



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



UNIVERSITAT [Q] ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
DE VALÈNCIA

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

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 FISICOQUÍMICAS

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Autora:

IRENE MARTÍNEZ GONZÁLEZ

Director:

DR. MIGUEL MARTÍN MONERRIS

Codirector:

D. ANDRÉS ZORNOZA ZORNOZA

VALENCIA, MARZO 2016

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer especialmente a mis directores Miguel Martín y Andrés Zornoza por compartir conmigo sus conocimientos, sus útiles consejos y su tiempo en la realización del presente trabajo.

A la gerencia de la urbanización “Los Monasterios” por poner a mi disposición su EDAR y facilitarme realizar los muestreos.

Gracias también al Laboratorio de Contaminación de Aguas del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la UPV y al Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) por permitirme realizar con ellos este TFM.

A mis compañeros de máster por el tiempo compartido.

También quería agradecer a mi familia y amigos todo su apoyo. Y en especial a Jaume por ser mi voz más crítica y estar siempre ahí.

ÍNDICES

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.	11
1.1	Tratamientos biológicos de aguas residuales. Aireación prolongada.	12
1.1.1	Aireación prolongada.	13
1.2	Humedales artificiales. Sistemas con macrófitas emergentes en flotación.	15
1.2.1	Humedales artificiales.	15
1.2.2	Sistemas con macrófitas emergentes en flotación.	21
1.3	Función de los protistas y metazoos en el tratamiento de aguas residuales.	23
2	OBJETIVOS.	31
3	MATERIALES Y MÉTODOS.	32
3.1	Área de estudio.	32
3.1.1	Localización.	32
3.1.2	Antecedentes.	33
3.1.3	Situación actual.	34
3.1.4	Consumos energéticos de la EDAR.	36
3.2	Toma de muestras.	38
3.3	Variables fisicoquímicas y operacionales.	42
3.4	Identificación y abundancia de protistas y metazoos.	43
3.4.1	Preparación de las muestras.	43
3.4.2	Análisis microscópico.	44
3.4.3	Abundancia de protistas y metazoos.	44
4	RESULTADOS.	45
4.1	Incidencias recogidas durante el periodo de estudio.	45
4.2	Variables fisicoquímicas y operacionales.	46
4.2.1	Agua de entrada.	46
4.2.2	Licor mezcla.	48
4.2.3	Agua efluente.	51
4.3	Identificación y abundancia de protistas y metazoos.	56
4.3.1	Reactor biológico. Licor mezcla.	58
4.3.2	Reactor biológico. Macrófitas en flotación.	62
4.3.3	Humedal artificial con macrófitas en flotación.	66
4.3.4	Humedal artificial de flujo subsuperficial.	70
4.4	Relaciones con las variables fisicoquímicas y operacionales.	73
4.4.1	Reactor biológico. Licor mezcla.	73
4.4.2	Reactor biológico. Macrófitas en flotación.	78
4.4.3	Humedal artificial con macrófitas en flotación.	82
4.4.4	Humedal artificial de flujo subsuperficial.	85

5	DISCUSIÓN.	87
5.1	Condiciones de funcionamiento de la EDAR.....	87
5.2	Dinámica de los protistas y metazoos	89
5.2.1	Reactor biológico. Licor mezcla.	89
5.2.2	Reactor biológico. Macrófitas en flotación.....	91
5.2.3	Humedal artificial con macrófitas en flotación.....	92
5.2.4	Humedal artificial de flujo subsuperficial.	94
6	CONCLUSIONES.	95
7	BIBLIOGRAFÍA.	97
8	ANEXOS.	103
8.1	Anexo I: Resultados de las variables fisicoquímicas y operacionales.	103
8.2	Anexo II: Resultados de la identificación y abundancia de protistas y metazoos.	103
8.3	Anexo III: Gráficas de la evolución de los microorganismos con las variables fisicoquímicas y operacionales.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de proceso de fangos activados (MMA 2010).	12
Figura 2: Esquema del diseño de un humedal de flujo superficial o flujo libre (Fernández 2005).	16
Figura 3: Esquema del diseño de un humedal de flujo sub-superficial horizontal (Fernández 2005).	17
Figura 4: Esquema del diseño de un humedal de flujo sub-superficial vertical (Fernández 2005).	17
Figura 5: Esquema de un humedal con especies flotantes. (Fernández 2005).	18
Figura 6: Esquema filtro de macrófitas en flotación (Fernández 2005).	18
Figura 7: Detalle del aerénquima de la hoja y el tallo de una <i>Typha</i> sp (Fernández 2005).	20
Figura 8: Esquema del proceso de aireación de la rizosfera de las macrófitas (Fernández 2005).	20
Figura 9: Sistema FMF (fuente Urb. "Los Monasterios" 2013)	22
Figura 10: Esquema estructura de un FTW experimental (adaptación de Tanner y Headley 2011)	22
Figura 11: Cadena trófica en el proceso de fangos activos (adaptación de Madoni 2003).	23
Figura 12: Localización de la estación depuradora.	32
Figura 13: Instalación del FMF en el reactor biológico (fuente Urb. "Los Monasterios" 2012)	34
Figura 14: Vista general de la depuradora (imagen tomada 11/02/2015).	35
Figura 15: Evolución de los consumos eléctricos anuales.	37
Figura 16: Ubicación de los puntos de muestreo de agua y licor mezcla.	38
Figura 17: Puntos de muestreo de agua y licor mezcla: a) agua afluyente (punto 1); b) agua efluente decantador secundario (punto 2); c) agua efluente planta (punto 3); d) licor mezcla (punto 4).	39
Figura 18: Toma de muestras en: a) punto 1; b) punto 2.	39
Figura 19: Proceso y material de empelado en la toma de muestras del licor mezcla.	40
Figura 20: Ubicación de los puntos de muestreo de macrófitas	40
Figura 21: Toma de muestras del sistema radicular de las macrófitas del reactor biológico: a) vista general de reactor; b) zona radicular vegetación una vez extraída; c) proceso de lavado; d) almacenamiento.	41
Figura 22: Sistemas radiculares obtenidos en los diferentes puntos de muestreo: a) reactor biológico (punto 5); b) humedal con macrófitas en flotación (punto 6); c) humedal con flujo subsuperficial (punto 7).	41
Figura 23: Vistas del reactor biológico: a) vegetación agostada (imagen tomada 25/02/2015); b) rebrote tras la siega (imagen tomada 26/03/2015).	45
Figura 24: Representación gráfica de variables fisicoquímicas del afluyente.	47
Figura 25: Representación gráfica de sólidos suspendidos del licor mezcla.	49
Figura 26: Evolución del pH y CE en el licor mezcla.	49
Figura 27: Evolución de la Cm e IVFD en el periodo estudio.	50
Figura 28: Representación gráfica de variables fisicoquímicas del efluente decantador secundario.	52
Figura 29: Comparativa del límite de vertido la Directiva Europea (91/271/CEE) con los resultados del efluente del decantador secundario.	53
Figura 30: Representación gráfica de variables fisicoquímicas del efluente planta.	55

Figura 31: Dinámica poblacional de protistas y metazoos del licor mezcla.....	58
Figura 32: Imágenes de especies catalogadas en el licor mezcla (contraste de fases): a, b y c) Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i> (200x); d) Detalle del Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i> (400x); e) <i>Aspidisca cicada</i> (200x); f) <i>Holophrya</i> sp (200x).....	60
Figura 33: Imágenes del flóculo del licor mezcla (contraste de fases; 200x): a) aspecto usual; b) apariencia en M5 durante el episodio de abundancia de bacterias filamentosas.	61
Figura 34: Dinámica poblacional de protistas y metazoos en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico.	62
Figura 35: Imágenes de especies catalogadas en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico (contraste de fases; 200x): a) Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i> ; b) Nematodo.....	64
Figura 36: Imágenes de <i>Aelosoma variegatum</i>	64
Figura 37: Imágenes del flóculo (biopelícula) de las macrófitas del reactor biológico (contraste de fases; 200x): a, b, c y d) aspecto usual; e y f) apariencia en M7 con abundancia de <i>Beggiatoa</i> sp.....	65
Figura 38: Dinámica poblacional de protistas y metazoos de las macrófitas del FMF.	66
Figura 39: Imágenes de especies catalogadas en la biopelícula de las macrófitas del FMF (contraste de fases): a y b) Complejo <i>Vorticella convallaria</i> (200x); c) Detalle del zooide del Complejo <i>Vorticella convallaria</i> (400x); d) Nematodo (200x); e y f) <i>Holophrya</i> sp (200x).....	68
Figura 40: Imágenes del flóculo (biopelícula) de las macrófitas del FMF (contraste de fases; 200x).....	69
Figura 41: Dinámica poblacional de protistas y metazoos de las macrófitas del HA flujo subsuperficial.....	70
Figura 42: Imágenes del flóculo (biopelícula) de las macrófitas HA flujo subsuperficial (contraste de fases; 200x).	72
Figura 43: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con las variables fisicoquímicas (DQO, DBO ₅ , NT y PT) del agua afluyente a la planta.....	73
Figura 44: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con las variables fisicoquímicas (SST, SSVT, pH, CE, OD y T ^a) del reactor biológico.	74
Figura 45: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con las variables fisicoquímicas (DQO, DBO ₅ , SST, NT, N-NH ₄ , N-NO ₃ , PT, P-PO ₄) del agua efluente del decantador secundario.	75
Figura 46: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con los rendimientos de eliminación de contaminantes del reactor biológico.....	76
Figura 47: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con las variables operacionales (Cm e IVF).....	77
Figura 48: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con las variables fisicoquímicas (DQO y DBO ₅) del agua afluyente a la planta.	78
Figura 49: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con las variables fisicoquímicas (SST, SSVT, pH, CE, OD y T ^a) del reactor biológico.	79
Figura 50: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con las variables fisicoquímicas (DQO, DBO ₅ , SST, NT, N-NH ₄ , N-NO ₃ , PT, P-PO ₄) del agua efluente del decantador secundario.....	80
Figura 51: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con los rendimientos de eliminación de contaminantes del reactor biológico.	81

Figura 52: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con las variables operacionales (Cm e IVF).	82
Figura 53: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del FMF con las variables fisicoquímicas (DQO, NT, N-NH ₄ , PT , OD y T ^a) del agua afluyente al humedal artificial.	83
Figura 54: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del FMF con las variables fisicoquímicas (DQO, NT, N-NH ₄ y PT) del agua efluente de la planta.	84
Figura 55: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del FMF con los rendimientos de eliminación de contaminantes de la planta.	84
Figura 56: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del humedal artificial de flujo subsuperficial con las variables fisicoquímicas (DQO, NT, N-NH ₄ , PT , OD y T ^a) del agua afluyente al humedal artificial.	85
Figura 57: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del humedal artificial de flujo subsuperficial con las variables fisicoquímicas (DQO, NT, N-NH ₄ y PT) del agua efluente de la planta.	86
Figura 58: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del humedal artificial de flujo subsuperficial con los rendimientos de eliminación de contaminantes de la planta.	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Rendimientos medios de depuración sistema aireación prolongada (MMA 2010).....	14
Tabla 2: Parámetros de diseño habituales en la aireación prolongada (adaptación de Ferrer y Seco 2007; MMA 2010).....	14
Tabla 3: Mecanismos de eliminación contaminantes en los humedales artificiales (Lahora 2003).	19
Tabla 4: Coordenadas geográficas de la estación depuradora.	32
Tabla 5: Consumo eléctricos anuales.	36
Tabla 6: Consumo eléctricos anuales descompuestos.....	37
Tabla 7: Calendario de los muestreos.	38
Tabla 8: Puntos de muestreo.	38
Tabla 9: Variables fisicoquímicas determinadas en las muestras de agua.	42
Tabla 10: Variables fisicoquímicas determinadas en las muestras de licor mezcla.	42
Tabla 11: Variables operacionales.	43
Tabla 12: Criterio abundancia de protistas y metazoos.	44
Tabla 13: Observaciones e incidencias durante los muestreos realizados.	45
Tabla 14: Resultados de variables fisicoquímicas del afluente. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.....	46
Tabla 15: Valores típicos de las variables para agua residual urbana (adaptación de Ferrer y Seco 2007).	48
Tabla 16: Resultados de variables fisicoquímicas del licor mezcla. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.	48
Tabla 17: Resultados de variables operacionales Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.	50
Tabla 18: Resultados de variables fisicoquímicas del efluente del decantador secundario. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.	51
Tabla 19: Rendimiento de eliminación de contaminantes del reactor biológico Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.	51
Tabla 20: Requisitos de vertido marcado por la Directiva Europea (91/271/CEE).....	53
Tabla 21: Resultados de variables fisicoquímicas del efluente de la planta. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.	54
Tabla 22: Rendimiento de eliminación de contaminantes de la EDAR. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.	54
Tabla 23: Resumen de protistas y metazoos identificados.....	57
Tabla 24: Ocurrencia (frecuencia aparición) de especies identificadas en el licor mezcla. Ocurrencia global; ocurrencia como especie dominante y secundaria.....	59
Tabla 25: Especies valoradas en el licor mezcla como “Dominante” y “Secundario”.....	59
Tabla 26: Ocurrencia (frecuencia aparición) de especies identificadas en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico. Ocurrencia global; ocurrencia como especie dominante y secundaria.	63
Tabla 27: Especies valoradas en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico como “Dominante” y “Secundario”.	63
Tabla 28: Ocurrencia (frecuencia aparición) de especies identificadas en las macrófitas del FMF. Ocurrencia global; ocurrencia como especie dominante y secundaria.	67
Tabla 29: Especies valoradas en las macrófitas del FMF como “Dominante” y “Secundario”. ...	67

Tabla 30: Ocurrencia (frecuencia aparición) de especies identificadas en las macrófitas HA flujo subsuperficial. Ocurrencia global; ocurrencia como especie dominante y secundaria.	71
Tabla 31: Especies valoradas en las macrófitas HA flujo subsuperficial como "Dominante" y "Secundario"	71

ABREVIATURAS y ACRÓNIMOS

CE	Conductividad eléctrica
Cm	Carga másica
CV	Coeficiente de variación
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EDAR	Estación depuradora de aguas residuales
FMF	Filtro de macrófitas en flotación.
FTW's	Humedal de tratamiento flotante con macrófitas emergentes
FWS	Humedal artificiales de flujo superficial o flujo libre
IVF	Índice volumétrico de fangos
IVFD	Índice volumétrico de fangos diluido
N-NH ₄ ⁺	Nitrógeno amoniacal
N-NO ₂ ⁻	Nitrógeno nitroso
N-NO ₃ ⁻	Nitrógeno nítrico
NT	Nitrógeno total
OD	Oxígeno disuelto
P-PO ₄ ³⁻	Fósforo del ortofosfato
PT	Fósforo total
Q	Caudal de aguas residuales a tratar
Qr	Caudal de lodos recirculados
rDBO ₅ RB	Rendimiento eliminación de DBO ₅ en el reactor biológico
rDQO EDAR	Rendimiento eliminación de DQO en la estación depuradora de aguas residuales
rDQO RB	Rendimiento eliminación de DQO en el reactor biológico
rNH ₄ EDAR	Rendimiento eliminación de NH ₄ en la estación depuradora de aguas residuales
rNH ₄ RB	Rendimiento eliminación de NH ₄ en el reactor biológico
rNT EDAR	Rendimiento eliminación de NT en la estación depuradora de aguas residuales
rNT RB	Rendimiento eliminación de NT en el reactor biológico
rPT EDAR	Rendimiento eliminación de PT en la estación depuradora de aguas residuales
rPT RB	Rendimiento eliminación de PT en el reactor biológico
SSLM	Sólidos en suspensión del licor mezcla
SST	Sólidos en suspensión totales
SSVT	Sólidos en suspensión volátiles totales
T ^a	Temperatura
TRC	Tiempo de retención celular.
TRH	Tiempo de retención hidráulico
V30	Sedimentabilidad del licor mezcla a 30 minutos
V30 D	Sedimentabilidad del licor mezcla a 30 minutos diluido
VSB	Humedales artificiales de flujo subsuperficial

INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de tratamiento de aguas usados en las pequeñas poblaciones son muy diversos (aireación prolongada, biodiscos rotativos, humedales artificiales, lagunaje, etc.), todos ellos con sus ventajas e inconvenientes. Estos se caracterizan por proporcionar una buena calidad del efluente, ser de funcionamiento robusto, de fácil mantenimiento y de simple control sin la necesidad de personal altamente cualificado.

Son muchos los estudios que pretenden mejorar y optimizar las características de los sistemas de tratamiento de aguas a nivel de diseño, operacional, costes, etc.

Hasta la fecha no existe ningún método que aúne las virtudes de los diferentes sistemas sin ningún defecto. A saber, no existe un sistema generalista de tratamiento de aguas que resuelva todos los aspectos de la depuración.

Por otro lado, gran parte de la bibliografía se centra en mejorar el conocimiento técnico de los procesos de depuración. Sin embargo, es poca la enfocada en conocer las comunidades de los microorganismos presentes en los sistemas biológicos de depuración y mucho menos la orientada a relacionar estos microorganismos con las demás variables del sistema, mejorando los conocimientos del control biológico de los procesos.

A causa de las peculiaridades de los sistemas de tratamiento de pequeñas poblaciones, los estudios enfocados en mejorar el control biológico de los procesos de dichos sistemas han sido mucho más escasos, por tanto la bibliográfica orientada en este ámbito es prácticamente inexistente. Por otra parte, tampoco existen estudios sobre sistemas mixtos en el mismo reactor que proporcionen las ventajas de los sistemas convencionales, como la aireación prolongada, y de los sistemas blandos, como los filtros de macrófitas en flotación.

Dada la carencia de estudios en estos aspectos, generó la necesidad de realizar un estudio exploratorio en una pequeña EDAR situada en el término municipal de Puçol (Valencia) donde su tratamiento biológico combina en un mismo reactor dos de los sistemas de tratamiento usualmente empleados para la depuración de las aguas residuales en las pequeñas poblaciones: aireación prolongada y filtro de macrófitas en flotación, formando un sistema mixto de tratamiento; la depuración del agua se completa con un tratamiento de afino con humedales artificiales.

Con este trabajo se amplía el conocimiento de la microfauna en diversos sistemas de tratamiento usualmente empleados para la depuración de las aguas residuales en las pequeñas poblaciones y, al mismo tiempo, estudia las peculiaridades del sistema mixto planteado.

En los siguientes apartados se plasma una breve descripción de los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales haciendo hincapié en la aireación prolongada, humedales artificiales y especialmente en los humedales con un sistema de macrófitas en flotación. Por último, se habla de la función de los protistas y metazoos en el tratamiento de aguas residuales.

1.1 Tratamientos biológicos de aguas residuales. Aireación prolongada.

Los tratamientos biológicos de las aguas residuales tienen como principal objetivo la eliminación de materia orgánica de éstas mediante la acción de diferentes grupos de microorganismos (biomasa) a través de reacciones bioquímicas. Actualmente además de la eliminación de materia orgánica, los tratamientos biológicos buscan otros objetivos como: la oxidación del nitrógeno amoniacal (nitrificación), la eliminación del nitrógeno a través de la conversión de las formas oxidadas a nitrógeno gaseoso (desnitrificación) y/o la eliminación de fósforo.

La clasificación más usual de los tratamientos biológicos es en función del medio de soporte sobre el que crecen los microorganismos. Atendiendo a este criterio los tratamientos se dividen en dos grandes grupos:

- Procesos biológicos de cultivo en suspensión donde se destacan los fangos activos.
- Procesos biológicos de soporte sólido.

De todos los tratamientos biológicos existentes es el proceso de fangos activos el sistema más habitual en la depuración de las aguas residuales urbanas. Éste fue desarrollado en Inglaterra, en 1914, por Arden y Lockett.

Normalmente la configuración básica del proceso de fangos activos consta de un reactor donde se mantiene un cultivo aerobio en suspensión conocido como “licor mezcla” capaz de realizar transformaciones bioquímicas de eliminación de la materia orgánica y otros contaminantes presentes en el agua residual a depurar.

Tras un cierto tiempo de permanencia en el reactor, el licor mezcla se conduce hasta un decantador o clarificador, cuya función es separar la biomasa (fango biológico) del agua tratada. Parte de la biomasa decantada se recirculan de nuevo al reactor, con objeto de mantener en éste una concentración adecuada de microorganismos, y el resto, los denominados fangos en exceso, se purgan periódicamente para evitar la acumulación excesiva de biomasa en el sistema.

El esquema básico del proceso se muestra en la figura adjunta.

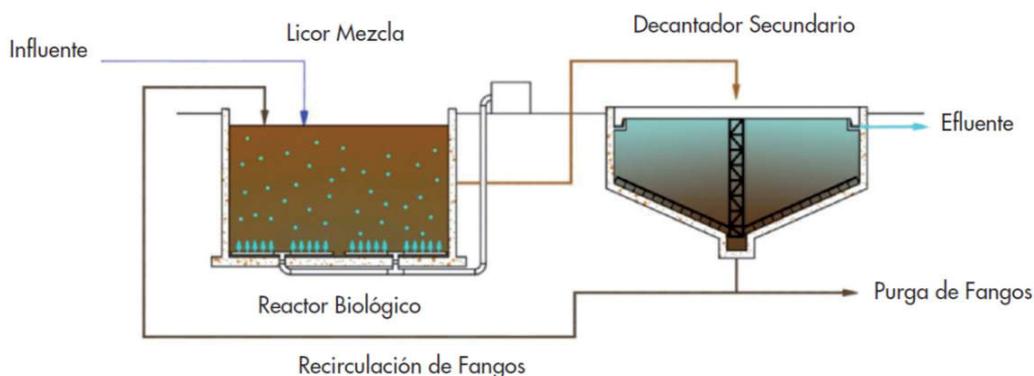


Figura 1: Esquema de proceso de fangos activados (MMA 2010).

Las condiciones aerobias en el reactor se consiguen mediante el empleo de aireadores mecánicos (turbinas o eyectores) o aireadores por difusión (difusores de membrana principalmente). El sistema de aireación, además de oxigenar, permite la homogeneización del licor mezcla, evitando la decantación de la biomasa.

El tiempo medio de residencia de los microorganismos en el reactor, también conocido como tiempo de retención celular (TRC) o edad del fango y la carga másica (C_m) que se define como la relación entre la materia orgánica que entra en el reactor por unidad de tiempo y la cantidad de microorganismos existentes en el mismo, expresándose en $\text{kg DBO}_5 / \text{kg SST} \cdot \text{día}$, son dos parámetros fundamentales para el diseño de este proceso.

Hoy en día existen numerosas variantes y modificaciones de esta tecnología, siendo las versiones más empleadas: convencional, flujo pistón y aireación prolongada.

Seguidamente se hace hincapié en la información del tratamiento biológico de cultivo en suspensión mediante el sistema de aireación prolongada (también conocido por oxidación total) ya que es significativo para el desarrollo posterior del presente estudio.

1.1.1 Aireación prolongada.

Como ya se ha mencionado anteriormente la aireación prolongada u oxidación total es una variante dentro de los procesos de fangos activos para el tratamiento biológico aerobio de las aguas residuales.

Este sistema se caracteriza con respecto a los procesos convencionales de fangos activos en:

- Opera con altas edades del fango y, como consecuencia, con cargas másicas muy bajas, y altos tiempos de retención hidráulica.
- Normalmente prescinde de la decantación primaria.
- Los fangos generados durante el proceso se encuentran ya estabilizados como consecuencia del alto tiempo de permanencia de los microorganismos en el sistema que les obliga a realizar procesos de respiración endógena. Estos fangos tan solo precisan ser deshidratados antes de su disposición final.

Los reactores biológicos en los sistemas de aireación prolongada se pueden disponer en distintas configuraciones: en función del régimen de mezcla (mezcla completa, flujo pistón), y del régimen de alimentación (flujo continuo o discontinuo). Lo habitual en pequeñas aglomeraciones es que sean reactores de alimentación continua y que funcionen en régimen próximo al de mezcla completa, aspecto que es deseable dado que permite absorber mejor las variaciones de carga diarias.

a) Características del tratamiento.

El sistema de *aireación prolongada* es aplicable en todo el rango de población situado entre 50 y 2.000 h-e., pero se recomienda especialmente en el rango superior (> 500 h-e.), o no cumpliendo dicho rango, cuando se exija eliminación de nitrógeno total (MMA 2010).

Los rendimientos medios habituales de eliminación de contaminantes que se alcanzan con el empleo de esta tecnología, dimensionada y explotada en condiciones normales, son las que se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 1: Rendimientos medios de depuración sistema aireación prolongada (MMA 2010).	
Parámetro	% Reducción
SS	80-90
DBO ₅	85-95
DQO	80-90

A continuación se recogen los valores que habitualmente se emplean para cálculo de los diferentes parámetros de diseño en los reactores de aireación prolongada.

Tabla 2: Parámetros de diseño habituales en la aireación prolongada (adaptación de Ferrer y Seco 2007; MMA 2010).	
Parámetro	Rango habitual
Edad del fango (d)	20-30
Carga másica (kg DBO ₅ /kg SST·d)	0,05-0,12
Tiempo retención hidráulica (h)	18-36
Sólidos en Suspensión en el reactor (gr/l)	3,0-6,0
Relación recirculación (Qr/Q) (%)	75-150

SST: Sólidos suspendidos en el licor mezcla; Qr: caudal de lodos recirculados (m³/d); Q: caudal de aguas residuales a tratar (m³/d).

b) Ventajas e inconvenientes.

Entre las principales ventajas que presenta la tecnología de aireación prolongada cabe subrayar, con respecto a otras tecnologías, los buenos rendimientos de eliminación de materia orgánica y sólidos en suspensión y el hecho que los lodos salen del reactor ya estabilizados, por lo que no hay que proceder a su posterior digestión.

El inconveniente más destacable de la tecnología es su elevado consumo energético por los elevados requisitos de mezclado del reactor y aireación (Ferrer y Seco 2007; MMA 2010).

1.2 Humedales artificiales. Sistemas con macrófitas emergentes en flotación.

Alternativamente a los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales se encuentran los llamados sistemas blandos de depuración, también llamados por los textos científico-técnicos como: tecnologías no convencionales, sistemas de bajo coste, sistemas naturales o sistemas verdes, entre otros.

Estos sistemas se caracterizan por tener consumos energéticos relativamente bajos. En la actualidad se encuentran cada vez más extendidos entre las pequeñas comunidades rurales. A causa de su localización geográfica y/o por su grado de desarrollo, presentan una problemática particular para la provisión de los servicios de saneamiento y depuración.

Un tipo muy interesante entre los sistemas blandos es el de los “fitosistemas”, donde se utiliza la energía solar a través del proceso fotosintético de los vegetales, tanto de algas como de vegetales superiores (macrófitas), en sustitución de la energía convencional que se emplea normalmente en las EDAR. Los consumos energéticos de estos sistemas son muy bajos y permiten que los costes de mantenimiento sean muy bajos pero requieren una mayor superficie de terreno por habitante (Fernández 2005).

Entre estos sistemas se encuentran: los lagunajes (algas y bacterias suspendidas en el agua), filtros verdes en base a especies herbáceas o leñosas y humedales artificiales.

A continuación se completa la información referente a los humedales artificiales dada su importancia para el desarrollo del presente trabajo.

1.2.1 Humedales artificiales.

El tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante la tecnología de humedales artificiales, se basa en la reproducción artificial de las condiciones propias de las zonas húmedas naturales, para aprovechar los procesos de eliminación de contaminantes que se dan en las mismas.

Los humedales naturales pueden definirse como aquellos lugares terrestres que permanecen inundados o saturados de agua durante, al menos, un tiempo lo suficientemente prolongado para permitir el desarrollo en ellos un tipo de vegetación característica, palustre, la cual está adaptada a condiciones de inundación o saturación de agua, como por ejemplo, los carrizales, espadañales o los juncales.

En los humedales, ya sean naturales o artificiales, se produce la actuación simultánea y complementaria de las plantas superiores y los microorganismos favoreciendo la degradación de la materia orgánica. Por este motivo se utilizan estos sistemas para la depuración de aguas residuales.

a) Tipos de humedales artificiales.

Los tipos de humedales artificiales se pueden clasificar atendiendo a numerosas variables de diferenciación como el sistema de flujo del agua, sustrato o lecho utilizado, vegetación y/o sucesión de unidades de tratamiento.

La clasificación más común de los humedales, según la diversa bibliografía consultada, es:

- ❖ **Humedales artificiales de flujo superficial o flujo libre** (del inglés *Surface Flow Wetlands, SFW*, o *Free Water Surface Wetlands, FWS*): la apariencia de estos sistemas es similar a la de los humedales naturales, existiendo una combinación de espacios con la lámina de agua a la vista con otros de cobertura total por vegetación acuática.

En estos humedales el agua circula por la superficie a través de tallos, raíces y hojas caídas, donde se desarrolla la biopelícula encargada de la eliminación de contaminantes. Son instalaciones de varias hectáreas, constituidas por balsas o canales con un nivel de agua poco profundo y vegetación acuática (hidrófitos), generalmente con dominancia de macrófitas emergentes (helófitas) que enraízan en el sustrato dispuesto en el fondo; también pueden incorporar especies acuáticas flotantes y especies vegetales sumergidas. La entrada de agua residual normalmente es continua (o intermitente si precisa bombeo).

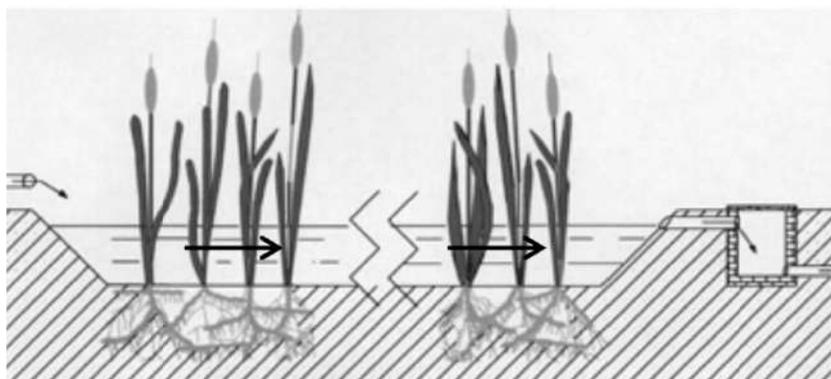


Figura 2: Esquema del diseño de un humedal de flujo superficial o flujo libre (Fernández 2005).

- ❖ **Humedales artificiales de flujo subsuperficial** (del inglés *Subsurface Flow Wetlands, SSFW*, o *Vegetated Submerged Beds, VSB*): en estos humedales no existe como tal, una columna de agua continua, sino que el influente circula a través de un medio inerte, consistente en un lecho de arena y/o grava de grosor variable, que sostiene la vegetación. El lecho filtrante debe ser diseñado de tal modo que permita el contacto del agua residual con los rizomas y raíces de la vegetación del humedal.

Según la dirección en que circulan las aguas a través del lecho filtrante, estos humedales se clasifican a su vez en dos tipos:

- Horizontales: el agua circula en sentido horizontal a través del lecho. La entrada de agua puede ser continua o intermitente.

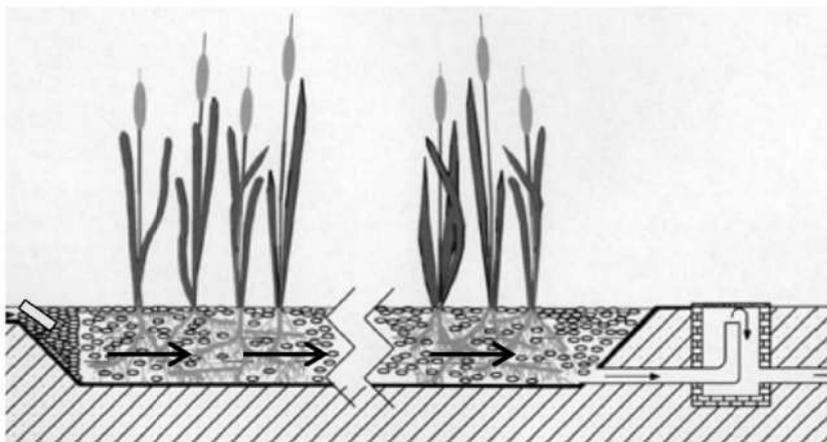


Figura 3: Esquema del diseño de un humedal de flujo sub-superficial horizontal (Fernández 2005).

- Verticales: el agua circula en sentido vertical a través del lecho. La entrada de agua se realiza de forma intermitente mediante bombeo o sifones de descarga controlada. La aireación del humedal se produce fundamentalmente por la corriente de aire ascendente que se crea al circular en sentido descendente el agua.

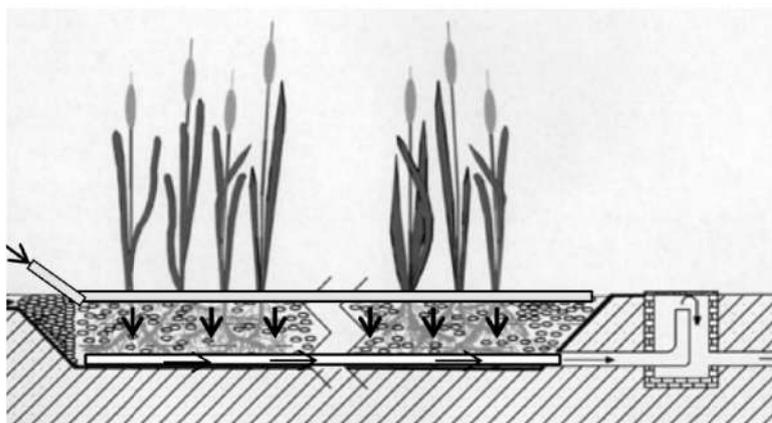


Figura 4: Esquema del diseño de un humedal de flujo sub-superficial vertical (Fernández 2005).

- ❖ **Sistemas acuáticos con especies flotantes**, se denomina así a los humedales artificiales con plantas en flotación en la superficie del agua y emplean plantas naturalmente flotantes, tales como el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) o la lenteja de agua (*Lemna* sp.).

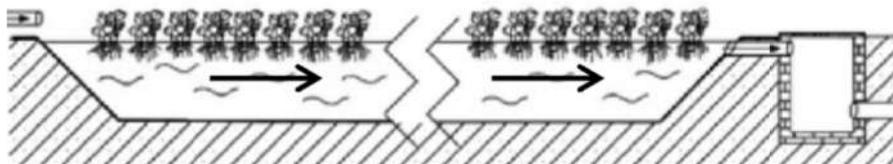


Figura 5: Esquema de un humedal con especies flotantes. (Fernández 2005).

Una variante de estos sistemas son los llamados **sistemas con macrófitas emergentes en flotación** que utilizan especies emergentes a las que se les hace flotar. En este tipo de humedales no hay un sustrato donde se fijan las macrófitas emergentes. Las plantas, mediante una estructura artificial, permanecen flotando en la superficie, con el fin de formar un tapiz filtrante mediante el entrelazamiento del sistema radicular y órganos sumergidos de reserva (rizomas) y este se encuentre permanentemente bañado por el agua residual.

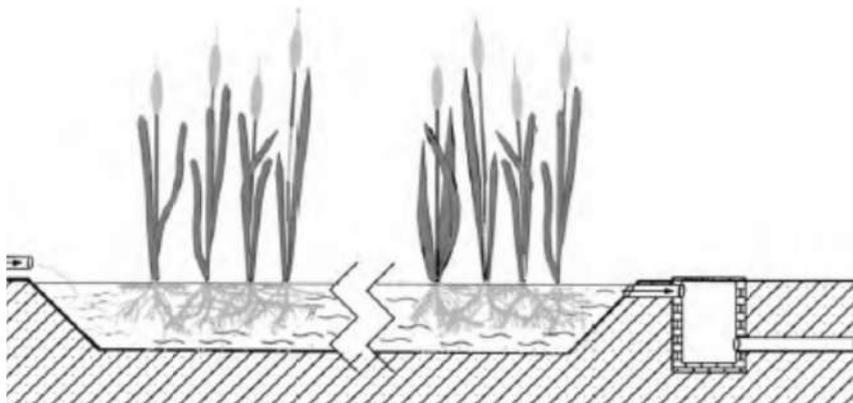


Figura 6: Esquema filtro de macrófitas en flotación (Fernández 2005).

b) Ventajas e inconvenientes.

En relación con otros sistemas de depuración tecnológicos, los humedales artificiales tienen las ventajas de bajo coste, mantenimiento sencillo, eficaz capacidad depuradora de aguas residuales con contaminación principalmente orgánica, y bajo impacto visual de las instalaciones, porque la vegetación proporciona una apariencia natural.

Entre sus limitaciones se pueden indicar el requerimiento de amplias superficies de terreno y no son apropiados para determinadas aplicaciones, como por ejemplo el tratamiento de aguas industriales con alta contaminación inorgánica.

Los humedales artificiales son especialmente apropiados para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas poblaciones, en donde se suelen dar las circunstancias de bajo coste del terreno y mano de obra no altamente tecnificada.

c) Mecanismos de eliminación de contaminantes en los humedales.

Los mecanismos de eliminación de contaminantes en los humedales artificiales son muy dispares, pero los principales procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la depuración de las aguas residuales en los humedales se recoge de forma abreviada en la siguiente tabla:

Tabla 3: Mecanismos de eliminación contaminantes en los humedales artificiales (Lahora 2003).	
CONTAMINANTE	PROCESO DE ELIMINACIÓN
Sólidos en suspensión	Floculación Sedimentación Filtración Degradación
Materia orgánica	Sedimentación Asimilación Mineralización
Nitrógeno	Amonificación Nitrificación Desnitrificación Asimilación vegetal
Fósforo	Adsorción Sedimentación Precipitación química Asimilación vegetal
Patógenos	Sedimentación y muerte gradual Radiación UV Antibióticos naturales Predación
Compuestos inorgánicos	Asimilación Inmovilización
Metales pesados	Fijación al sedimento Adsorción por las plantas

d) Macrófitas emergentes.

Las macrófitas emergentes son las especies vegetales con mayor relevancia e importancia en el proceso depurador de los sistemas con humedales artificiales, tal y como se ha ido reflejando en los apartados anteriores. Por ese motivo se procede a realizar una breve descripción de este tipo de vegetación.

Las especies de macrófitas emergentes usualmente empleadas en los humedales artificiales son las mismas que normalmente colonizan los humedales naturales, plantas helófitas como carrizos (*Phragmites* sp.), los juncos (*Scirpus* sp.), las eneas (*Typha* sp.), etc. Se desarrollan en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo, y cuyos tallos y hojas emergen fuera del agua, pudiendo alcanzar alturas de 2-3 m.



Este tipo de plantas toleran bien las condiciones de falta de oxígeno, las cuales se producen en suelos encharcados, al contar con canales internos o zonas de aireación (aerénquima), que facilitan el paso del oxígeno desde las partes aéreas hasta la zona radicular. Asimismo, presentan una elevada productividad (50-70 toneladas de materia seca/ha.año).

Figura 7: Detalle del aerénquima de la hoja y el tallo de una *Typha* sp (Fernández 2005).

Las plantas juegan un papel fundamental en estos sistemas siendo sus principales funciones:

- La rizosfera realiza funciones de desbaste, filtrando y reteniendo los sólidos transportados en el agua residual a través del entramado formado por su sistema radicular.
- Las raíces y rizomas proporcionan un soporte pasivo para los microorganismos y crean en sus proximidades ambientes propicios para el desarrollo de estos; es decir, las plantas crean una enorme área superficial para el desarrollo de 'biopelículas', en donde crecen bacterias, protistas, y algas microscópicas.
- Las plantas empleadas en los humedales artificiales con capaces de enviar oxígeno del aire a las raíces a través de un sistema de conductor muy especializado (aerénquima). Aireando de este modo el sistema radicular y facilitando oxígeno a los microorganismos que viven en la rizosfera (figura 8).

Este microambiente estimula el desarrollo de microorganismos aerobios responsables de la degradación de la materia orgánica y la nitrificación, favoreciendo la disminución de la carga contaminante del sistema.

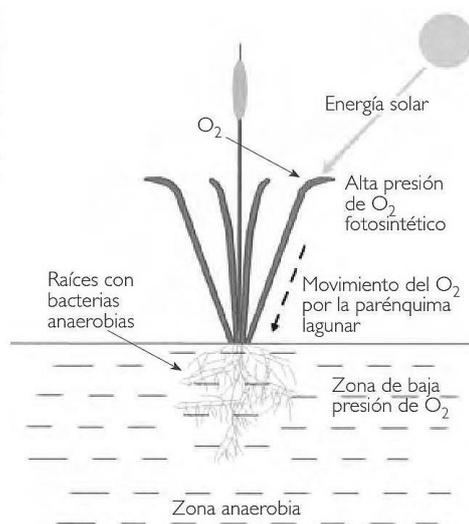


Figura 8: Esquema del proceso de aireación de la rizosfera de las macrófitas (Fernández 2005).

- Las plantas absorben de iones contaminantes, tanto metales pesados como aniones eutrofizantes (nitratos y fosfatos principalmente).

Su contribución a la eliminación de nutrientes es modesta cuando se tratan aguas residuales urbanas de tipo medio; eliminan entre un 10% del N y un 20% del P (García y Corzo 2008). En aguas residuales diluidas su contribución es mayor (pudiendo ser más del 50%).

- Amortiguamiento de las variaciones ambientales. Cuando las plantas están desarrolladas reducen la intensidad de la luz incidente sobre el medio evitándose así grandes gradientes de temperatura en profundidad que pueden afectar el proceso de depuración. En climas fríos la vegetación protege de la congelación.

1.2.2 Sistemas con macrófitas emergentes en flotación.

Dada la notoriedad que tiene para el desarrollo del presente estudio se va a proceder a completar la información referente a los sistemas de humedales artificiales con macrófitas emergentes en flotación.

En este tipo de sistemas se emplean macrófitas emergentes, que a través de mecanismos diversos se hacen flotar. Entre estos sistemas uno de los más destacados es el recientemente desarrollado, filtro de macrófitas en flotación (FMF). También es destacable el *Floating Treatment Wetlands Planted with Emergent Macrophytes* (FTWs) o humedales de tratamiento flotante con macrófitas emergentes, cuyas características se evidenciarán más adelante.

a) Filtro de macrófitas en flotación (FMF).

Este sistema fue desarrollado por el Grupo de Agroenergética del Departamento de Producción Vegetal, Botánica, de la E.T.S. de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid, motivado por encontrar una solución a los problemas de colmatación que presentan algunas de las técnicas de humedales artificiales. El sistema combina las ventajas de los humedales de flujo libre superficial y el de los sistemas acuáticos.

El rasgo diferencial más notable de los FMF es el manejo de la vegetación emergente como vegetación flotante. Las macrófitas emergentes, que en la naturaleza están arraigadas en el suelo sumergido de humedal se hacen crecer como plantas flotantes, a fin de que el sistema radicular y órganos sumergidos de reserva (rizomas) se entrelacen formando un tapiz filtrante que esté permanentemente bañado por el agua residual.

A la ventaja de tener siempre el sistema radicular bañado por el agua residual sin posibilidad de colmatación, propio de los sistemas que utilizan plantas flotantes, se une la ventaja de utilizar plantas macrófitas de gran porte que pueden producir una

gran cantidad de biomasa, lo cual posibilita el funcionamiento del sistema sin necesidad de retirar la biomasa durante períodos de tiempo mucho más largos que en el caso de las plantas flotantes.

La depuración del agua se logra mediante mecanismos similares a los del sistema FWS, pero mejorando los procesos en los cuales interviene la vegetación.



Figura 9: Sistema FMF (fuente Urb. "Los Monasterios" 2013)

b) Humedales de tratamiento flotante con macrófitas emergentes (FTW's).

Estos sistemas son similares a los FMF. Manejan macrófitas emergentes flotando en la superficie del agua a través de una estructura flotante. La diferencia fundamental entre los dos sistemas, consiste en el montaje de las macrófitas, que tienen lugar en estructuras diferentes.

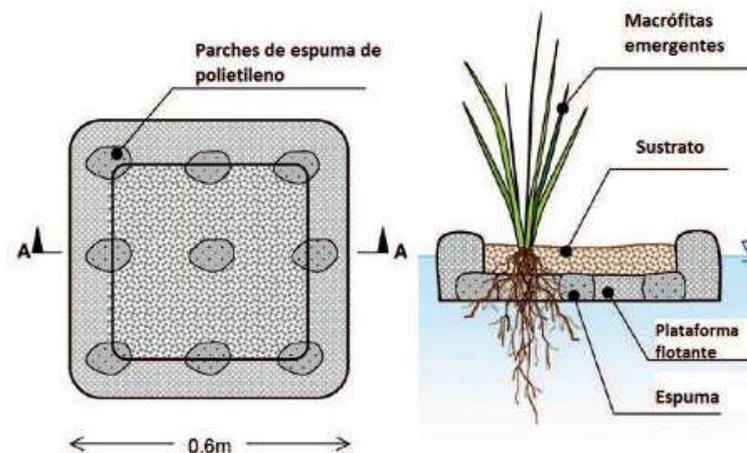


Figura 10: Esquema estructura de un FTW experimental (adaptación de Tanner y Headley 2011)

1.3 Función de los protistas y metazoos en el tratamiento de aguas residuales.

Los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales (tanto convencionales o no) son ecosistemas artificiales capaces de producir la eliminación de los contaminantes presentes en el agua mediante la interacción y el metabolismo de diferentes microorganismos.

Estos procesos dependen de la capacidad de la comunidad microbiana para utilizar los compuestos del agua. No existe un único organismo capaz de utilizar todos los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales; por tanto, un proceso biológico constituye un ecosistema diverso que se alimenta directamente del agua bruta que entra al sistema y depende de la disponibilidad de O₂, del pH y las condiciones del sistema (Knobelsdorf, 2005).

Las comunidades microbianas presentes en los sistemas de depuración de aguas se agrupan en estructuras, tal y como ocurre en los sistemas biológicos naturales, denominados flóculos en los sistemas de tratamiento fangos activados y biopelículas en los sistemas de tratamiento con humedales artificiales. Los flóculos y biopelículas son agregados de partículas orgánicas e inorgánicas junto con una comunidad microbiana unido a través de polímeros microbianos extracelulares.

Los sistemas biológicos de depuración se encuentran constituidos por bacterias, protistas, metazoos, hongos, algas y organismos filamentosos. Los hongos y las algas generalmente no tienen gran importancia dentro del proceso, mientras que los protistas, metazoos, las bacterias y los organismos filamentosos son los principales responsables de la eficiencia en el tratamiento biológico del agua residual. Cada una de estas poblaciones desempeña un papel determinado en el proceso y en conjunto forman la comunidad biológica característica del sistema de depuración.

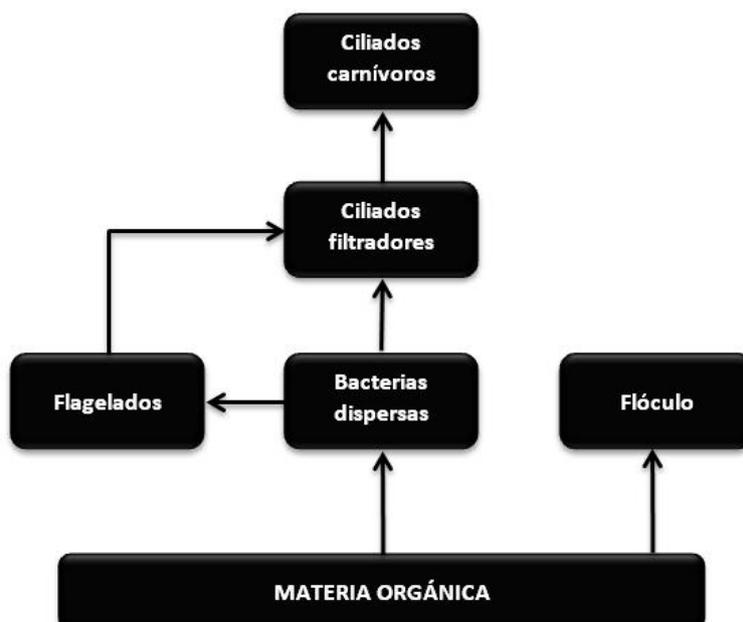


Figura 11: Cadena trófica en el proceso de fangos activos (adaptación de Madoni 2003).

