

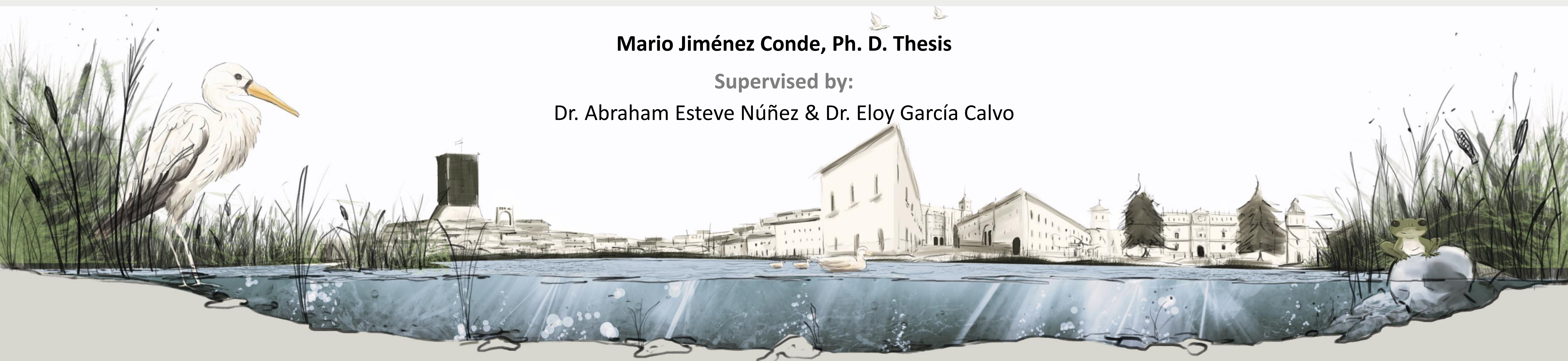
ELECTROBIOREMEDIATION STRATEGIES FOR REMOVING NITROGEN AND EMERGING POLLUTANTS IN URBAN WASTEWATER

The METland Solution as Tertiary & Quaternary Treatment

Mario Jiménez Conde, Ph. D. Thesis

Supervised by:

Dr. Abraham Esteve Núñez & Dr. Eloy García Calvo



Ph. D. Hydrology and Water Resource Management

Department of Analytical Chemistry, Physical Chemistry and Chemical Engineering

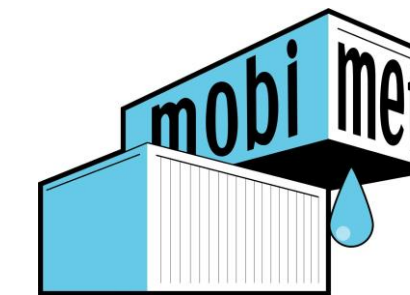
PROGRAMA DE
DOCTORADO INDUSTRIAL

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN



Comunidad
de Madrid

PROYECTOS EUROPEOS



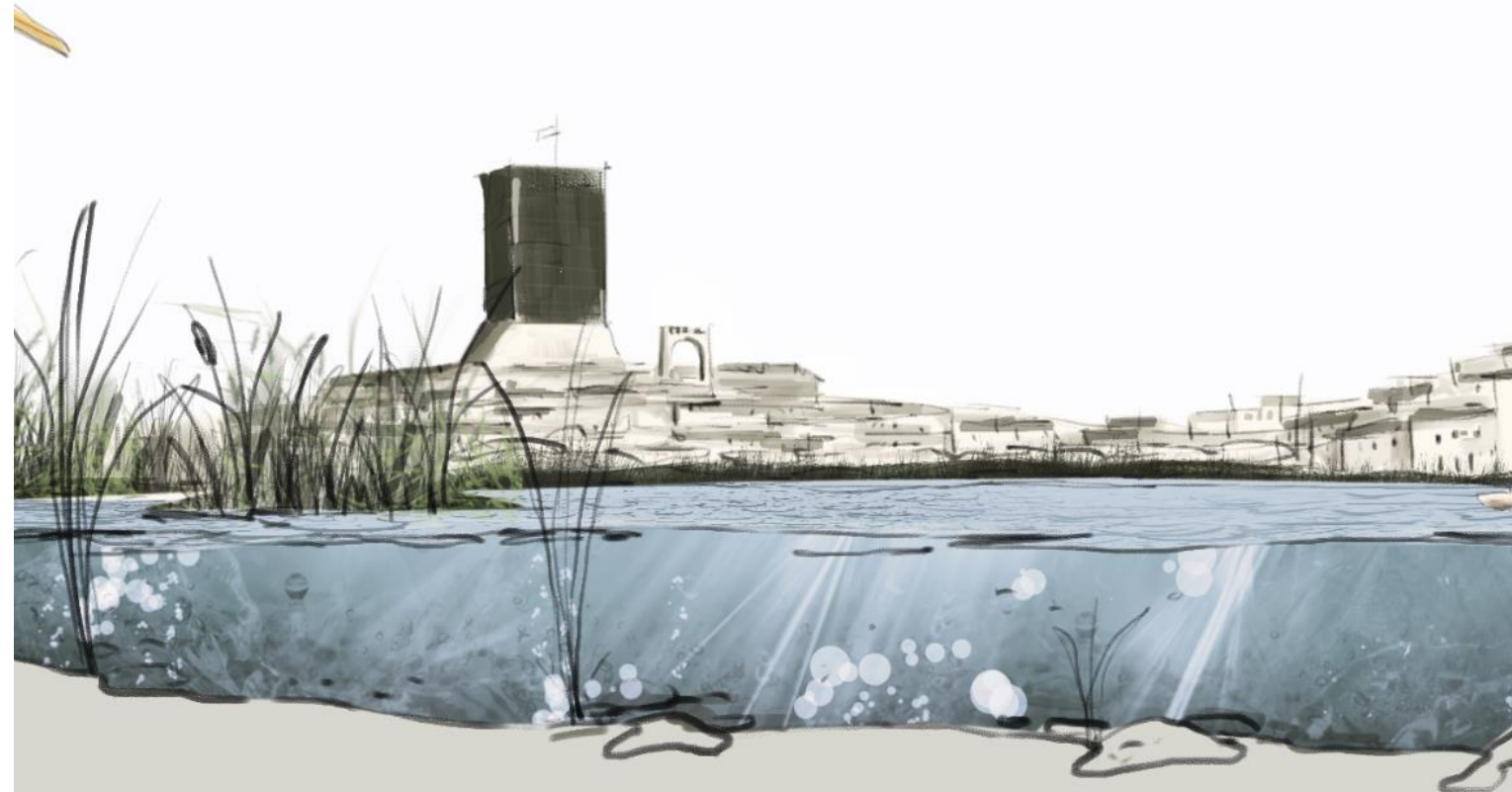
PROYECTOS COMERCIALES



INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

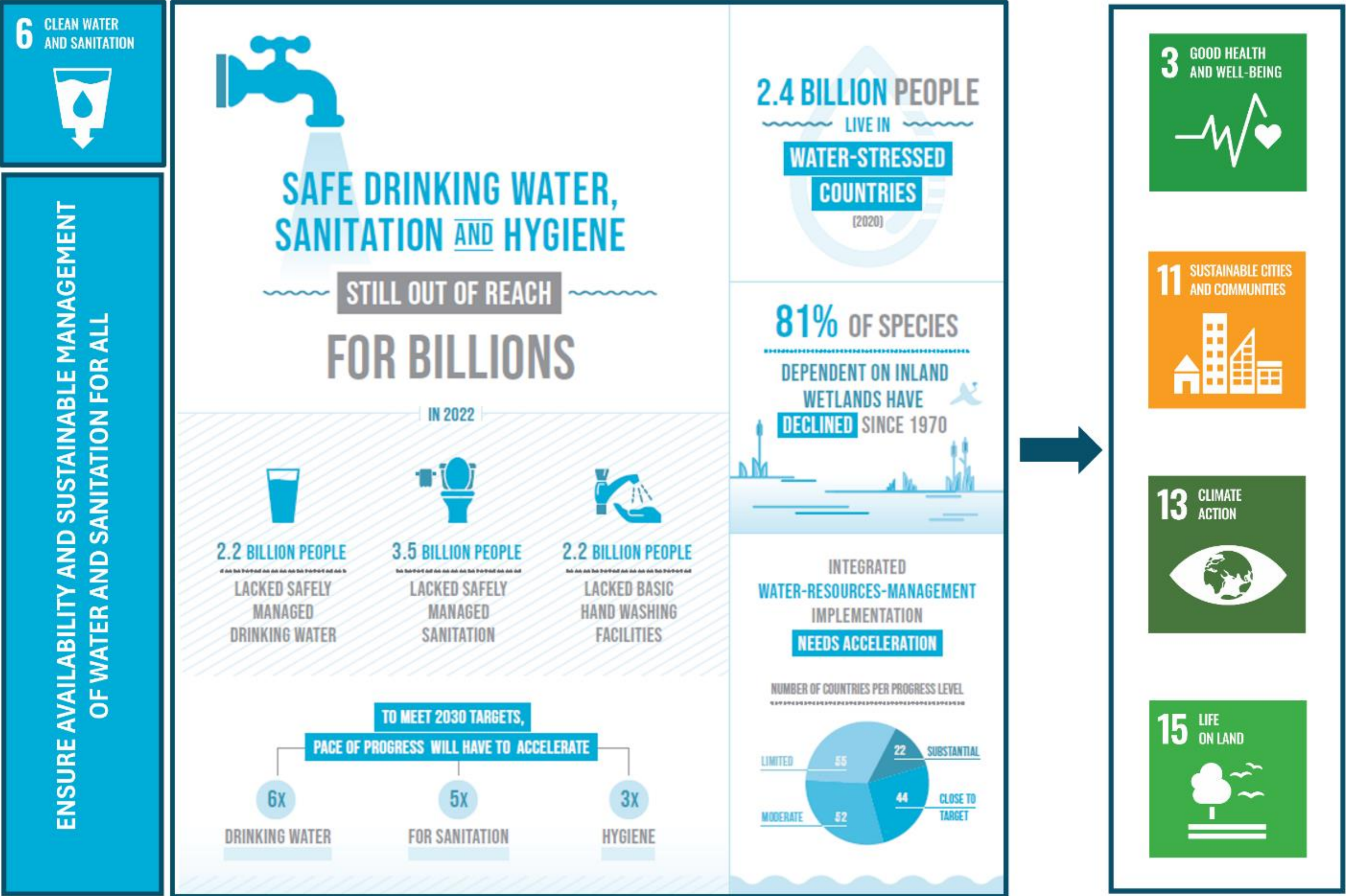


CAPÍTULO 2

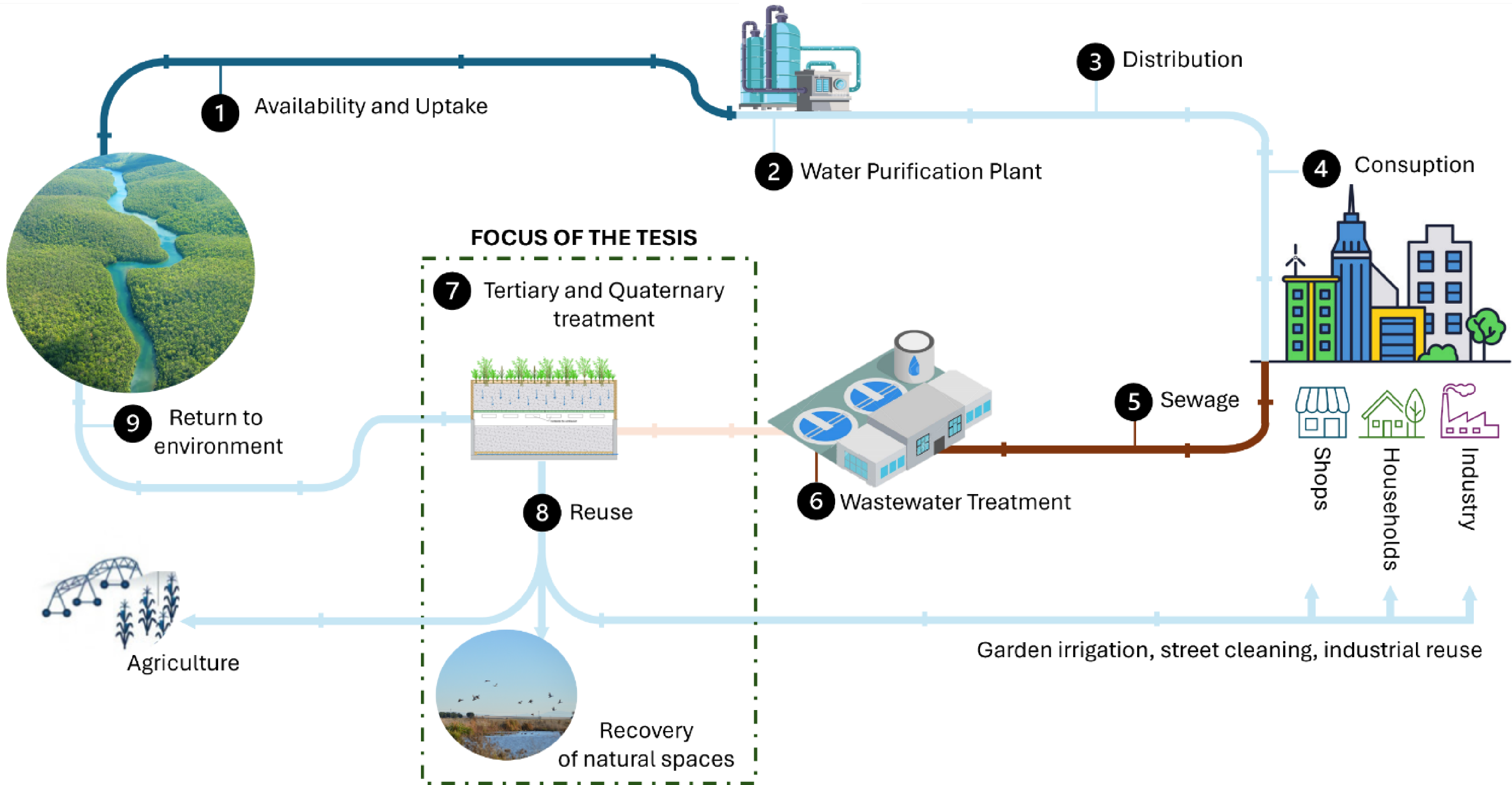
OBJETIVOS



LA CRISIS GLOBAL DEL AGUA