Los protistas (flagelados, sarcodinos y ciliados) y metazoos son el segundo grupo en importancia en términos de biomasa después de bacterias en sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales, que representan hasta a 10% de la biomasa total. Estos valores pueden ser incluso mayores, como en los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial representando hasta 45% (Puigagut et al., 2007).

La contribución de los protistas y pequeños metazoos a la calidad del efluente de un sistema biológico de aguas residuales ha estado ampliamente descrita en numerosos estudios (Curds, 1982; Al-Shahwani y Horan, 1991; Madoni et al., 1993; Madoni, 1994; Salvado et al., 1995; Pérez-Uz et al., 2010) y se fundamentan en su contribución en los procesos de eliminación de contaminantes por su participación en las cadenas tróficas, principalmente mediante procesos de depredación de la comunidad bacteriana, la eliminación de bacterias patógenas del licor mezcla y su contribución a los procesos de biofloculación mediante la secreción de polímeros o la actividad biológica asociada a la nutrición o al movimiento (Curds, 1963; Arregui et al., 2007, 2008).

A pesar de que los protistas pueden estar involucrados en la eliminación de la materia orgánica en los procesos de tratamiento (Curds y Cockburn, 1970; Curds, 1973), una de sus funciones fundamentales es la depredación sobre las poblaciones de bacterias libres. La actividad bacterívora de los protistas contribuye a la clarificación del efluente (Curds y Hawkes, 1983) así como a la eliminación de bacterias patógenas de transmisión fecal. Curds (1992) demostró que en presencia de protistas se llega a eliminar el 95 % de *Escherichia coli*, mientras que en ausencia de estos organismos el porcentaje disminuye hasta un 50 %.

Algunos autores han centrado sus investigaciones en determinar el papel de la acción depredadora de los protistas y metazoos en la reducción del volumen de los lodos (Rensink, 1997; Wei, 2003; Ratsak y Verkuijlen, 2006). Ratsak y Verkuijlen, (2006) realizó una revisión de todos los estudios realizados hasta la fecha en los cuales se valora la posibilidad del empleo de *Oligochaetes* acuáticos para la reducción de fangos en plantas de tratamiento de aguas residuales, concluyendo que es posible la reducción de la cantidad de lodos producidos en una EDAR mediante la introducción de *Oligochaetes* acuáticos pero esta opción no es posible hasta que se conozcan la manera de incentivar la aparición de anélidos en las plantas depuradoras y mantener una población estable de estos.

Además, las estructuras de las poblaciones de protistas y metazoos asociados a un sistema biológico de depuración de aguas residuales son considerados un instrumento de diagnóstico muy potente que permite valorar el estado de funcionamiento del proceso de depuración, y por tanto, mejorar la capacidad de gestión de la planta depuradora. En los últimos años, se han realizado numerosos estudios que confirman la capacidad bioindicadora de las especies pertenecientes a estas comunidades (Martin-Cereceda et al 1996; Madoni, 1994; S. Lee, 2004). Madoni en 1994 propuso el "Índice biótico de fango" (*Sludge biotic index-SBI*), un índice biológico de control de calidad del proceso basado en la determinación de la abundancia de ciertos grupos de protistas, como los pequeños flagelados, las amebas

testáceas y ciertos grupos de ciliados sésiles, reptantes, nadadores o depredadores, junto con algunas especies particulares de ciertas condiciones del sistema.

❖ Clasificación de protistas y metazoos.

Para poder establecer la función de los protistas y metazoos en el tratamiento de aguas residuales inicialmente se debe proceder a la caracterización de las diferentes especies.

La identificación de estos microorganismos en fangos activos se basa principalmente en la observación microscópica de las muestras en fresco y en ocasiones, en la utilización de tinciones argénticas o con fluorocromos específicos.

Una clasificación muy sencilla de los **protistas** es la inclusión en alguno de los siguientes grupos: Flagelados, Ciliados o Sarcodinos; fundamentado en el tipo de movimiento y la presencia/ausencia de apéndices móviles. Estas características son fácilmente observable en las muestras en fresco.

➤ **Presencia de apéndices móviles (flagelos o cilios).**

- **FLAGELADOS:** uno o varios flagelos que emergen en posición apical o subapical; formas verdes (metabolismo fotosintético) o incoloras (osmotrofas o fagotrofas).
- **CILIADOS:** numerosos cilios somáticos organizados en cinetias; ciliación oral asociada al citostoma (superficial o en un embudo bucal); dualismo nuclear.

➤ **Movimiento mediante pseudópodos.**

- **SARCODINOS:** emisión de pseudópodos no permanentes (amebas desnudas y testáceas) o presencia de pseudópodos permanentes (axopodos de heliozoos).

a) Flagelados.

La característica morfológica más básica en este grupo es el número de flagelos emergentes, clasificándose los distintos taxones dentro de los siguientes grupos taxonómicos:

- Chrysomonanida (**Crisomonánidos**).

Se caracterizan por presentar células de pequeño tamaño con dos flagelos anteriores desiguales y escamas silíceas superficiales. Dentro de este grupo se encuentran los géneros *Synura*, *Anthophysis*, *Oikomonas* y *Spumella*.

- Cryptomonadida (**Cryptomonadidos**).

Células aplanadas con forma arriñonada u ovoide (a menudo truncadas anteriormente). Dos flagelos ligeramente desiguales subapicales. Cripta con tricocistos. Dentro de este grupo se encuentran los géneros *Cryptomonas* y *Goniomonas*.

- Euglenida (**Euglenidos**).

Formas nadadoras libres. Células con 1-3 flagelos que emergen anteriormente de un reservorio. Dentro de este grupo se encuentran los géneros *Euglena*, *Anisonema* y *Peranema*.

- Volvacida (**Volvocidos**).

Géneros individuales o coloniales, nadadores libres. En general, dos flagelos anteriores iguales divergentes. En las especies fotosintéticas, un único cloroplasto con forma de copa. Gránulos de reserva de almidón. Dentro de este grupo se encuentra el género *Polytoma*.

- Choanoflagellida (**Coanoflagelados**).

Células incoloras con un collar anterior muy transparente al microscopio. Formas nadadoras libres o sésiles, a veces coloniales. Presencia de 1-3 flagelos anteriores. Dentro de este grupo se encuentra el género *Codonosiga*.

- Kinetoplastea (**Kinetoplástidos**).

Células con dos flagelos, uno anterior y un segundo flagelo más largo recurrente. Formas nadadoras libres. Dentro de este grupo se encuentra el género *Bodo*.

Los flagelados en general, no son muy abundantes en fangos activados, excepto en fases de colonización, o en condiciones de sobrecarga de las plantas.

b) Amebas (sarcodinos)

Los sarcodinos se caracterizan por la presencia de pseudópodos (invaginaciones de la célula) que utilizan para el movimiento y la alimentación (fagocitosis). Las amebas pueden presentar testas (amebas testáceas) o estar ausentes (amebas desnudas).

- Amebas desnudas:
 - Amoebidae: polipodiales (p.e. género *Amoeba*) y monopodiales (p.e. género *Thecamoeba* y *Hartmannella*).
 - Vahlkampfiidae: incluye los géneros *Vahlkampfia* y *Tetramitus*.
- Amebas testáceas:
 - Testáceas con lobópodos: incluye los géneros *Arcella*, *Centropyxis*, *Diffugia* y *Hyalosphenia*.

- Testáceas con filópodos: incluye los géneros *Euglypha* y *Trinema*.

c) **Ciliados.**

El grupo de los ciliados domina normalmente dentro de la comunidad de protistas del fango activo, y por ello, se van a describir con mayor atención. Los ciliados han sido divididos dentro de una serie de grupos ecológicos basados en sus hábitos de alimentación, modo de locomoción y localización física dentro de la biomasa. Según Curds (1968), Madoni, (1991) y Madoni et al., (1994) estos grupos son:

- Ciliados libres nadadores, los cuales se encuentran principalmente nadando en el espacio interflocular.
- Ciliados reptantes, los cuales se desplazan sobre el flóculo.
- Ciliados sésiles, los cuales se encuentran fijos al flóculo a través de estructuras de fijación.
- Ciliados carnívoros, los cuales se alimentan de otros protozoos.

Los ciliados más comunes en estaciones de aguas residuales se pueden identificar según la disposición del citostoma y el tipo de infraciliación oral, tal y como se expone a continuación (Rodríguez et al., 2008):

- **Heterotricos:**

- Células oblongas o aplanadas con el cuerpo celular contráctil debido a la presencia de mionemas.
- Ciliación somática (si está presente) homogénea.
- Ciliación oral constituida por numerosas membranelas en el lado izquierdo (zona adoral de membranelas ZAM) y una membrana paroral más o menos desarrollada en el lado derecho del infundíbulo.
- Especies generalmente **libre-nadadoras** o temporalmente sésiles.

Entre los géneros más representativos se encuentran: *Blepharisma*, *Spirostomum*, y *Stentor*.

- **Espirotricos:**

- Ciliación somática en el lado ventral constituida por una serie de cirros.
- Cuerpo aplanado dorsoventralmente en los grupos presentes en los reactores biológicos.
- Ciliación oral constituida por numerosas membranelas en el lado izquierdo (ZAM) y una membrana o complejo paroral más o menos desarrollada en el lado derecho del infundíbulo.

- Especies **reptantes** asociadas al flóculo.

Entre los géneros más representativos de este grupo se encuentran:

- Hipotricos: *Euplotes* y *Aspidisca*.
- Esticotricos: *Oxitricha*, *Stylonychia* y *Uroleptus*.

- **Litostomados:**

- Cuerpo oblongo o aplanado lateralmente.
- Citostoma alargado en la parte anterior o lateral rodeado de toxicistos.
- Cinetias somáticas bipolares.
- A menudo son **depredadores** de flagelados e incluso otros ciliados.

Entre los géneros más representativos de este grupo se encuentran:

- Hiptoridos: *Enchelys*, *Lacrymaria* y *Spathidium*.
- Pleurostomátidos: *Litonotus* y *Acinera*.

- **Filofaringeos:**

- Citostoma superficial, en algunos casos ausente, excepto en las formas larvales.
- Citofaringe pronunciada, a menudo reforzada por estructuras citoesqueléticas patentes (nemadesmos).
- Ciliación somática restringida a una de las caras del ciliado o totalmente ausente en las formas vegetativas

Entre los géneros más representativos de este grupo se encuentran:

- Chilodoneidos: *Chilodonella*, *Pseudochilodonopsis* y *Trithigmostoma*.
- Disteridos: *Trochilia*.

- **Suctores:**

- Ciliación somática ausente en las formas vegetativas. Larvas móviles con una franja aboral de cilios somáticos.
- Tentáculos con toxicistos para la captura de presas (**ciliados depredadores**).
- Pedúnculos de fijación (**ciliados sésiles**).

Entre los géneros más representativos se encuentran: *Podophrya*, *Tokophrya*, *Acineta*, *Periacineta* y *Multifasciculatum*.

- **Oligohimenóforos:**

- Ciliación somática homogénea o ausente en formas vegetativas.
- Ciliación oral con tres membranelas o penículos en el lado izquierdo y una membrana paroral a la derecha.
- Formas preferentemente nadadoras.

Entre los géneros más representativos de este grupo se encuentran:

- Peniculinos: *Paramecium*.
- Escuticociliados: *Cinetochilum*, *Uronema* y *Cyclidium*.
- Himenostomados: *Tetrahymena*, *Colpidium* y *Glaucoma*.
- Peritricos: *Vorticella*, *Carchesium*, *Epistylis* y *Opercularia*.

Los **metazoos** son microorganismos más complejos que los protistas. En las aguas residuales se encuentran frecuentemente: Rotíferos, Anélidos, Gastrotricos y Nematodos.

d) Rotíferos.

Organismos de mayor tamaño que los protistas (50-500 μm). Poseen un aparato digestivo complejo, que se caracteriza por presentar un órgano triturador llamado mastax. En función de la alimentación y al grupo de rotíferos la morfología del mastax puede variar, presentándose este como un carácter taxonómico importante.

Los géneros que frecuentemente se presentan de las plantas de aguas residuales son: *Rotaria* sp. y *Lecane* sp..

La alimentación de las especies más habituales en los sistemas de fangos activos se produce por la filtración de bacterias dispersas y/o materia orgánica particulada (de la misma forma que los ciliados peritricos sésiles), o la alimentación se puede realizar ingiriendo pequeñas porciones de flóculo, consumiendo igualmente bacterias y materia orgánica.

Aparte de contribuir los rotíferos en la eliminación de bacterias dispersas y materia orgánica, estos favorecen a la formación del flóculo por la secreción de mucus, y por tanto, a la mejora de la sedimentabilidad del fango activo. Una gran concentración de rotíferos indica un elevado tiempo de retención del fango (Fernández-Galiano et al., 1996).

e) Nematodos.

Los nematodos son organismos ampliamente distribuidos tanto en ambientes acuáticos como terrestres. La apariencia de los nematodos de forma libre es muy similar. Presentan un cuerpo cilíndrico que se estrecha en ambos extremos (cuerpo fusiforme), con una longitud media en la mayoría de las especies de 0.5-3 mm. La

boca se encuentra rodeada por papilas, continuando en una faringe musculosa que desemboca en el ano. Se alimentan de bacterias, materia orgánica y pequeños organismos.

Varias especies del orden Rhabditida son las representantes habituales de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los nematodos se encuentran de forma habitual en la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, y concretamente en los sistemas aerobios (Scheimer, 1978). La abundancia de nematodos en sistemas de fangos activos generalmente representa menos del 1 % de la microfauna, siendo su presencia limitada por el tiempo corto de residencia de la biomasa en el sistema (Salvadó, 1994). Colonizan sustratos sólidos como sedimentos y material fecal, de ahí que sea común encontrarlos en sistemas de soporte fijo (filtros percoladores y CBR).

Debido a que necesitan altos tiempos para su desarrollo, su abundancia se relaciona con altas edades de fango o presencia de depósitos en el decantador o aireador (Duchene, 1991).

f) Anélidos.

Los anélidos, junto con tardígrados y gastrotricos, aparecen de forma ocasional en el fango activo (Klimowicz, 1970; Madoni et al., 1993). Dentro de los anélidos presentes en fangos activos, el género más característico es *Aelosoma sp.* Este organismo tiene aspecto vermiforme, cuerpo segmentado y provisto de haces de sedas (3-4) o quetas en cada segmento de la zona dorsal. Es frecuente su aparición, igual que el resto de los oligoquetos, en procesos que operan con elevadas edades de fango y durante etapas de nitrificación. Se alimentan de detritus, bacterias y algas.

g) Gastrotricos.

Son organismos pluricelulares de tamaño comprendido entre 70-500µm, de cuerpo alargado, provisto de cilios en su parte ventral, mientras que en la dorsal presentan escamas o ganchos. Es posible observar un extremo cefálico más o menos definido y un extremo caudal bifurcado. Son translúcidos e incoloros. Se alimentan, por succión de la faringe, de pequeñas partículas orgánicas, principalmente protistas, bacterias y algas unicelulares.

OBJETIVOS

2 OBJETIVOS.

El desarrollo del presente trabajo tiene como objetivo principal realizar un estudio exploratorio de las comunidades y dinámica de los protistas y metazoos presentes en diversas zonas de la línea de aguas (reactor biológico, humedal con macrófitas en flotación y humedal de flujo subsuperficial) de la EDAR estudiada, y en la medida de lo posible determinar las relaciones con las variables fisicoquímicas y operacionales del proceso.

El reactor biológico de la EDAR dispone de un método inusual de tratamiento de aguas residuales. Dicho método combina en un mismo reactor un sistema de aireación prolongada con un filtro de macrófitas en flotación instalado en su superficie. Este sistema mixto no ha sido estudiado con anterioridad, siendo este trabajo un estudio preliminar.

Los objetivos específicos que se pretenden alcanzar son:

- Categorizar las comunidades de protistas y metazoos en el sistema mixto de tratamiento de aguas, tanto del licor mezcla como de la biopelícula adherida a las raíces de las macrófitas.
- Categorizar las comunidades de protistas y metazoos de la biopelícula de las macrófitas del humedal con macrófitas en flotación y humedal de flujo subsuperficial.
- Estudiar las posibles relaciones entre las comunidades de protistas y metazoos observados (licor mezcla y biopelículas), con las variables fisicoquímicas, operaciones y las características del fango activo.
- Comparar las comunidades de protistas y metazoos en los diferentes hábitats del sistema mixto (licor mezcla y biopelícula) y las presentes el humedal artificial.
- Indicar las posibles características diferenciadoras del sistema mixto de tratamiento de aguas frente a los sistemas convencionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

3 MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 Área de estudio.

3.1.1 Localización.

La EDAR se encuentra al noroeste del Término Municipal de Puçol. Concretamente adyacente a la urbanización de Los Monasterios en su parte este, recogiendo y tratando parte de las aguas residuales urbanas producidas en dicha urbanización. Presenta la peculiaridad de tratar únicamente aguas negras de procedencia exclusivamente domiciliaria y ubicarse a escasos metros del último punto de vertido (área escolar).



Figura 12: Localización de la estación depuradora.

Las coordenadas geográficas de la estación depuradora son:

Tabla 4: Coordenadas geográficas de la estación depuradora.	
Coordenada geográficas	
DATUM	ETRS 89
HUSO UTM	30
X	730.301,2
Y	4.389.799,9

3.1.2 Antecedentes.

La estación depuradora se construyó en los **años 90** según directrices del plan de ordenación de la zona. El sistema de depuración de las aguas residuales instalado se trataba de un proceso biológico de aireación prolongada compuesto de las siguientes etapas:

- PRETRATAMIENTO.
 - Aliviadero.
 - Reja manual de desbaste.
 - Desarenador/balsa de regulación.
- TRATAMIENTO BIOLÓGICO.
 - Reactor biológico.
 - Decantador secundario.
 - Recirculación de fangos.
- CLORACIÓN.
- Balsa de acumulación.

En el **año 2006** se procede a la conexión de la red de aguas residuales de la urbanización al nuevo colector municipal.

En el **año 2011** se mejora la depuradora existente para aumentar la calidad del agua efluente y poder reutilizar el agua depurada para el riego de los jardines de la urbanización reduciendo de este modo la demanda de agua para riego del servicio de abastecimiento; este hecho vino motivado por el apremiante problema de déficit hídrico de la zona y la conciencia medioambiental de la administración de la urbanización. Las obras de mejora fueron las siguientes:

- Reja de desbaste automática y menor luz de paso.
- Ejecución de un nuevo desarenador e incorporación de un desengrasador.
- Ampliación y mejora del sistema de aireación, con la incorporación de una nueva soplante, instalación de una sonda de oxígeno y automatización del sistema de aireación del reactor biológico.
- Instalación de un deflector de flotantes en el decantador.

En el **año 2012** se procedió a continuar las actuaciones para mejorar las características del vertido de la planta y reducir el consumo energético de esta. Para ello entre otras actuaciones se transformó el tratamiento biológico de oxidación total en un tratamiento mixto de oxidación con fitodepuración mediante los siguientes trabajos:

- Instalación de un filtro de macrófitas emergentes en flotación (FMF) en el reactor biológico, decantador y balsa de acumulación.



Figura 13: Instalación del FMF en el reactor biológico (fuente Urb. “Los Monasterios” 2012)

En 2013 se complementan las acciones para la mejora de las características de vertido mediante la construcción de dos filtros de macrófitas en flotación, uno para completar el proceso de depuración del efluente y otro para proceder al clarificado de este.

A comienzos de 2014 se transforma el FMF de clarificación en un sistema de macrófitas de flujo horizontal subsuperficial.

3.1.3 Situación actual.

Como ya se ha comentado con anterioridad la EDAR se encuentra en las inmediaciones de la urbanización “Los Monasterios” tratando únicamente los vertidos generados por dicho complejo. Las aguas residuales procesadas son exclusivamente aguas negras domiciliarias y una pequeña parte de las pluviales recogidas en las parcelas residenciales.

El agua depurada por la planta es empleada en su totalidad para el riego de los jardines comunitarios del área residencial.

Los equipos y características que actualmente componen la depuradora son:

➤ **PRETRATAMIENTO.**

- Aliviadero.
- Reja automática de desbaste luz de paso de 3mm.
- Desarenador/desengrasador.
- Balsa de regulación (Vol 90 m³, Sup 50 m²).

- TRATAMIENTO BIOLÓGICO.
 - Reactor biológico (Vol 175 m³, Sup 44 m²)+ FMF.
 - Decantador secundario (Vol 48 m³, Sup 25 m²).
 - Recirculación de fangos.
- TRATAMIENTO TERCIARIO
 - Balsa para depuración mediante filtro de macrófitas en flotación (Vol 544 m³, Sup 340 m²).
 - Balsa para clarificación mediante macrófitas en flujo horizontal subsuperficial (Sup 83 m²).
- Balsa de ACUMULACIÓN.

El caudal medio tratado por la planta es de 100 m³/d, siendo este más o menos estable a lo largo del año. Las pequeñas variaciones que existen a lo largo del año dependen de las necesidades de riego.

El proceso que siguen las aguas residuales cuando llegan a la EDAR “Los Monasterios” es el siguiente:

El agua bruta pasa a través de una reja de desbaste, tras esto se procede a su desarenado-desengrasado, para terminar el pretratamiento esta entra en una pequeña balsa de regulación para proporcionar un caudal estable de agua al reactor.

El tratamiento biológico del agua bruta comienza cuando llega al reactor biológico (aireación prolongada con filtro de macrófitas en flotación en su superficie) para la remoción de materia orgánica y la nitrificación. Con el fin de conseguir la realización de dicho cometido es necesario el aporte extra de oxígeno que se realiza mediante dos soplantes. La clarificación del agua antes del tratamiento terciario se realiza en el decantador secundario, el cual dispone también en su superficie de macrófitas en flotación.



Figura 14: Vista general de la depuradora (imagen tomada 11/02/2015).

En el tratamiento terciario se completa la depuración y desinfección del agua residual con el fin de conseguir la calidad suficiente para poder emplearla como agua el riego.

El oxígeno es proporcionado a través de dos soplantes, como se ha comentado con anterioridad, trabajando con diferente consigna. Una funciona de forma automática (15 min aireando y 30 min de reposo), mientras que la otra actúa mediante una consigna de concentración de oxígeno en el reactor (se pone en funcionamiento cuando la concentración es menor de 0,9 mg/l y se detiene al alcanzar la concentración de 1,5 mg/l).

La purga de fangos se realiza desde el fondo del decantador secundario de forma automática (Q=190 L/min, 8 veces al día durante 2 minutos).

El tiempo de retención hidráulico del reactor es de 1,75 días unas 42 horas y el del humedal artificial es de unos 6 días.

3.1.4 Consumos energéticos de la EDAR.

La propiedad de la depuradora ha proporcionado los consumos energéticos globales anuales del periodo 2011-2014 que se reflejan en la tabla adjunta.

Tabla 5: Consumo eléctricos anuales.		
	Consumo anual (kWh)	Observaciones
Año 2011	56.023	Incorporación de una nueva soplante, instalación de una sonda de oxígeno y automatización del sistema de aireación.
Año 2012	49.960	Implantación del reactor combinado a finales de año.
Año 2013	30.966	Funcionamiento de ambas soplantes de modo automático. Instalación de un contador en las bombas de riego a mediados de año.
Año 2014	40.606	Cambio forma de operar las soplantes: una soplante pasa a funcionar con programador y la otra en automático. Bombas de relevación funcionan más horas por incremento de las horas de riego.

El valor anual del gasto energético incluye el consumo eléctrico de las soplantes del reactor, bomba de purga y las bombas relevadoras para el riego de las zonas ajardinadas.

Únicamente se dispone de datos del consumo de las bombas de riego a partir de mediados de 2013. Con los datos disponibles se ha estimado el consumo para los años anteriores, ascendiendo estos a unos 18.500 kWh anuales. Teniendo en cuenta lo anterior la tabla 6 plasma los consumos anuales descompuestos.

Tabla 6: Consumo eléctricos anuales descompuestos			
	Consumo global (kWh)	Consumo EDAR (kWh)	Consumo bomba riego (kWh)
Año 2011	56.023	37.523	≈18.500
Año 2012	49.960	31.460	≈18.500
Año 2013	30.966	12.518	≈18.448
Año 2014	40.606	20.306	20.300

Tal y como se puede observar más claramente en la figura 15, la reducción de consumo eléctrico es notable desde el comienzo de la implantación de las mejoras a mediados de 2011. Principalmente se aprecia la reducción de los consumos desde la implantación del reactor mixto a finales del año 2012.

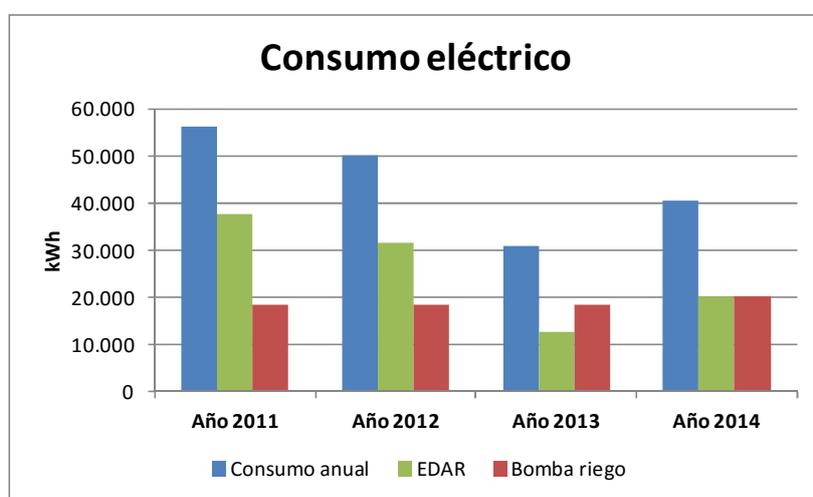


Figura 15: Evolución de los consumos eléctricos anuales.

Se ha calculado la reducción de los consumos eléctricos del último periodo proporcionado por la propiedad (año 2014) con respecto al 2012 (último año sin macrófitas). Según esos datos se ha reducido el consumo eléctrico global anual (EDAR más bomba riego) en un 19%. Si se considera únicamente el consumo de la EDAR, éste se ha reducido en un 35%.

3.2 Toma de muestras.

Para la elaboración del presente estudio se ha llevado a cabo una campaña de muestreos durante cuatro meses con una periodicidad de dos veces al mes, desde enero de 2015 hasta abril de 2015. En total se realizaron ocho muestreos, recogiendo en la tabla adjunta la fecha exacta de su obtención. Los muestreos se obtuvieron en horario de mañana entre la 11:00 y las 12:00 horas.

Tabla 7: Calendario de los muestreos.

	Denominación	Fecha	Hora
MUESTREO 1	M1	14/01/2015	11:45 am
MUESTREO 2	M2	28/01/2015	11:30 am
MUESTREO 3	M3	11/02/2015	11:30 am
MUESTREO 4	M4	25/02/2015	11:45 am
MUESTREO 5	M5	11/03/2015	11:15 am
MUESTREO 6	M6	26/03/2015	11:30 am
MUESTREO 7	M7	16/04/2015	11:00 am
MUESTREO 8	M8	29/04/2015	11:00 am

En cada muestreo se procedió a recoger tres muestras de agua, una de licor mezcla y tres del sistema radicular de las macrófitas (tabla 8).

Tabla 8: Puntos de muestreo.

Tipo de muestra	Punto muestreo	Ubicación muestro	Tipo de ensayo realizado
Agua	1	Afluente al reactor	Variables fisicoquímicas
	2	Efluente del decantador secundario	
	3	Efluente de la planta	
Licor mezcla	4	Reactor biológico	Variables fisicoquímicas Observación microscópica
	5	Reactor biológico	Observación microscópica
Macrófitas	6	Humedal con macrófitas en flotación	Observación microscópica
	7	Humedal con flujo subsuperficial	

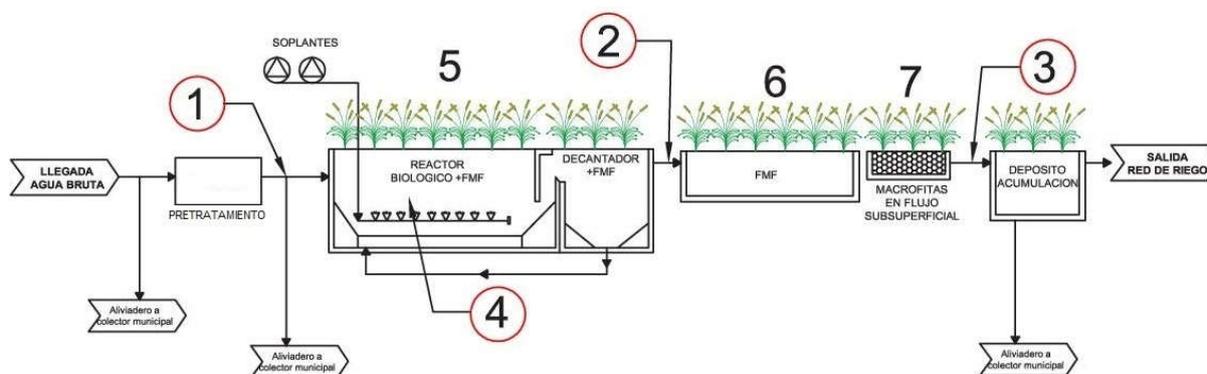


Figura 16: Ubicación de los puntos de muestreo de agua y licor mezcla.

Las muestras de agua obtenidas corresponden al afluente del reactor, efluente del decantador y al efluente de la planta, mientras que la muestra del licor mezcla fue tomada directamente del reactor. Los puntos de muestreo seleccionados vienen reflejados en la figura 16 obteniéndose en cada caso muestras simples y de carácter puntual.



Figura 17: Puntos de muestreo de agua y licor mezcla: a) agua afluente (punto 1); b) agua efluente decantador secundario (punto 2); c) agua efluente planta (punto 3); d) licor mezcla (punto 4).

Tanto las muestras de agua como las del licor mezcla fueron recogidas manualmente con recipientes de plástico con una capacidad de 2 litros y almacenadas en frío para su transporte hasta el laboratorio donde fueron analizadas inmediatamente.



Figura 18: Toma de muestras en: a) punto 1; b) punto 2.



Figura 19: Proceso y material de empelado en la toma de muestras del licor mezcla.

También se obtuvieron muestras del sistema radicular de la vegetación, estas corresponden a las macrófitas presentes en el reactor biológico, humedal artificial con macrófitas en flotación y humedal artificial de flujo subsuperficial. Los puntos de muestreo seleccionados se indican en la figura adjunta.

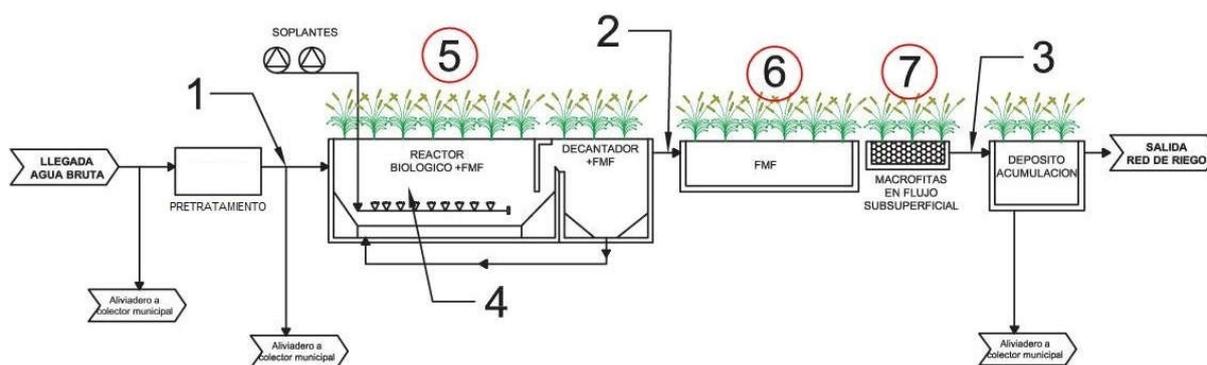


Figura 20: Ubicación de los puntos de muestreo de macrófitas

De cada punto de muestreo se extrajo una planta completa de forma manual intentando en la medida de lo posible no alterar el sistema radicular. Una vez recolectadas las muestras se procedió a separar mediante corte el sistema radicular de la parte aérea (tallo y hojas), desechándose esta última. Las raíces fueron introducidas en botes de plástico rellenos con agua de la salida de la depuradora para evitar que la biopelícula adherida a las raíces sufriese estrés hídrico y osmótico. Posteriormente fueron transportadas en frío hasta el laboratorio donde fueron

almacenadas en condiciones refrigeradas hasta su análisis (máximo 24h después de la recolección).

Las muestras de macrófitas procedentes del reactor biológico retenían entre sus raíces mucha cantidad de fango procedente del licor mezcla. Para facilitar su almacenamiento en botes éstas fueron sometidas a un lavado suave mediante inmersión en agua de la salida de la depuradora para retirarles el fango del licor mezcla y no dañar la biopelícula.



Figura 21: Toma de muestras del sistema radicular de las macrófitas del reactor biológico: a) vista general de reactor; b) zona radicular vegetación una vez extraída; c) proceso de lavado; d) almacenamiento.



Figura 22: Sistemas radiculares obtenidos en los diferentes puntos de muestreo: a) reactor biológico (punto 5); b) humedal con macrófitas en flotación (punto 6); c) humedal con flujo subsuperficial (punto 7).

3.3 Variables fisicoquímicas y operacionales.

Las tablas siguientes agrupan (tabla 10 y 11) las variables fisicoquímicas analizadas en las muestras de agua (afluente al reactor, efluente del decantador secundario y efluente de la planta) y licor mezcla (reactor biológico) tomadas.

Las variables fisicoquímicas se han determinado siguiendo los procedimientos normalizados en el laboratorio de Contaminación de Aguas del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la UPV.

Tabla 9: Variables fisicoquímicas determinadas en las muestras de agua.		
Parámetros	Abreviatura	Ud
pH	-	Ud.
Conductividad eléctrica	CE	μS/cm
Oxígeno disuelto	OD	mg/L
Temperatura	T ^a	°C
Sólidos en suspensión totales	SST	mg/L
Sólidos en suspensión volátiles totales	SSVT	mg/L
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días	DBO ₅	mg/L
Nitrógeno total	NT	mg/L
Nitrógeno amoniacal	N-NH ₄ ⁺	mg/L
Nitrógeno nítrico	N-NO ₃ ⁻	mg/L
Nitrógeno nitroso	N-NO ₂ ⁻	mg/L
Fósforo total	PT	mg/L
Fósforo del ortofosfato	P-PO ₄ ³⁻	mg/L

Tabla 10: Variables fisicoquímicas determinadas en las muestras de licor mezcla.		
Parámetros	Abreviatura	Ud
pH	-	Ud.
Conductividad eléctrica	CE	μS/cm
Oxígeno disuelto	OD	
Temperatura	T ^a	°C
Sólidos en suspensión totales	SST	mg/L
Sólidos en suspensión volátiles totales	SSVT	mg/L
Sedimentabilidad del licor mezcla a 30 minutos	V30	ml/L
Sedimentabilidad del licor mezcla a 30 minutos diluido	V30 D	ml/L

Las variables operacionales determinadas durante el periodo de estudio de la EDAR son las recogidas en la tabla 12.

Parámetros	Abreviatura	Ud
Índice volumétrico de fangos	IVF	ml/g
Índice volumétrico de fangos diluido	IVFD	ml/g
Carga másica	Cm	kg/kg
Tiempo de retención hidráulico	TRH	h

3.4 Identificación y abundancia de protistas y metazoos.

3.4.1 Preparación de las muestras.

La preparación de las muestras se realizó en el laboratorio de Bioindicación y Control de Proceso en EDAR del Área de Química y Microbiología del Agua en el IIAMA.

La metodología empleada en la preparación de las muestras, para su posterior análisis, es diferente según el origen de estas: biopelícula adheridas a las raíces o licor mezcla.

Para de realizar la identificación de los protistas y metazoos presentes en la biopelícula adherida al sistema radicular de las plantas es necesaria su separación previa. El método ha empleado para la preparación de las muestras es el siguiente:

Las raíces se extraen de los botes de plástico y se depositan en bandejas limpias en donde se seleccionan dos o tres raicillas de la zona interior de los sistemas radiculares. A continuación, se procede a un lavado suave mediante inmersión en agua de la salida de la planta por un periodo de 1 minuto.

Posteriormente se introducen en tubos Falcón con aproximadamente 40 ml de agua de la salida de planta, sometiéndose los tubos a agitación durante 30 segundos para desprender los protistas y metazoos de las raíces. Los tubos se dejan sedimentar unos 30 minutos antes de realizar los submuestreros del fondo de estos.

La preparación de las muestras procedentes del licor mezcla ha consistido en una homogeneización mediante agitado antes de realizar los submuestreros, para evitar distorsiones por sedimentación durante el almacenamiento.

3.4.2 Análisis microscópico.

El análisis microscópico de las muestras se realizó en un intervalo de tiempo máximo de 24 horas después de la toma de muestras, utilizando un microscopio de contraste de fases Zeiss (modelo Axiostar).

Se observaron tres submuestras de 25µl de cada muestra para proceder a la identificación de los microorganismos y realizar una valoración subjetiva de su abundancia.

Los organismos fueron identificados en vivo usando las claves de Foissner *et al.* (1991; 1992; 1994; 1995; 1996), Rodríguez *et al.*, (2008) y Serrano *et al.*, (2008).

El análisis microscópico se efectuó en el laboratorio de Bioindicación y Control de Proceso en EDAR del Área de Química y Microbiología del Agua en el IIAMA.

3.4.3 Abundancia de protistas y metazoos.

La determinación de la abundancia de protistas y metazoos se realizó mediante una valoración subjetiva de los individuos tras realizar la observación microscópica de las submuestras.

La densidad de los organismos caracterizados fue estimada mediante un criterio subjetivo, en el cual se estableció la abundancia de las especies dentro de una escala ordinal del 1 al 4 (tabla 13) Se asignó el valor de 4 a los organismos con una presencia dominante y de 1 para la presencia ocasional.

ESCALA	DENOMINACIÓN
4	Dominante
3	Secundario
2	Frecuente
1	Ocasional

RESULTADOS

4 RESULTADOS.

4.1 Incidencias recogidas durante el periodo de estudio.

A continuación se indican las observaciones e incidencias más representativas registradas durante los muestreos. Estos datos facilitarán la interpretación posterior de los resultados obtenidos.

Tabla 13: Observaciones e incidencias durante los muestreos realizados.		
	Fecha	Observaciones
MUESTREO 1	14/01/2015	Fallo en el funcionamiento de la soplante principal (07/ene al 23/ene). Se aprecia mal olor en la planta. Concentración baja de oxígeno en el reactor.
MUESTREO 2	28/01/2015	Funcionamiento correcto de la soplante (23/ene). No se aprecia mal olor en la planta. Siega del humedal artificial de flujo subsuperficial.
MUESTREO 3	11/02/2015	Periodo de bajas temperaturas (4/feb al 7/feb).
MUESTREO 4	25/02/2015	Periodo de fuertes vientos (18/feb al 23/feb).
MUESTREO 5	11/03/2015	Siega de las macrófitas del reactor (11/abr). Aparición de un episodio de proliferación de bacterias filamentosas del genero <i>Microthrix</i> .
MUESTREO 6	26/03/2015	Periodo de fuertes lluvias (18/marz al 24/marz). No se purga, solo se recircula fango.
MUESTREO 7	16/04/2015	
MUESTREO 8	29/04/2015	Aumento de las temperaturas.

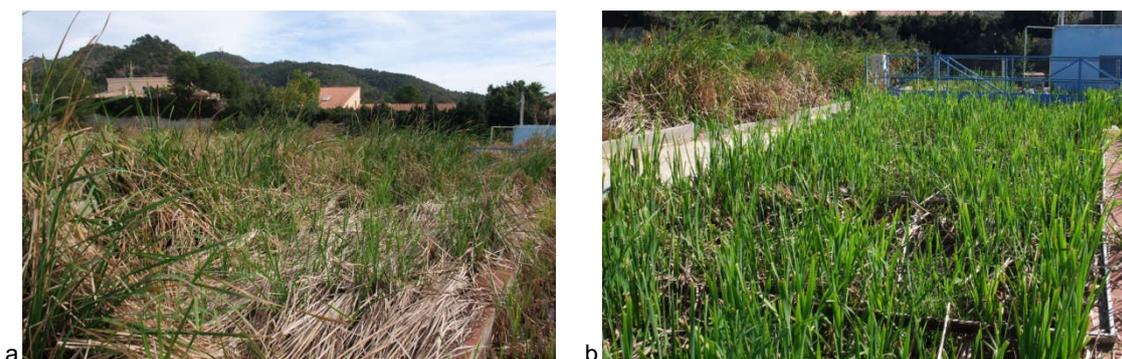


Figura 23: Vistas del reactor biológico: a) vegetación agostada (imagen tomada 25/02/2015); b) rebrote tras la siega (imagen tomada 26/03/2015).

4.2 Variables fisicoquímicas y operacionales.

En este apartado se presenta un resumen de los resultados obtenidos de las variables fisicoquímicas y operacionales estudiadas en los diferentes puntos de muestreo. Los resultados completos se pueden consultar en un anexo a este documento.

4.2.1 Agua de entrada.

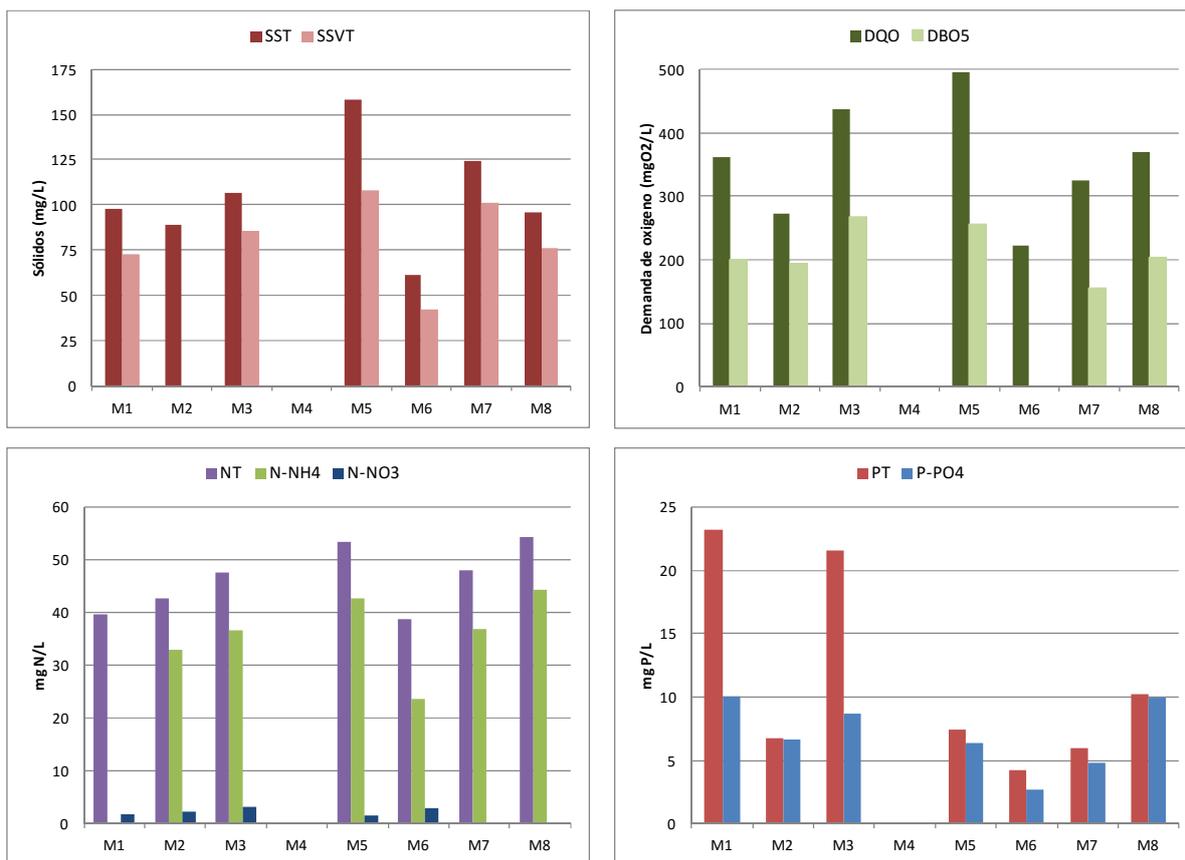
La tabla adjunta muestra un resumen estadístico de los resultados obtenidos del agua de entrada a la planta: media, desviación estándar, coeficiente de variación y los valores máximos y mínimos obtenidos.

Tabla 14: Resultados de variables fisicoquímicas del afluente. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación

		Media	Desviación estándar	Coeficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
SST	mg/l	104,71	30,26	28,90%	61,00	158,00
SSVT	mg/l	81,00	23,51	29,03%	42,00	108,00
DQO	mg O ₂ /l	354,86	92,77	26,14%	223,00	495,00
DBO ₅	mg O ₂ /l	212,50	41,85	19,69%	155,00	267,00
DBO ₅ /DQO		0,57	0,08	14,39%	0,48	0,71
PT	mg P/l	11,35	7,77	68,46%	4,28	23,20
P-PO ₄	mg P/l	7,01	2,72	38,79%	2,70	10,00
NT	mg N/l	46,36	6,22	13,42%	38,80	54,40
N-NH ₄	mg N/l	36,23	7,49	20,67%	23,60	44,40
N-NO ₃	mg N/l	1,72	1,14	66,32%	0,25	3,10
pH		7,88	0,37	4,74%	7,27	8,34
CE	mS/cm	2,51	0,29	11,73%	2,27	3,01
OD	mg O ₂ /l	1,89	1,27	66,83%	0,27	3,29
T ^a	°C	17,13	2,09	12,19%	14,70	20,90

Los resultados obtenidos revelan un agua afluente a la EDAR poco uniforme y con frecuentes variaciones de contaminación, como revela el elevado valor del coeficiente de variación de casi todas las variables analizadas. Hay que recordar tal y como se expuso en el apartado “Área de estudio” la proximidad de la EDAR a las fuentes del vertido y escasa homogenización del agua de entrada por un mal uso de la balsa de regulación.

Representando gráficamente los resultados obtenidos estos reflejan con más claridad la irregularidad de concentraciones del agua de entrada (figura 24).



Nota: se han eliminado los datos del muestreo M4 por ser anormalmente irregulares

Figura 24: Representación gráfica de variables fisicoquímicas del afluente.

Los sólidos suspendidos medios presentes en el agua afluente son de 104,71 mg/l con un coeficiente de variación (CV) del 29%, siendo su contenido en volátiles de 81,00 mg/l (77% de los SST). La proporción de SST con SSVT es más o menos estable en los diferentes muestreos tal y como puede observarse en la gráfica (figura 24). Aproximadamente en el 77% de los sólidos son volátiles.

La concentración media de la DQO se encuentra en 354,86 mgO₂/l con un CV del 26%, en el caso de la DBO₅ la concentración es de 212,50 mgO₂/l y su CV del 20%. El valor promedio de relación DBO₅/DQO (índice biodegradabilidad del agua) es igual a 0,57 indicando que el afluente a la planta es altamente biodegradable al ser mayor de 0,4 (Metcalf & Eddy).

Tal y como refleja la gráfica del fósforo (figura 24) en la mayoría de los muestreos realizados el fósforo presente en el agua residual se encuentra en forma de ortofosfato a excepción de M1 y M3 en donde la diferencia es considerable, este hecho puede ser motivado por el tipo de muestreo realizado (simple y puntual) y la escasa homogenización del agua de entrada, como se ha comentado anteriormente. También se observa fácilmente en la gráfica el elevado CV obtenido para el PT próximo al 68%.

En referencia al nitrógeno, la forma mayoritaria con la que se presenta este elemento es la de amonio (78% del nitrógeno total). Un 4% del nitrógeno total presente en el agua se encuentra en forma de nitrato.

Comparando los valores medios registrados con las concentraciones típicas para las aguas residuales urbanas (tabla 15), los resultados de las analíticas corresponden con un agua residual típica de concentraciones entre débiles y medias.

Tabla 15: Valores típicos de las variables para agua residual urbana (adaptación de Ferrer y Seco 2007).

Constituyente		CONCENTRACIÓN		
		FUERTE	MEDIA	DEBIL
SST	mg/l	580	300	100
SSVT	mg/l	460	225	70
DQO	mg O ₂ /l	1600	750	250
DBO ₅	mg O ₂ /l	500	300	100
PT	mg P/l	33	15	6
NT	mg N/l	140	60	20
N-NH ₄	mg N/l	82	37	12
N-NO ₃	mg N/l	0	0	0

La conductividad media del agua de entrada (2,51 mS/cm) es algo más elevada a las aguas residuales domésticas de la zona. La causa de este valor es la presencia de equipos de ósmosis para agua potable en la zona y los rechazos de la limpieza de filtros de las piscinas salinas muy habituales en el área residencial donde se ubica la depuradora.

4.2.2 Licor mezcla.

En la siguiente tabla se presentan los resultados medios de las variables fisicoquímicas estudiadas en el licor mezcla, así como su desviación estándar, coeficiente de variación y los valores máximos y mínimos obtenidos.

Tabla 16: Resultados de variables fisicoquímicas del licor mezcla. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

		Media	Desviación estándar	Coeficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
SST	mg/l	2.317,50	629,80	27,18%	1.650,00	3.590,00
SSVT	mg/l	1.787,14	509,27	28,50%	1.280,00	2.820,00
pH		7,36	0,27	3,61%	7,07	7,85
CE (*)	mS/cm	2,36	0,13	5,68%	2,18	2,60
OD	mg O ₂ /l	1,53	0,93	60,61%	0,80	3,68
T°	°C	17,30	2,67	15,46%	14,50	21,70
V30	ml/l	422,50	119,97	28,40%	270,00	620,00
V30 D(1:2)	ml/l	182,50	38,82	21,27%	140,00	240,00

(*): en el cálculo estadístico no se ha incluido el valor de M6

La concentración de sólidos suspendidos en el reactor ha sido relativamente baja durante el periodo de estudio alrededor de 2.000 mg/l, como se puede observar en la figura adjunta (figura 25), a excepción del los dos primeros muestreos.

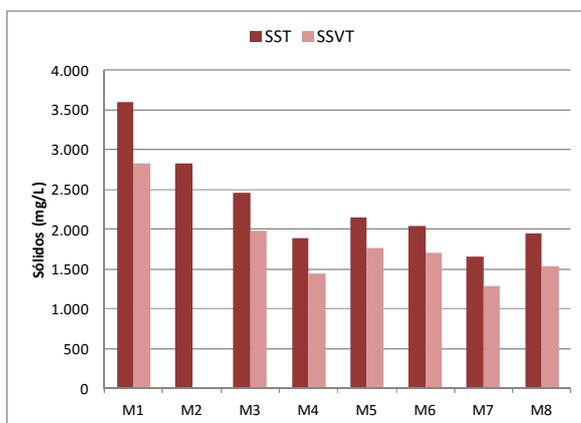


Figura 25: Representación gráfica de sólidos suspendidos del licor mezcla.

En los reactores de aireación prolongada la concentración de sólidos suele encontrarse entre los 3.000-6.000 mg/l (fuente Ferrer y Seco 2007). Estos valores típicos únicamente se cumplen en los muestreos 1 y 2, siendo la concentración en el resto de los casos alrededor de 2.000 mg/l como ya se ha mencionado anteriormente.

La evolución de la concentración de los SSVT es análoga a la de los SST ya que su proporción es más o menos constante a lo largo de todo el estudio. Aproximadamente el 77% de los sólidos suspendidos son volátiles.

Los valores del pH (valor medio 7,36) y la conductividad eléctrica (valor medio 2,36 mS/cm) son estables a lo largo de los muestreos a excepción del resultado de la conductividad en M6 donde se recogió la muestra después de un periodo de fuertes lluvias, este dato no ha sido incluido en los cálculos estadísticos del: valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

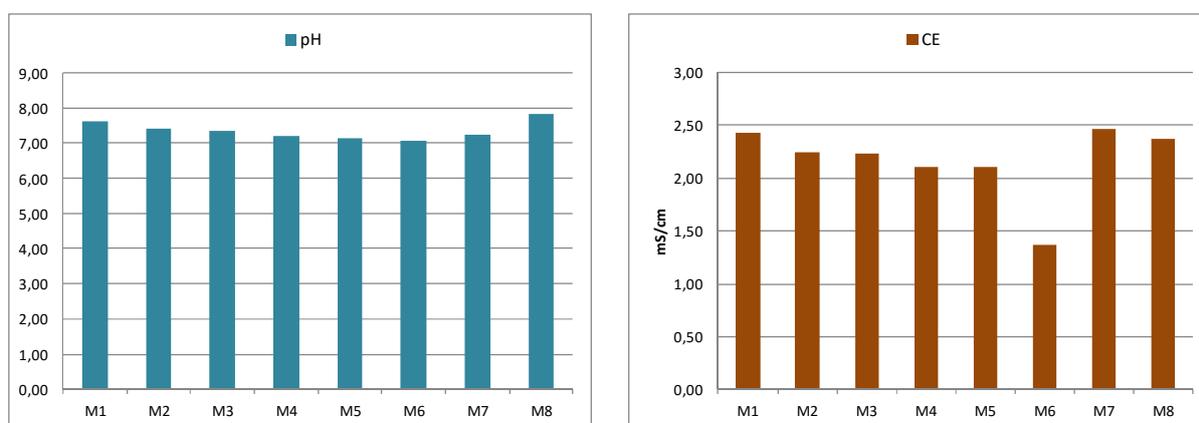


Figura 26: Evolución del pH y CE en el licor mezcla.

Con referencia a las variables operacionales, la tabla 17 muestra un resumen de los valores medios obtenidos durante la duración del estudio, así como su desviación estándar, coeficiente de variación y los valores máximos y mínimos obtenidos.

Tabla 17: Resultados de variables operacionales Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

		Media	Desviación estándar	Coeficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
IVFD	ml/g	161,34	30,47	18,89%	127,21	213,95
TRH	h	42,00	0,00	0,00%	42,00	42,00
Cm	kg/kg	0,07	0,02	24,22%	0,04	0,08

La carga másica obtenida de 0,07 Kg_{DBO5}/kg_{SST}.día corresponde con los valores típicos de las plantas de aireación prologada dada la temperatura media del reactor ,menor 20°C, para aguas residuales típicas (Cm≤0,07 Kg_{DBO5}/kg_{SST}.día; fuente Ferrer y Seco 2007).

Los valores de la IVF han sido obtenidos en todos los muestreos a partir de la V30 con una dilución 1:2, situándose el valor medio de la IVFD en 161,34 ml/l.

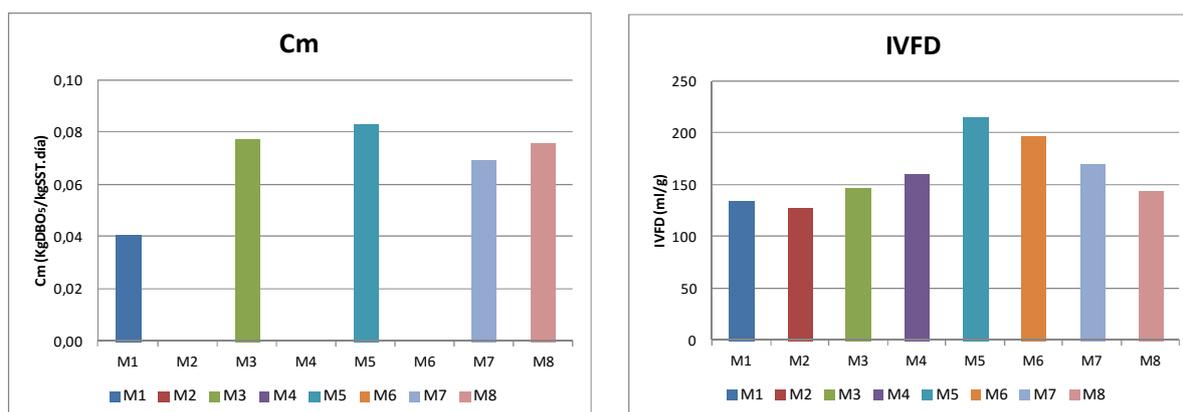


Figura 27: Evolución de la Cm e IVFD en el periodo estudio.

El TRH es de 42 horas, este valor no ha sufrido variación alguna durante la realización del estudio al ser el caudal de entrada a la planta relativamente constante a lo largo del año.

4.2.3 Agua efluente.**a) Agua efluente del decantador secundario.**

Los resultados del agua efluente después de la salida del decantador secundario y los rendimientos de eliminación del reactor biológico se exponen en las tablas anexas: media, desviación estándar, coeficiente de variación y los valores máximos y mínimos obtenidos.

Tabla 18: Resultados de variables fisicoquímicas del efluente del decantador secundario. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

		Media	Desviación estándar	Coeficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
SST ^(*)	mg/l	4,70	1,05	22,35%	3,30	5,90
SSVT ^(*)	mg/l	3,53	0,75	21,23%	2,60	4,30
DQO ^(*)	mg O ₂ /l	51,43	15,59	30,31%	32,00	76,00
DBO ₅ ^(*)	mg O ₂ /l	17,20	6,20	36,05%	7,30	26,40
DBO ₅ /DQO ^(*)		0,35	0,14	39,65%	0,16	0,52
PT ^(*)	mg P/l	4,40	1,28	29,00%	3,35	6,80
P-PO ₄ ^(*)	mg P/l	3,52	0,89	25,24%	2,40	5,20
NT ^(*)	mg N/l	15,70	3,00	19,14%	12,20	19,60
N-NH ₄ ^(*)	mg N/l	2,47	1,69	68,24%	0,57	6,00
N-NO ₃ ^(*)	mg N/l	10,25	2,55	24,87%	6,30	13,70
pH		7,47	0,34	4,50%	6,83	7,88
CE ^(**)	mS/cm	2,28	0,15	6,42%	2,11	2,47
OD	mg O ₂ /l	0,55	0,20	37,33%	0,24	0,88
T°	°C	17,08	2,12	12,40%	14,70	21,00

(*): en el cálculo estadístico no se han incluido el valor de M1

(**): en el cálculo estadístico no se ha incluido el valor de M6

Tabla 19: Rendimiento de eliminación de contaminantes del reactor biológico Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

	Media	Desviación estándar	Coeficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
rDQO _{RB}	85%	6%	6,57%	77%	91%
rDBO _{5 RB}	91%	2%	2,28%	89%	94%
rPT _{RB}	43%	20%	46,92%	19%	69%
rNT _{RB}	68%	5%	6,74%	64%	76%
rNH _{4 RB}	95%	2%	1,74%	93%	98%

Representando gráficamente los valores de las analíticas en los diferentes muestreos se observa la evolución de las variables fisicoquímicas.

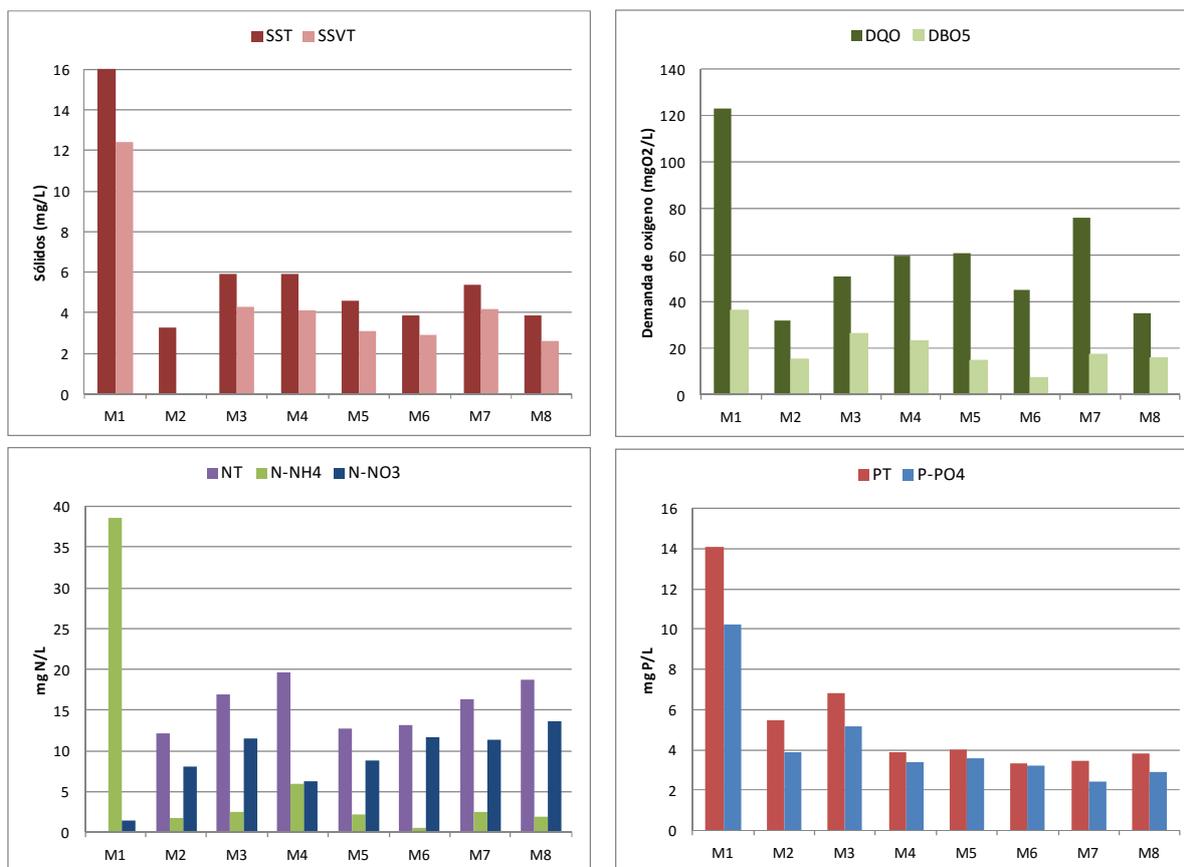


Figura 28: Representación gráfica de variables fisicoquímicas del efluente decantador secundario.

En el cálculo estadístico se han eliminado los resultados del M1 puesto que corresponden a un funcionamiento anómalo de la depuradora (concentración deficitaria de oxígeno en el reactor por fallo de una soplante) y se pretende establecer el rango de funcionamiento “normal” de la depuradora. Este hecho se pone de manifiesto al observar las gráficas de la figura 28 donde la mayoría de los resultados en los diferentes muestreos se encuentran dentro de un rango más o menos constante a excepción del M1.

No se han eliminado los resultados del M1 del estudio, aún tratándose de un funcionamiento poco habitual de la depuradora, porque se desea conocer la composición de los protistas y metazoos en diferentes situaciones de funcionamiento depuración y su dinámica en respuesta a las condiciones extremas.

Obviando los resultados de las analíticas del M1 los sólidos suspendidos del agua de salida se encuentran entre los 3 y 6 mg/l, con una proporción SSVT sobre el 70%. El valor medio de SST es de 4,70 mg/l.

La concentración media de la DQO se encuentra sobre los 51,4 mgO₂/l, en el caso de la DBO₅ la concentración es de 17,2 mgO₂/l.

		Concentración	% Reducción
SST	mg/l	35	90
DQO	mg O ₂ /l	125	75
DBO ₅	mg O ₂ /l	25	70-90

En general la calidad del agua efluente del decantador secundario cumple con las exigencias de vertido marcadas Directiva Europea 91/271/CEE (tabla 20 y figura 29), a excepción del resultado de la DBO₅ en M1 coincidiendo con el periodo de mal funcionamiento de la soplante principal.

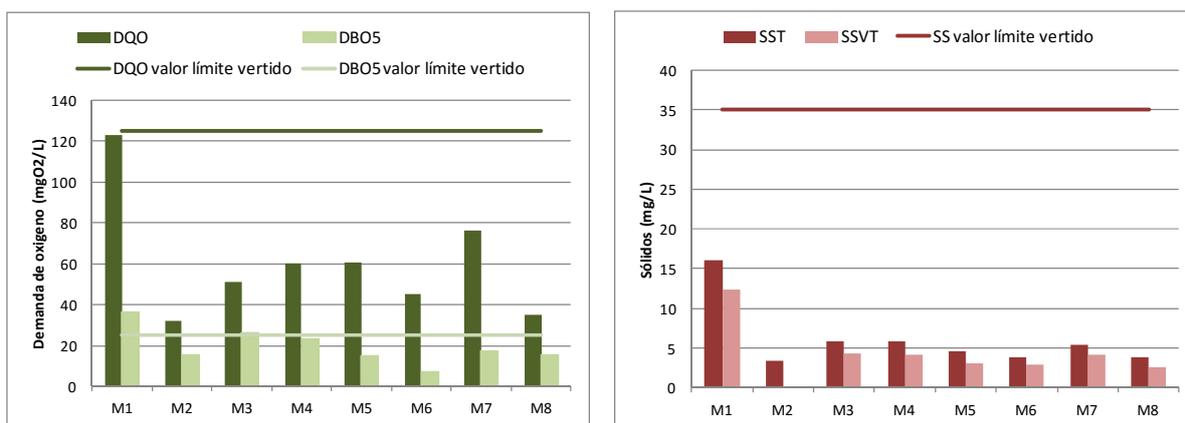


Figura 29: Comparativa del límite de vertido la Directiva Europea (91/271/CEE) con los resultados del efluente del decantador secundario.

Las analíticas realizadas al efluente del decantador ponen de manifiesto al ortofosfato como forma mayoritaria del fósforo total presente en el agua. Este hecho se muestra más evidente en la representación gráfica del P_T y P-PO₄ (figura 28).

El contenido de nitrógeno total en el efluente del decantador es inferior a 20 mg/l como se observa en la gráfica de la figura 28. El 70% del nitrógeno total presente en el agua se encuentra en forma de nitrato; a excepción de M1 donde es el amonio la forma mayoritaria, hecho que evidencia la reducción del proceso de nitrificación a causa de las deficiencias de oxígeno en el reactor por mal funcionamiento de una soplante.

b) Agua efluente de la planta.

En las tablas anexas se indican los resultados del agua efluente de la planta después de ser tratada a través del humedal artificial y los rendimientos de eliminación de la EDAR: media, desviación estándar, coeficiente de variación y los valores máximos y mínimos obtenidos.

Tabla 21: Resultados de variables fisicoquímicas del efluente de la planta. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

		Media	Desviación estándar	Coeficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
DQO	mg O ₂ /l	<10,00	6,56	70,95%	<10,00	22,00
PT	mg P/l	3,86	1,26	32,56%	2,02	5,66
P-PO ₄	mg P/l	3,83	1,24	32,53%	2,00	5,60
NT	mg N/l	10,02	2,43	24,28%	5,76	14,19
N-NH ₄	mg N/l	2,55	4,26	166,81%	<0,50	11,80
N-NO ₃	mg N/l	7,34	3,34	45,43%	2,20	10,80
N-NO ₂	mg N/l	0,04	0,02	54,55%	0,02	0,08
OD	mg O ₂ /l	2,03	0,52	25,70%	1,47	2,99
T°	°C	15,38	2,63	17,12%	12,80	20,20

Tabla 22: Rendimiento de eliminación de contaminantes de la EDAR. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

	Media	Desviación estándar	Coeficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
rDQO _{EDAR}	97%	2%	1,75%	95%	99%
rPT _{EDAR}	55%	26%	47,05%	20%	81%
rNT _{EDAR}	91%	4%	4,06%	86%	96%
rNH ₄ _{EDAR}	97%	5%	4,72%	89%	99%

La representación gráfica de los resultados de los muestreos pueden observarse en la figura 30.

La concentración media de la DQO en el inferior a los 10 mgO₂/l, obteniendo un agua con baja demanda de oxígeno.

El contenido de nitrógeno total medio es 10 mgN/l presentándose principalmente en forma de nitrato.

El fósforo presente en el agua efluente se encuentra en forma de ortofosfato, tal y como sucedía en el agua efluente del decantador secundario. La tendencia del contenido de fósforo en el agua ha ido descendiendo a medida que se realizaba los muestreos, coincidiendo los valores de concentraciones más bajas con el inicio de la primavera y el inicio de la actividad vegetativa de las macrófitas después del periodo de agostamiento.

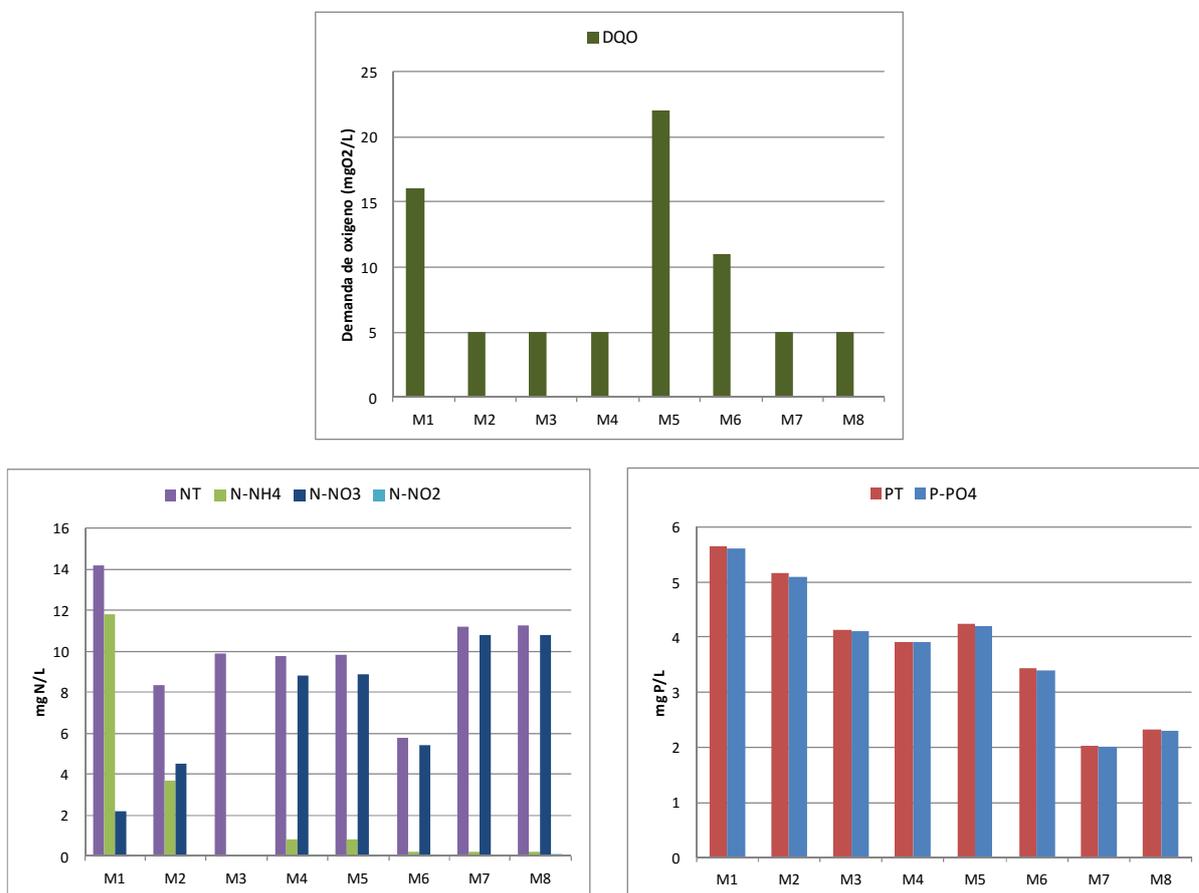


Figura 30: Representación gráfica de variables fisicoquímicas del efluente planta.

4.3 Identificación y abundancia de protistas y metazoos.

Para la identificación de los protistas y metazoos presentes en la EDAR objeto de este estudio se realizó una campaña de muestreos tal y como se indica en el apartado “Materiales y Métodos”.

Se procedió al reconocimiento de los pequeños metazoos y protistas presentes en el licor mezcla (punto muestreo 4) y en el sistema radicular de las macrófitas del reactor biológico (punto 5), humedal artificial con macrófitas en flotación (punto 6) y humedal artificial de flujo subsuperficial (punto 7) realizando posteriormente una valoración subjetiva de su abundancia.

Los resultados completos de las observaciones microscópicas se recogen en un anexo adjunto al documento.

En la siguiente página se expone un resumen de las especies caracterizadas de protistas y metazoos en los diferentes puntos de muestreo (tabla 23).

Tabla 23: Resumen de protistas y metazoos identificados.					
Grupo taxonómico	Especie	RB LM	RB MF	HA FMF	HA Sub
GRANDES FLAGELADOS					
Euglénidos	<i>Entosiphon</i> sp.	+			
	<i>Peranema trichophorum</i>	+		+	
AMEBAS					
Amebas testáceas					
Arcellinida	<i>Centropyxis</i> sp.	+	+		+
Euglyphida	<i>Euglypha</i> sp.			+	+
	<i>Trinema</i> sp.				+
Amebas desnudas	Amoeba >5 µm	+			
Actinópodos	<i>Heliozo</i> sp.			+	
CILIADOS					
Heterotricos	<i>Stentor roeselii</i>			+	
	<i>Spirostomun</i> sp.			+	+
Estichotricos	<i>Oxytricha</i> sp.			+	
Hipotricos	<i>Aspidisca cicada</i>	+	+	+	
Filofariéngenos	<i>Trochilia minuta</i>	+	+		
Peniculinos	<i>Paramecium</i> sp.			+	
Escuticociliados	<i>Cinetochilum margaritaceum</i> .	+	+		
	<i>Dextiostricha granulosa</i>	+		+	
Peritricos	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	+	+	+	+
	Complejo <i>Vorticella convallaria</i>			+	+
	Complejo <i>Vorticella microstoma</i>	+			
Haptóridos	<i>Acinera uncinata</i>	+		+	
	<i>Litonotus lamella</i>	+		+	
Prorodontidos	<i>Holophrya</i> sp.	+	+	+	+
Prostomatidos	<i>Metacystis galiani</i>	+	+	+	
METAZOOS					
Rotíferos	<i>Cephalodella</i> sp.			+	
	<i>Rotaria</i> sp.			+	
Anélidos	<i>Aelosoma variegatum</i>		+	+	
Gastrotricos	Gastrotricos				+
Nematodos	Nematodos	+	+	+	+
OTROS ORGANISMOS					
Artrópodos	Acaro			+	+

RB LM: Presencia en el reactor biológico. Licor mezcla.

RB MF: Presencia en el reactor biológico. Macrófitas en flotación.

HA FMF: Presencia en el humedal artificial con macrófitas en flotación

HA Sub: Presencia en el humedal artificial de flujo subsuperficial.

4.3.1 Reactor biológico. Licor mezcla.

La siguiente figura muestra las especies de microorganismos identificados en el licor mezcla y su evolución durante el periodo de estudio considerado.

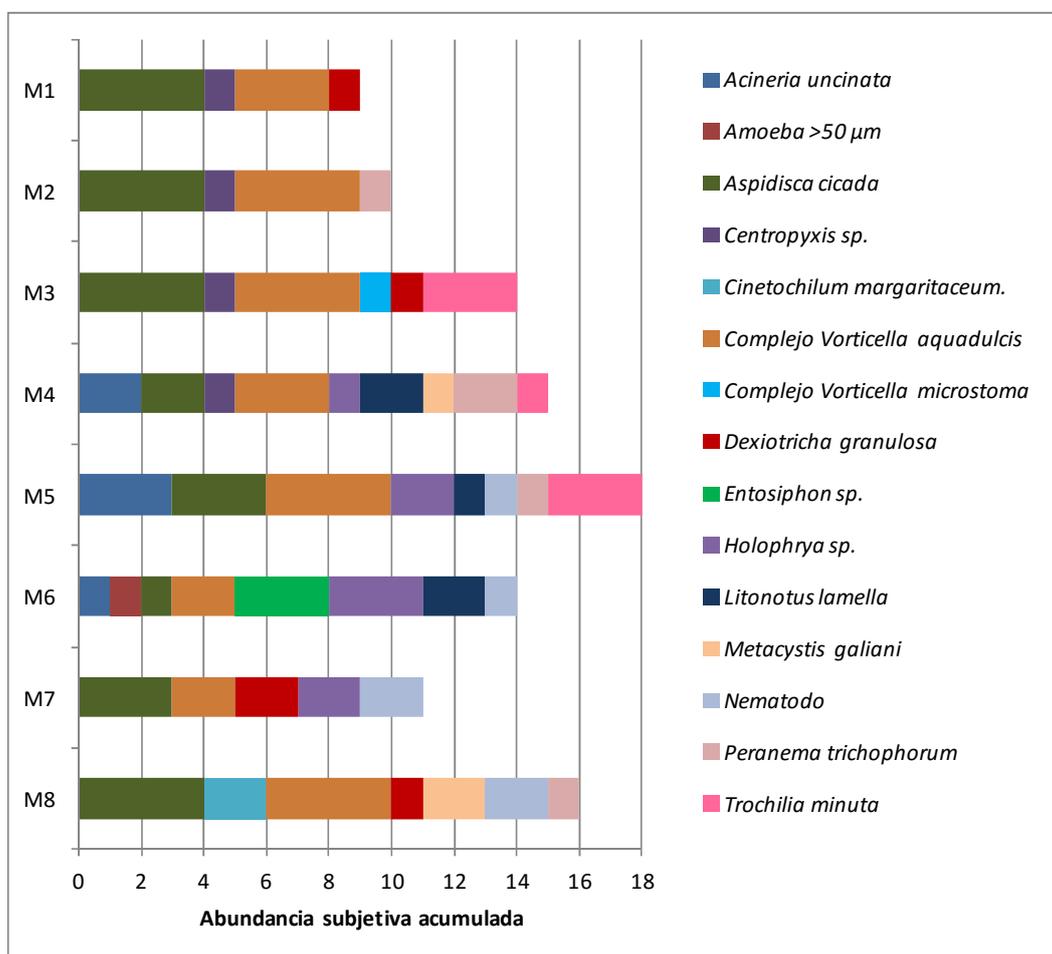


Figura 31: Dinámica poblacional de protistas y metazoos del licor mezcla.

Se han caracterizado la presencia entre cuatro a nueve especies en cada muestreo, constatándose un total de quince especies diferentes en el periodo que comprende el estudio. Los protistas ciliados han sido el grupo de mayor representación.

El muestreo M4 fue donde más biodiversidad se encontró, con nueve especies diferentes, seguido de M5 y M6 con ocho especies diferentes.

En M1 y M2 la comunidad de protistas y metazoos estaba formada principalmente por dos especies (*Aspidisca cicada* y Complejo *Vorticella aquadulcis*) siendo anecdótica la presencia del resto de especies identificadas.

El muestreo que ha obtenido una abundancia subjetiva acumulada mayor ha sido M5. Es este uno de los muestreos con más biodiversidad y donde existía una densidad mayor de los protistas y metazoos catalogados.

La ocurrencia o frecuencia de aparición de las diferentes especies identificadas se indica en la tabla contigua junto con la ocurrencia como especie dominante y secundaria.

Tabla 24: Ocurrencia (frecuencia aparición) de especies identificadas en el licor mezcla. Ocurrencia global; ocurrencia como especie dominante y secundaria.

	% Ocurrencia Total	% Ocurrencia Dominante	% Ocurrencia Secundaria
<i>Acineria uncinata</i>	38%	0%	13%
<i>Amoeba >50 µm</i>	13%	0%	0%
<i>Aspidisca cicada</i>	100%	50%	25%
<i>Centropyxis sp.</i>	50%	0%	0%
<i>Cinetochilum margaritaceum.</i>	13%	0%	0%
Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	100%	50%	25%
Complejo <i>Vorticella microstoma</i>	13%	0%	0%
<i>Dexiotricha granulosa</i>	50%	0%	0%
<i>Entosiphon sp.</i>	13%	0%	13%
<i>Holophrya sp.</i>	50%	0%	13%
<i>Litonotus lamella</i>	38%	0%	0%
<i>Metacystis galiani</i>	25%	0%	0%
Nematodo	50%	0%	0%
<i>Peranema trichophorum</i>	50%	0%	0%
<i>Trochilia minuta</i>	38%	0%	25%

La tabla siguiente agrupa las especies catalogadas como dominante y secundaria, en los diferentes muestreos.

Tabla 25: Especies valoradas en el licor mezcla como “Dominante” y “Secundario”.

	Valoración abundancia “Dominante”	Valoración abundancia “Secundario”
M1	<i>Aspidisca cicada</i>	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>
M2	<i>Aspidisca cicada</i> Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	-
M3	<i>Aspidisca cicada</i> Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	<i>Trochilia minuta</i>
M4	-	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>
M5	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	<i>Acineria uncinata</i> <i>Aspidisca cicada</i> <i>Trochilia minuta</i>
M6	-	<i>Entosiphon sp.</i> <i>Holophrya sp.</i>
M7	-	<i>Aspidisca cicada</i>
M8	<i>Aspidisca cicada</i> Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	-

Como puede observarse en la tabla 24, con una ocurrencia del 100% se encontraron individuos de *Aspidisca cicada* y Complejo *Vorticella aquadulcis*. En el 50% de los muestreos estos microorganismos se presentaron como la especie dominante y en un 25% fueron la especie secundaria; siendo las especies mayoritarias que conforman la biota de protistas y metazoos en el periodo de estudio considerado.

En tres de los ocho muestreos realizados se describen como especies codominantes *Aspidisca cicada* y el Complejo *Vorticella aquadulcis*.

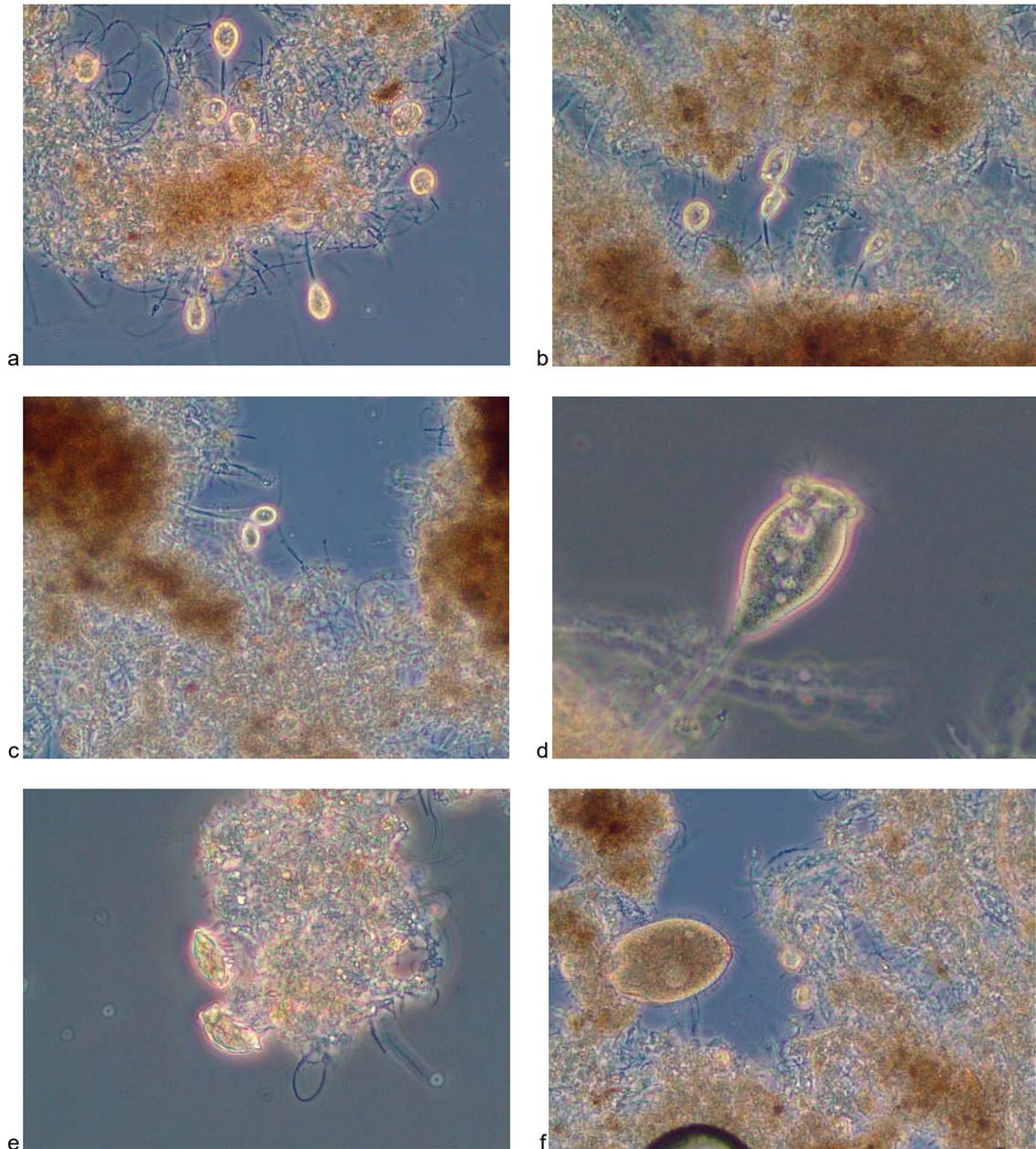


Figura 32: Imágenes de especies catalogadas en el licor mezcla (contraste de fases): a, b y c) Complejo *Vorticella aquadulcis* (200x); d) Detalle del Complejo *Vorticella aquadulcis* (400x); e) *Aspidisca cicada* (200x); f) *Holophrya* sp (200x).

Otras especies catalogadas con una abundancia alta (dominante o secundario) en alguno de los muestreos han sido: *Trochilia minuta*, *Acineria uncinata*, *Entosiphon* sp. y *Holophrya* sp.

Entosiphon sp. y *Holophrya* sp. únicamente se presentaron como especie predominante en M6 coincidiendo por un periodo de fuertes lluvias los días anteriores al muestreo.

Durante el análisis microscópico se advirtió también: en M5 el reactor sufrió un episodio de abundancia de bacterias filamentosas (figura 33b); en M7 se distinguieron la presencia de muchos pequeños protistas reptantes.

El flóculo del licor mezcla presenta, en general, durante el periodo de estudio un aspecto bien desarrollado con una estructura regular y compacta.

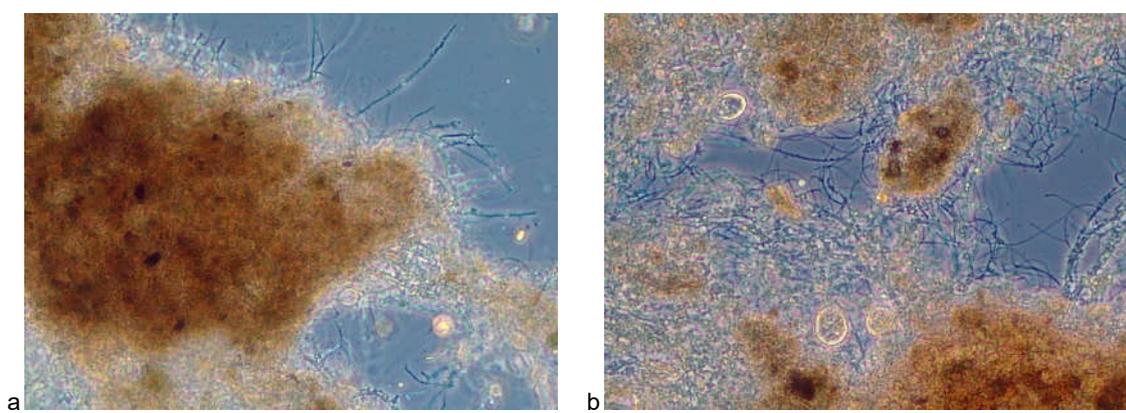


Figura 33: Imágenes del flóculo del licor mezcla (contraste de fases; 200x): a) aspecto usual; b) apariencia en M5 durante el episodio de abundancia de bacterias filamentosas.

4.3.2 Reactor biológico. Macrófitas en flotación.

Los individuos identificados en la biopelícula de las raíces de las macrófitas del reactor biológico se representan en la figura adjunta así como su evolución durante el periodo de estudio considerado.

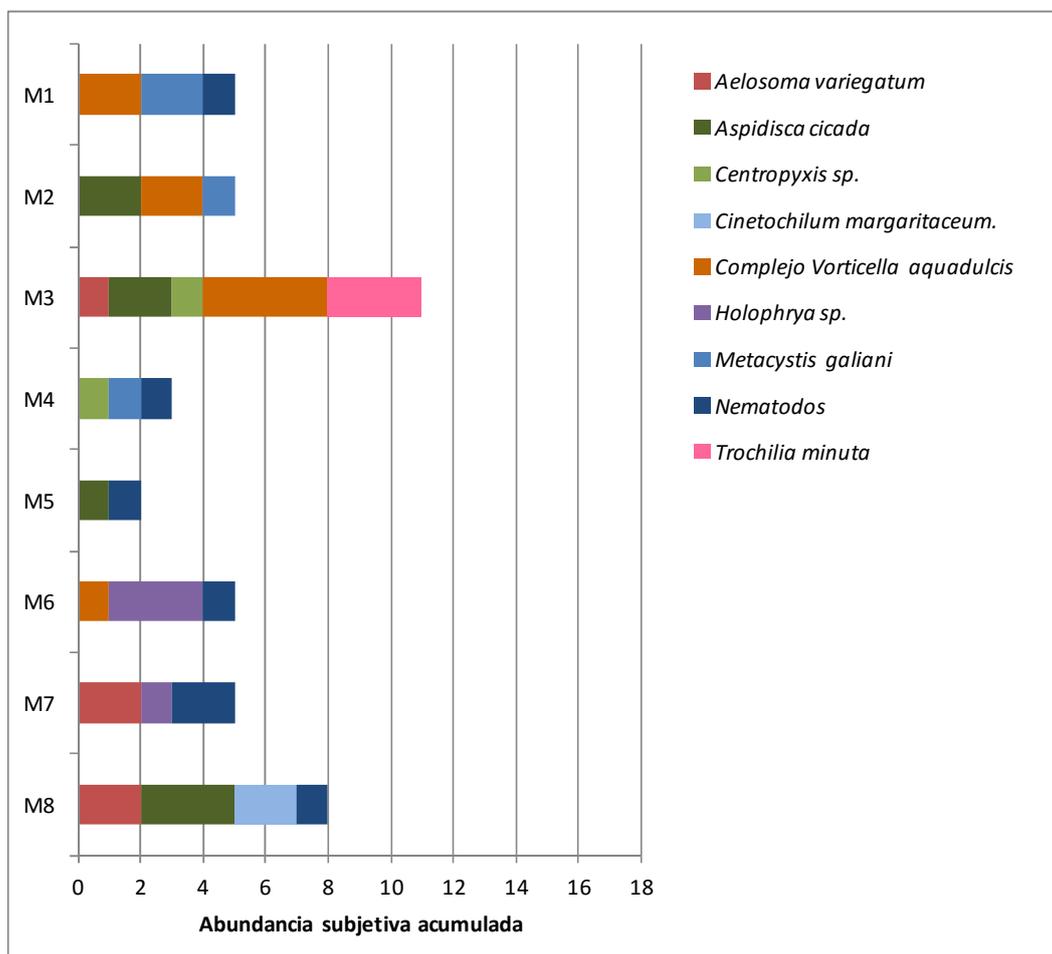


Figura 34: Dinámica poblacional de protistas y metazoos en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico.

Entre dos a cinco especies se catalogaron en cada muestreo, constatándose un total de nueve especies diferentes durante el proceso de estudio. El grupo de mayor representación ha sido el de los protistas ciliados.

El muestreo con más biodiversidad fue M3 con cinco especies diferentes, seguido del M8 con cuatro especies diferentes.

Además de ser M3 y M8 los muestreos donde se ha detectado más biodiversidad, estos muestreos también han obtenido la mayor abundancia subjetiva acumulada. Son los muestreos donde existían una densidad mayor de los protistas y metazoos descritos.

En M4 y M5 la comunidad de protistas y metazoos en estos muestreos fue leve identificándose pocas especies y muy poco abundantes.

La tabla adyacente refleja la ocurrencia o frecuencia de aparición de las diferentes especies identificadas junto con la ocurrencia como especie dominante y secundaria.

Tabla 26: Ocurrencia (frecuencia aparición) de especies identificadas en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico. Ocurrencia global; ocurrencia como especie dominante y secundaria.

	% Ocurrencia Total	% Ocurrencia Dominante	% Ocurrencia Secundaria
<i>Aelosoma variegatum</i>	38%	0%	0%
<i>Aspidisca cicada</i>	50%	0%	13%
<i>Centropyxis</i> sp.	25%	0%	0%
<i>Cinetochilum margaritaceum</i> .	13%	0%	0%
Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	50%	13%	0%
<i>Holophrya</i> sp.	25%	0%	13%
<i>Metacystis galiani</i>	38%	0%	0%
Nematodo	75%	0%	0%
<i>Trochilia minuta</i>	13%	0%	13%

La tabla siguiente agrupa las especies caracterizadas como dominante y secundaria, en los diferentes muestreos.

Tabla 27: Especies valoradas en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico como "Dominante" y "Secundario".

	Valoración abundancia "Dominante"	Valoración abundancia "Secundario"
M1	-	-
M2	-	-
M3	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	<i>Trochilia minuta</i>
M4	-	-
M5	-	-
M6	-	<i>Holophrya</i> sp.
M7	-	-
M8	-	<i>Aspidisca cicada</i>

En el 75% de los muestreos se ha observado la presencia de nematodos en las raíces de las macrófitas (tabla 26). Con una ocurrencia del 50% se encontraron individuos de *Aspidisca cicada* y Complejo *Vorticella aquadulcis*.

En general el número de individuos de las especies descritas no ha sido elevado. M3 es el muestreo con más número de individuos y biodiversidad.

El Complejo *Vorticella aquadulcis* es la única especie que apareció como dominante (ocurrencia del 13%). Se han descrito como especies valoradas como secundarias a *Aspidisca cicada*, *Holophrya* sp. y *Trochilia minuta* todas con una ocurrencia del 13%.

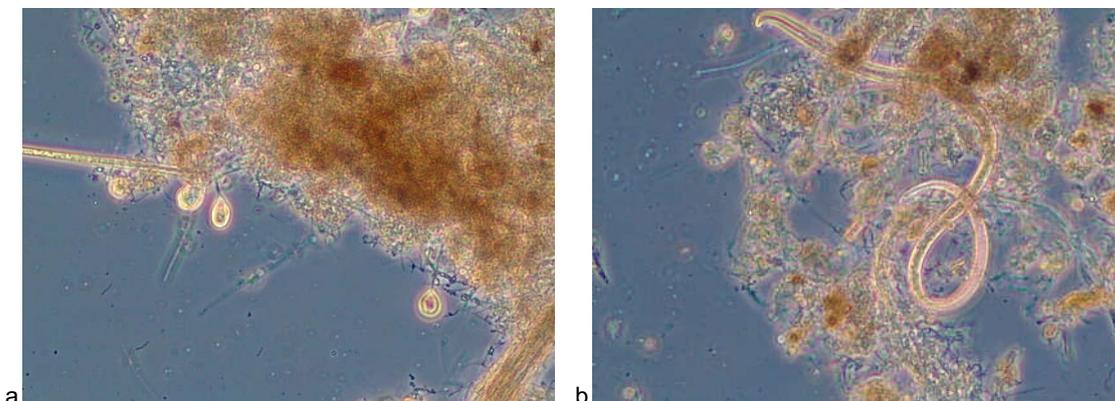


Figura 35: Imágenes de especies catalogadas en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico (contraste de fases; 200x): a) Complejo *Vorticella aquadulcis*; b) Nematodo.

Dada su importancia como especie reductora del volumen de fangos (Ratsak, 2006) se ha de resaltar la presencia de *Aelosoma variegatum* en las raíces de las macrófitas ubicadas en el reactor biológico. A nivel macroscópico se han hallado con cierta abundancia en todos los muestreos pero su presencia a nivel microscópico no ha sido muy relevante (ocurrencia del 38%).