LA CRISIS GLOBAL DEL AGUA



CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LA UNIÓN EUROPEA EN REUTILIZACIÓN

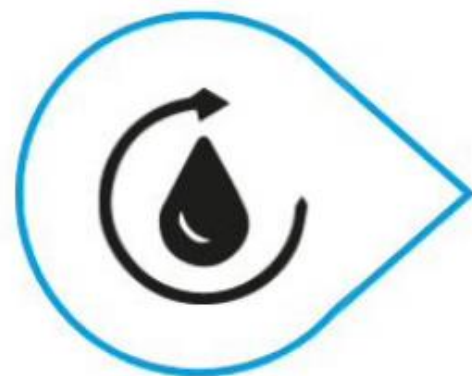


Revisión de la Directiva de Tratamiento de Aguas Residuales

REDEFINICIÓN INTEGRAL DE LAS PRÁCTICAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



Alineación con los objetivos del **PACTO VERDE EUROPEO** y el plan de acción de **CONTAMINACIÓN CERO**



La importancia de la **REUTILIZACIÓN**

Las autoridades nacionales deberán proporcionar la reutilización del agua residual tratada
400 hm³ DE AGUA/AÑO SE REUTILIZAN EN ESPAÑA



MICROCONTAMINANTES

↑ **PORCENTAJES DE REDUCCIÓN EN NITRÓGENO Y FÓSFORO**
Para 2045, eliminación con tratamiento cuaternario ≥ 150 000 h-e

QUIEN CONTAMINA PAGA	RESPONSABILIDAD AMPLIADA DEL PRODUCTOR (RAP) 80% de financiación de la instalación de los tratamientos cuaternarios, costes de operación y mantenimiento.
----------------------	--



NEUTRALIDAD ENERGÉTICA

Grado de generación renovable:

2023 →	20% de la energía consumida
2045 →	100% de la energía consumida

≥ 10 000 h-e

AUDITORIAS ENERGÉTICAS CADA 4 AÑOS

1.CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA.

Garantizar la seguridad y adecuación del agua en función del uso.