Figura 36: Imágenes de *Aelosoma variegatum*.

El aspecto mostrado por el flóculo (biopelícula) es de maduro y bien desarrollado. En comparación con el del licor mezcla, este mostraba una apariencia mucilaginosa y menos compacta con mayor presencia de bacterias filamentosas, encontrándose entre ellas *Beggiatoa sp.* En general el aspecto proporcionado por el flóculo es similar al de las biopelículas de los sistemas fijos de tratamiento de aguas.

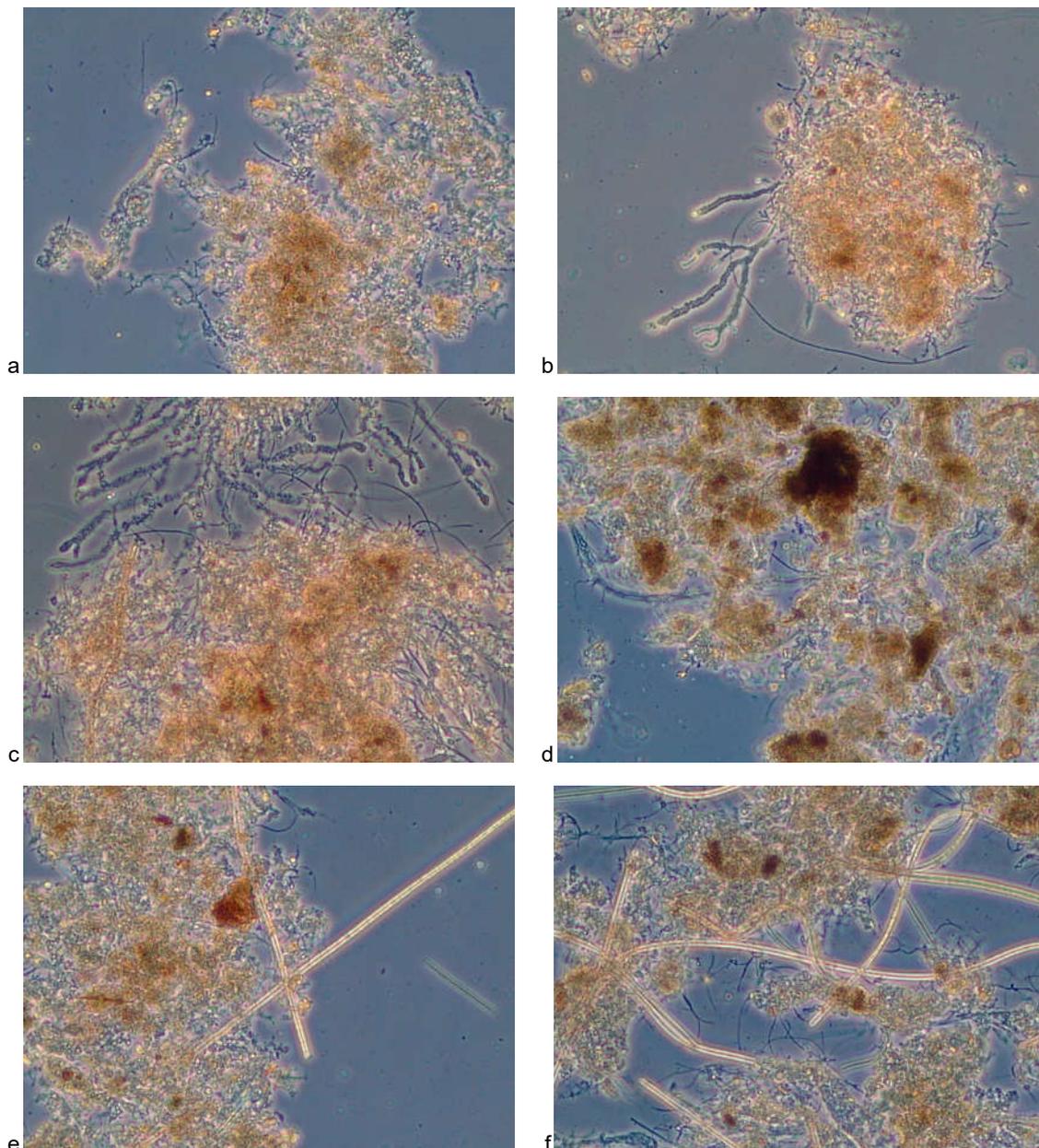


Figura 37: Imágenes del flóculo (biopelícula) de las macrofitas del reactor biológico (contraste de fases; 200x): a, b, c y d) aspecto usual; e y f) apariencia en M7 con abundancia de *Beggiatoa sp*

Durante el análisis microscópico se advirtió también: en M7 aumentó considerablemente la presencia de *Beggiatoa sp* en la biopelícula (figura 37e y 37f).

4.3.3 Humedal artificial con macrófitas en flotación.

Los microorganismos presentes en las raíces del humedal artificial con macrófitas en flotación se muestran en la figura adjunta.

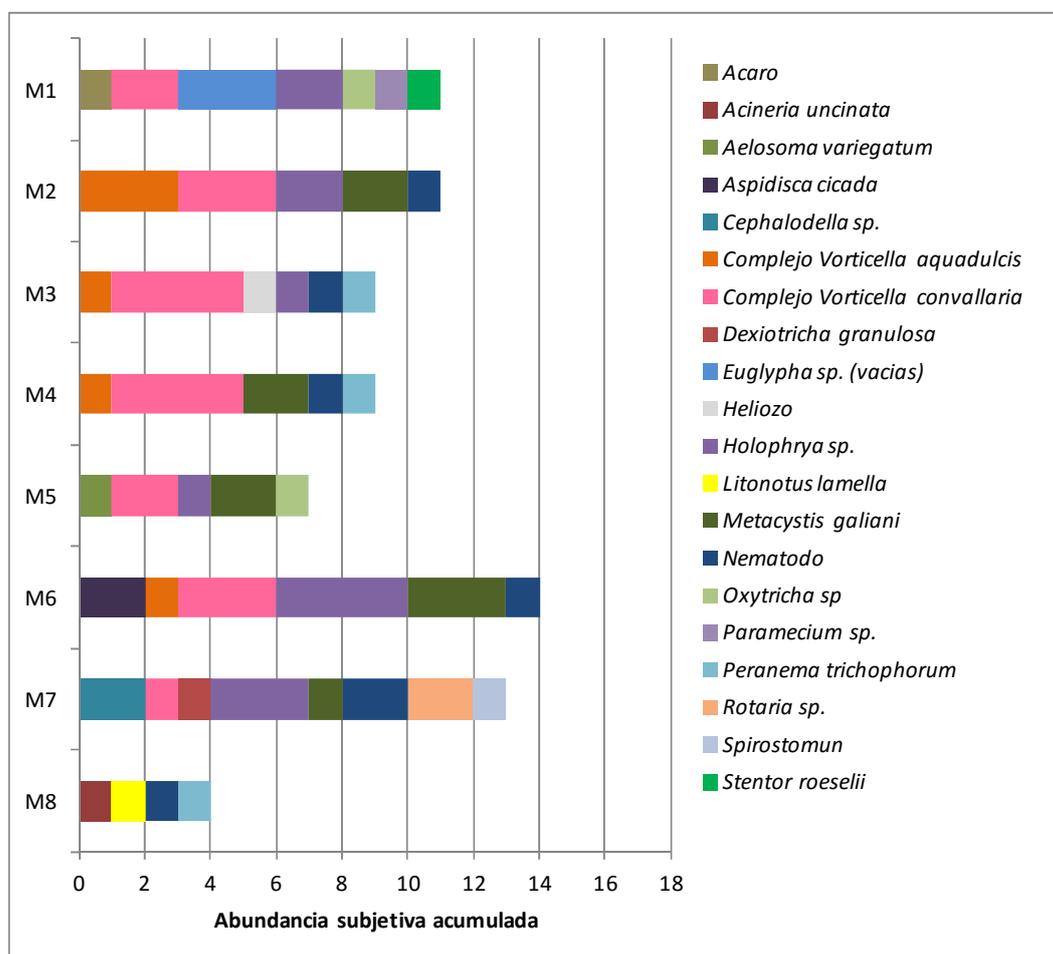


Figura 38: Dinámica poblacional de protistas y metazoos de las macrófitas del FMF.

El número de especies identificadas en cada muestreo oscila entre cuatro a ocho especies, constatándose un total de veinte especies diferentes en el periodo de estudio.

El muestreo M7 ha sido donde más biodiversidad se ha hallado con ocho especies diferentes, seguido del M1 con siete especies diferentes.

En el último muestreo realizado, M8, la comunidad de protistas y metazoos era escasa. Fue donde menos especies se identificaron y los organismos presentes eran muy poco abundantes.

Los muestreos que ha obtenido una abundancia subjetiva acumulada mayor ha sido M6. Es en este muestreo donde había más protistas y metazoos con una densidad alta.

La ocurrencia o frecuencia de aparición de las diferentes especies identificadas se indica en la tabla aneja, junto con la ocurrencia como especie dominante y secundaria.

Tabla 28: Ocurrencia (frecuencia aparición) de especies identificadas en las macrófitas del FMF. Ocurrencia global; ocurrencia como especie dominante y secundaria.

	% Ocurrencia Total	% Ocurrencia Dominante	% Ocurrencia Secundaria
Acaro	13%	0%	0%
<i>Acineria uncinata</i>	13%	0%	0%
<i>Aelosoma variegatum</i>	13%	0%	0%
<i>Aspidisca cicada</i>	13%	0%	0%
<i>Cephalodella sp.</i>	13%	0%	0%
Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	50%	0%	13%
Complejo <i>Vorticella convallaria</i>	88%	25%	25%
<i>Dexiotricha granulosa</i>	13%	0%	0%
<i>Euglypha sp. (vacía)</i>	13%	0%	13%
<i>Heliozo sp.</i>	13%	0%	0%
<i>Holophrya sp.</i>	75%	13%	13%
<i>Litonotus lamella</i>	13%	0%	0%
<i>Metacystis galiani</i>	63%	0%	13%
Nematodo	75%	0%	0%
<i>Oxytricha sp</i>	25%	0%	0%
<i>Paramecium sp.</i>	13%	0%	0%
<i>Peranema trichophorum</i>	38%	0%	0%
<i>Rotaria sp.</i>	13%	0%	0%
<i>Spirostomun</i>	13%	0%	0%
<i>Stentor roeselii</i>	13%	0%	0%

La tabla siguiente agrupa las especies catalogadas como dominante y secundaria, en los diferentes muestreos.

Tabla 29: Especies valoradas en las macrófitas del FMF como "Dominante" y "Secundario".

	Valoración abundancia "Dominante"	Valoración abundancia "Secundario"
M1	-	<i>Euglypha sp. (vacía)</i>
M2	-	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i> Complejo <i>Vorticella convallaria</i>
M3	Complejo <i>Vorticella convallaria</i>	-
M4	Complejo <i>Vorticella convallaria</i>	-
M5	-	-
M6	<i>Holophrya sp.</i>	Complejo <i>Vorticella convallaria</i> <i>Metacystis galiani</i>
M7	-	<i>Holophrya sp.</i>
M8	-	-

El organismo con una frecuencia de aparición más elevada ha sido el Complejo *Vorticella convallaria* con una ocurrencia del 88% (catalogado en 7 de los 8 muestreos realizados). Adicionalmente *Holophrya* sp. y Nematodos se han descrito con una ocurrencia del 75 % y *Metacystis galiani* del 63%.

Solo en tres de los muestreos realizados se catalogaron la presencia organismo con una abundancia dominante: el Complejo *Vorticella convallaria* con el 25% de ocurrencia y *Holophrya* sp. del 13%. Las especies valoradas como secundarias han sido: Complejo *Vorticella convallaria*, Complejo *Vorticella aquadulcis*, *Metacystis galiani* con una ocurrencia del 25% la primera y del 13% el resto.

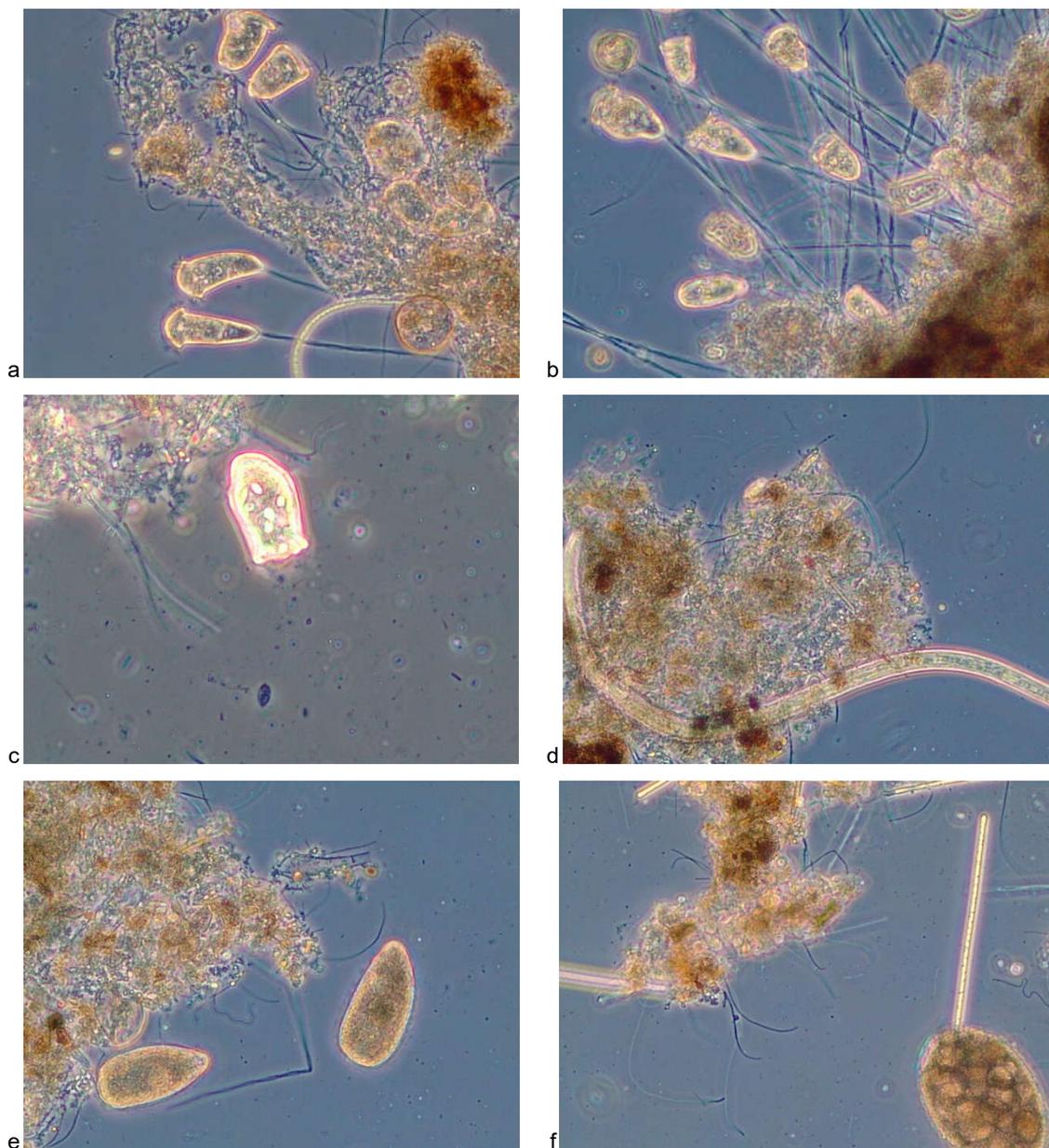


Figura 39: Imágenes de especies catalogadas en la biopelícula de las macrófitas del FMF (contraste de fases): a y b) Complejo *Vorticella convallaria* (200x); c) Detalle del zoide del Complejo *Vorticella convallaria* (400x); d) Nematodo (200x); e y f) *Holophrya* sp (200x).

El flóculo (biopelícula) es de constitución similar al desarrollado en el reactor, algo más maduro y siendo mayor el número de filamentos presentes de la bacteria filamentosas del genero *Beggiatoa* sp.

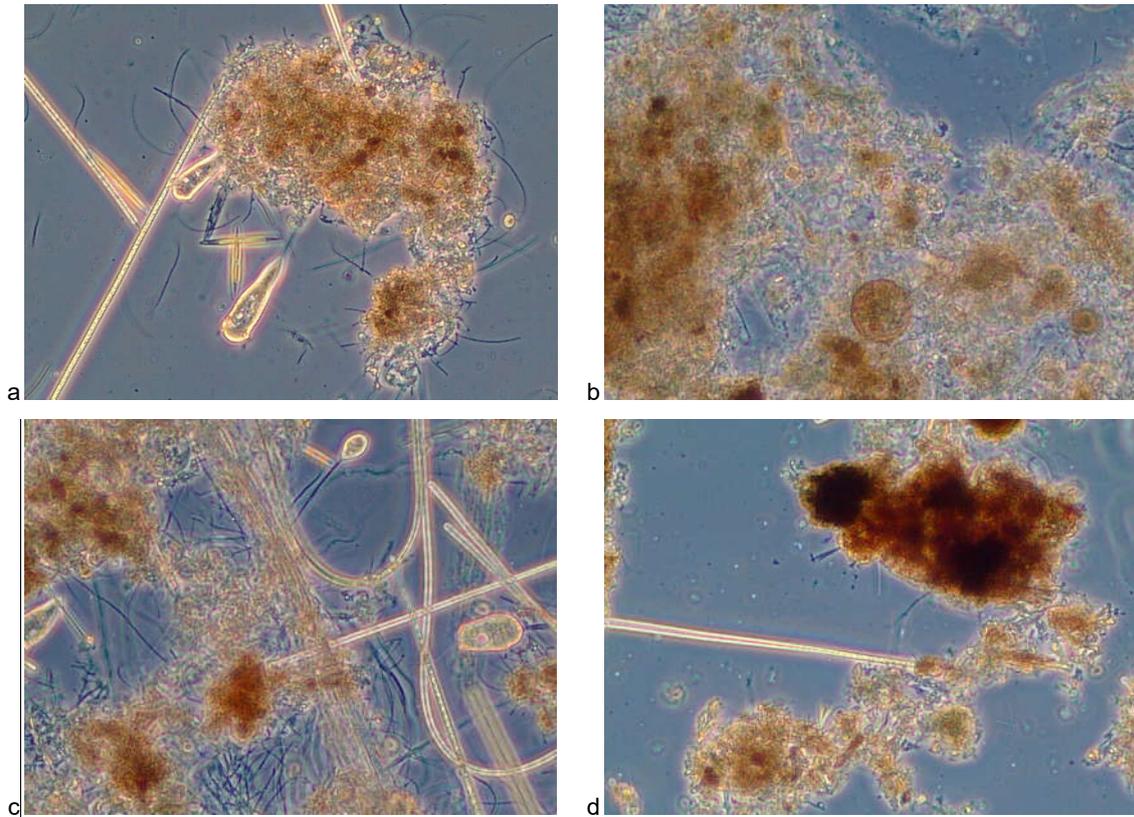


Figura 40: Imágenes del flóculo (biopelícula) de las macrófitas del FMF (contraste de fases; 200x).

Otras observaciones realizadas en el análisis microscópico fueron: la presencia *Beggiatoa* sp en la biopelícula fue abundante en todos los muestreos, en general, a excepción de M5 donde se redujo su cantidad; aparición de los zooides del Complejo *Vorticella convallaria* en M3 (figura 39c).

4.3.4 Humedal artificial de flujo subsuperficial.

Las especies clasificadas en las raíces del humedal artificial de flujo subsuperficial se muestran en la figura adjunta.

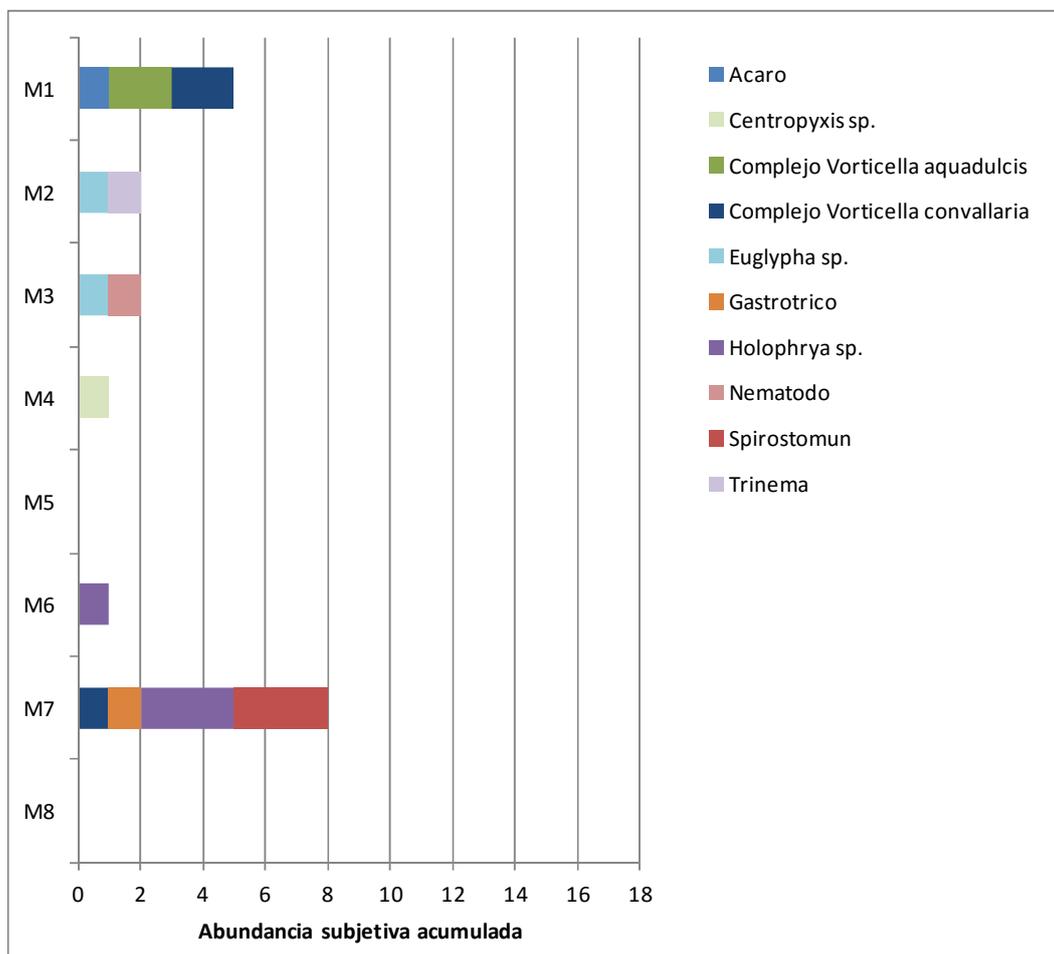


Figura 41: Dinámica poblacional de protistas y metazoos de las macrófitas del HA flujo subsuperficial.

Se han identificado la presencia entre cuatro a cero especies en cada muestreo, constatándose un total de diez especies diferentes en el tiempo que ha durado el estudio.

El muestreo M7 fue en el cual más biodiversidad se encontró con cuatro especies diferentes, seguido del M1 con tres especies diferentes. En M5 y M8 no se hallaron individuos para identificar.

La abundancia acumulada en este punto de muestreo ha sido muy baja a excepción de M7 y M1 que son los muestreos donde se obtuvo más biodiversidad.

La ocurrencia o frecuencia de aparición de las diferentes especies identificadas se indica en la tabla contigua junto con la ocurrencia como especie dominante y secundaria.

Tabla 30: Ocurrencia (frecuencia aparición) de especies identificadas en las macrófitas HA flujo subsuperficial. Ocurrencia global; ocurrencia como especie dominante y secundaria.

	% Ocurrencia Total	% Ocurrencia Dominante	% Ocurrencia Secundaria
<i>Acaro</i>	13%	0%	0%
<i>Centropyxis sp.</i>	13%	0%	0%
<i>Complejo Vorticella aquadulcis</i>	13%	0%	0%
<i>Complejo Vorticella convallaria</i>	25%	0%	0%
<i>Euglypha sp.</i>	25%	0%	0%
<i>Gastrotrico</i>	13%	0%	0%
<i>Holophrya sp.</i>	25%	0%	13%
<i>Nematodo</i>	13%	0%	0%
<i>Spirostomun sp.</i>	13%	0%	13%
<i>Trinema sp.</i>	13%	0%	0%

La tabla siguiente agrupa las especies descritas como dominante y secundaria, en los diferentes muestreos.

Tabla 31: Especies valoradas en las macrófitas HA flujo subsuperficial como "Dominante" y "Secundario".

	Valoración abundancia "Dominante"	Valoración abundancia "Secundario"
M1	-	-
M2	-	-
M3	-	-
M4	-	-
M5	-	-
M6	-	-
M7	-	<i>Holophrya sp.</i> <i>Spirostomun sp.</i>
M8	-	-

En general la ocurrencia de los microorganismos identificados es muy baja presentándose pocos individuos y muy dispersos a excepción de M7 donde se identificó *Holophrya sp.* y *Spirostomun sp.* con una valoración de abundancia de secundario.

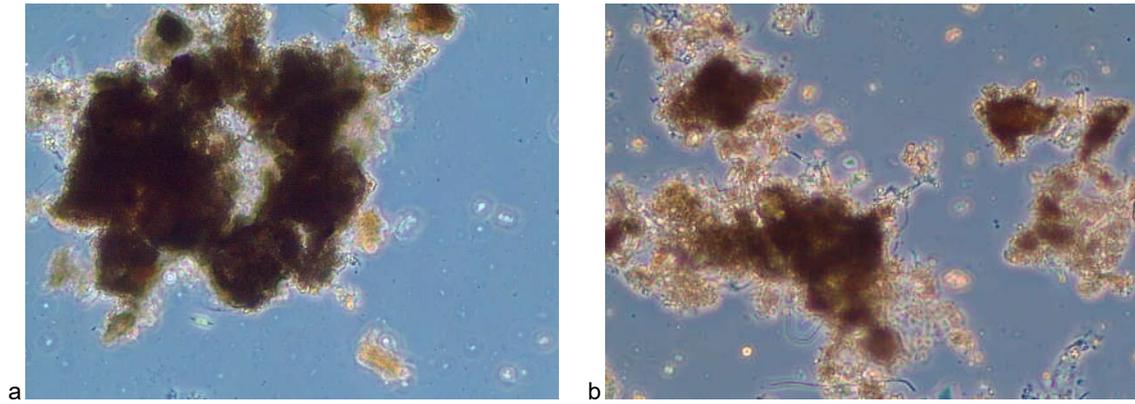


Figura 42: Imágenes del flóculo (biopelícula) de las macrófitas HA flujo subsuperficial (contraste de fases; 200x).

El flóculo (biopelícula) presenta un aspecto muy maduro con una estructura regular y compacta. La presencia de bacterias filamentosas es escasa.

4.4 Relaciones con las variables fisicoquímicas y operacionales.

Para determinar las posibles relaciones entre los protistas y metazoos identificados en los distintos puntos de muestreo con las variables fisicoquímicas y operacionales se han representado gráficamente la evolución de los microorganismos en el tiempo con las diferentes variables.

Para simplificar la representaciones gráficas únicamente se grafican los organismos catalogados con una abundancia elevada (dominante y/o secundario) y los descritos con una frecuencia de aparición superior al 70%.

Las figuras adjuntas de los siguientes apartados muestran una selección de las gráficas realizadas. La totalidad de las gráficas pueden consultarse en el anexo correspondiente.

4.4.1 Reactor biológico. Licor mezcla.

La figura 43 muestra la dinámica poblacional de los microorganismos identificados en el licor mezcla durante el periodo de estudio considerado con los niveles de DQO, DBO₅, NT y PT del agua afluyente a la planta.

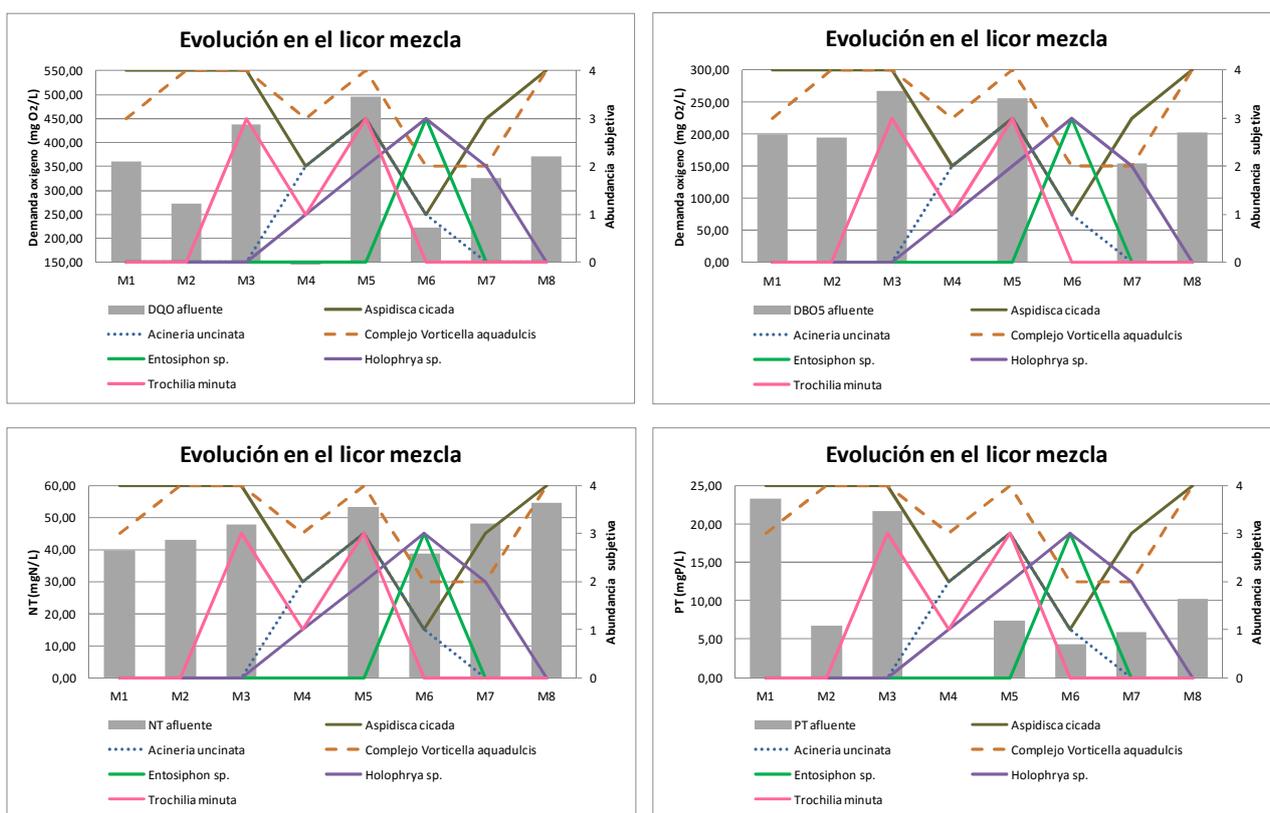


Figura 43: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con las variables fisicoquímicas (DQO, DBO₅, NT y PT) del agua afluyente a la planta.

Como se ha visto en el apartado 4.3.1 la biota del licor mezcla se encuentra principalmente formada por *Aspidisca cicada* y *Complejo Vorticella aquadulcis*. Estos

organismos en las gráficas de la figura 43 aparecen de forma abundante tanto con valores bajos y altos de la DQO, DBO₅, NT y PT.

En referencia a *Entosiphon* sp y *Holophrya* sp. se observa un aumento de número al reducirse drásticamente la DQO del afluente en un muestreo (M6) coincidiendo este con un periodo de fuertes lluvias. En contraposición *Trochilia minuta* asciende su abundancia cuando la DQO y DBO₅ alcanzan su mayor valor.

Las siguientes gráficas (figura 44) detallan la evolución de microorganismos con los resultados de SST, SSVT, pH, CE, OD y T^a del reactor biológico.

En estas gráficas *Aspidisca cicada* y Complejo *Vorticella aquadulcis* no reflejan ninguna tendencia con las variables aquí representadas. Presentándose de forma abundante en todo el rango de valores.

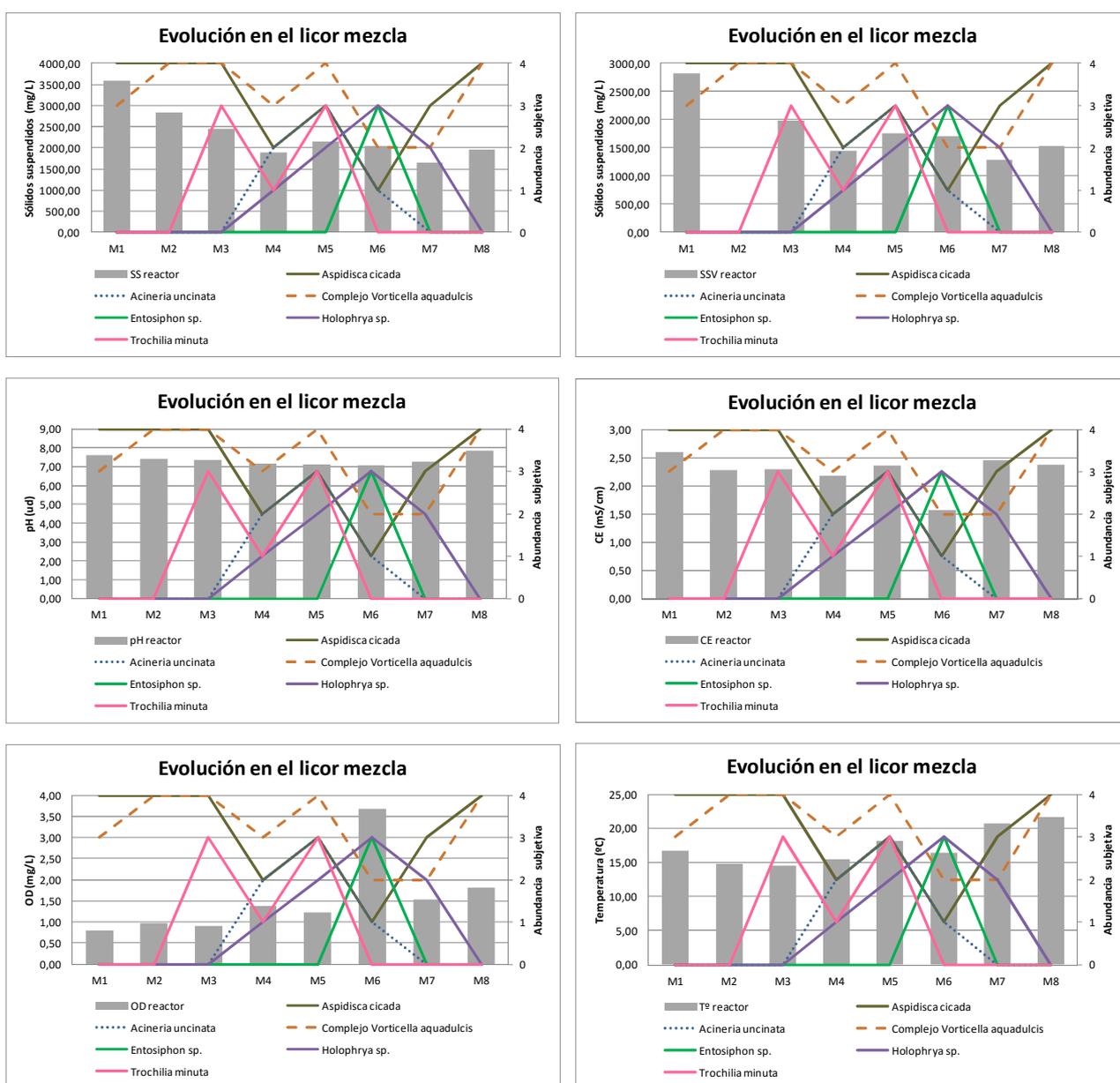


Figura 44: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con las variables fisicoquímicas (SST, SSVT, pH, CE, OD y T^a) del reactor biológico.

En la figura 44 se puede observar el aumento de individuos de *Entosiphon* sp y *Holophrya* sp al reducirse drásticamente la CE del reactor y aumentar el OD en este.

En la siguiente figura se reflejan gráficamente (figura 45) las relaciones de los protistas y metazoos con las variables fisicoquímicas del agua efluente del decantador secundario (DQO, DBO₅, SST, NT, N-NH₄, N-NO₃, PT, P-PO₄).

Tal y como ocurre con las gráficas anteriores, en la figura 45 la presencia abundante de *Aspidisca cicada* y Complejo *Vorticella aquadulcis* se produce en una amplia escala de resultados.

En la figura también se puede observar un incremento de los individuos de *Entosiphon* sp y *Holophrya* sp cuando la DBO₅ del efluente es inferior a 10 mgO₂/L y el N-NH₄ desciende por debajo de los 0,6 mg/L.

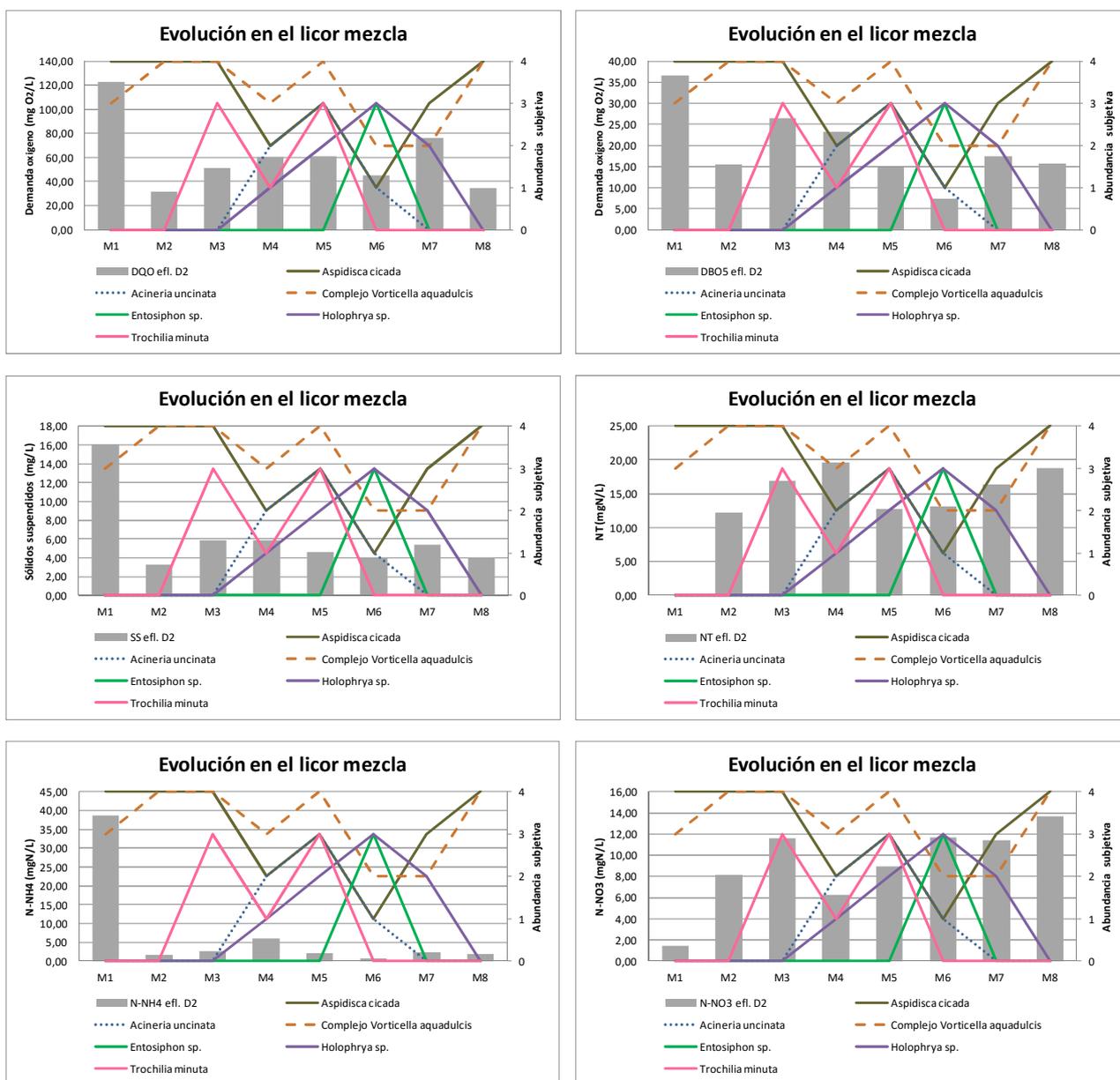


Figura 45: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con las variables fisicoquímicas (DQO, DBO₅, SST, NT, N-NH₄, N-NO₃, PT, P-PO₄) del agua efluente del decantador secundario.

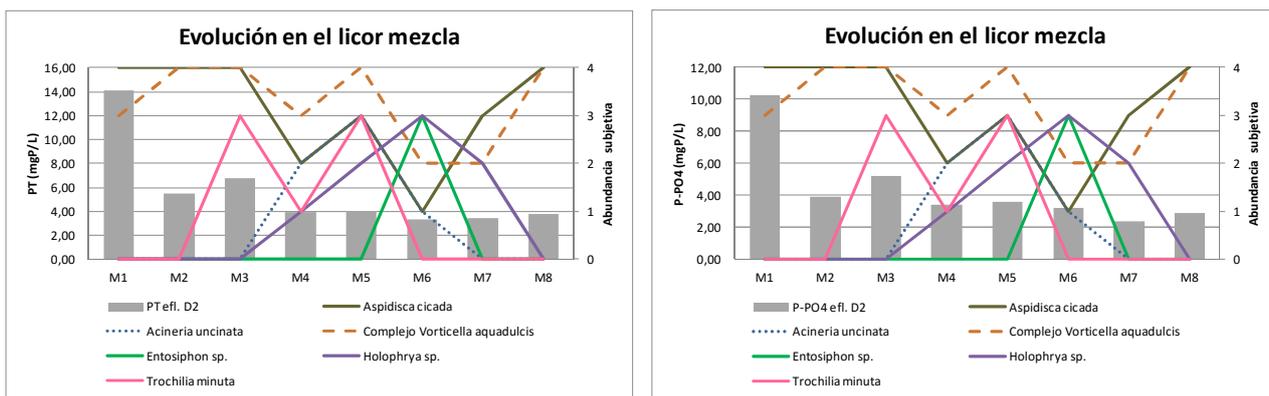


Figura 45bis: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con las variables fisicoquímicas (DQO, DBO₅, SST, NT, N-NH₄, N-NO₃, PT, P-PO₄) del agua efluente del decantador secundario.

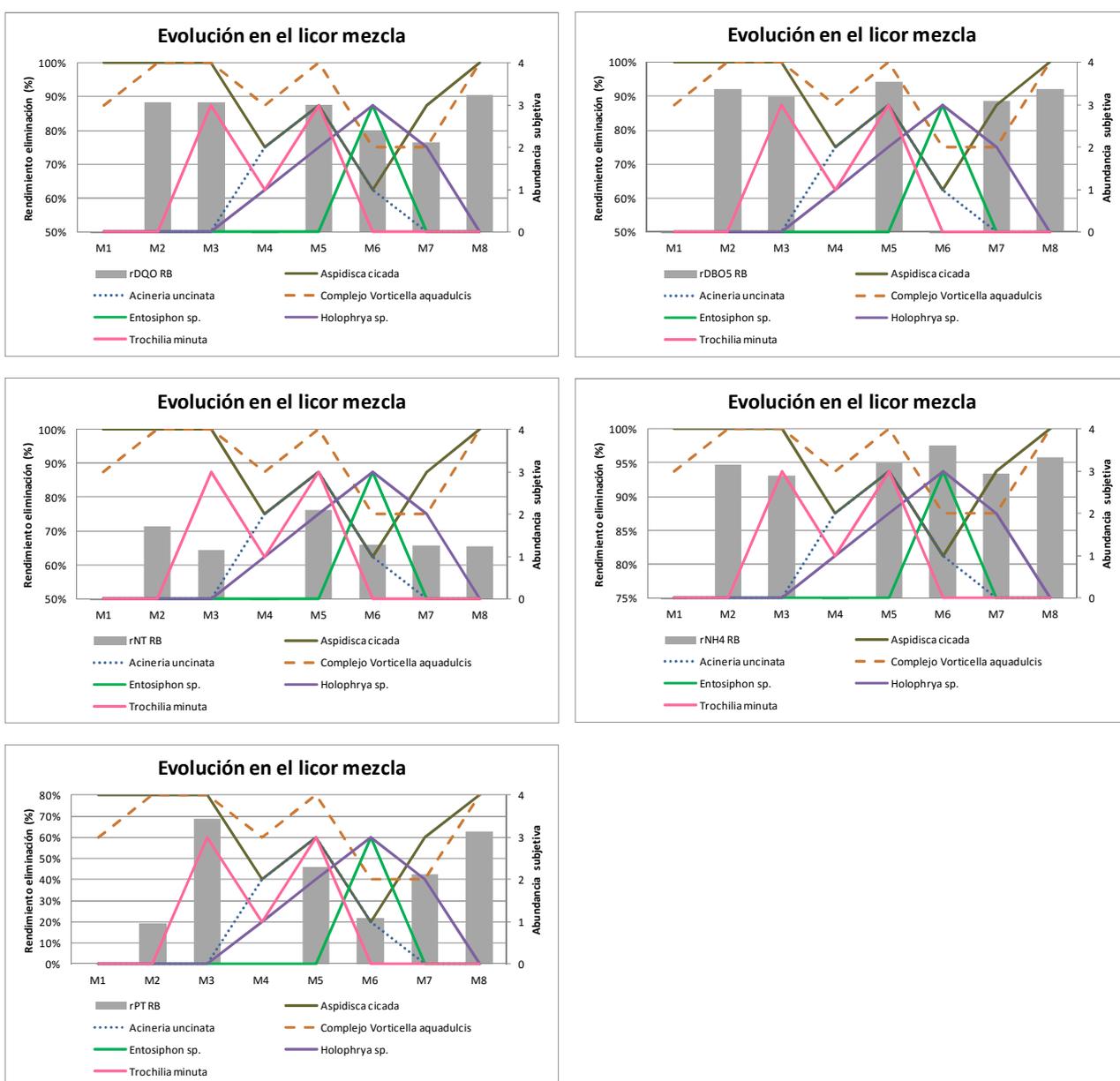


Figura 46: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con los rendimientos de eliminación de contaminantes del reactor biológico.

La relación de los rendimientos de eliminación de contaminantes en el reactor biológico con los protistas y metazoos catalogados aparecen reflejados en la figura adjunta (figura 46).

Como es deducible por los resultados anteriormente obtenidos, *Entosiphon* sp y *Holophrya* sp obtienen su mayor densidad cuando la planta alcanza su máximo rendimiento de eliminación de NH₄ próximo al 98%.

La figura 47 ilustra la evolución poblacional de los protistas y metazoos definidos en el licor mezcla durante el periodo de estudio considerado con las variables operacionales de la planta IVFD y Cm.

Aspidisca cicada y Complejo *Vorticella aquadulcis* no refleja ninguna tendencia plausible con la Cm e IVFD en las gráficas de la figura 47, presentándose de forma abundante en un amplio intervalo de valores. Con referencia a *Trochilia minuta* este organismo se ha descrito con una densidad elevada cuando la Cm se sitúa próxima a los 0,08 Kg_{DBO5}/kg_{SST}.día.

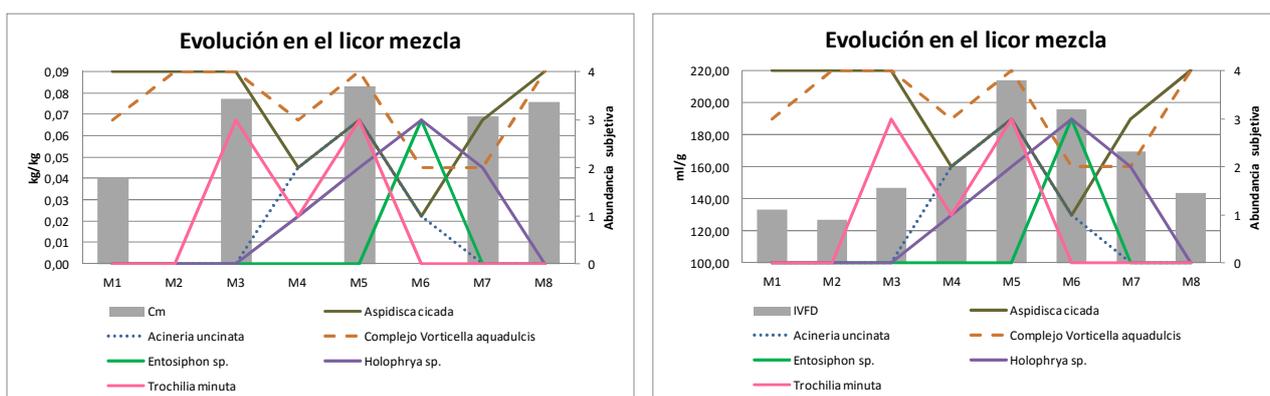


Figura 47: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en el licor mezcla con las variables operacionales (Cm e IVF).

4.4.2 Reactor biológico. Macrófitas en flotación.

Las gráficas de la figura 48 agrupan a los individuos identificados en la biopelícula de las raíces de las macrófitas del reactor biológico con los resultados de la DQO, DBO₅, NT y PT del agua afluyente a la planta.

La gráfica de la DQO muestra un aumento de la abundancia de *Holophrya* sp cuando el valor de la DQO alcanza su resultado más bajo próximo a los 200 mgO₂/L. La densidad del resto de organismos no parece tener vinculación alguna con el resultado de la DQO.

Trochilia minuta y Complejo *Vorticella aquadulcis* alcanzan su mayores densidades cuando la DBO₅ del agua afluyente a la planta obtiene su valor más elevado superior a los 260 mgO₂/L.

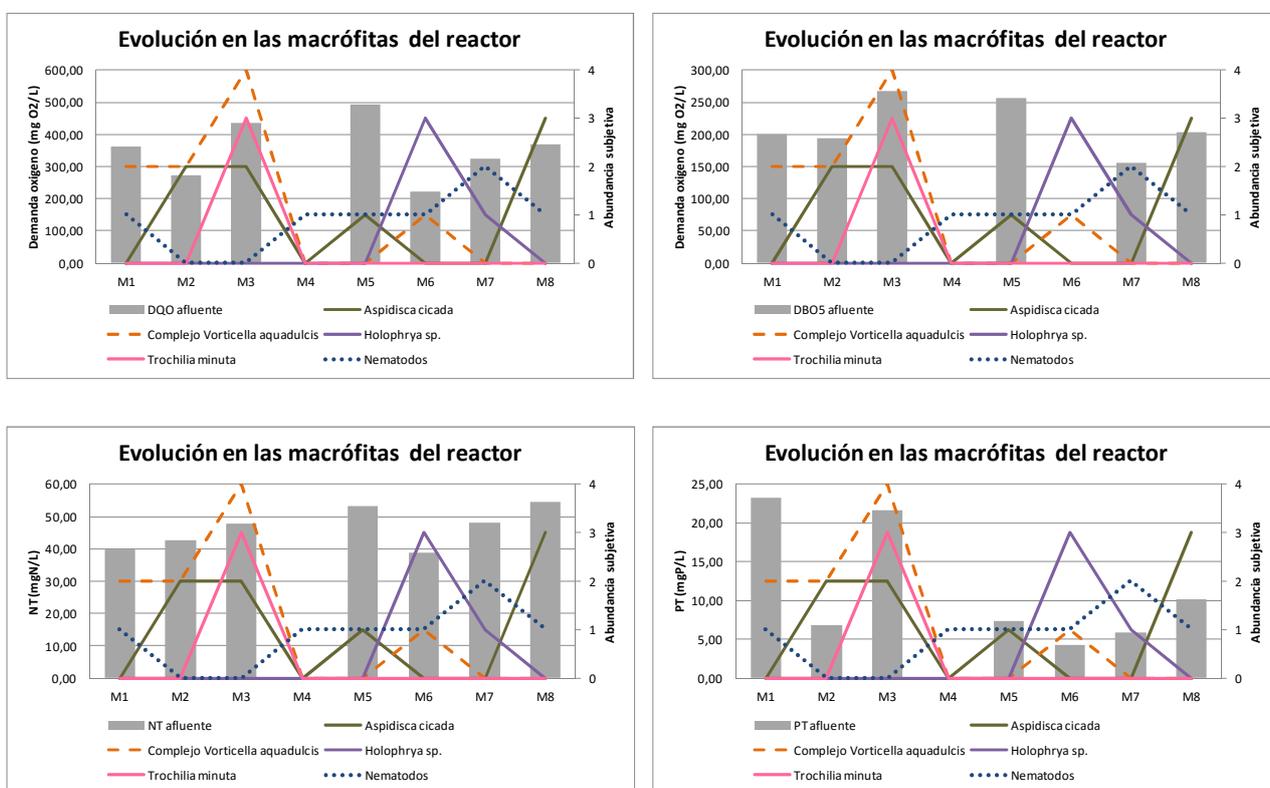


Figura 48: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con las variables fisicoquímicas (DQO y DBO₅) del agua afluyente a la planta.

La figura 49 detalla la dinámica poblacional de los microorganismos identificados en la biopelícula de las macrófitas del reactor durante el periodo de estudio considerado con los resultados de SST, SSVT, pH, CE, OD y T^a del reactor biológico.

La figura muestra una abundancia elevada de *Holophrya* sp al reducirse drásticamente la CE del reactor y amentar el OD en este.

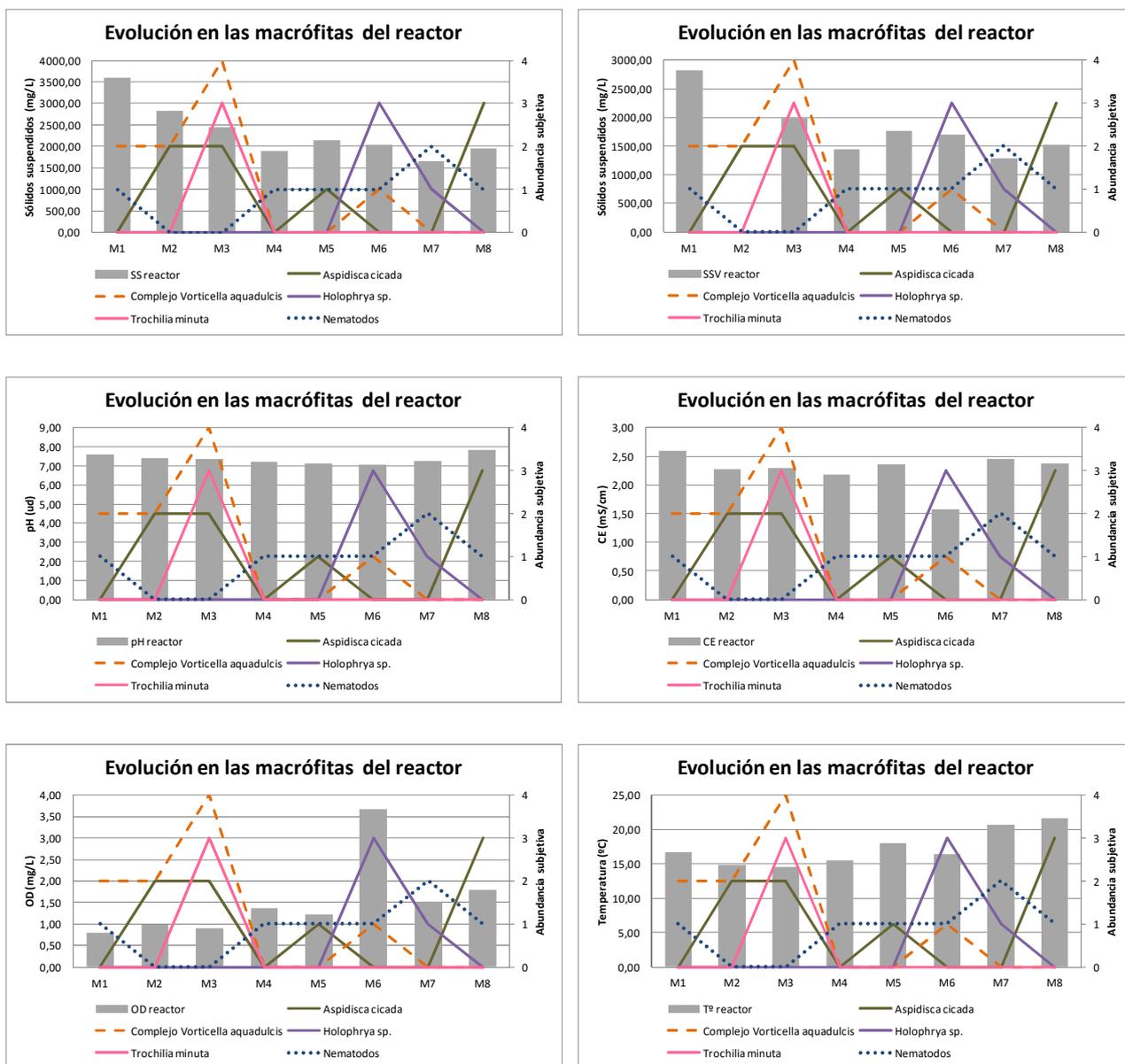


Figura 49: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con las variables fisicoquímicas (SST, SSV, pH, CE, OD y Tª) del reactor biológico.

En la siguiente página se reflejan gráficamente (figura 50) las relaciones de los protistas y metazoos con las variables fisicoquímicas del agua efluente del decantador secundario (DQO, DBO₅, SST, NT, N-NH₄, N-NO₃, PT, P-PO₄).

La gráfica de la DBO₅ muestra un aumento de la presencia de *Trochilia minuta* y Complejo *Vorticella aquadulcis* que adquieren sus mayores densidades cuando el resultado de la DBO₅ alcanza su máximo valor (exceptuando el resultado de M1).

En la figura también se puede observar un incremento de los individuos de *Holophrya sp* cuando la DBO₅ del efluente es inferior a 10 mgO₂/L y el N-NH₄ desciende por debajo de los 0,6 mgN/L.



Figura 50: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con las variables fisicoquímicas (DQO, DBO₅, SST, NT, N-NH₄, N-NO₃, PT, P-PO₄) del agua efluente del decantador secundario.

Las siguientes gráficas (figura 51) detallan la evolución de microorganismos con los rendimientos de eliminación de contaminantes en el reactor biológico.

Cuando la planta alcanza su máximo rendimiento de eliminación de NH_4 próximo al 98% la gráfica reflejan una abundancia alta *Holophrya* sp.

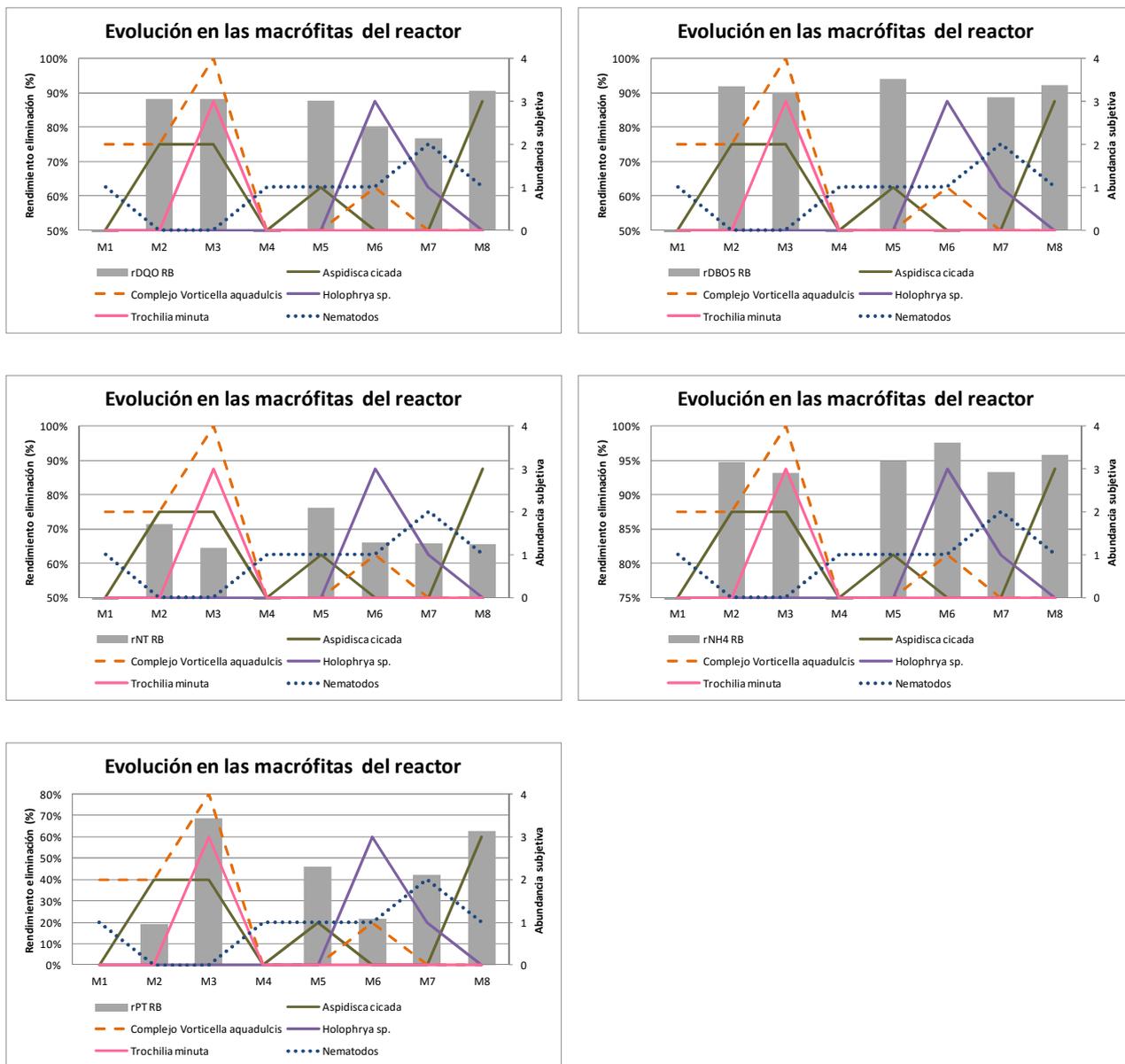


Figura 51: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con los rendimientos de eliminación de contaminantes del reactor biológico.

La figura 52 ilustra la evolución poblacional de los protistas y metazoos definidos en la biopelícula de las raíces de las macrófitas del reactor biológico durante el periodo de estudio considerado con las variables operacionales de la planta IVFD y Cm

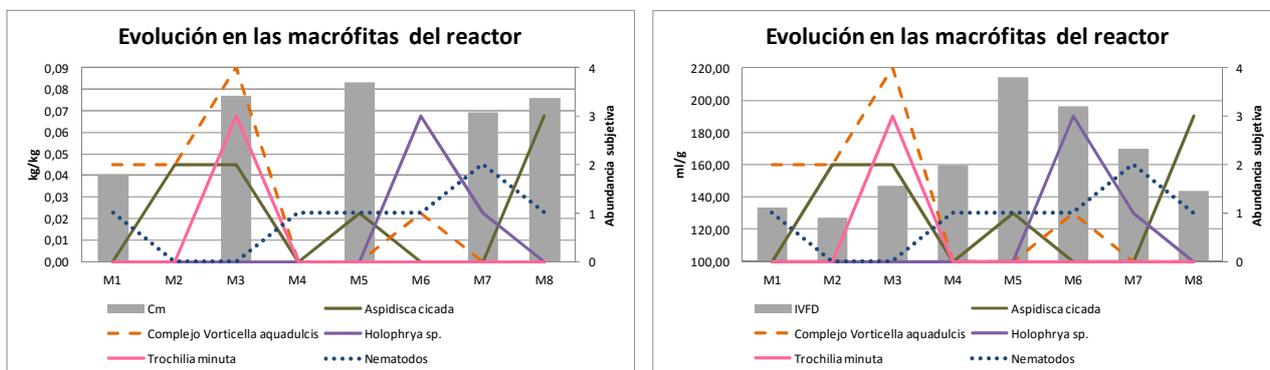


Figura 52: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del reactor biológico con las variables operacionales (Cm e IVF).

4.4.3 Humedal artificial con macrófitas en flotación.

La figura 53 refleja la evolución poblacional de los protistas y metazoos identificados en la biopelícula de la vegetación del humedal artificial con macrófitas en flotación con los resultados de DQO, NT, N-NH₄, PT, OD y T^a del agua afluyente al humedal artificial.

El Complejo *Vorticella convallaria* es el microorganismo con mayor frecuencia de aparición en la biopelícula de las macrófitas como se ha visto en el apartado 4.3.3; en las gráficas de la figura 53 aparece de forma abundante en todo el intervalo de resultados de las variables consideradas no pudiendo asociarlos a ningún rango de valores.

En la figura también se puede observar un incremento de los individuos de *Holophrya* sp cuando el OD del agua afluyente al humedal es el más alto de los registrados y el N-NH₄ desciende por debajo de los 0,6 mgN/L.

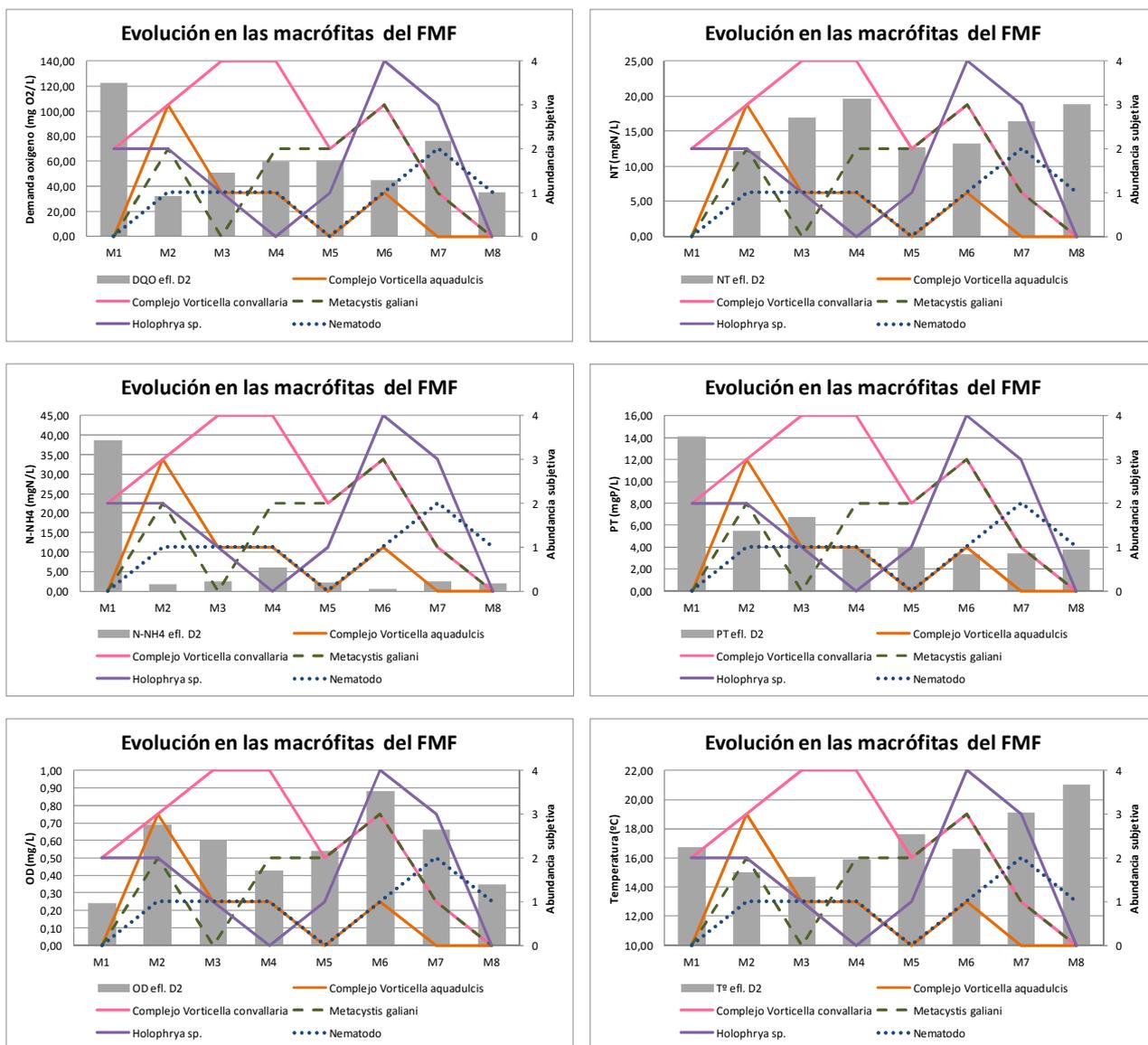


Figura 53: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del FMF con las variables fisicoquímicas (DQO, NT, N-NH₄, PT, OD y T^o) del agua afluente al humedal artificial.

Las gráficas de la figura 54 agrupan a los individuos descritos en la biopelícula de las macrófitas con los resultados de la DQO, NT, N-NH₄ y PT del agua efluente de la planta.

Tal y como ocurre con las gráficas anteriores, en la figura 54 las altas densidades del Complejo *Vorticella convallaria* se produce en una amplia escala de valores de las variables.

Holophrya sp se identifica de forma abundante cuando el NT del agua efluente de la planta desciende por debajo de 6,00 mgN/L y el contenido en N-NH₄ es inferior a los 0,5 mgN/L.

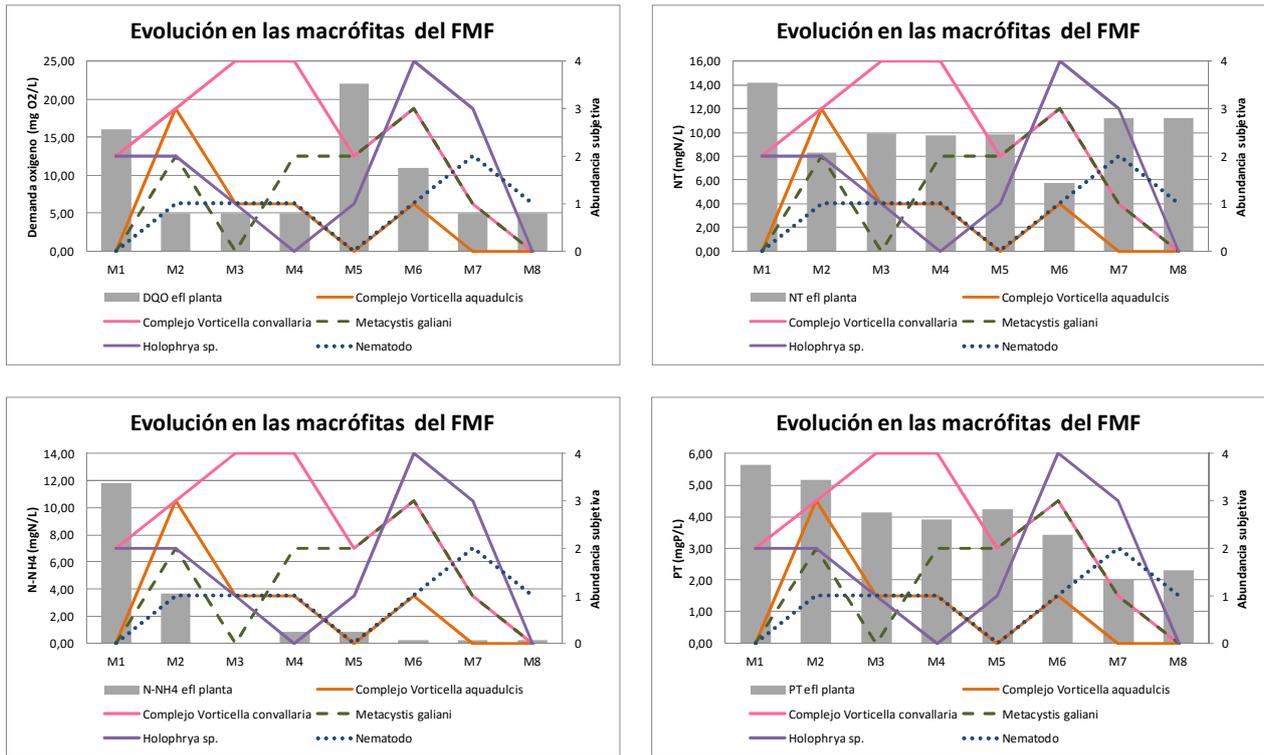


Figura 54: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrofitas del FMF con las variables fisicoquímicas (DQO, NT, N-NH₄ y PT) del agua efluente de la planta.

Las siguientes gráficas (figura 55) detallan la evolución de microorganismos con los rendimientos de eliminación de contaminantes en la planta.

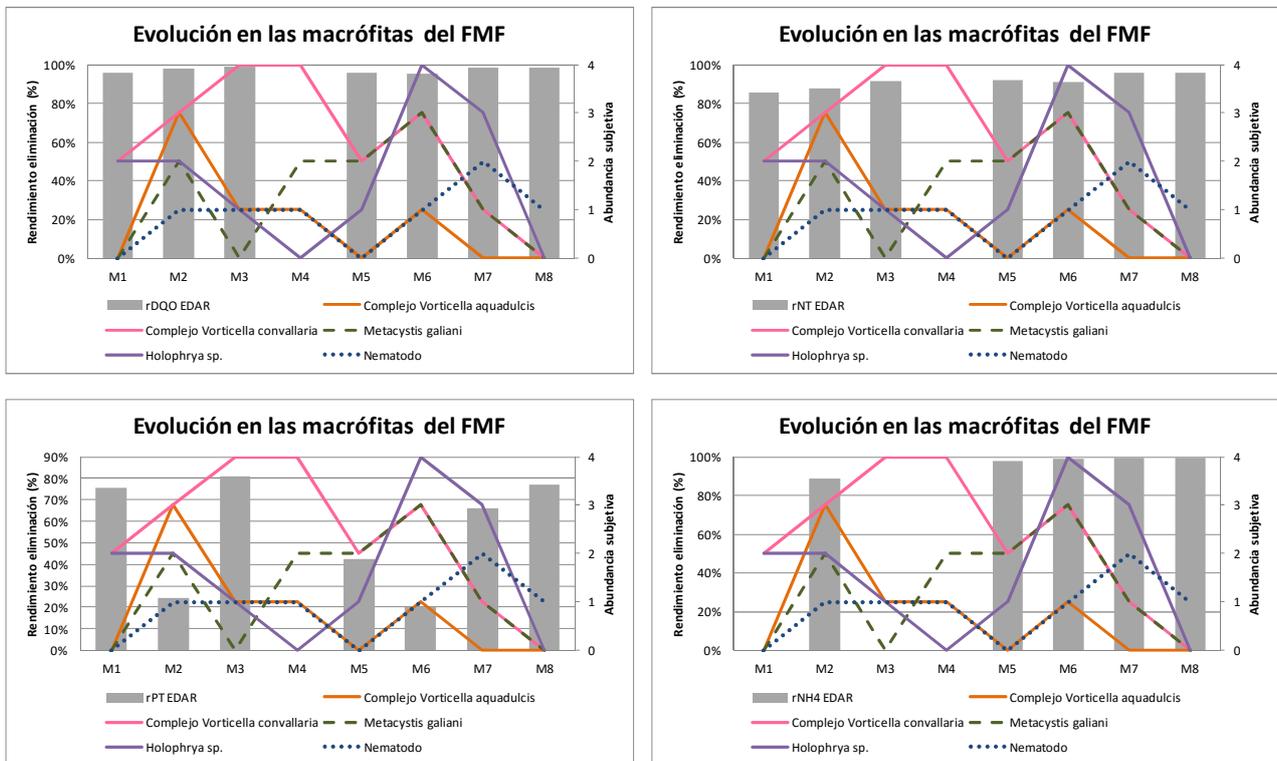


Figura 55: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrofitas del FMF con los rendimientos de eliminación de contaminantes de la planta.

4.4.4 Humedal artificial de flujo subsuperficial.

La figura 56 refleja la evolución poblacional de los protistas y metazoos identificados en la biopelícula de la vegetación del humedal artificial de flujo sub superficial con los resultados de DQO, NT, N-NH₄, PT , OD y T^a del agua afluyente al humedal artificial.

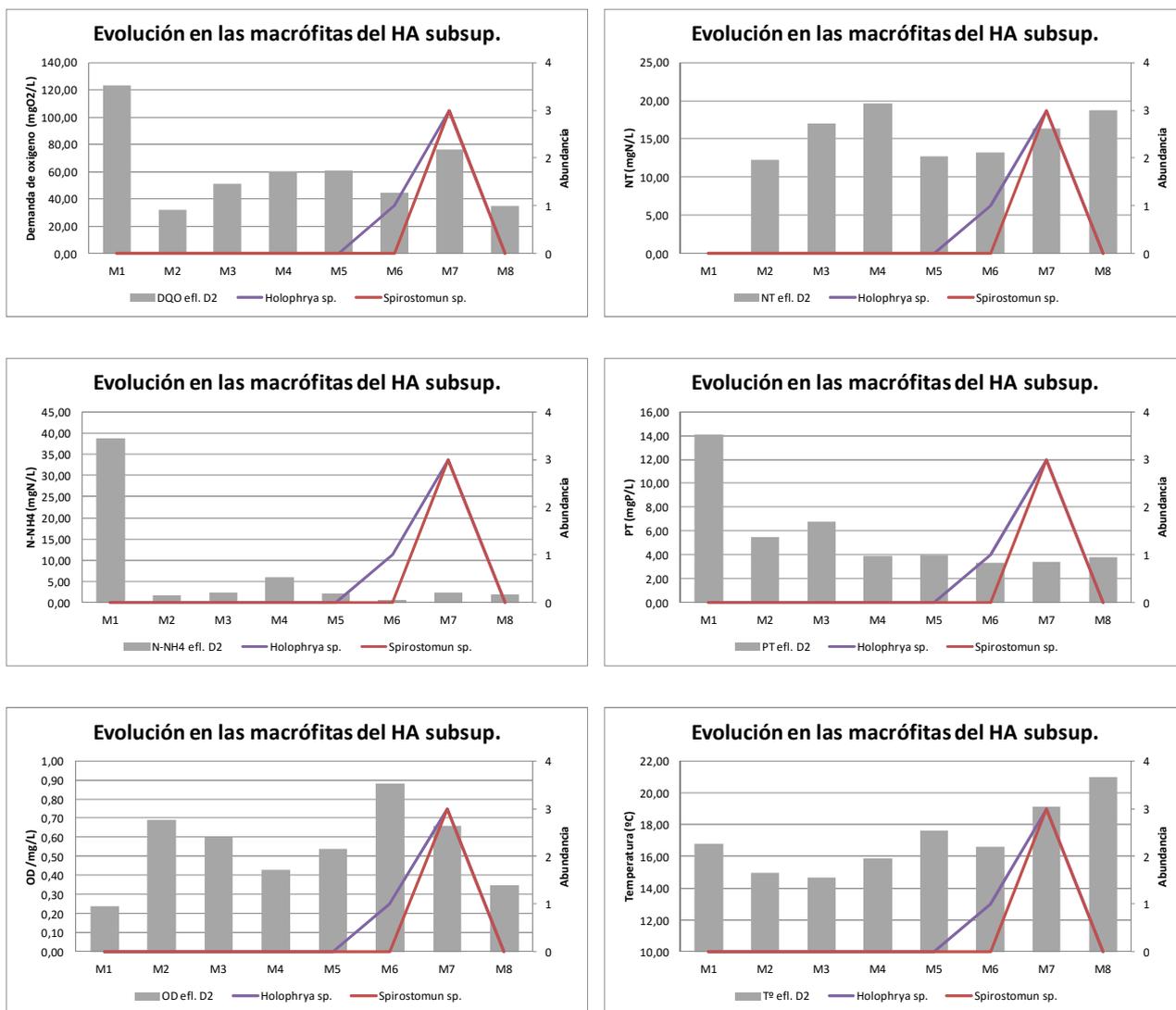


Figura 56: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del humedal artificial de flujo subsuperficial con las variables fisicoquímicas (DQO, NT, N-NH₄, PT , OD y T^a) del agua afluyente al humedal artificial.

Las gráficas de la página siguiente (figura 57) agrupan a los individuos descritos en la biopelícula de las macrófitas con los resultados de la DQO, NT, N-NH₄ y PT del agua efluente de la planta.

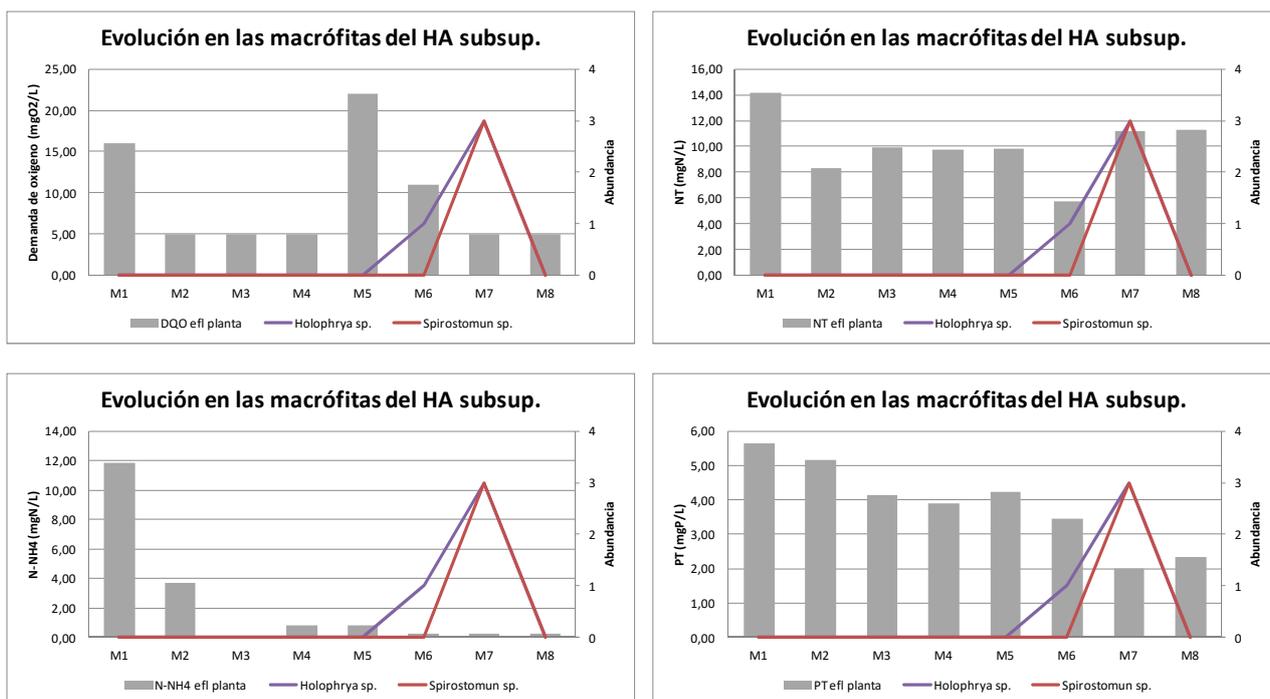


Figura 57: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del humedal artificial de flujo subsuperficial con las variables fisicoquímicas (DQO, NT, N-NH₄ y PT) del agua efluente de la planta.

Las siguientes gráficas (figura 58) detallan la evolución de microorganismos con los rendimientos de eliminación de contaminantes en la planta.

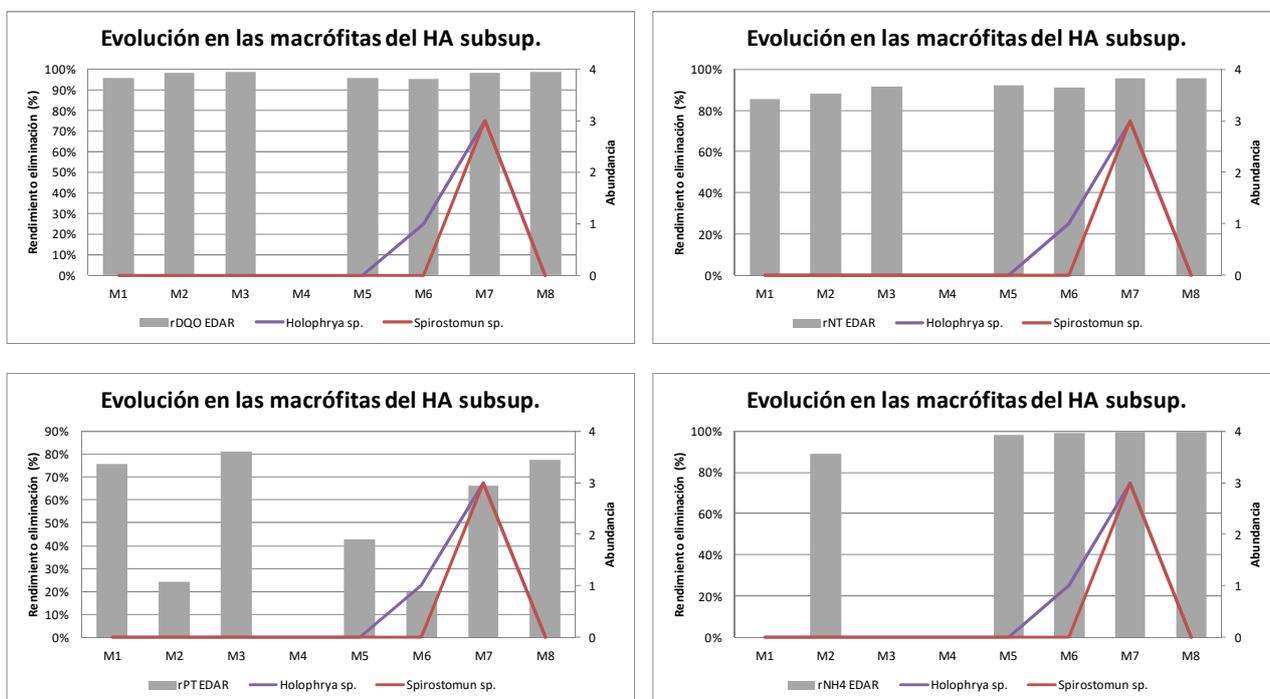


Figura 58: Evolución de los protistas y metazoos caracterizados en la biopelícula de las macrófitas del humedal artificial de flujo subsuperficial con los rendimientos de eliminación de contaminantes de la planta.

DISCUSIÓN

5 DISCUSIÓN.

El principal objetivo del trabajo es realizar un estudio exploratorio de las comunidades y dinámica de los protistas y metazoos presentes en diversas zonas de la línea de aguas (reactor biológico, humedal con macrófitas en flotación y humedal de flujo subsuperficial) de la EDAR en estudio, y en la medida de lo posible determinar las relaciones con las variables fisicoquímicas y operacionales.

El reactor biológico dispone de un sistema inusual de tratamiento de aguas residuales, combinando en un mismo reactor la aireación prolongada con un filtro macrófitas en flotación. Formando un sistema mixto de tratamiento.

Este sistema mixto no ha sido estudiado con anterioridad, no existiendo material bibliográfico con el cual comparar los resultados obtenidos. La confrontación de los resultados obtenidos se ha realizado con documentación procedente de sistemas de tratamiento similares (fangos activos, humedales artificiales, discos rotativos, etc.).

5.1 Condiciones de funcionamiento de la EDAR.

Antes de proceder a exponer el objeto principal de este estudio se comentarán brevemente las condiciones de funcionamiento de la EDAR.

El agua afluente a la planta presenta frecuentes variaciones de la carga contaminante, como han mostrado los datos obtenidos de las variables analizadas. Éstas presentan gran dispersión de los resultados con coeficiente de variación superior al 25% en la mayoría de las variables. La proximidad de la EDAR a las fuentes del vertido, con un colector de entrada de poca longitud, y la escasa homogenización del agua de entrada por un mal uso de la balsa de regulación parecen ser unos de los motivos principales de las características del agua bruta que abastece al reactor biológico.

Los valores medios registrados en el agua de entrada corresponden con un agua residual urbana típica de concentraciones entre débiles y medias según la bibliografía consultada (Ferrer y Seco 2007).

La concentración media de sólidos suspendidos en el reactor biológico durante el periodo de estudio ha sido baja, de 2.317,50 mg/l. Esta concentración es algo inferior para lo que suele ser usual en los sistemas de tratamiento de aireación prolongada. En estos sistemas el rango de SST suele encontrarse entre los 3.000-6.000 mg/l (Ferrer y Seco 2007). El reactor opera con concentraciones inferiores a las habituales y la calidad del efluente es buena. Se obtiene una adecuada eliminación de los contaminantes y se cumple con los requerimientos de vertido marcados en la Directiva Europea (91/271/CEE) a la salida del decantador secundario y en la planta tras el tratamiento con el humedal artificial.

El volumen de fangos en exceso generados al operar la planta con concentraciones de sólidos inferiores a las habituales da como resultado una menor

cantidad de fangos a gestionar. Por tanto, se reduce el coste de gestión de dichos fangos con respecto a las plantas comunes de aireación.

Se sospecha que la concentración de sólidos real del licor mezcla es mucho mayor a los resultados de las analíticas; esta suposición se fundamenta que durante el proceso de extracción de las macrófitas se observó gran cantidad de sólidos retenidos en el sistema radicular, aun cuando la toma de muestras (tanto de las macrófitas como del licor mezcla) se obtuvo con el reactor completamente agitado. Por tanto, en futuras investigaciones sería necesario evaluar los sólidos atrapados en las raíces y su aportación al funcionamiento del sistema. Esta podría ser una de las razones del buen comportamiento del proceso.

El tiempo de retención hidráulico del reactor es elevado, próximo a los dos días, pero se desconoce cuál es caudal de recirculación de los fangos. Esta información hace intuir que la edad de los fangos también es elevada. Tiempos de retención tan elevados proporcionan a la biomasa de más tiempo para la eliminación de la materia orgánica y otros contaminantes del agua. Esto puede ser otro de los motivos para el buen funcionamiento del sistema.

Los resultados del estudios indican que el reactor biológico sufrió un episodio de abundancia de bacterias filamentosas ("*bulking*") en M5, este fenómeno apareció reflejado en el valor de la IVFD de 213,9 ml/g, el mayor de los registrados, y los resultados de la observación microscópica del licor mezcla. Contrariamente a lo que suele ser habitual, la concentración de sólidos en el efluente del decantador secundario no se vio afectada, encontrándose su valor próximo a la media. La presencia de las macrófitas en el decantador y reactor actuó como un filtro en superficie e impidió la transferencia de sólidos suspendidos con mala decantación al efluente.

El rendimiento medio de eliminación de nitrógeno es alto, próximo a 68%. Este valor es elevado para un sistema de aireación prolongada sin proceso de eliminación de nitrógeno. El consumo de nitrógeno por parte de la biomasa no justifica el resultado obtenido aun cuando la edad del fango sea elevada. En los procesos biológicos con nitrificación la remoción del nitrógeno total que entra en el proceso suele situarse entre 5-20% (Metcalf y Eddy ,1995) siendo en este caso muy superior.

Otro sumidero de nitrógeno, que podría explicar el alto rendimiento de eliminación de nitrógeno del sistema, es la vegetación ubicada en la superficie del reactor biológico. La contribución de las macrófitas emergentes como la *Typha* sp se sitúa sobre el 10% cuando tratan aguas residuales urbanas de tipo medio (García y Corzo, 2008) como el actual caso. Aunque este hecho tampoco justifica el rango del rendimiento alcanzado.

Como la planta es antigua y la edad de los fangos es elevada, la explicación más factible para el valor del rendimiento obtenido es la producción simultánea de procesos de nitrificación y desnitrificación. Este fenómeno se puede producir en algunos sistemas de fangos activados con nitrificación donde los elevados tiempos de retención celular (superiores a los necesarios para la nitrificación) permiten que ésta se origine con concentraciones bajas de oxígeno disuelto. La aparición de zonas anóxicas en las que se produce la desnitrificación se pueden producir en determinadas

zonas del reactor, debido a la configuración del mismo, o dentro de los flóculos a causa de una limitación en la transferencia de oxígeno en el interior del mismo (Ferrer y Seco, 2007).

Es ampliamente conocida la capacidad de aporte de oxígeno de las plantas helófitas, como las macrófitas emergentes instaladas en el reactor (*Typha* sp), desde las partes aéreas hasta la zona radicular. Esta característica de la vegetación se ha notado especialmente en la reducción del gasto eléctrico de la depuradora desde la implantación de las macrófitas en flotación.

Se ha calculado la reducción de los consumos eléctricos a partir de los datos proporcionados por la propiedad. Según esos datos se ha reducido el consumo eléctrico global anual (EDAR más bomba riego) en un 19%. Si se considera únicamente el consumo de la EDAR, éste se ha reducido en un 35%. Es necesario realizar estudios más detallados para determinar específicamente el rango de reducción de consumo que supone la implantación de macrófitas en un reactor biológico, pero es evidente su ventaja con respecto a la gestión energética de la planta.

5.2 Dinámica de los protistas y metazoos

Retomando el objeto principal del estudio, los resultados obtenidos revelan que las comunidades de protistas y metazoos encontradas presentan una dinámica poblacional muy compleja.

Por otro lado, la estructura de las comunidades desarrollada en las biopelículas de las raíces de las macrófitas y el licor mezcla son similares a las encontradas en cualquier sistema biológico de tratamiento de aguas. La mayoría de las especies identificadas en este estudio han sido previamente descritas en trabajos previos de sistemas biológicos de tratamiento de aguas. (Curds y Cockburn 1970; Curds 1975; Madoni y Ghetti 1981; Madoni 1988; Foissner, 1992; Martín-Cereceda et al.1996; entre otros).

Madoni (2000) y Martín-Cereceda et al. (1996) observaron que los ciliados reptantes y sésiles son los grupos más representativos de protistas en los tanques de aireación, apreciándose en este caso un comportamiento similar.

5.2.1 Reactor biológico. Licor mezcla.

La biota en el licor mezcla, según los resultados obtenidos, la conforman principalmente dos especies de protistas: *Aspidisca cicada* y Complejo *Vorticella aquadulcis*. Estas se calificaron como especie predominante (nivel de abundancia Dominante y Secundario) en siete de los ocho muestreos realizados. Siendo las únicas especies caracterizadas en todos los muestreos realizados.

Por tanto, las especies de *Aspidisca cicada* y Complejo *Vorticella aquadulcis* son las especies principales que conforman la biota en el licor mezcla. Por otro lado, en

tres de los ocho muestreos realizados aparecen como especies codominantes. Esta situación concuerda con las investigaciones de Madoni (1994), donde explica que los protistas ciliados reptantes bacterívoros, como *Aspidisca cicada* y los ciliados sésiles bacterívoros, como Complejo *Vorticella aquadulcis*, suelen ser codominantes en los fangos activos debido a que al tener diferentes tipos de alimentación (los reptantes se alimentan básicamente de bacterias floculantes y los sésiles de bacterias libres) no compiten entre ellos.

La relación de *Aspidisca cicada* y Complejo *Vorticella aquadulcis* con las diferentes variables fisicoquímicas y operacionales parece estar vinculada a un amplio rango de valores. Varios autores han relacionado a estos microorganismos con diferentes variables fisicoquímicas y operacionales (Poole, 1984; Madoni, 1991; Martin-Cereceda et al. 1996; Salvadó et al., 1988; B Hu et al. 2013; entre otros) no siendo clara su vinculación con las diferentes variables tal y como ocurre con los resultados obtenidos.

En el caso de *Aspidisca cicada*, Poole (1984) lo asocia a diferentes condiciones de operación en la EDAR y calidad del efluente, mientras Madoni (1991) lo relaciona con un amplio rango de la carga orgánica en el afluente. Al igual que ocurre en dichos estudios, los resultados obtenidos tampoco vinculan la presencia de *A. cicada* a ningún rango de valores presentándose de forma abundante en diferentes condiciones.