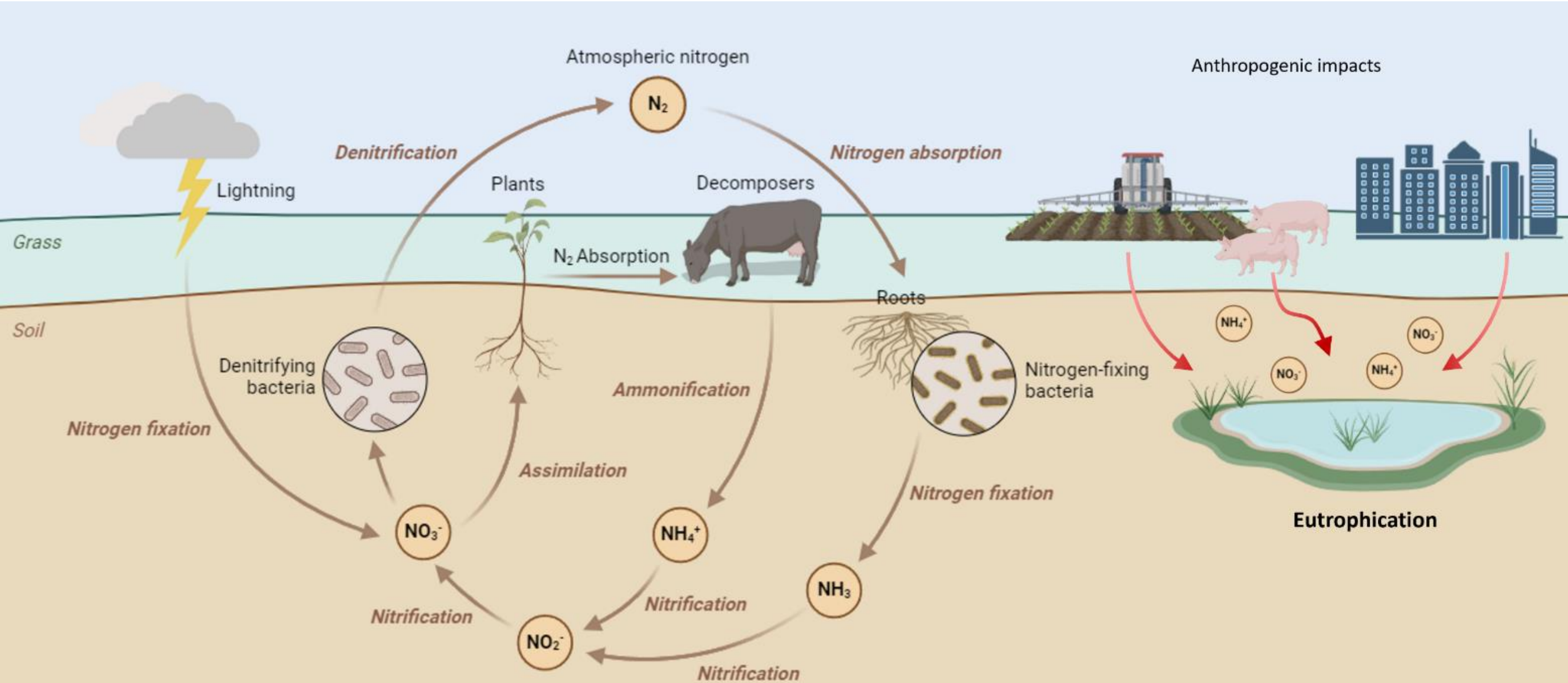
2. GESTIÓN DE RIESGOS.

Control y evaluaciones periódicas de los riesgos para la salud pública.

3. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.

Evaluar posibles efectos de la reutilización de las aguas residuales.

NITRÓGENO, UN RECURSO CONVERTIDO EN UN PROBLEMA



- TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
- 1

FIJACIÓN DE NITRÓGENO
- 2

ASIMILACIÓN
- 3

AMONIFICACIÓN
- 4

NITRIFICACIÓN
- 5

DESNITRIFICACIÓN
- 6

ANAMMOX

PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE NITRÓGENO EN AGUAS RESIDUALES

1

Oxidación **Autotrófica** de Amonio

- Utiliza el proceso de **Nitrificación** para la obtención de energía.
- Utiliza **CO₂** como fuente de carbono.