La presencia de *Aspidisca cicada* se ha asociado también a condiciones de estabilidad en el tanque de aireación (Madoni, 1991). En este caso no se puede asociar a condiciones de estabilidad del tanque ya que aparecían un elevado número de individuos con una clara situación de alteración del sistema (M1 y M2), por fallo de una de las soplantes durante un periodo prolongado de tiempo con el consiguiente déficit de oxígeno y posterior recuperación de las condiciones habituales.

Martin-Cereceda et al. (1996) ha asociado la presencia de *A. cicada* con niveles de altos DBO₅ del efluente, indicando una depuración deficiente. Contrariamente Salvadó et al., (1988) relacionó a esta especie con un buen rendimiento en la depuración, lo cual se reproduce en este sistema.

Con respecto al Complejo *Vorticella aquadulcis*, Martin-Cereceda et al. (1996) ha asociado su presencia con niveles de altos DBO₅ del efluente, indicando una depuración deficiente. En el estudio no se ratifica dicha conclusión ya que se observa esta especie tanto cuando la concentración de DBO₅ del efluente es elevada como cuando se sitúa en valores aceptables de concentración.

B Hu et al. (2013) relacionó a *V. striata* (Complejo *Vorticella aquadulcis*) con valores altos de IVF proponiendo a este organismo como bioindicador, junto con *E. plicatilis*, de episodios de “bulking” filamentoso. Los resultados registraron la presencia del Complejo *Vorticella aquadulcis* como especie dominante cuando el reactor sufrió un episodio de “bulking” filamentoso. Este hecho no confirma las conclusiones de B Hu et al. (2013) ya que dicha especie se ha presentado más veces de forma abundante sin que el reactor estuviese padeciendo un episodio de “bulking”. No obstante, a falta de más datos, no se puede descartar que la presencia del Complejo *Vorticella aquadulcis* se vea favorecido por valores altos de IVF puesto que la abundancia en

general del microorganismo en el estudio fue alta y los valores registrados del IVF también eran elevados.

Otras especies descritas en el licor mezcla con una abundancia alta han sido: *Trochilia minuta*, *Acineria uncinata*, *Entosiphon* sp y *Holophrya* sp.

Trochilia minuta es considerado como un buen bioindicador de baja CM (Salvadó et al., 1993) y buena nitrificación (Dubber et al., 2011). En el presente trabajo los valores de CM son muy bajos y el rendimiento de la nitrificación, en general, se sitúa por encima del 90% mientras que la presencia de *Trochilia minuta* es esporádica, con una frecuencia de aparición del 38% del total de los muestreos realizados. Su presencia no contradice los estudios realizados pero tampoco confirma, por la escasez de resultados, que pueda ser empleada como especie bioindicadora en el sistema mixto de tratamiento objeto del estudio.

Entosiphon sp y *Holophrya* sp. únicamente se presentaron como especies predominantes en M6, coincidiendo con un periodo de fuertes lluvias los días anteriores al muestreo siendo las condiciones del reactor de altas concentraciones de oxígeno disuelto, altos rendimientos de nitrificación y una reducción de la conductividad eléctrica y pH del medio. No se puede afirmar la existencia de una relación directa entre la abundancia de estas especies y las variables mencionadas por la escasez de los datos que se disponen. Además este hecho contrasta con lo expuesto por Dubber et al. (2011) donde catalogó a *Holophrya discolor* como una especie tolerante a condiciones anaerobias y asociada con una alta desnitrificación.

Acineria uncinata es una especie de ciliado muy frecuente en las EDAR pudiendo ser encontrada tanto en procesos de cultivo en suspensión como de lecho fijo (Curds y Cockburn, 1970; Madoni, 2011). Su presencia en el estudio ha sido ocasional no pudiéndola catalogarla como especie habitual del sistema mixto aquí investigado.

5.2.2 Reactor biológico. Macrófitas en flotación.

Las especies principales formadoras de la biota en la biopelícula de las macrófitas presentes en el reactor no son tan claras como en el caso del licor mezcla. La frecuencia de aparición más elevada la obtuvieron los nematodos (75%) pero con una abundancia escasa de individuos, seguido de los protistas *Aspidisca cicada* y Complejo *Vorticella aquadulcis* (ambos con el 50% de ocurrencia).

El Complejo *Vorticella aquadulcis* es la única especie catalogada como dominante con una ocurrencia del 13%, mientras que *Aspidisca cicada*, *Holophrya* sp. y *Trochilia minuta* se han descrito como especies secundarias con el 13% de ocurrencia.

En general, el número de individuos de las especies descritas no es elevado a excepción de M3, M6 y M8. El Complejo *Vorticella aquadulcis* y *T. minuta* son las especies con mayor densidad de individuos en M3; *Holophrya* sp en M6; y *Aspidisca cicada* en M8. Los resultados también revelan a estos organismos como especies abundantes del licor mezcla en los mismos muestreos.

Las comunidades de protistas y metazoos de las macrófitas en flotación del reactor biológico no se diferencian de las descritas en el licor mezcla. Alrededor del 90% de los organismos identificados en las macrófitas obtuvieron ocurrencia en el licor mezcla.

Aunque los resultados obtenidos son escasos, se intuye la misma influencia de las variables fisicoquímicas y operacionales sobre la biocenosis de las macrófitas y la del licor mezcla, siendo necesaria la demostración de dicha correspondencia en próximos estudios.

Aelosoma variegatum se ha presentando, a nivel macroscópico, con cierta abundancia en todo el periodo de estudio, pero su presencia a nivel microscópico no ha sido muy relevante. Este organismo tiene interés como especie reductora del volumen de fangos en exceso. Ratsak y Verkuijlen en 2006 realizaron una revisión de toda la bibliografía referente a la reducción de fangos en plantas de tratamiento de aguas residuales con *Oligochaetes* acuáticos, como *Aelosoma sp*, en el cual concluyeron que la reducción de fangos es posible empleando *Oligochaetes*, pero el problema es mantener poblaciones estables de estos organismos en las plantas. Posteriormente se han publicado investigaciones sobre nuevos modelos de reactor donde se reducen el volumen de lodos empleando *Oligochaetes* acuáticos (Elissen 2006, Wei 2009, Hendrickx 2009). Todos los modelos investigados son a nivel experimental sin resultados definitivos.

La presencia durante todo el estudio de una población constante de *Aelosoma variegatum* hace sospechar de la influencia positiva de las macrófitas para proporcionar un hábitat favorable para mantener una densidad adecuada de *Aelosoma sp*, siendo esta una posible alternativa para mantener poblaciones constantes de *Oligochaetes* acuáticos en los reactores biológicos.

5.2.3 Humedal artificial con macrófitas en flotación.

Tal y como se esperaba, las comunidades de protistas y metazoos en el humedal artificial con macrófitas en flotación difieren de las presentes en el reactor biológico. La biodiversidad de las especies catalogadas fue la más alta de todos los puntos de muestreo, con veinte especies diferentes. Alrededor del 60% de los organismos descritos en de licor mezcla y el 67% de los identificados en las macrófitas tuvieron ocurrencia en el humedal artificial.

El Complejo *Vorticella convallaria* es la especie con más frecuencia de aparición en la biota del humedal artificial con macrófitas en flotación. Estando presente en siete de los ocho muestreos realizados. Además, esta especie ha sido caracterizada en 50% de los muestreos con un nivel de abundancia elevado (nivel de abundancia Dominante o Secundario).

El Complejo *Vorticella convallaria* es una especie muy frecuente en los sistemas de tratamiento de aguas residuales siendo fácilmente observada tanto en procesos de cultivo en suspensión como de lecho fijo (Madoni 2011). No se ha podido relacionar

esta especie con ninguna variable del sistema, debido a que durante el estudio se presentaba abundantemente en todo el intervalo de resultados.

Con la única variable que parece tener cierta relación el Complejo *Vorticella convallaria*, en el presente estudio, es la temperatura. Al final del periodo de muestreo se produjo una reducción de su densidad coincidiendo con el aumento de las temperaturas ambientales. A falta de más datos, no se puede confirmar la existencia de una relación inversa entre la abundancia de esta especie con la temperatura, o si la disminución del número de individuos se debe a otros factores.

Otras especies con una frecuencia de aparición elevada son: *Holophrya* sp. y nematodos con una ocurrencia del 75% y *Metacystis galiani* con el 63% de ocurrencia.

Además del Complejo *Vorticella convallaria*, se han catalogado otras especies con una abundancia alta: *Holophrya* sp, Complejo *Vorticella aquadulcis* y *Metacystis galiani*.

La mayor densidad de *Holophrya* sp se ha hallado en M6 y M7, cuando las concentraciones de NT y N-NH₄ en el efluente de la planta son bajas. La bibliografía referente a la dinámica de protistas y metazoos en humedales artificiales es muy escasa, pero Dubber *et al.* (2011) en un estudio sobre los sistemas de fangos activos en Irlanda catalogó a *Holophrya discolor* como una especie tolerante a condiciones anaerobias y asociada con una alta desnitrificación. En este caso se produce también dicha asociación, apareciendo la mayor densidad de *Holophrya* sp cuando el proceso de desnitrificación en el humedal artificial es elevado. No se puede ratificar la existencia de una asociación entre la abundancia de estas especies y las variables mencionadas por la escasez de los resultados obtenidos.

A igual modo como ocurre en el reactor biológico, la relación del Complejo *Vorticella aquadulcis* con las diferentes variables fisicoquímicas y operacionales parece estar vinculada a un amplio rango de valores.

Aunque la presencia de *Metacystis galiani* en el humedal se describe en cinco de los ocho muestreos realizados, su abundancia en general no ha sido muy elevada (nivel abundancia 2) a excepción de un muestreo que se catalogó con un nivel de abundancia 3; no se dispone de datos suficientes para asociar a esta especie con alguna variable fisicoquímica u operacional. La bibliografía para comparar los resultados referente a *M. galiani* es inexistente ya que se catalogó por primera vez en 2010 por Arregui, et al.

En el último muestreo realizado en el humedal artificial con macrófitas en flotación se produjo una reducción drástica del número de organismos y la biodiversidad de especies siendo casi anecdótica la presencia de protistas y metazoos. Este periodo coincidió con un aumento de las temperaturas y la iniciación de la actividad vegetativa de las macrófitas tras la parada invernal. Dicha actividad (principalmente la activación de las raíces) parece tener cierta influencia en la biocenosis asociada a las raíces de las macrófitas. Este hecho no ha sido objeto del presente trabajo pero sería conveniente evaluarlo en futuras investigaciones.

5.2.4 Humedal artificial de flujo subsuperficial.

Las comunidades de protistas y metazoos en el humedal artificial de flujo subsuperficial son muy reducidas presentándose, en general, escasos organismos y muy dispersos. En este punto, último de la línea del sistema de tratamiento, la carga orgánica ya es muy débil.

Como ya se ha mencionado en el párrafo anterior, la presencia de microorganismos a lo largo del estudio es esporádica, a excepción de M7 donde se identificó *Holophrya* sp y *Spirostomon* sp con una valoración de abundancia de secundario. Se desconoce la posible causa del incremento de densidad de los organismos, ya que no se dispone, por dificultad de muestreo, de las características del agua en la entrada a la zona de flujo subsuperficial del humedal artificial. Pero se intuye, por el resto de resultados obtenidos, que ha podido ser originada por un incremento de la DQO en la entrada al humedal junto con un arrastre de microorganismos posiblemente producido en el periodo de fuertes lluvias ocurrido semanas anteriores.

No se ha podido determinar la asociación de las especies identificadas con las variables fisicoquímicas y operacionales del sistema de tratamiento estudiado por solo disponer de un dato.

CONCLUSIONES

6 CONCLUSIONES.

Este estudio exploratorio y proporciona información de la dinámica y composición de las comunidades de protistas y metazoos en un inusual sistema mixto de tratamiento de aguas residuales donde se ha combinado en un mismo reactor la aireación prolongada con un filtro macrófitas en flotación en su superficie. Asimismo se amplían los conocimientos de la dinámica y composición de estas en los humedales artificiales.

Por otro lado, se ha obtenido información de las peculiaridades del nuevo sistema mixto aquí planteado.

Las principales conclusiones obtenidas son:

- Las raíces de las macrófitas actúan como un filtro en superficie e impiden a los sólidos suspendidos con mala decantación que se transfieran al efluente, reduciendo el impacto causado por un episodio de “*bulking*” sobre la calidad del efluente.
- La implantación de macrófitas en la superficie del reactor, como *Typha sp* capaz de transferir oxígeno al agua, reduce los costes energéticos en aireación. Además de mejorar la calidad del efluente del reactor biológico.
- La presencia del humedal artificial posterior al sistema biológico mejora la calidad del agua tratada.
- La composición de protistas y metazoos hallada en la biopelícula de las macrófitas o en licor mezcla no difiere de la que se puede encontrar en otros estudios de sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales, tanto de lecho fijo como suspendido.
- Las principales comunidades de protistas y metazoos presentes en la EDAR objeto del estudio son capaces de adaptarse a un rango amplio de variables fisicoquímicas y operacionales.
- La composición de las comunidades de protistas y metazoos presentes en las biopelículas de las macrófitas a lo largo de la línea de aguas varía en función de la carga contaminante soportada.
- La implantación de macrófitas en el reactor puede proporcionar un nuevo hábitat para la proliferación de especie de *Oligochaetes* acuáticos, como *Aelosoma sp*, no habituales en los reactores de fangos activos, capaces de reducir el volumen de fango generado.

Complementariamente a las conclusiones generales del estudio, el nuevo modelo de sistema de tratamiento del presente trabajo, muestra un conjunto de ventajas adicionales a los sistemas tradicionales de aireación prolongada:

- Se obtiene una buena calidad del efluente con una demanda energética inferior a los sistemas convencionales de aireación prolongada. El consumo eléctrico

demandado por la planta es menor ya que disminuyen los requisitos de aireación del reactor.

- Se minimiza el impacto producido en la calidad del efluente por una mala decantación de los fangos.
- Los costos de gestión de lodos se reducen porque el sistema permite ser operado con concentraciones de sólidos inferiores a los sistemas convencionales de aireación prolongada, generando menos volumen de lodos en exceso. También proporciona un hábitat favorable para el desarrollo de organismos consumidores de fangos, como Oligochaetes acuáticos.
- La presencia de la vegetación reduce el impacto visual provocado por la depuradora.
- La especialización de la mano de obra no es mayor que el presente en una planta depuradora con aireación prolongada.
- Completando el afino del efluente con un tratamiento terciario de bajo coste (como humedales artificiales) se obtiene una calidad excelente del agua, apta para su reutilización, sin un coste excesivo.

BIBLIOGRAFÍA

7 BIBLIOGRAFÍA.

- Alianza por el agua (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Monográficos agua en Centroamérica.
- Al-shahwani, S.M., Horan, N.J., (1991). The use of protozoa to indicate changes in the performance of activated sludge plants. *Water Res.* 25: 633–638.
- American Public Health Association (2012) Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC.
- Andern, E. Lockett, W.T., (1914). Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. *J. Soc. Chem. Ind.* 33: 523-525.
- Arregui, L., Linares, M., Pérez-uz, B., Guinea, A., Serrano, S., (2008). Involvement of crawling and attached ciliates in the aggregation of particles in wastewater treatment plants. *Air, Soil and Water Res.* 1: 13-19.
- Arregui, L., Serrano, S., Linares, M., Pérez-Uz, B., Guinea, A., (2007). Ciliate contributions to bioaggregation: laboratory assays with axenic cultures of *Tetrahymena thermophila*. *International Microb.* 10: 91-96.
- Arregui, Lucia, et al. (2010). A New Species of the Genus *Metacystis* (Ciliophora, Prostomatida, Metacystidae) from a Wastewater Treatment Plant. *Journal of Eukaryotic Microbiology* 57.4 362-368.
- Bitton, G. (2011). *Wastewater Microbiology*. Wiley-Liss. Quinta Edición. Universidad de Florida. Estados Unidos.
- Curds, C. R. (1975). *Ecological Aspects of Used-water Treatment: Vol. 1: The Organisms and Their Ecology*. Academic Press.
- Curds, C. R., Cockburn, A., & Vandyke, J. M. (1968). An experimental study of the role of the ciliated protozoa in the activated sludge process. *Water Pollution Control*, Vol 67, Nº 3, 1968. P 312-329, 14 Fig, 3 Tab, 13 Ref.
- Curds, C. R., Cockburn, A., (1970a). Protozoa in biological sewage-treatment processes I. A survey of the protozoan fauna of British percolating filters and activated-sludge plants. *Wat. Res.* 4: 225-236.
- Curds, C. R., Cockburn, A., (1970b). Protozoa in biological sewage-treatment processes II. Protozoa as indicators in the activated-sludge process. *Wat. Res.* 4: 237-249.
- Curds, C.R., (1963). The flocculation of suspended matter by *Paramecium caudatum*. *J. Gen. Microbiol.* 33.
- Curds, C.R., (1973). The role of protozoa in the activated-sludge process. *Am. Zoologist* 13:161–169.
- Curds, C.R., (1982). The ecology and role of protozoa in aerobic sewage treatment processes. *Annual. Rev. Microbiol.* 36:27–46.

- Curds, C.R., (1992). Protozoa and the Water Industry. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Curds, C.R., Hawkes, H.A., (1983). Biological activities and treatment process. Ecological Aspects of Used-Water Treatment. Academic Press, London Vol. 2.
- Delgadillo, O. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Nelson Antequera.
- Directiva del Consejo 91/271/CEE de 21 de Mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas.
- Dubber, D., y Gray, N. F. (2011). The influence of fundamental design parameters on ciliates community structure in Irish activated sludge systems. European journal of protistology, 47(4), 274-286.
- Elissen, H. J., Hendrickx, T. L., Temmink, H., & Buisman, C. J. (2006). A new reactor concept for sludge reduction using aquatic worms. Water Research, 40(20), 3713-3718.
- EPA (2000). Constructed Wetlands. Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R-99/010.
- EPA (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial. EPA 832-F-00-023
- EPA (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial. EPA 832-F-00-024
- Fernández González, J. (2005). Manual de Fitodepuración, Filtro de macrófitas en flotación. Edita Fundación Global Nature.
- Fernández-Galiano, D., Guinea, A., Serrano, S., Martín, M., Arregui, L., Rodríguez, B., Campos, I., Calvo, P., Suarez, J., (1996). Guía práctica de identificación de protozoos ciliados en estaciones depuradoras de aguas residuales por lodos activados de la Comunidad Autónoma de Madrid. Dpto Microbiología, Facultad de Biología, Universidad Complutense de Madrid.
- Ferrer, J y Seco, A. (2007). Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales. Editorial UPV. Valencia, España.
- Foissner, W., Berger, H. Kohmann, F., (1992). Taxonomische und ökologische Revision der Ciliaten des Saprobien-system. Band II: Peritrichia, Heterotrichia, Odontostomatidia, 502 pp. Bayer, Munich. Bayerisches Landesamtes für Wasserwirtschaft.
- Foissner, W., Berger, H., (1996). A user-friendly guide to the ciliates (Protozoa, Ciliophora) commonly used by hydrobiologist as bioindicators in rivers, lakes, and waste waters, with notes on their ecology. Freshwater. Biol. 35: 375-482.
- Foissner, W., Berger, H., Kohmann, F., (1994). Taxonomische und ökologische Revision der Ciliaten des Saprobien-systems. Band III: Hymenostomata,

- Protomastida. Nassulida, 548 pp. Bayer, Munich. Bayerisches Landesamtes für Wasserwirtschaft.
- Foissner, W., Berger, H., Kohmann, F., (1995). Taxonomische und ökologische revision der ciliaten des saprobiensystems. Band IV: Gymnostomate, Loxodes, Suctoria, 540 pp. Bayer, Munich. Bayerisches Landesamtes für Wasserwirtschaft.
- Foissner, W., Blatterer, H., Berger, H. Kohmann, F., (1991). Taxonomische und ökologische Revision der Ciliaten des Saprobiensystem. Band I: Cytorphorida, Oligotrichida, Hypotrichyda, Colpodea, 478 pp. Bayer, Munich. Bayerisches Landesamtes für Wasserwirtschaft.
- Foladori, P., Andreottola, G., y Ziglio, G. (2010). Sludge reduction technologies in wastewater treatment plants. IWA publishing.
- García Serrano, J., y Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial.
- Hendrickx, T. L. G., Temmink, H., Elissen, H. J. H., and Buisman, C. J. N. (2009). Aquatic worms eating waste sludge in a continuous system. *Bioresource technology*, 100(20), 4642-4648.
- Hernandez Muñoz, A., Hernández Lehman, A., Galan, P., (1996). Manual de depuración URALITA: sistemas para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20.000 habitantes. 3ª Edición. Editorial Paraninfo, S.A. Madrid, 427 pp.
- Hu, B., Qi, R., An, W., Xu, M., Zhang, Y., Bai, X., & Yang, M. (2013). Dynamics of the microfauna community in a full-scale municipal wastewater treatment plant experiencing sludge bulking. *European journal of protistology*, 49(4), 491-499.
- Klimowicz, H. K. (1970). Microfauna of activated sludge: Part I. Assemblage of microfauna in laboratory models of activated sludge.
- Knobelsdorf, J., (2005). Eliminación biológica de nutrientes en una ARU de baja carga orgánica mediante el proceso VIP. Tesis doctoral Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Lahora, A. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). In *Ecología, manejo y conservación de los humedales* (pp. 99-112). Instituto de Estudios Almerienses.
- Larrea, L., (2013). Aplicación de tratamientos innovadores a la eliminación de nutrientes. En XXXI Curso sobre Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras. CEDEX, Madrid.
- Lee, S., Basu, S., Tyler, C. W., & Wei, I. W. (2004). Ciliate populations as bio-indicators at Deer Island Treatment Plant. *Advances in Environmental Research*, 8(3), 371-378.

- Madoni, P. and Ghetti, P. F. (1981). The structure of ciliated protozoa communities in biological sewage-treatment plants. *Hydrobiologia*, 83(2), 207-215.
- Madoni, P., (1988). I protozoi ciliate nel controllo di efficienza dei fanghi attivi. Centro Italiano Studi di Biologia Ambientale, Reggio Emilia.
- Madoni, P., (1991). Role of protozoans and their indicator value in the activated sludge process. In *Biological Approach to Sewage Treatment Process: Current Status and Perspectives* (Edited by Madoni P.), pp. 21-28. Centro Bazzucchi, Perugia.
- Madoni, P., (1994). A sludge biotic index (SBI) for the evaluation of the biological performance of activated sludge plants based on the microfauna analysis. *Water Res.* 28: 67–75.
- Madoni, P., (2003). Protozoa as indicators of wastewater treatment efficiency. In: Mara D, Horan N, editors. *The handbook of water and wastewater microbiology*. London: Academic Press.
- Madoni, P., (2011). Protozoa in wastewater treatment processes: a minireview. *Italian Journal of Zoology*, 78(1), 3-11.
- Madoni, P., Davoli, D., and Gibin, G. (2000). Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated-sludge plants in Italy. *Water Research*, 34(6), 1767-1772.
- Madoni, P., Davoli, D., Chierici, E., (1993). Comparative analysis of the activated sludge microfauna in several sewage treatment works. *Water Res.* 27: 1485–1491.
- Martelo, J., y Borrero, J. A. L. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y ciencia*, 8(15), 221-243.
- Martín García, I., Rodríguez, J. B., Rodríguez, J. S., Suárez, B. P., Bocardo, J. P., & Martín, N. S. (2006). *Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población. Mejora de la calidad de los efluentes*. Edit. Junta de Andalucía. 126pp. Sevilla.
- Martín-Cereceda, M., Pérez-Uz, B., Serrano, S., and Guinea, A. (2001). Dynamics of protozoan and metazoan communities in a full scale wastewater treatment plant by rotating biological contactors. *Microbiological research*, 156(3), 225-238.
- Martín-Cereceda, M., Serrano, S., & Guinea, A. (1996). A comparative study of ciliated protozoa communities in activated-sludge plants. *FEMS Microbiology Ecology*, 21(4), 267-276.
- Metcalf y Eddy (1995). *Ingeniería de Aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill. Tercera edición.
- Ministerio de Medio Ambiente (2010). *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*.

- Ministerio de Medio Ambiente (2013). Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones
- Papadimitriou, C. A., Papatheodoulou, A., Takavakoglou, V., Zdragas, A., Samaras, P., Sakellaropoulos, G. P., ... & Zalidis, G. (2010). Investigation of protozoa as indicators of wastewater treatment efficiency in constructed wetlands. *Desalination*, 250(1), 378-382.
- Pérez-Uz, ., Arregui, L., Calvo, P., Salvadó, H., Fernández, N., Rodríguez, E., Zornoza, A., Serrano, S., (2010). Assesment of advanced wastewater treatments for nitrogen removal searching for plausible efficiency bioindicators. *Water Res.* 44: 5059-5069.
- Poole, J. E. P. (1984). A study of the relationship between the mixed liquor fauna and plant performance for a variety of activated sludge sewage treatment works. *Water Research*, 18(3), 281-287.
- Puigagut, J., Maltais-Landry, G. y Gagnon V, Brisson, V. (2012). Are ciliated protozoa communities affected by macrophyte species, date of sampling and location in horizontal sub-surface flow constructed wetlands?. *Water Research* 46 (2012) 3005 e 3013.
- Puigagut, J., Salvadó, H., García, D., Granes, F., & García, J. (2007). Comparison of microfauna communities in full scale subsurface flow constructed wetlands used as secondary and tertiary treatment. *Water research*, 41(8), 1645-1652.
- Ratsak, C.,y Verkuijden, J. (2006). Sludge reduction by predatory activity of aquatic oligochaetes in wastewater treatment plants: science or fiction? A review. *Hydrobiologia* (2006) 564:197–211.
- Rensink, J. H., y Rulkens, W. H. (1997). Using metazoa to reduce sludge production. *Water Science and Technology*, 36(11), 171-179.
- Rodríguez, E., Isac, L., Salas, L., Fernandez, N., Zornoza, A., Perez, B. Serrano, S., Arregui, L., Calvo, P., Guinea, A., Estevez, F., (2008). Manual práctico para el estudio de grupos bioindicadores en fangos activos. Ed. Tecnología del Agua y EMASESA.
- Salas Rodríguez, Pidre Bocado, Cuenca Fernández. (2006). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Centa.
- Salvadó, H., & Gracia, M. P. (1993). Determination of organic loading rate of activated sludge plants based on protozoan analysis. *Water Research*, 27(5), 891-895.
- Salvado, H., (1994). Effect of mean cellular retention time on ciliated protozoan populations in urban wastewater plants based on a proposed model. *Water Res.* 28: 1315–1321.
- Salvado, H., Gonzalez-Palacios, E., & Pilar-Gracia, D. (1988). Study of the Population of Microorganisms in a Municipal Activated Sludge Treatment Plant(Estudio de la Poblacion de Microorganisms en una Planta Depuradora Urbana de Fangos

Activados). *Publicaciones del Departamento de Zoología Universidad de Barcelona Facultad de Biología*, 14.

- Salvado, H., Gracia, M.P., Amigo, J.M., (1995). Capability of ciliated protozoa as indicators of effluent quality in activated sludge plants. *Water Res.* 29: 1041–1050.
- Schiemer, F. (1978). Verteilung und Systematik der freilebenden Nematoden des Neusiedlersees. *Hydrobiologia*, 58(2), 167-194.
- Serrano, S., Arregui, L., Pérez-Uz, b., Calvo, P., Guinea, A., (2008). Guidelines for the Identification of Ciliates in Wastewater Treatment Plants. IWA Publishing, London.
- Tanner, C. C., y Headley, T. R. (2011). Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants. *Ecological Engineering*, 37(3), 474-486.
- Wei, Van Houten, Borger, Eikelboom y Fan. (2003). Comparison Performances of Membrane Bioreactor and Conventional Activated Sludge Processes on Sludge Reduction Induced by Oligochaete. *Environ. Sci. Technol.* 2003, 37, 3171-3180.
- Wei, Y., Van Houten, R. T., Borger, A. R., Eikelboom, D. H., y Fan, Y. (2003). Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment. *Water Research*, 37(18), 4453-4467.
- Wei, Y., Wang, Y., Guo, X., & Liu, J. (2009). Sludge reduction potential of the activated sludge process by integrating an oligochaete reactor. *Journal of hazardous materials*, 163(1), 87-91.
- Yeates, A., Esteban, G. (2014). Local ciliate communities associated with aquatic macrophytes. *International Microbiology* (2014).
- Zhan, Y., Feng, Q., Zhou, H., Zhang, Q., & Dong, B. (2014). Explosive propagation of aeolosoma hemprichi in an activated sludge-biofilm reactor. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(6).

ANEXOS

8 ANEXOS.

8.1 Anexo I: Resultados de las variables fisicoquímicas y operacionales.

8.2 Anexo II: Resultados de la identificación y abundancia de protistas y metazoos.

8.3 Anexo III: Gráficas de la evolución de los microorganismos con las variables fisicoquímicas y operacionales.

ANEXO I

8.1 Anexo I: Resultados de las variables fisicoquímicas y operacionales.

8.1.1 Aqua afluyente.

Tabla: Resultados de variables fisicoquímicas del afluyente. Muestréos.

		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
SST	mg/l	98,00	89,00	107,00	-	158,00	61,00	124,00	96,00
SSVT	mg/l	73,00	-	86,00	-	108,00	42,00	101,00	76,00
DQO	mg O ₂ /l	361,00	273,00	437,00	-	495,00	223,00	325,00	370,00
DBO ₅	mg O ₂ /l	200,00	194,00	267,00	-	256,00	-	155,00	203,00
DBO ₅ /DQO		0,55	0,71	0,61	-	0,52	-	0,48	0,55
PT	mg P/l	23,20	6,80	21,60	-	7,40	4,28	5,96	10,20
P-PO ₄	mg P/l	10,00	6,62	8,70	-	6,32	2,70	4,80	9,92
NT	mg N/l	39,60	42,80	47,64	-	53,28	38,80	48,00	54,40
N-NH ₄	mg N/l	-	33,00	36,60	-	42,80	23,60	37,00	44,40
N-NO ₃	mg N/l	1,80	2,16	3,10	-	1,60	2,90	<0,50 (a)	<0,50 (a)
pH		8,24	8,01	8,08	7,27	7,50	7,64	7,96	8,34
CE	mS/cm	2,40	2,33	2,27	2,33	3,01	2,39	2,86	-
OD	mg O ₂ /l	2,47	3,29	2,76	2,76	0,27	2,68	0,64	0,28
T ^a	°C	17,00	14,70	15,00	16,10	17,10	16,90	19,30	20,90

(a) Resultado inferior al rango de medición del método. Se considera para los cálculos estadísticos la mitad del rango inferior del procedimiento de medición.

Tabla: Resultados de variables fisicoquímicas del afluyente. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

		Media	Desviación estándar	Coficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
SST	mg/l	104,71	30,26	28,90%	61,00	158,00
SSVT	mg/l	81,00	23,51	29,03%	42,00	108,00
DQO	mg O ₂ /l	354,86	92,77	26,14%	223,00	495,00
DBO ₅	mg O ₂ /l	212,50	41,85	19,69%	155,00	267,00
DBO ₅ /DQO		0,57	0,08	14,39%	0,48	0,71
PT	mg P/l	11,35	7,77	68,46%	4,28	23,20
P-PO ₄	mg P/l	7,01	2,72	38,79%	2,70	10,00
NT	mg N/l	46,36	6,22	13,42%	38,80	54,40
N-NH ₄	mg N/l	36,23	7,49	20,67%	23,60	44,40
N-NO ₃	mg N/l	1,72	1,14	66,32%	0,25	3,10
pH		7,88	0,37	4,74%	7,27	8,34
CE	mS/cm	2,51	0,29	11,73%	2,27	3,01
OD	mg O ₂ /l	1,89	1,27	66,83%	0,27	3,29
T ^a	°C	17,13	2,09	12,19%	14,70	20,90

8.1.2 Licor mezcla.

Tabla: Resultados de variables fisicoquímicas del licor mezcla. Muestreos.

		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
SST	mg/l	3.590	2.830	2.450	1.880	2.150	2.040	1.650	1.950
SSVT	mg/l	2.820	-	1.980	1.440	1.760	1.700	1.280	1.530
pH		7,62	7,40	7,36	7,19	7,12	7,07	7,24	7,85
CE	mS/cm	2,60	2,28	2,30	2,18	2,36	1,57 (b)	2,45	2,38
OD	mg O ₂ /l	0,80	0,98	0,90	1,37	1,22	3,68	1,52	1,80
T°	°C	16,70	14,80	14,50	15,50	18,10	16,40	20,70	21,70
V30	ml	620	470	440	310	500	470	270	300
V30 D (1:2)	ml	240	180	180	150	230	200	140	140

(b) Resultado no incluido en el cálculo de la media por estar influenciado por un periodo de fuertes lluvias días antes del muestreo.

Tabla: Resultados de variables fisicoquímicas del licor mezcla. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

		Media	Desviación estándar	Coficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
SST	mg/l	2.317,50	629,80	27,18%	1.650,00	3.590,00
SSVT	mg/l	1.787,14	509,27	28,50%	1.280,00	2.820,00
pH		7,36	0,27	3,61%	7,07	7,85
CE	mS/cm	2,36	0,13	5,68%	2,18	2,60
OD	mg O ₂ /l	1,53	0,93	60,61%	0,80	3,68
T°	°C	17,30	2,67	15,46%	14,50	21,70
V30	ml/l	422,50	119,97	28,40%	270,00	620,00
V30 D(1:2)	ml/l	182,50	38,82	21,27%	140,00	240,00

Tabla: Resultados de variables operacionales. Muestreos.

		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
IVFD	ml/g	133,7	127,2	146,9	159,6	214,0	196,1	169,7	143,6
TRH	h	42	42	42	42	42	42	42	42
Cm	kg/kg	0,04	-	0,08	-	0,08	-	0,07	0,08

Tabla: Resultados de variables operacionales Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

		Media	Desviación estándar	Coficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
IVFD	ml/g	161,34	30,47	18,89%	127,21	213,95
TRH	h	42,00	0,00	0,00%	42,00	42,00
Cm	kg/kg	0,07	0,02	24,22%	0,04	0,08

8.1.3 Agua efluente del decantador secundario.

Tabla: Resultados de variables fisicoquímicas del efluente del decantador secundario. Muestreos.

		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
SST	mg/l	16,00 (c)	3,30	5,90	5,90	4,60	3,90	5,40	3,90
SSVT	mg/l	12,40 (c)	-	4,30	4,10	3,10	2,90	4,20	2,60
DQO	mg O ₂ /l	123,00 (c)	32,00	51,00	60,00	61,00	45,00	76,00	35,00
DBO ₅	mg O ₂ /l	36,60 (c)	15,40	26,40	23,30	14,90	7,30	17,40	15,70
DBO ₅ /DQO		0,30 (c)	0,48	0,52	0,39	0,24	0,16	0,23	0,45
PT	mg P/l	14,10 (c)	5,50	6,80	3,90	4,00	3,35	3,44	3,80
P-PO4	mg P/l	10,25 (c)	3,91	5,20	3,42	3,60	3,20	2,40	2,90
NT	mg N/l	-	12,20	16,94	19,60	12,73	13,20	16,40	18,80
N-NH ₄	mg N/l	38,60 (c)	1,73	2,52	6,00	2,17	0,57	2,46	1,86
N-NO ₃	mg N/l	1,40 (c)	8,15	11,60	6,30	8,90	11,70	11,40	13,70
pH		7,64	7,53	7,51	7,31	6,83	7,80	7,26	7,88
CE	mS/cm	2,43	2,24	2,23	2,11	2,11	1,37 (b)	2,47	2,37
OD	mg O ₂ /l	0,24	0,69	0,60	0,43	0,54	0,88	0,66	0,35
T°	°C	16,76	15,00	14,70	15,90	17,60	16,60	19,10	21,00

(b) Resultado no incluido en el cálculo de la media por estar influenciado por un periodo de fuertes lluvias días antes del muestreo.

(c) Resultado no incluido en el cálculo de la media.

Tabla: Resultados de variables fisicoquímicas del efluente del decantador secundario. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

		Media	Desviación estándar	Coeficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
SST	mg/l	4,70	1,05	22,35%	3,30	5,90
SSVT	mg/l	3,53	0,75	21,23%	2,60	4,30
DQO	mg O ₂ /l	51,43	15,59	30,31%	32,00	76,00
DBO ₅	mg O ₂ /l	17,20	6,20	36,05%	7,30	26,40
DBO ₅ /DQO		0,35	0,14	39,65%	0,16	0,52
PT	mg P/l	4,40	1,28	29,00%	3,35	6,80
P-PO4	mg P/l	3,52	0,89	25,24%	2,40	5,20
NT	mg N/l	15,70	3,00	19,14%	12,20	19,60
N-NH ₄	mg N/l	2,47	1,69	68,24%	0,57	6,00
N-NO ₃	mg N/l	10,25	2,55	24,87%	6,30	13,70
pH		7,47	0,34	4,50%	6,83	7,88
CE	mS/cm	2,28	0,15	6,42%	2,11	2,47
OD	mg O ₂ /l	0,55	0,20	37,33%	0,24	0,88
T°	°C	17,08	2,12	12,40%	14,70	21,00

Tabla: Rendimiento de eliminación de contaminantes del reactor biológico. Muestras.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
rDQO _{RB}	-	88%	88%	-	88%	80%	77%	91%
rDBO _{5 RB}	-	92%	90%	-	94%	-	89%	92%
rPT _{RB}	-	19%	50%	-	46%	22%	42%	63%
rNT _{RB}	-	71%	64%	-	76%	66%	66%	65%
rNH _{4 RB}	-	95%	93%	-	95%	98%	93%	96%

Tabla: Rendimiento de eliminación de contaminantes del reactor biológico Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

	Media	Desviación estándar	Coficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
rDQO _{RB}	85%	6%	6,57%	77%	91%
rDBO _{5 RB}	91%	2%	2,28%	89%	94%
rPT _{RB}	43%	20%	46,92%	19%	69%
rNT _{RB}	68%	5%	6,74%	64%	76%
rNH _{4 RB}	95%	2%	1,74%	93%	98%

8.1.4 Aqua efluente de la planta.

Tabla: Resultados de variables fisicoquímicas del efluente de la planta. Muestras.									
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
DQO	mg O ₂ /l	16,00	<10,00 (a)	<10,00 (a)	<10,00 (a)	22,00	11,00	<10,00 (a)	<10,00 (a)
PT	mg P/l	5,66	5,15	4,14	3,90	4,24	3,43	2,02	2,32
P-PO ₄	mg P/l	5,60	5,10	4,10	3,90	4,20	3,40	2,00	2,30
NT	mg N/l	14,19	8,31	9,90	9,74	9,83	5,76	11,18	11,24
N-NH ₄	mg N/l	11,80	3,70	-	0,82	0,80	<0,50 (a)	<0,50 (a)	<0,50 (a)
N-NO ₃	mg N/l	2,20	4,50	-	8,80	8,90	5,40	10,80	10,80
N-NO ₂	mg N/l	0,05	0,03	-	0,03	0,03	0,05	0,02	0,08
OD	mg O ₂ /l	1,98	1,60	2,47	1,47	2,99	1,54	2,23	1,95
T ^a	°C	15,80	13,20	12,80	13,60	16,50	13,30	17,60	20,20

(a) Resultado inferior al rango de medición del método. Se considera para los cálculos estadísticos la mitad del rango inferior del procedimiento de medición.

Tabla: Resultados de variables fisicoquímicas del efluente de la planta. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.						
		Media	Desviación estándar	Coefficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
DQO	mg O ₂ /l	<10,00	6,56	70,95%	<10,00	22,00
PT	mg P/l	3,86	1,26	32,56%	2,02	5,66
P-PO ₄	mg P/l	3,83	1,24	32,53%	2,00	5,60
NT	mg N/l	10,02	2,43	24,28%	5,76	14,19
N-NH ₄	mg N/l	2,55	4,26	166,81%	<0,50	11,80
N-NO ₃	mg N/l	7,34	3,34	45,43%	2,20	10,80
N-NO ₂	mg N/l	0,04	0,02	54,55%	0,02	0,08
OD	mg O ₂ /l	2,03	0,52	25,70%	1,47	2,99
T ^o	°C	15,38	2,63	17,12%	12,80	20,20

Tabla: Rendimiento de eliminación de contaminantes de la EDAR. Muestras.									
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
rDQO _{EDAR}		96%	98%	99%	-	96%	95%	98%	99%
rPT _{EDAR}		76%	24%	81%	-	43%	20%	66%	77%
rNT _{EDAR}		86%	88%	91%	-	92%	91%	96%	96%
rNH ₄ _{EDAR}		-	89%	-	-	98%	99%	99%	99%

Tabla: Rendimiento de eliminación de contaminantes de la EDAR. Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.						
		Media	Desviación estándar	Coefficiente variación	Valor mínimo	Valor máximo
rDQO _{EDAR}		97%	2%	1,75%	95%	99%
rPT _{EDAR}		55%	26%	47,05%	20%	81%
rNT _{EDAR}		91%	4%	4,06%	86%	96%
rNH ₄ _{EDAR}		97%	5%	4,72%	89%	99%

ANEXO II

8.2 Anexo II: Resultados de la identificación y abundancia de protistas y metazoos.

8.2.1 Reactor biológico. Licor mezcla.

Tabla: Reactor biológico. Licor mezcla.									
Grupo taxonómico	Especie	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
GRANDES FLAGELADOS									
Euglenidos	<i>Entosiphon</i> sp.	-	-	-	-	-	3	-	-
	<i>Peranema trichophorum</i>	-	1	-	2	1	-	-	1
AMEBAS									
Amebas testáceas									
Arcellinida	<i>Centropyxis</i> sp.	1	1	1	1	-	-	-	-
Euglyphida	<i>Euglypha</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Trinema</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
Amebas desnudas	Amoeba >5 µm	-	-	-	-	-	1	-	-
Actinópodos	<i>Heliozo</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
CILIADOS									
Heterotricos	<i>Stentor roeselii</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Spirostomon</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
Estichotricos	<i>Oxytricha</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
Hipotricos	<i>Aspidisca cicada</i>	4	4	4	2	3	1	3	4
Filofariengeos	<i>Trochilia minuta</i>	-	-	3	1	3	-	-	-
Peniculinos	<i>Paramecium</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
Escuticociliados	<i>Cinetochilum margaritaceum</i> .	-	-	-	-	-	-	-	2
	<i>Dexiotricha granulosa</i>	1	-	1	-	-	-	2	1
Peritricos	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	3	4	4	3	4	2	2	4
	Complejo <i>Vorticella convallaria</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
	Complejo <i>Vorticella microstoma</i>	-	-	1	-	-	-	-	-
Haptóridos	<i>Acineria uncinata</i>	-	-	-	2	3	1	-	-
	<i>Litonotus lamella</i>	-	-	-	2	1	2	-	-
Prorodontidos	<i>Holophrya</i> sp.	-	-	-	1	2	3	2	-
Prostomatidos	<i>Metacystis galiani</i>	-	-	-	1	-	-	-	2
METAZOOS									
Rotíferos	<i>Cephalodella</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Rotaria</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
Anélidos	<i>Aelosoma variegatum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Gastrotricos	Gastrotricos	-	-	-	-	-	-	-	-
Nematodos	Nematodos	-	-	-	-	1	1	2	2
OTROS ORGANISMOS									
Artrópodos	Acaro	-	-	-	-	-	-	-	-

8.2.2 Reactor biológico. Raíces de las macrófitas.

Tabla: Reactor biológico. Raíces de las macrófitas.									
Grupo taxonómico	Especie	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
GRANDES FLAGELADOS									
Euglénidos	<i>Entosiphon</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Peranema trichophorum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
AMEBAS									
Amebas testáceas									
Arcellinida	<i>Centropyxis</i> sp.	-	-	1	1	-	-	-	-
Euglyphida	<i>Euglypha</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Trinema</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
Amebas desnudas	Amoeba >5 µm	-	-	-	-	-	-	-	-
Actinópodos	<i>Heliozo</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
CILIADOS									
Heterotricos	<i>Stentor roeselii</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Spirostomon</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
Estichotricos	<i>Oxytricha</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
Hipotricos	<i>Aspidisca cicada</i>	-	2	2	-	1	-	-	3
Filofariéngicos	<i>Trochilia minuta</i>	-	-	3	-	-	-	-	-
Peniculinos	<i>Paramecium</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
Escuticociliados	<i>Cinetochilum margaritaceum</i> .	-	-	-	-	-	-	-	2
	<i>Dextrotricha granulosa</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Peritricos	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	2	2	4	-	-	1	-	-
	Complejo <i>Vorticella convallaria</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
	Complejo <i>Vorticella microstoma</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Haptóridos	<i>Acineria uncinata</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Litonotus lamella</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Prorodontidos	<i>Holophrya</i> sp.	-	-	-	-	-	3	1	-
Prostomatidos	<i>Metacystis galiani</i>	2	1	-	1	-	-	-	-
METAZOOOS									
Rotíferos	<i>Cephalodella</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Rotaria</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
Anélidos	<i>Aelosoma variegatum</i>	-	-	1	-	-	-	2	2
Gastrotricos	Gastrotricos	-	-	-	-	-	-	-	-
Nematodos	Nematodos	1	-	-	1	1	1	2	1
OTROS ORGANISMOS									
Artrópodos	Acaro	-	-	-	-	-	-	-	-

8.2.3 Humedal artificial con macrófitas en flotación.

Tabla: Humedal artificial con macrófitas en flotación.									
Grupo taxonómico	Especie	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
GRANDES FLAGELADOS									
Euglénidos	<i>Entosiphon</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Peranema trichophorum</i>	-	-	1	1	-	-	-	1
AMEBAS									
Amebas testáceas									
Arcellinida	<i>Centropyxis</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
Euglyphida	<i>Euglypha</i> sp.	3	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Trinema</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
Amebas desnudas	Amoeba >5 µm	-	-	-	-	-	-	-	-
Actinópodos	<i>Heliozo</i> sp	-	-	1	-	-	-	-	-
CILIADOS									
Heterotricos	<i>Stentor roeselii</i>	1	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Spirostomon</i> sp	-	-	-	-	-	-	1	-
Estichotricos	<i>Oxytricha</i> sp	1	-	-	-	1	-	-	-
Hipotricos	<i>Aspidisca cicada</i>	-	-	-	-	-	2	-	-
Filofariéngenos	<i>Trochilia minuta</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Peniculinos	<i>Paramecium</i> sp.	1	-	-	-	-	-	-	-
Escuticociliados	<i>Cinetochilum margaritaceum</i> .	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Dexiotricha granulosa</i>	-	-	-	-	-	-	1	-
Peritricos	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	-	3	1	1	-	1	-	-
	Complejo <i>Vorticella convallaria</i>	2	3	4	4	2	3	1	-
	Complejo <i>Vorticella microstoma</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Haptóridos	<i>Acineria uncinata</i>	-	-	-	-	-	-	-	1
	<i>Litonotus lamella</i>	-	-	-	-	-	-	-	1
Prorodontidos	<i>Holophrya</i> sp.	2	2	1	-	1	4	3	-
Prostomatidos	<i>Metacystis galiani</i>	-	2	-	2	2	3	1	-
METAZOOOS									
Rotíferos	<i>Cephalodella</i> sp.	-	-	-	-	-	-	2	-
	<i>Rotaria</i> sp.	-	-	-	-	-	-	2	-
Anélidos	<i>Aelosoma variegatum</i>	-	-	-	-	1	-	-	-
Gastrotricos	Gastrotricos	-	-	-	-	-	-	-	-
Nematodos	Nematodos	-	1	1	1	-	1	2	1
OTROS ORGANISMOS									
Artrópodos	Acaro	1	-	-	-	-	-	-	-

8.2.4 Humedal artificial de flujo subsuperficial.

Tabla: Humedal artificial de flujo subsuperficial.									
Grupo taxonómico	Especie	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
GRANDES FLAGELADOS									
Euglénidos	<i>Entosiphon</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Peranema trichophorum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
AMEBAS									
Amebas testáceas									
Arcellinida	<i>Centropyxis</i> sp.	-	-	-	1	-	-	-	-
Euglyphida	<i>Euglypha</i> sp.	-	1	1	-	-	-	-	-
	<i>Trinema</i> sp	-	1	-	-	-	-	-	-
Amebas desnudas	<i>Amoeba</i> >5 µm	-	-	-	-	-	-	-	-
Actinópodos	<i>Heliozo</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
CILIADOS									
Heterotricos	<i>Stentor roeselii</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Spirostomon</i> sp	-	-	-	-	-	-	3	-
Estichotricos	<i>Oxytricha</i> sp	-	-	-	-	-	-	-	-
Hipotricos	<i>Aspidisca cicada</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Filofariéngenos	<i>Trochilia minuta</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Peniculinos	<i>Paramecium</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
Escuticociliados	<i>Cinetochilum margaritaceum</i> .	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Dexiotricha granulosa</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Peritricos	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	2	-	-	-	-	-	-	-
	Complejo <i>Vorticella convallaria</i>	2	-	-	-	-	-	1	-
	Complejo <i>Vorticella microstoma</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Haptóridos	<i>Acineria uncinata</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Litonotus lamella</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Prorodontidos	<i>Holophrya</i> sp.	-	-	-	-	-	1	3	-
Prostomatidos	<i>Metacystis galiani</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
METAZOOOS									
Rotíferos	<i>Cephalodella</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Rotaria</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-
Anélidos	<i>Aelosoma variegatum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Gastrotricos	Gastrotricos	-	-	-	-	-	-	1	-
Nematodos	Nematodos	-	-	1	-	-	-	-	-
OTROS ORGANISMOS									
Artrópodos	Acaro	1	-	-	-	-	-	-	-

8.2.5 Resumen de las especies identificadas.

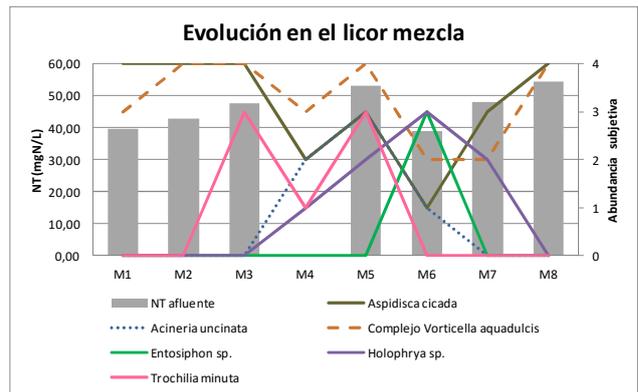
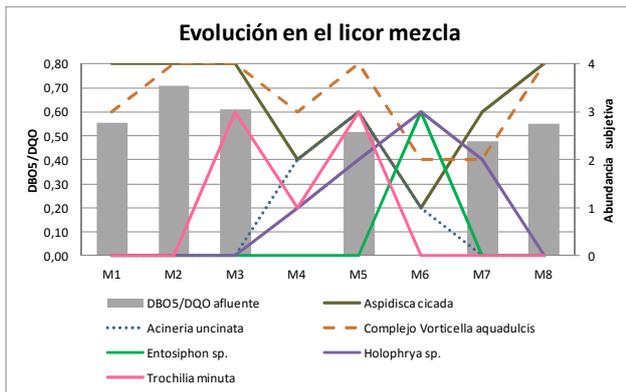
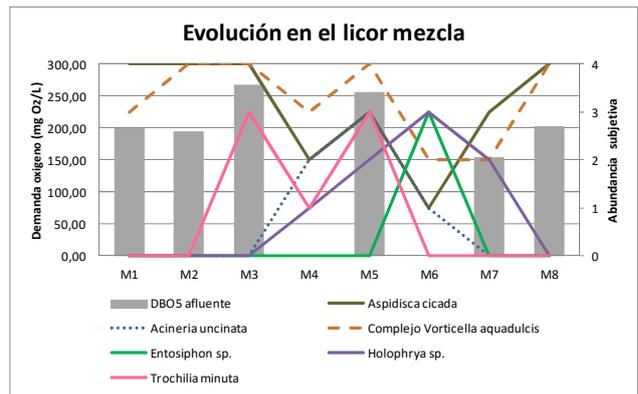
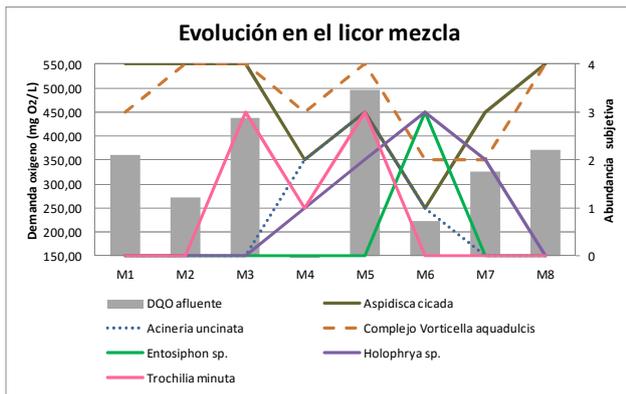
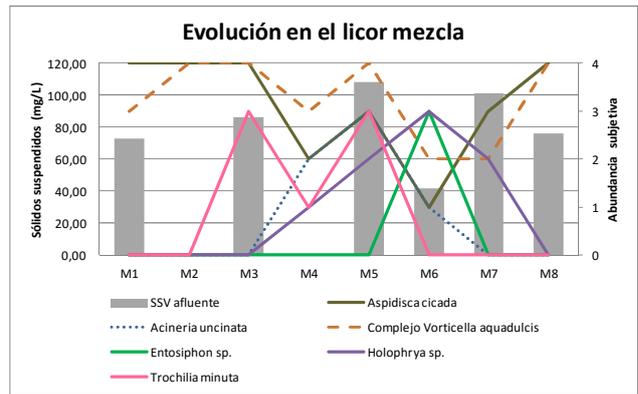
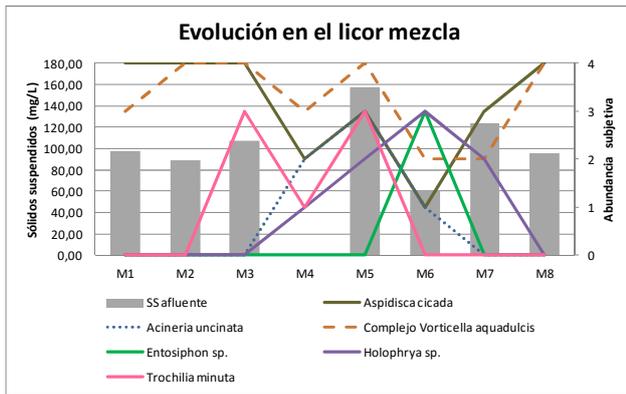
Tabla: Resumen de especies identificadas.					
Grupo taxonómico	Especie	RB LM	RB MF	HA FMF	HA Sub
GRANDES FLAGELADOS					
Euglénidos	<i>Entosiphon</i> sp.	+			
	<i>Peranema trichophorum</i>	+		+	
AMEBAS					
Amebas testáceas					
Arcellinida	<i>Centropyxis</i> sp.	+	+		+
Euglyphida	<i>Euglypha</i> sp.			+	+
	<i>Trinema</i> sp.				+
Amebas desnudas	Amoeba >5 µm	+			
Actinópodos	<i>Heliozo</i> sp.			+	
CILIADOS					
Heterotricos	<i>Stentor roeselii</i>			+	
	<i>Spirostomun</i> sp.			+	+
Estichotricos	<i>Oxytricha</i> sp.			+	
Hipotricos	<i>Aspidisca cicada</i>	+	+	+	
Filofariéngenos	<i>Trochilia minuta</i>	+	+		
Peniculinos	<i>Paramecium</i> sp.			+	
Escuticociliados	<i>Cinetochilum margaritaceum</i> .	+	+		
	<i>Dextiostricha granulosa</i>	+		+	
Peritricos	Complejo <i>Vorticella aquadulcis</i>	+	+	+	+
	Complejo <i>Vorticella convallaria</i>			+	+
	Complejo <i>Vorticella microstoma</i>	+			
Haptóridos	<i>Acineria uncinata</i>	+		+	
	<i>Litonotus lamella</i>	+		+	
Prorodontidos	<i>Holophrya</i> sp.	+	+	+	+
Prostomatidos	<i>Metacystis galiani</i>	+	+	+	
METAZOOOS					
Rotíferos	<i>Cephalodella</i> sp.			+	
	<i>Rotaria</i> sp.			+	
Anélidos	<i>Aelosoma variegatum</i>		+	+	
Gastrotricos	Gastrotricos				+
Nematodos	Nematodos	+	+	+	+
OTROS ORGANISMOS					
Artrópodos	Acaro			+	+

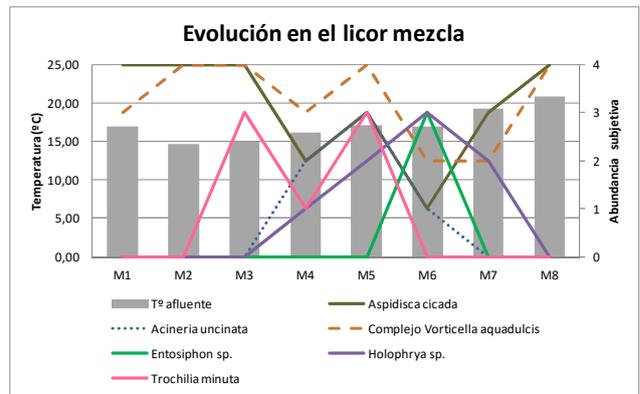
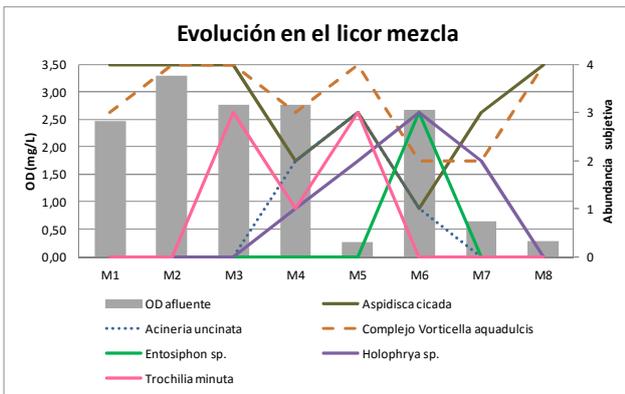
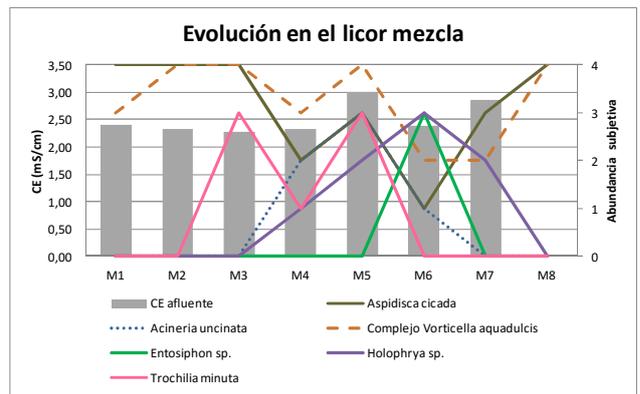
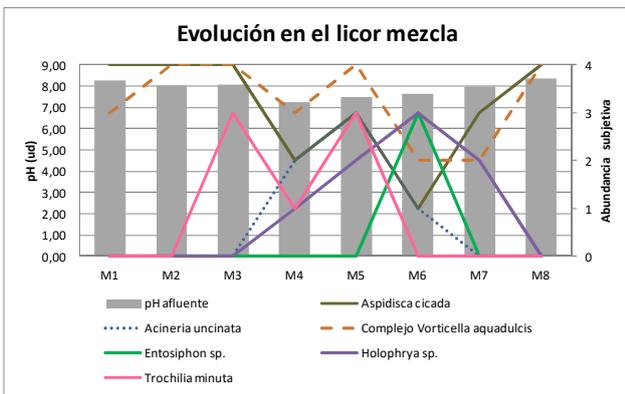
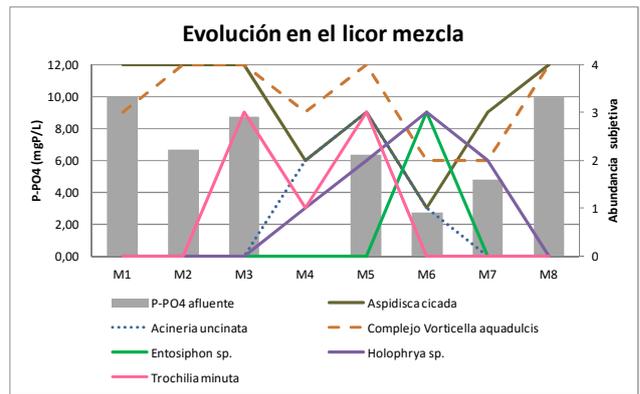
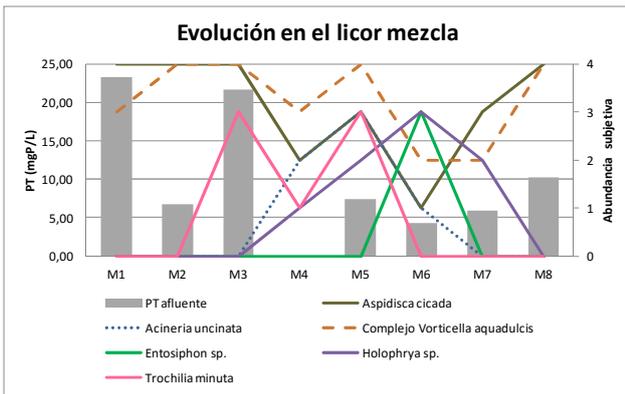
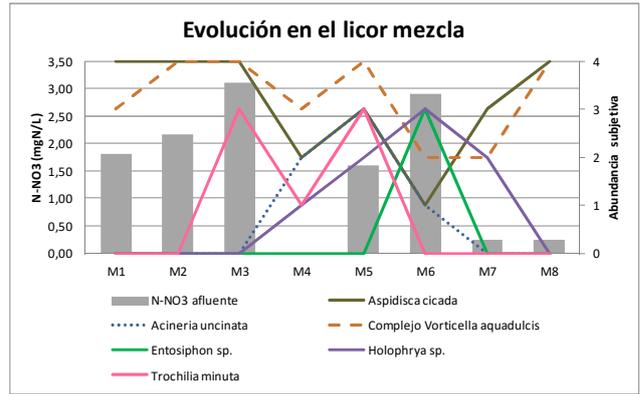
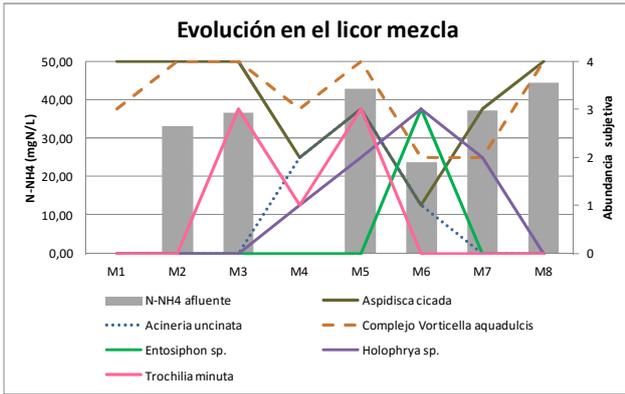
ANEXO III

8.3 Anexo III: Graficas de la evolución de los microorganismos con las variables fisicoquímicas y operacionales.

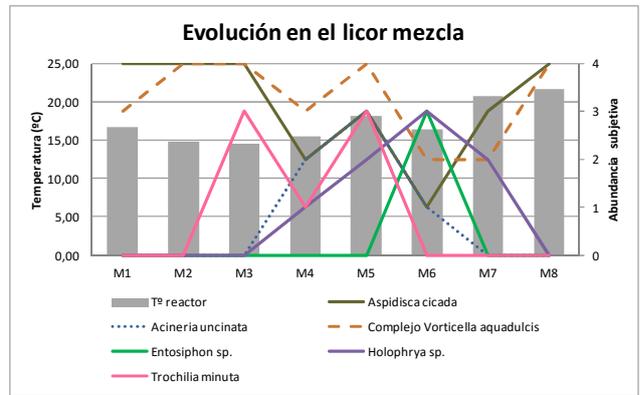
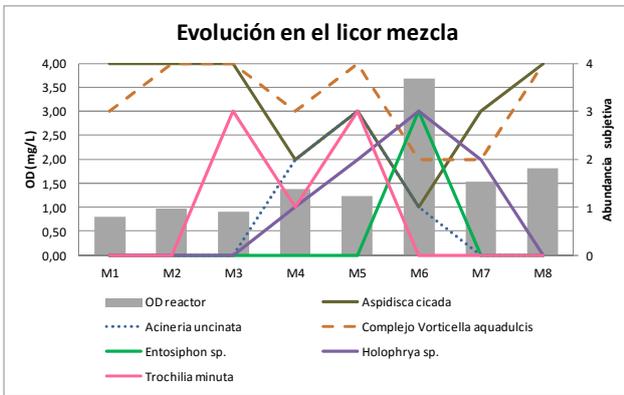
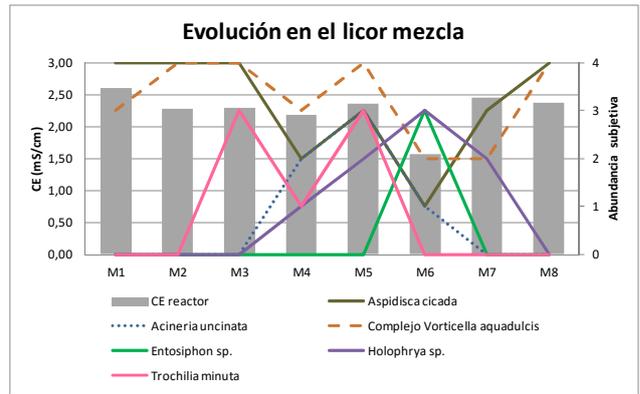
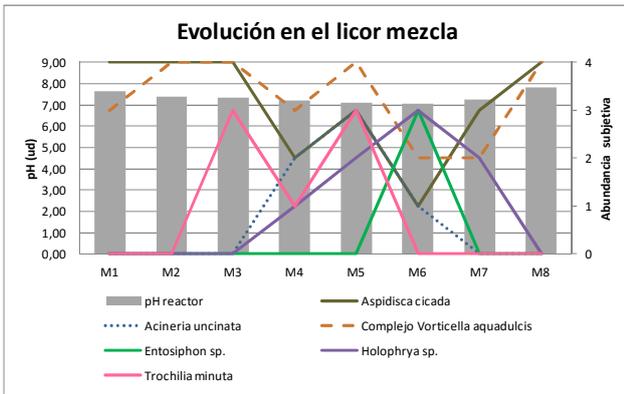
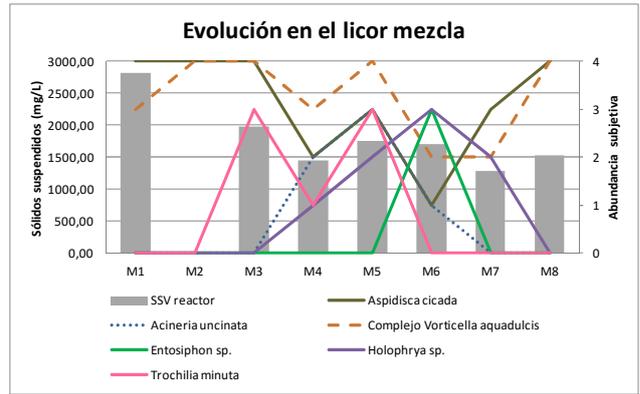
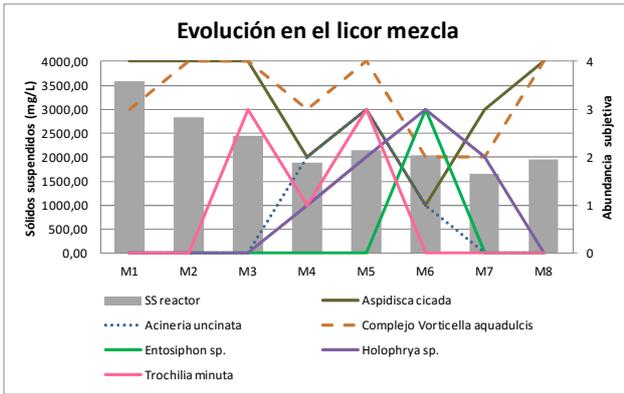
8.3.1 Reactor biológico. Licor mezcla.

a) *Agua afluyente*

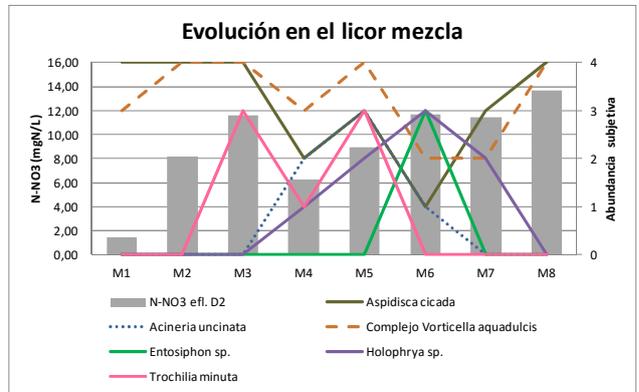
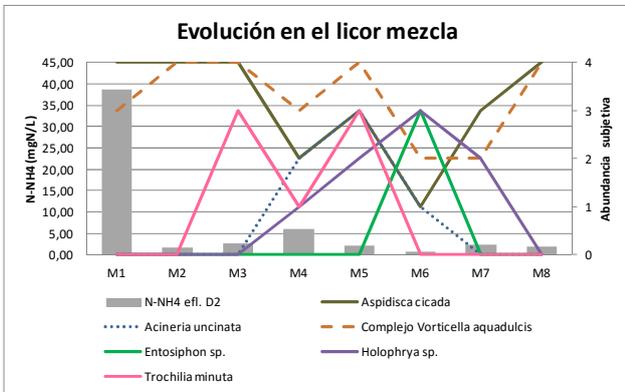
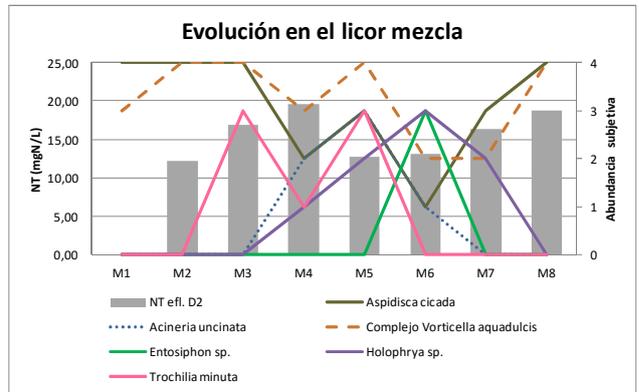
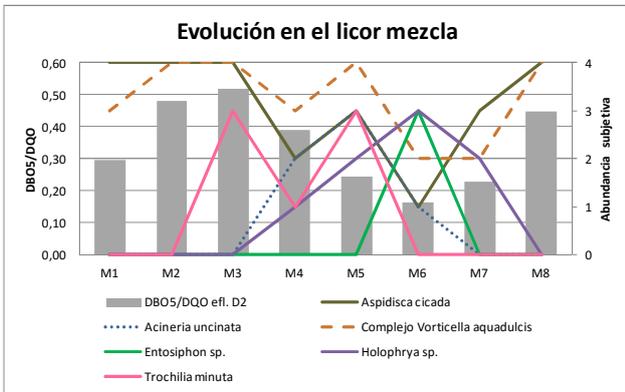
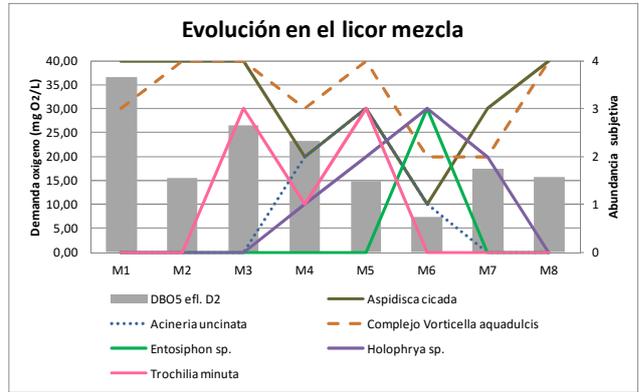
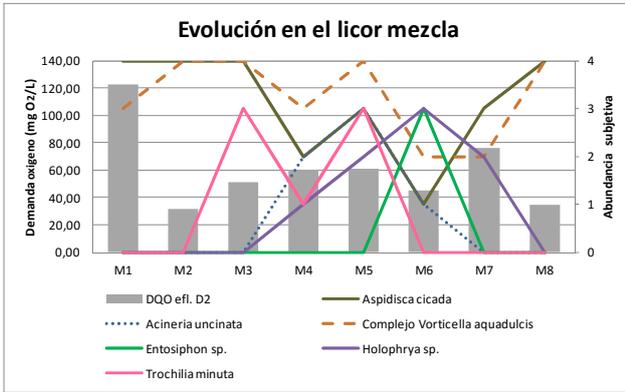
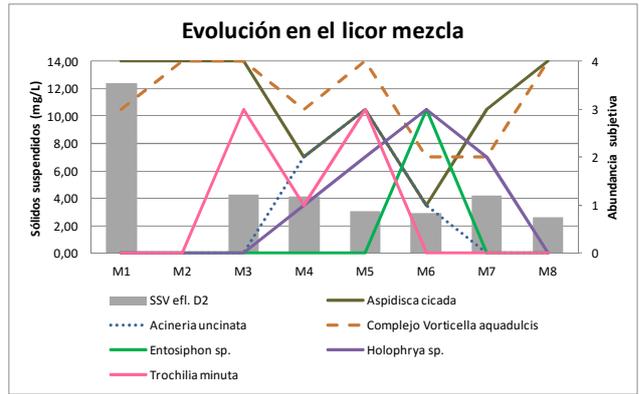
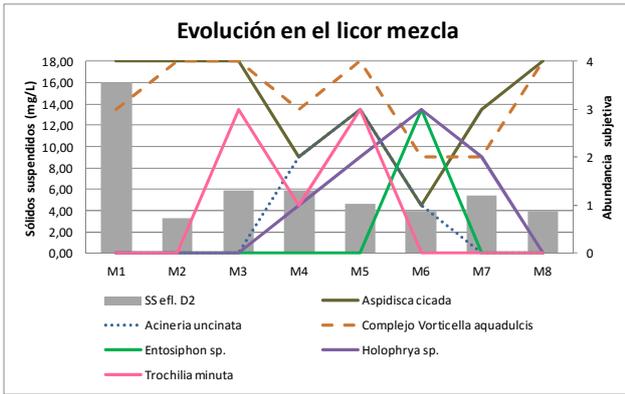


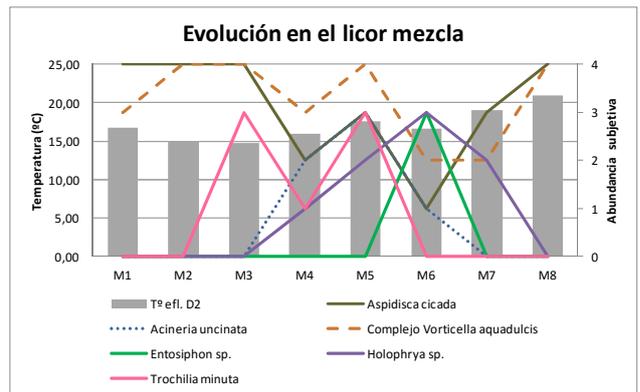
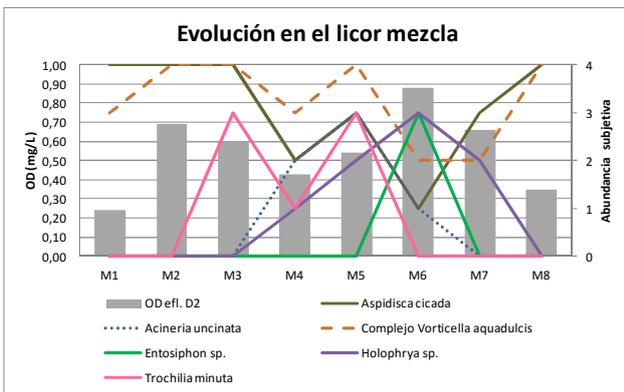
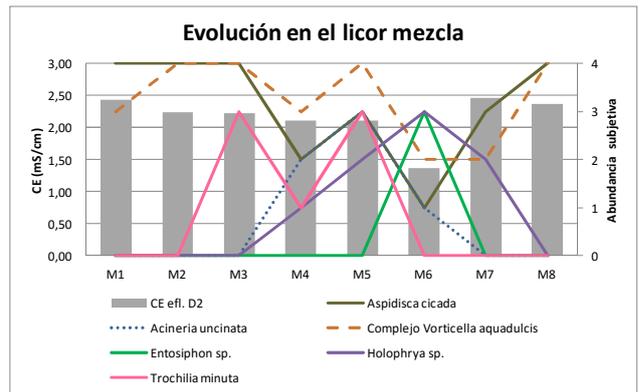
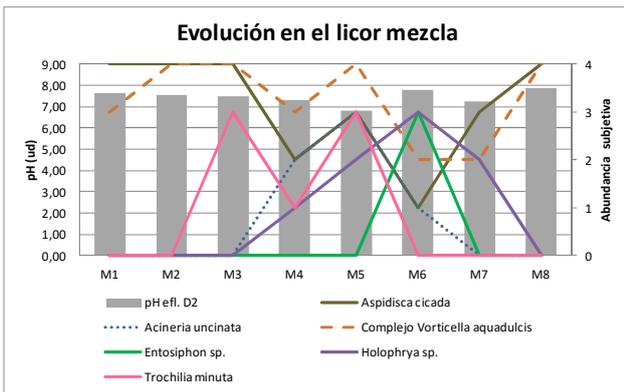
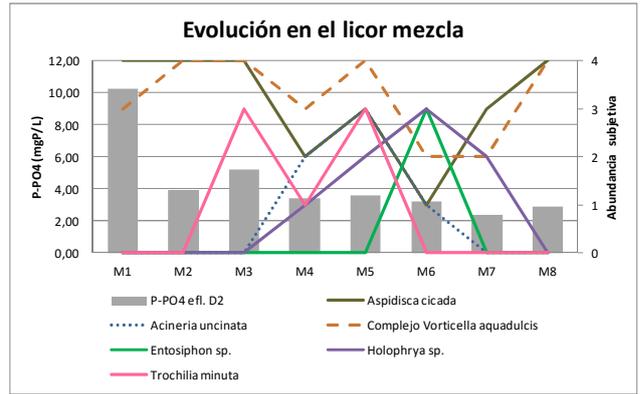
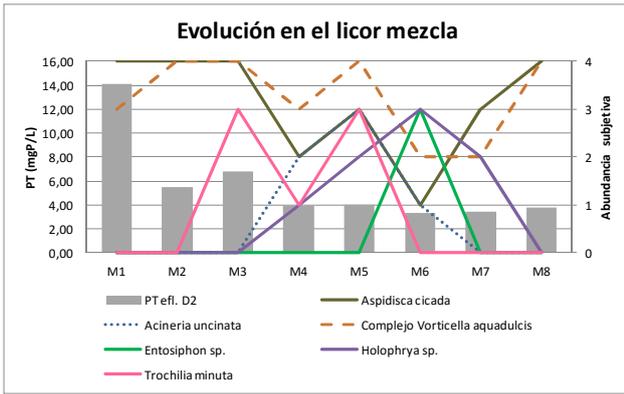


b) Reactor.

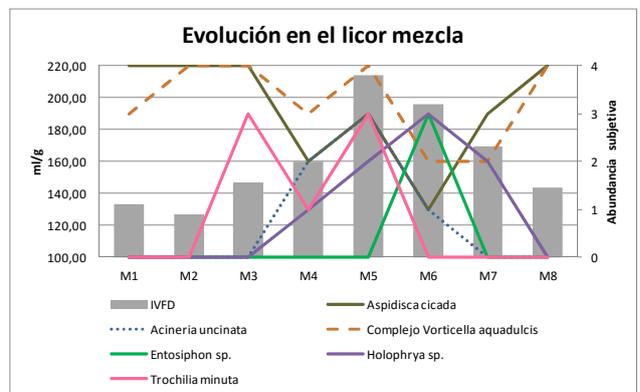
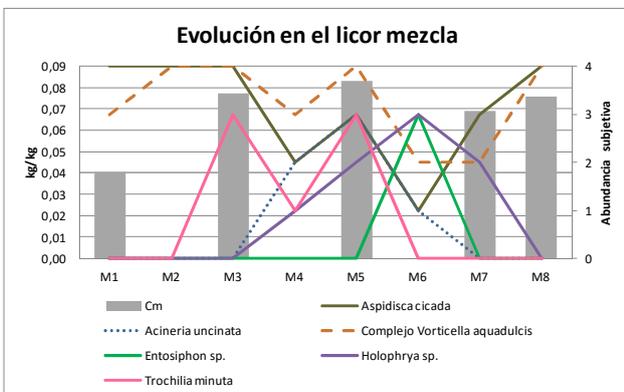


c) Agua efluente del decantador secundario.

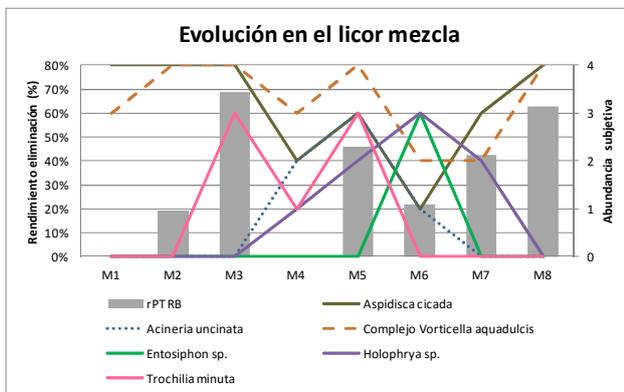
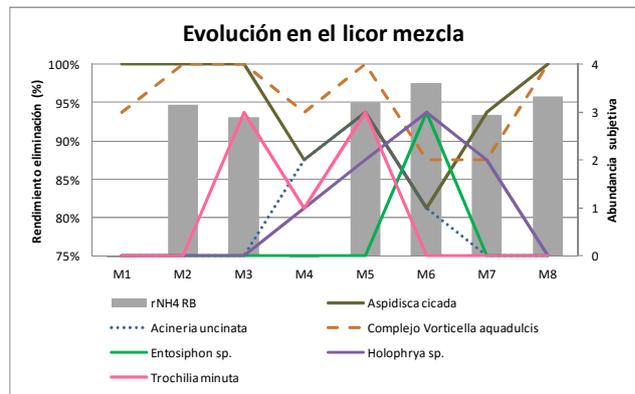
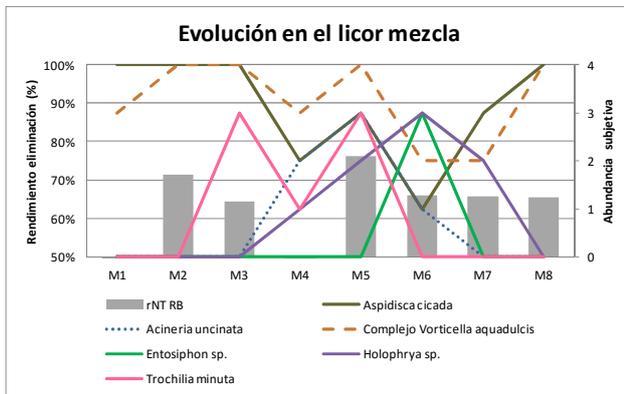
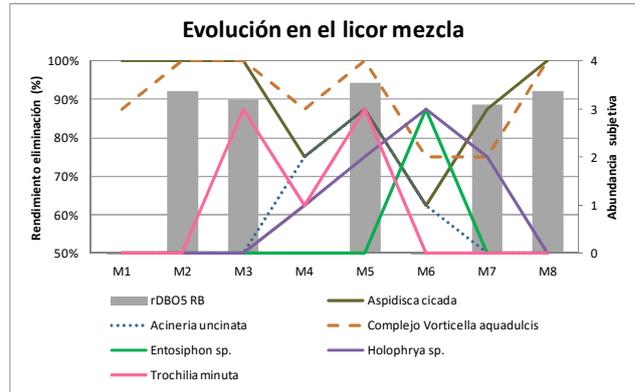
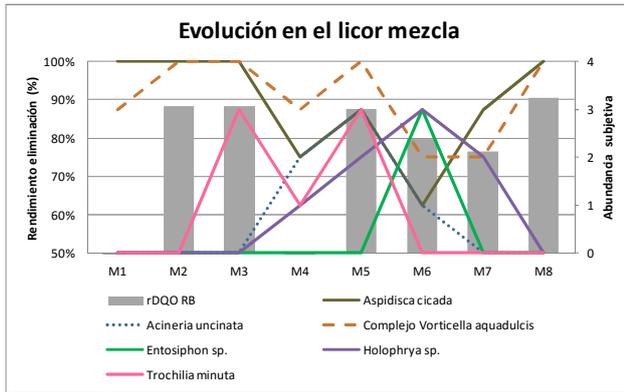




d) Variables operacionales.

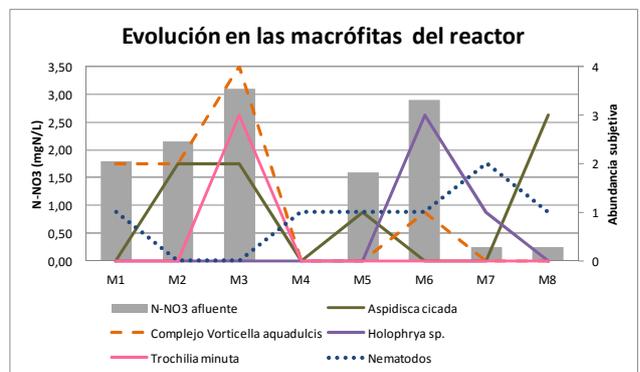
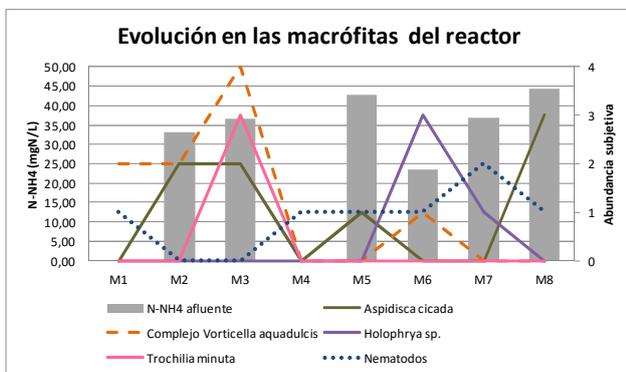
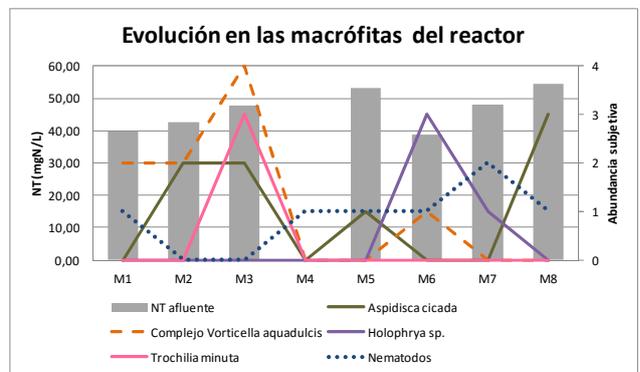
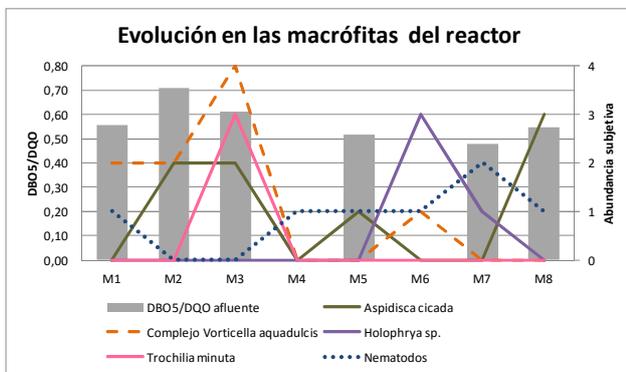
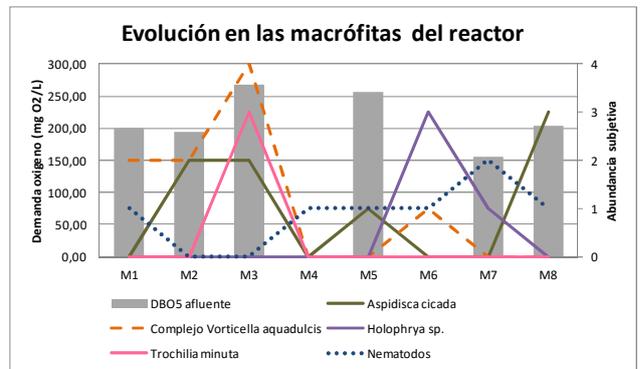
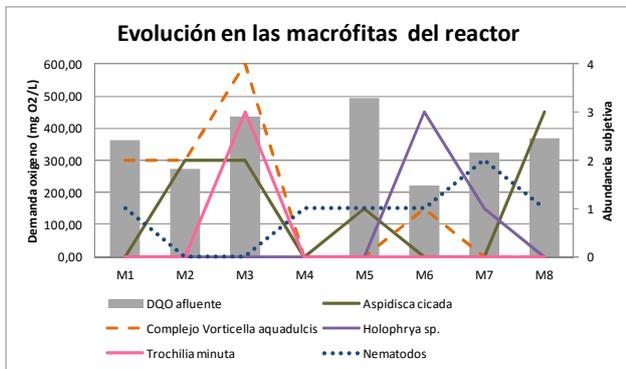
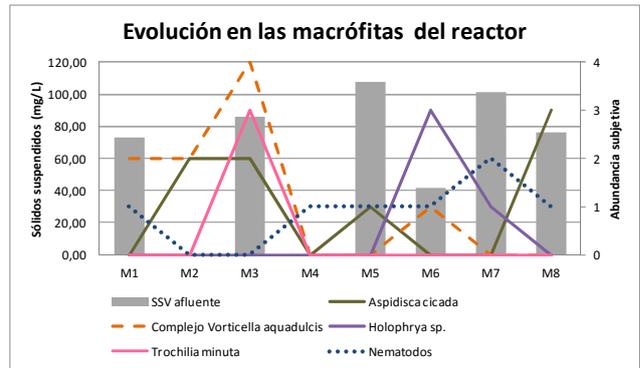
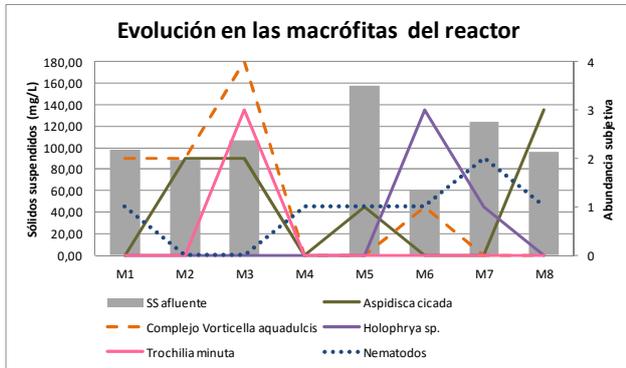


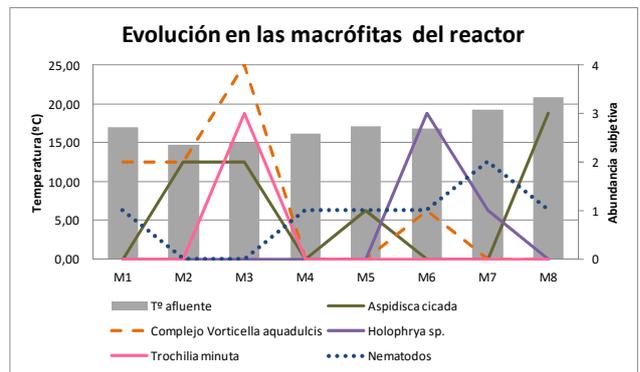
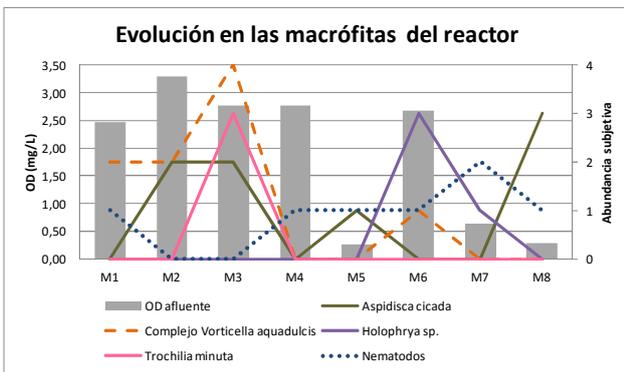
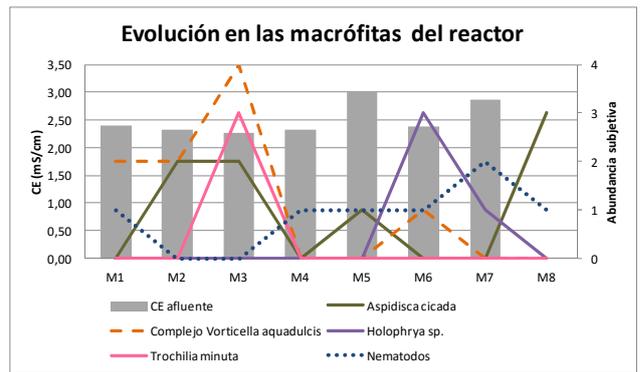
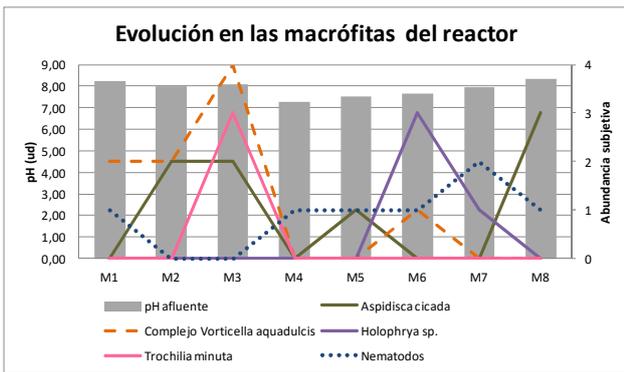
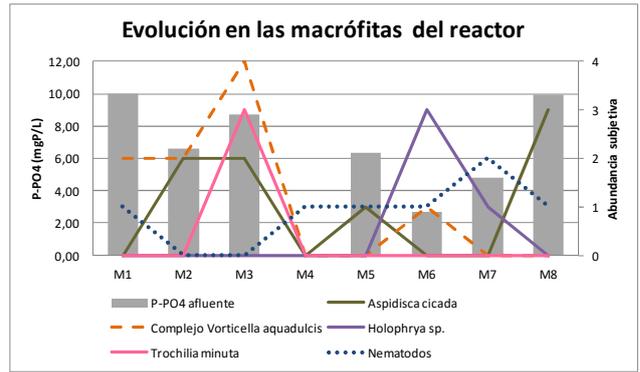
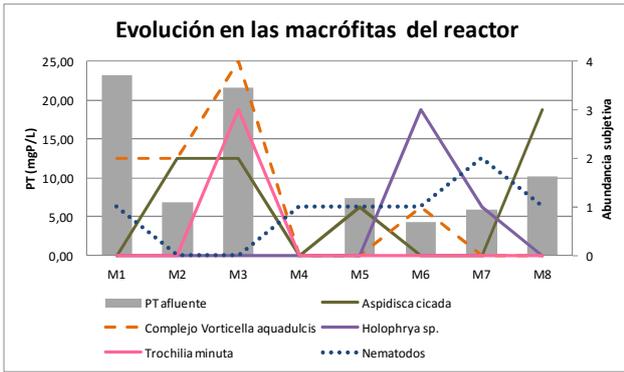
e) Rendimientos del sistema.