2

Oxidación **Heterotrófica** de Amonio

- No utiliza el proceso de nitrificación como medio de obtención de energía.
- Utiliza fuentes de **Materia Orgánica** como fuente de carbono.
- Utiliza esta ruta metabólica como método de **liberación del Estrés Oxidativo**.
- También tiene la **capacidad de acoplar el proceso a una desnitrificación aerobia**.

3

Oxidación **Anaerobia** del Amonio (Anammox)

- Obtiene energía de la transformación de amonio y nitrito en nitrógeno gas.
- Utiliza **CO₂** como fuente de carbono.

4

Desnitrificación **Heterotrófica**

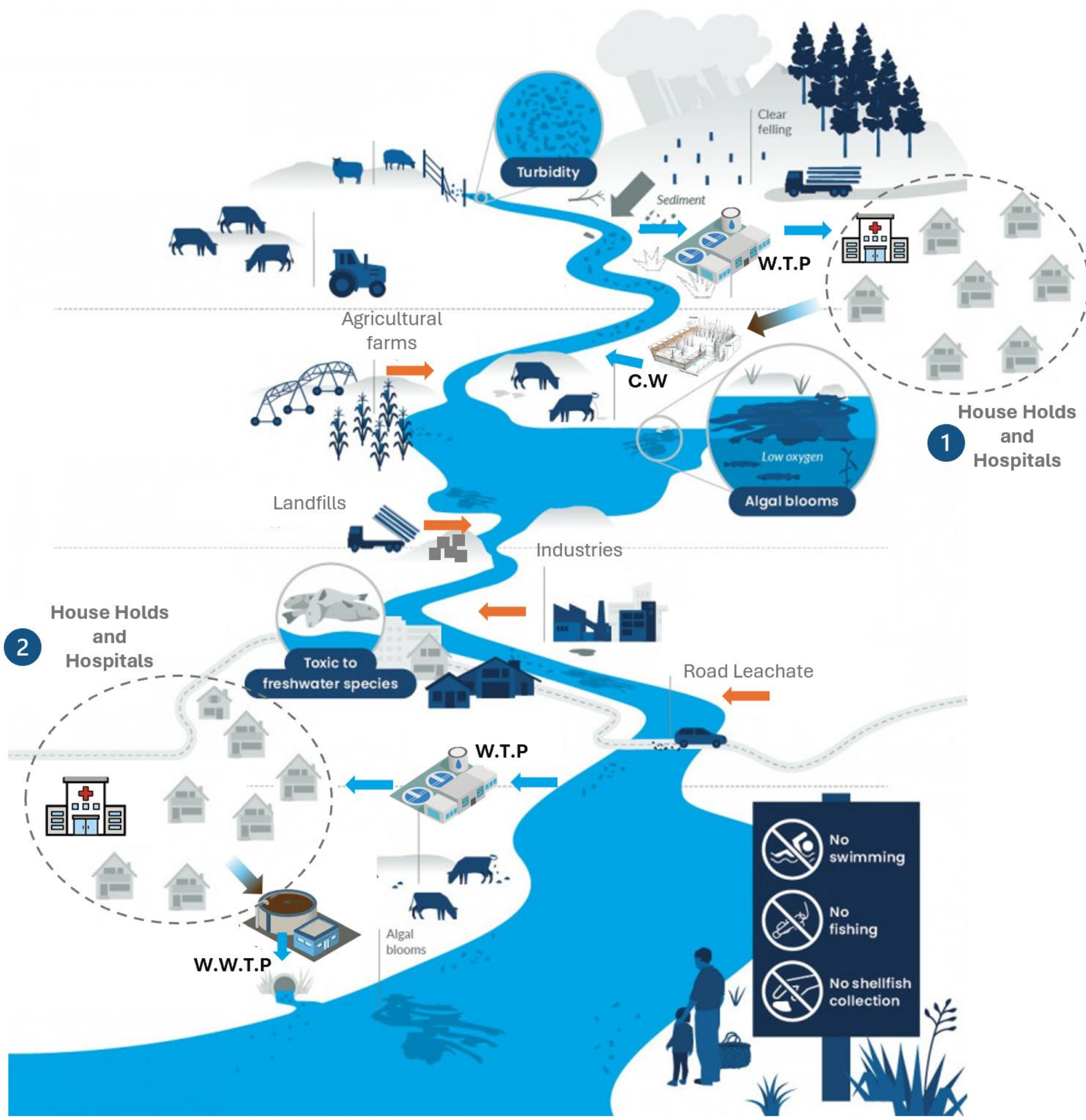
- Utiliza el Nitrato como aceptor de electrones.
- Utiliza materia orgánica como fuente de carbono.