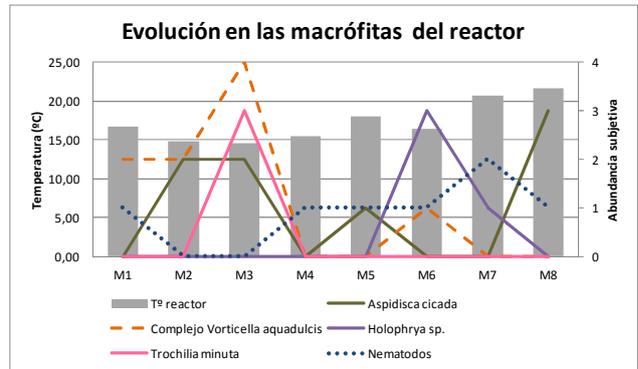
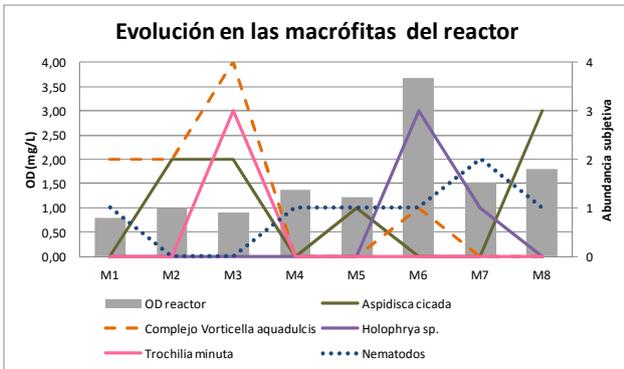
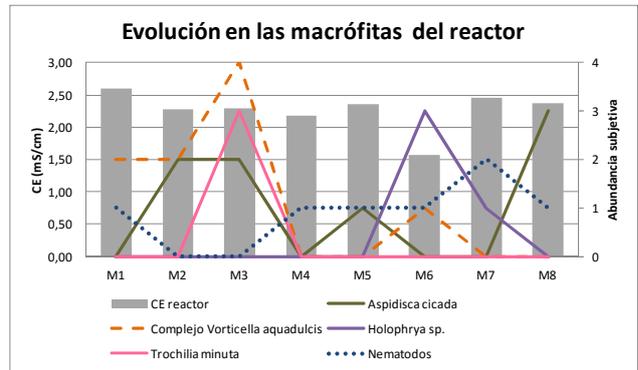
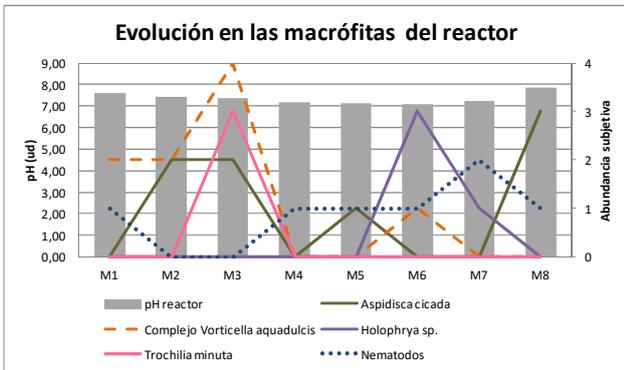
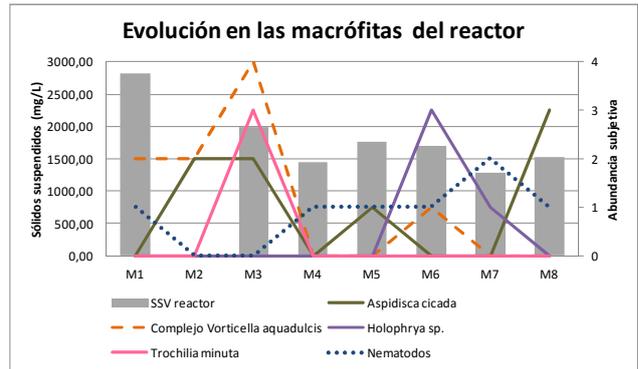
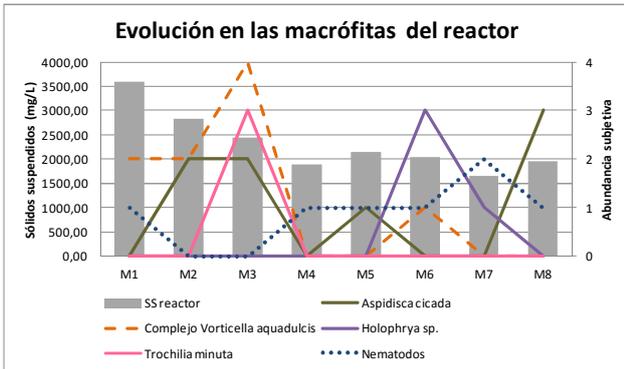
8.3.2 Reactor biológico. Raíces de las macrófitas.

a) **Agua afluyente**

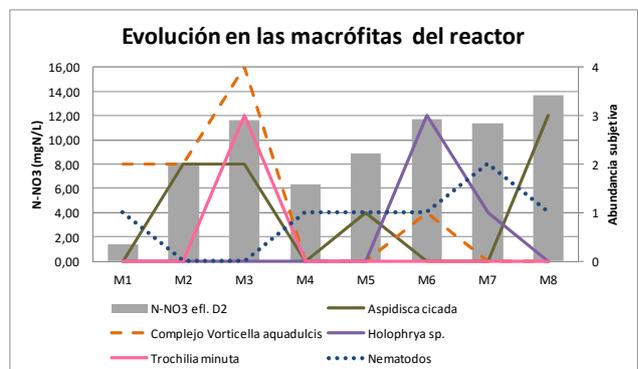
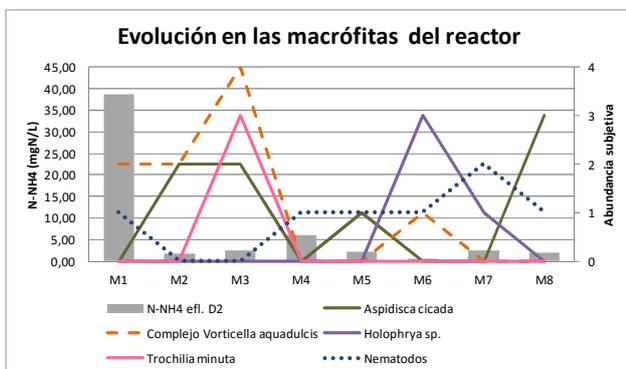
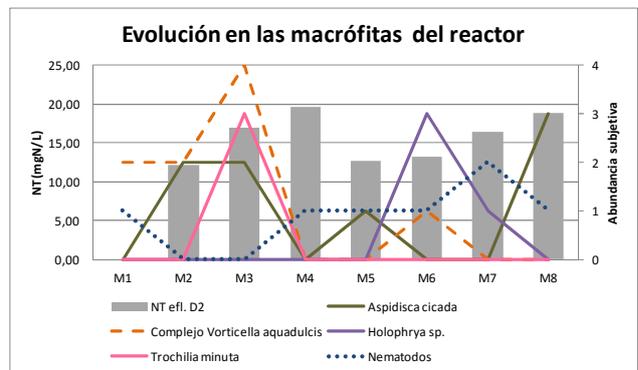
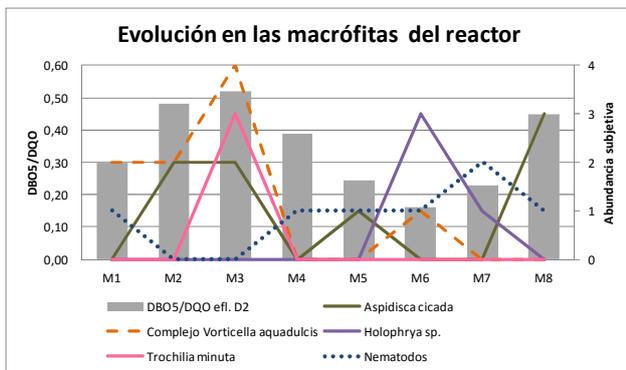
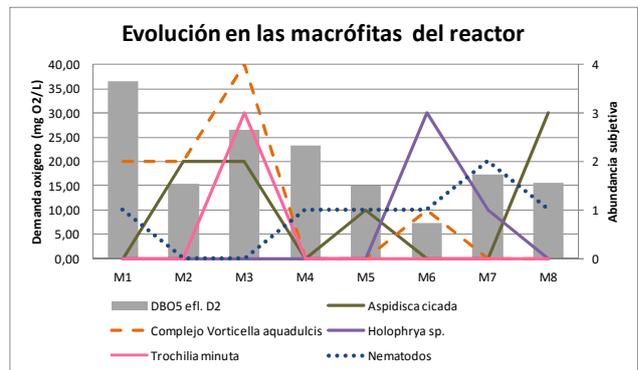
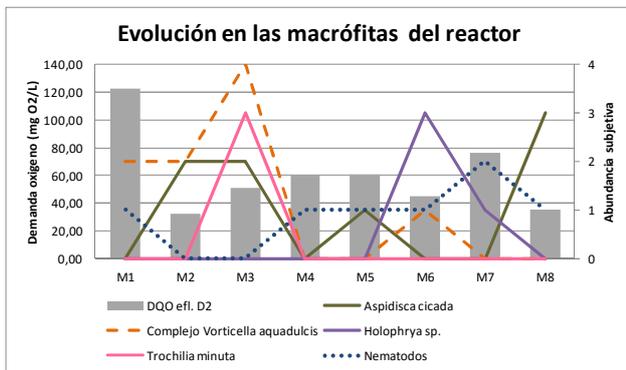
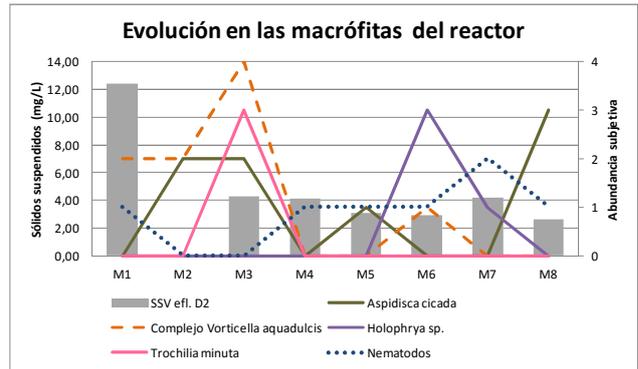
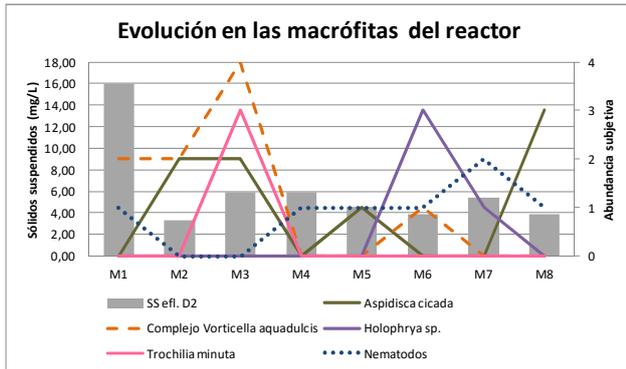


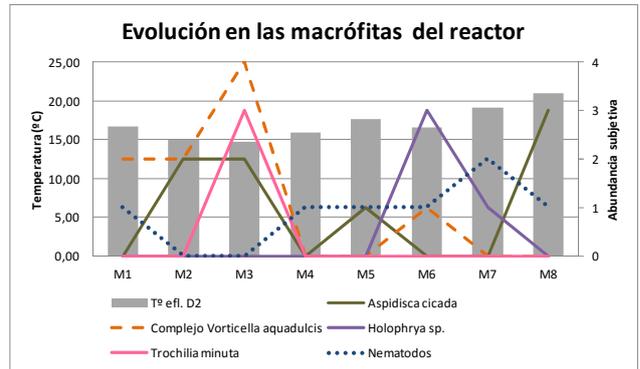
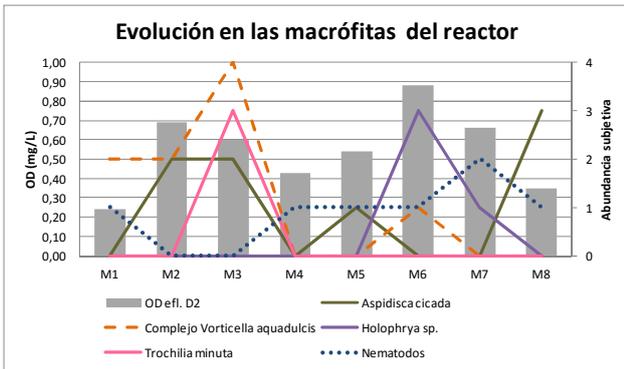
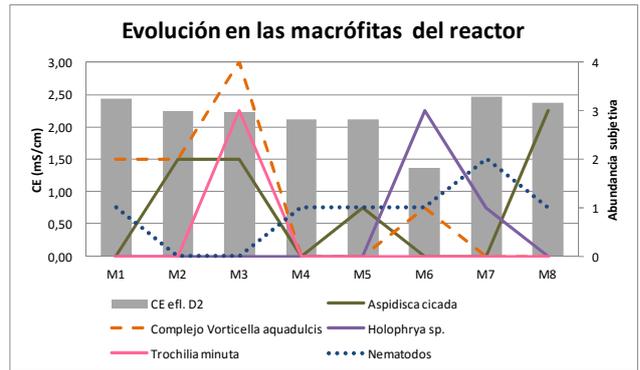
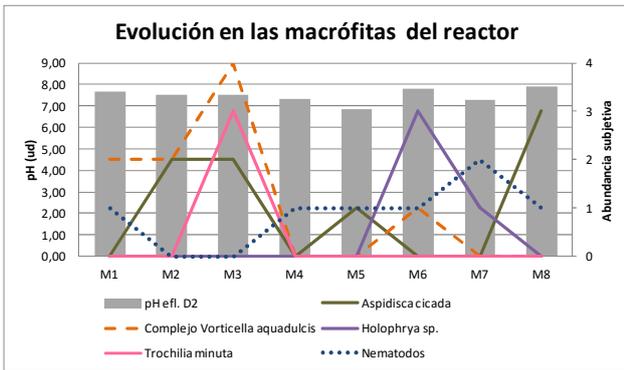
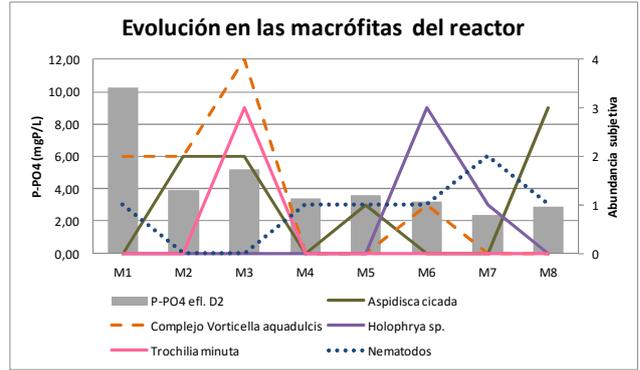
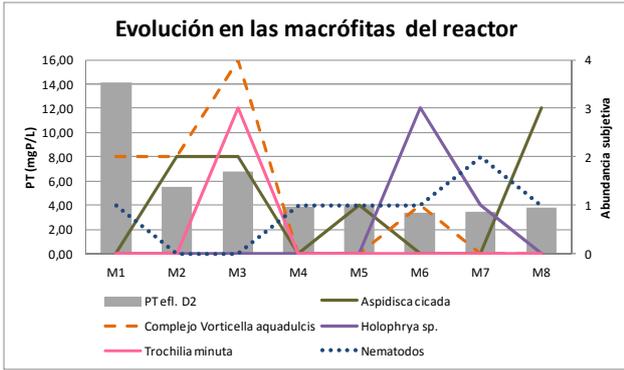


b) Reactor.

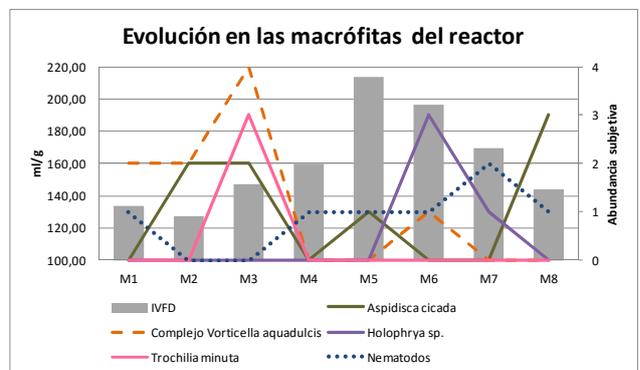
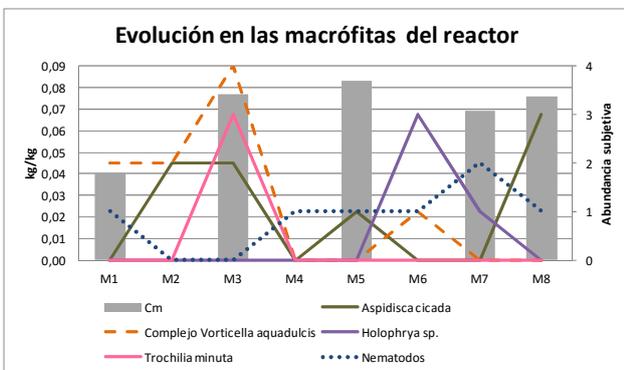


c) Agua efluente del decantador secundario.

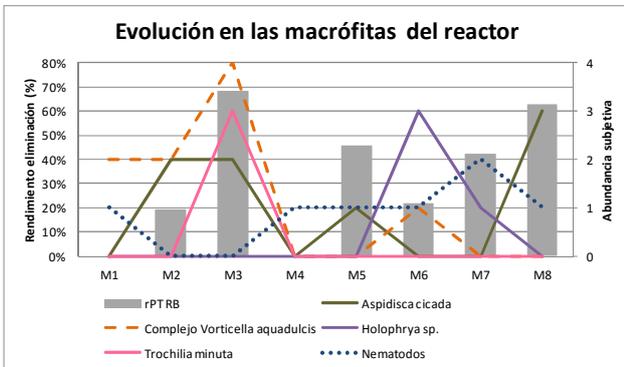
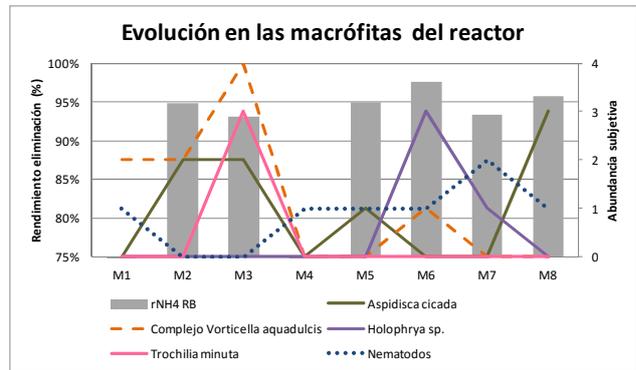
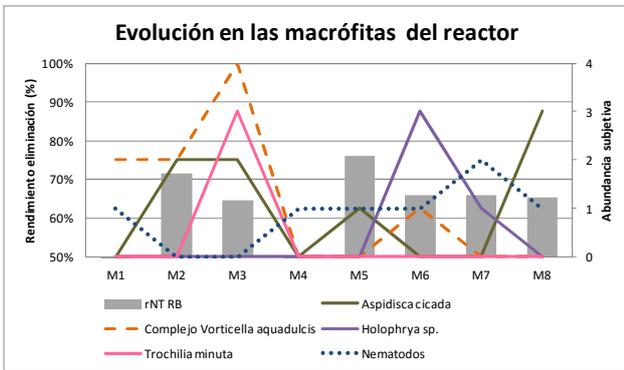
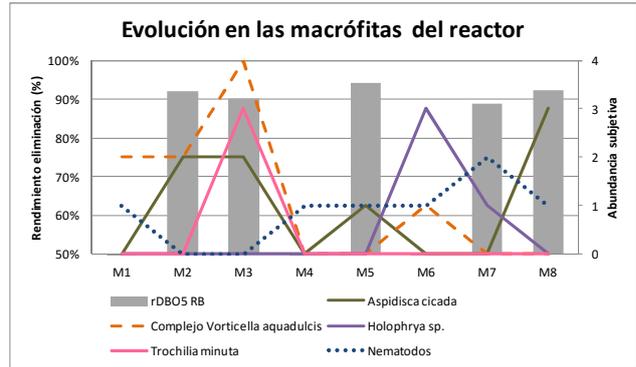
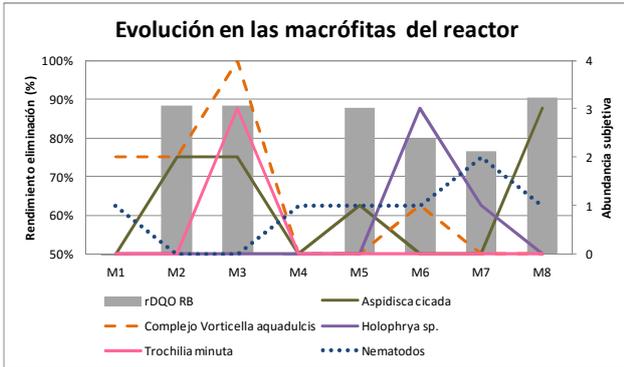




d) Variables operacionales.

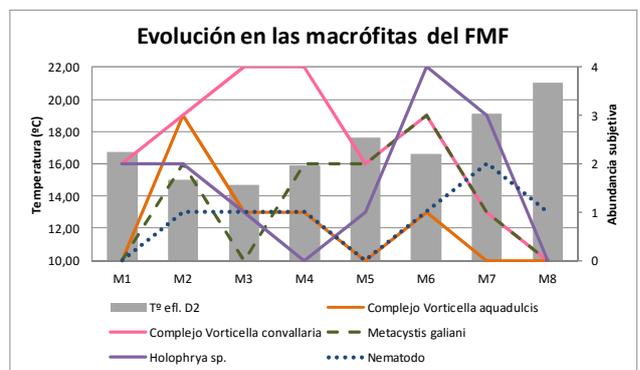
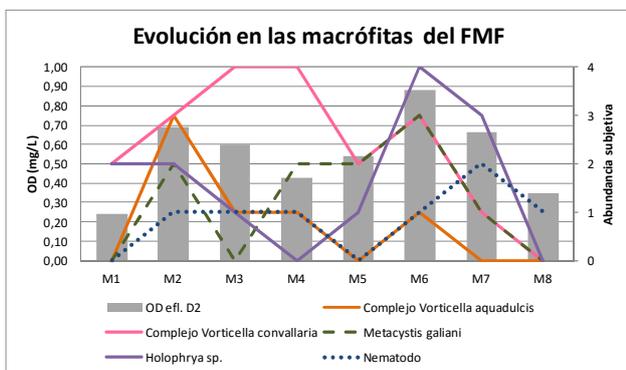
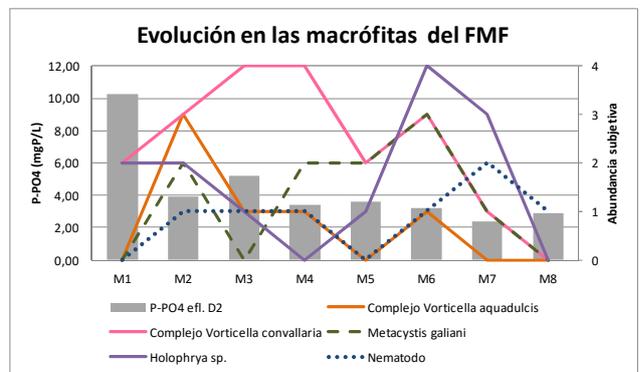
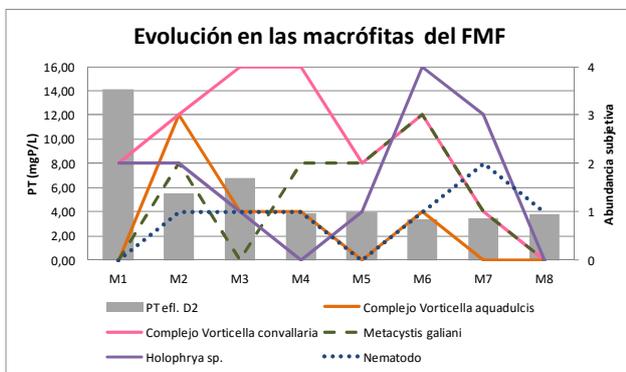
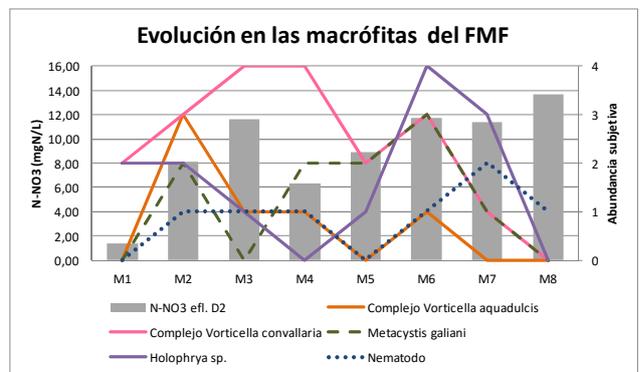
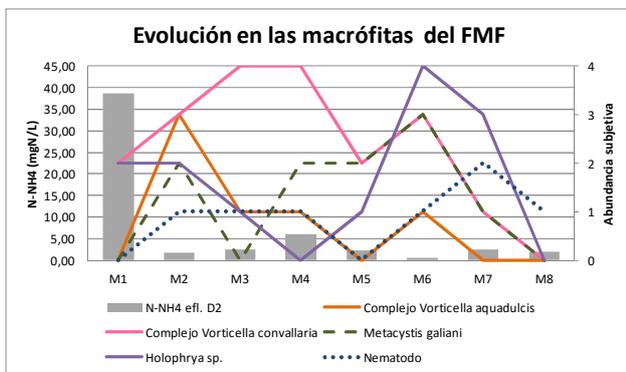
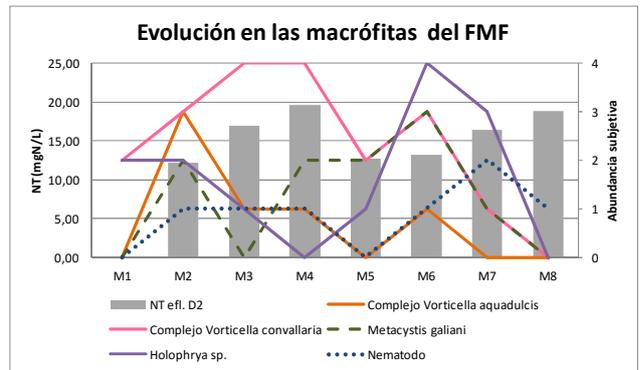
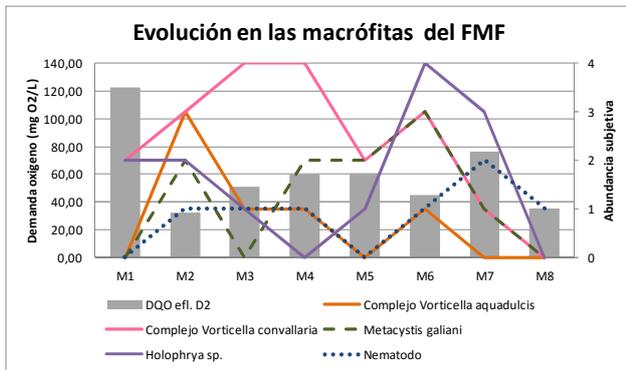


e) Rendimientos del sistema.

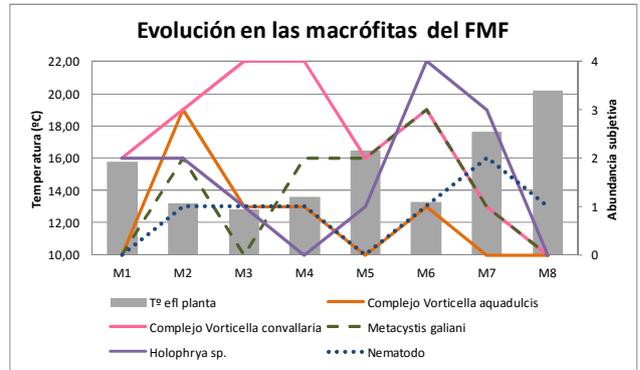
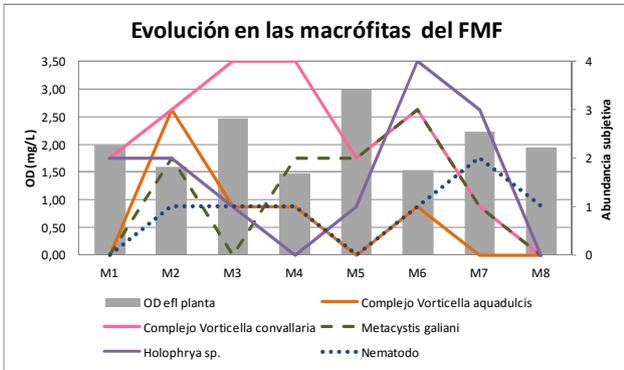
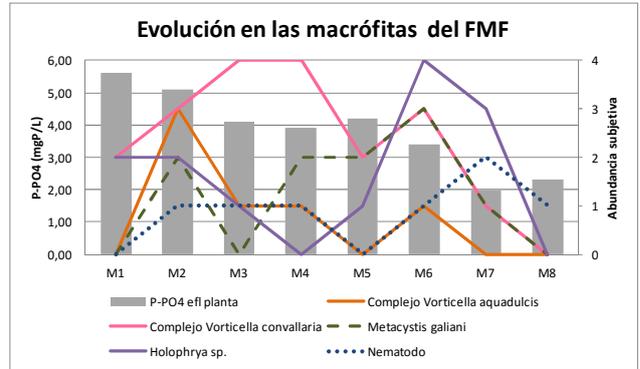
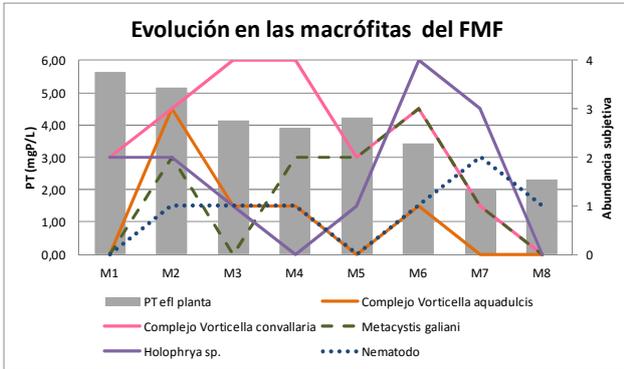
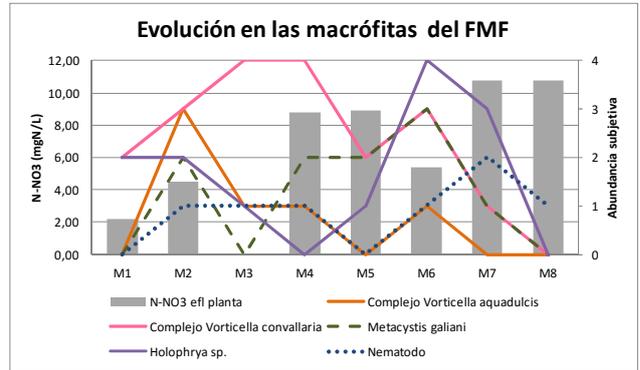
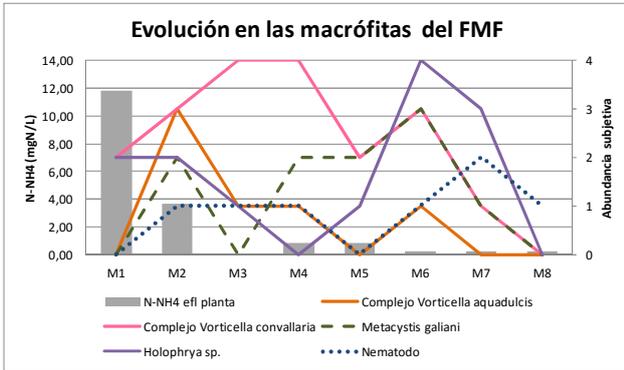
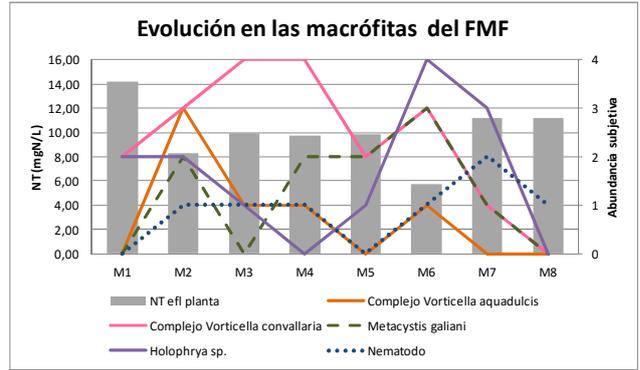
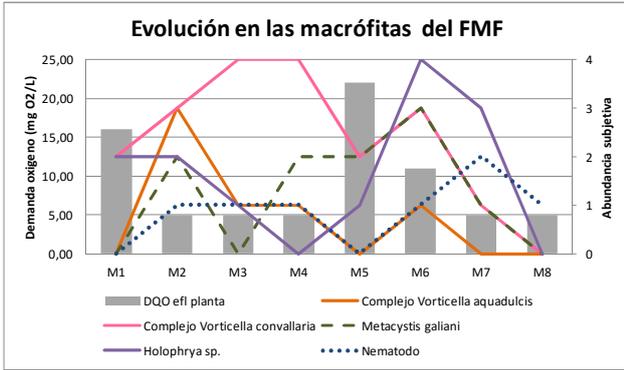


8.3.3 Humedal artificial con macrófitas en flotación.

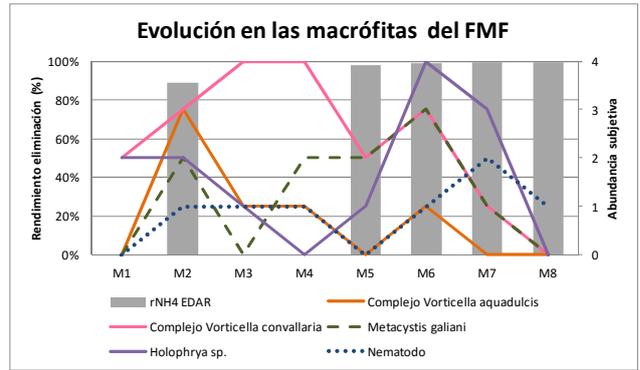
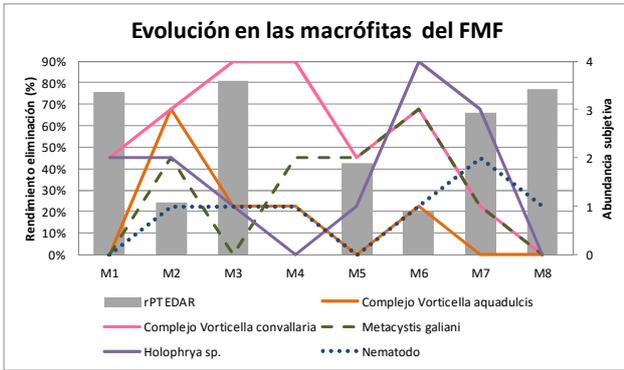
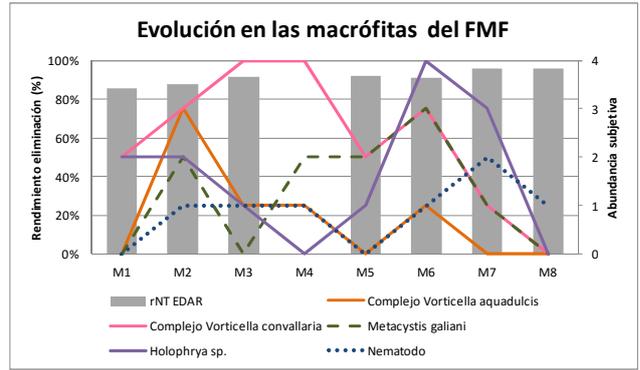
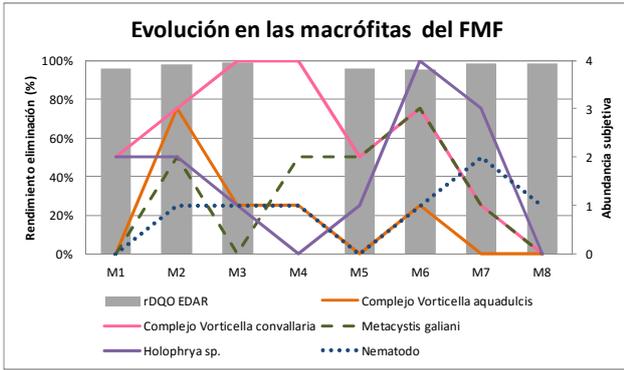
a) *Agua afluyente al humedal artificial.*



b) Agua efluente de la planta.

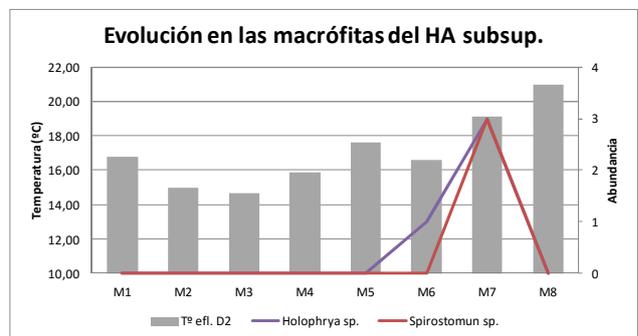
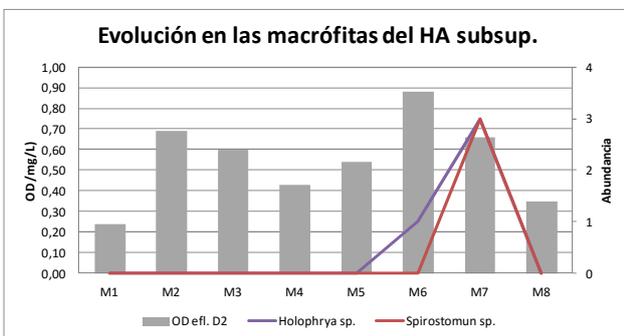
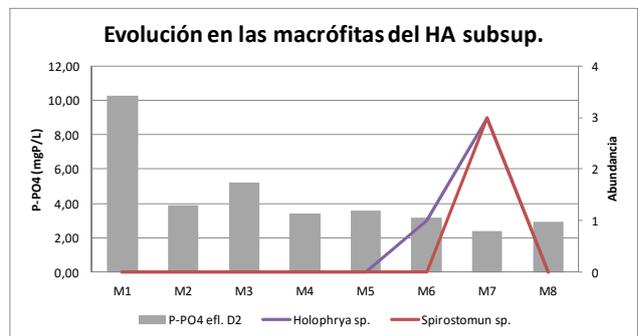
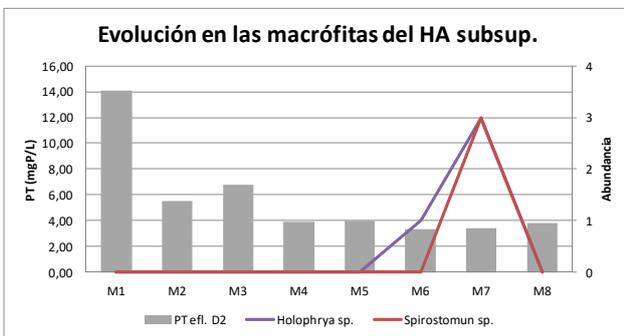
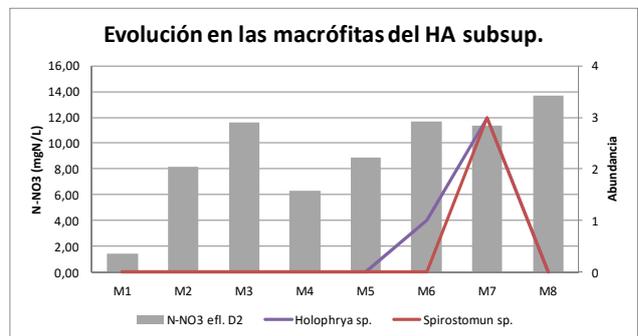
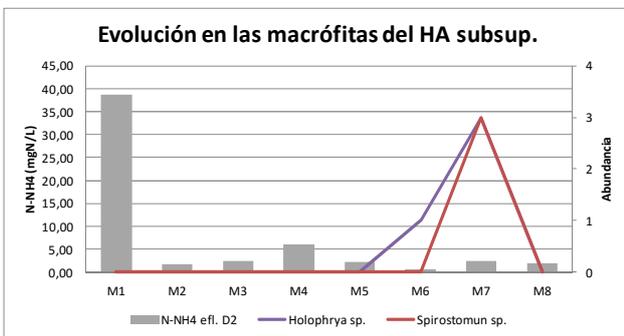
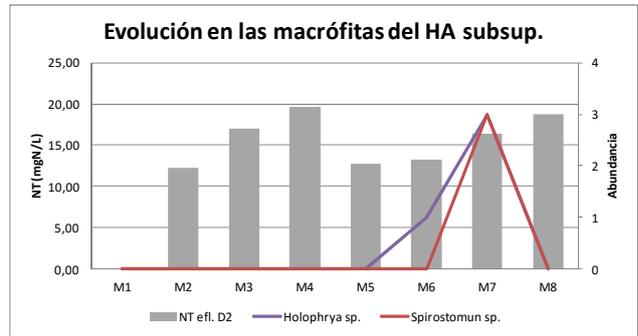
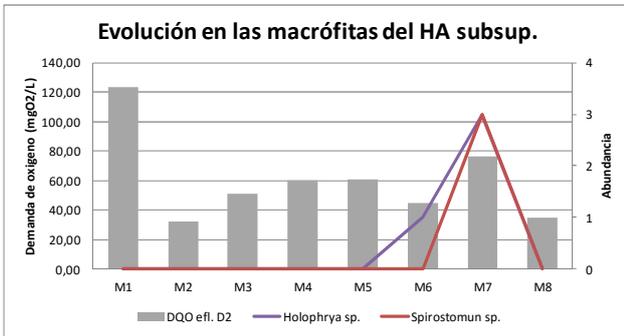


c) Rendimientos del sistema.

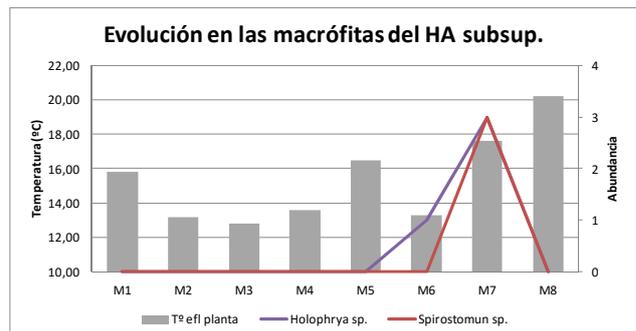
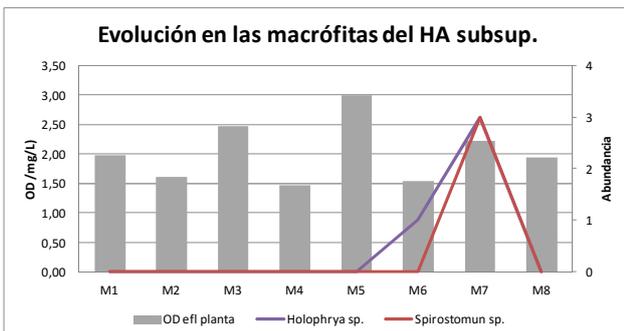
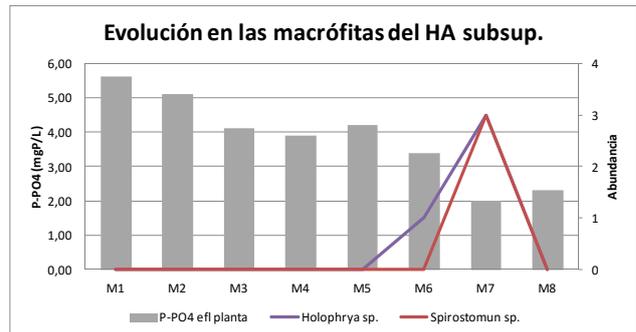
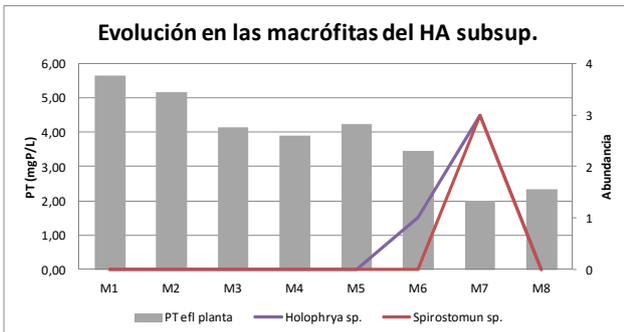
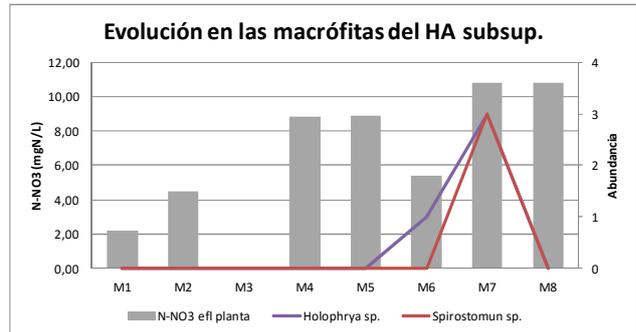
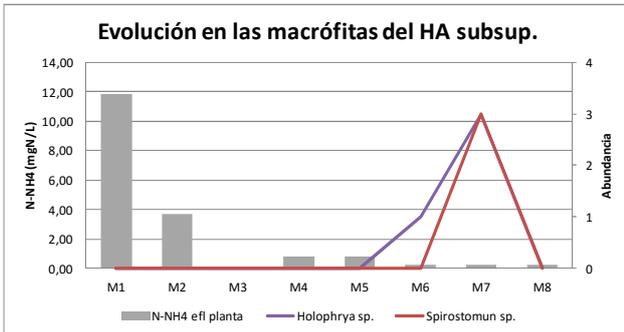
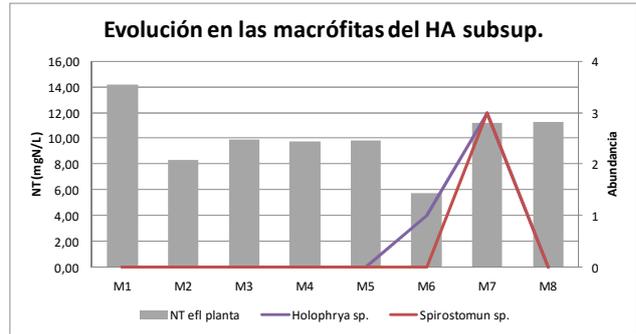
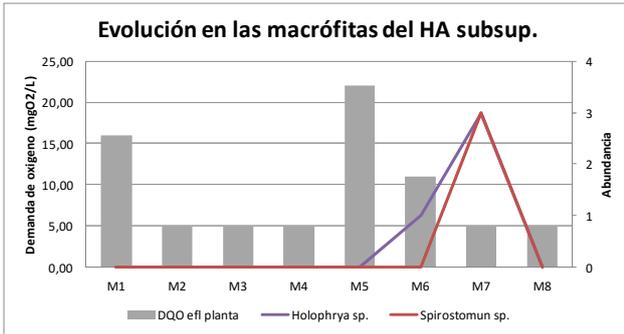


8.3.4 Humedal artificial de flujo subsuperficial.

a) *Agua afluyente al humedal artificial.*



b) Agua efluente de la planta.



c) Rendimientos del sistema.