5

Desnitrificación **Autotrófica**

- Utiliza el Nitrato como aceptor de electrones.
- Utiliza una fuente inorgánica como fuente de carbono.

CONTAMINANTES EMERGENTES, UN PROBLEMA DE PREOCUPACIÓN CRECIENTE



1

Se trata de un grupo de sustancias, generalmente en bajas concentraciones que en condiciones naturales no aparecerían en el medio.

2

Entre ellos se encuentran productos de cuidado personal, aditivos industriales y una amplia variedad de productos farmacéuticos.

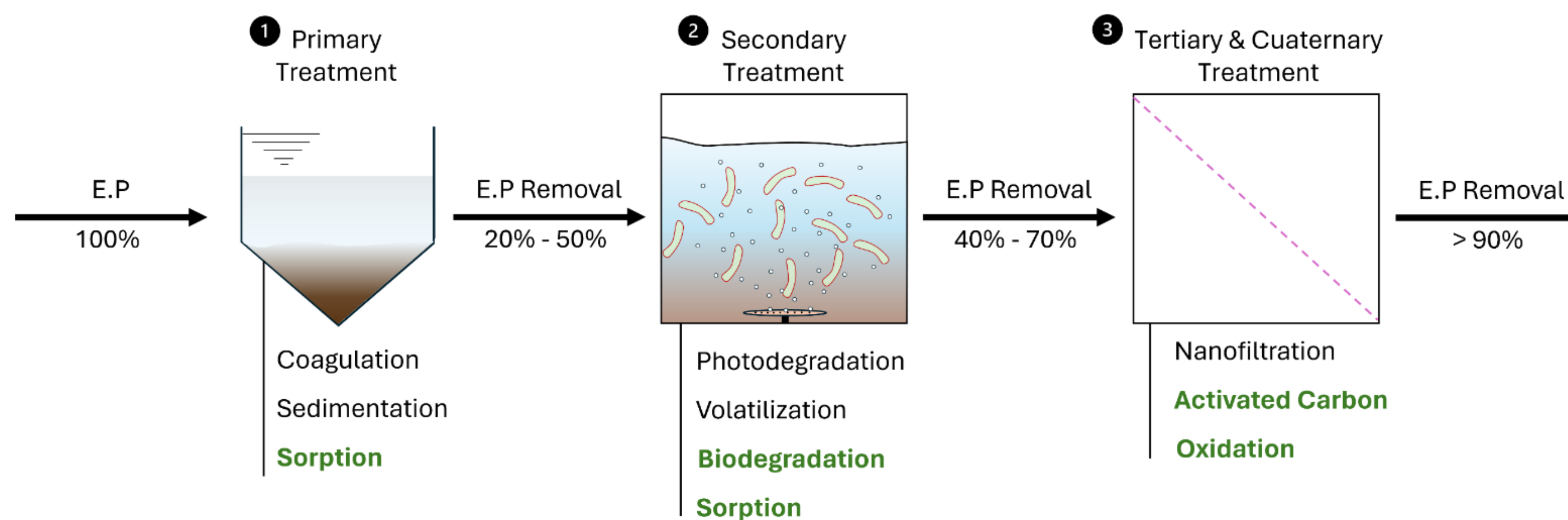
3

Estos compuestos son muy difíciles de degradar en sistemas de depuración convencionales, por lo que generalmente terminan llegando al medio ambiente de manera constante.

4

Se desconocen los múltiples efectos que pueden causar estas sustancias, algunos de ellos tan preocupantes como la resistencia a los antibióticos de las propias bacterias.

PROCESOS CONVENCIONALES DE ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES



1

Tratamiento Primario

- El proceso que alcanza un mayor porcentaje de reducción es la **sorción** en los diferentes compuestos presentes.
- Los procesos de floculación o sedimentación solo alcanzan rendimientos del 10%.

2

Tratamiento Secundario

- Los mayores rendimientos se alcanzan por procesos de **biodegradación y sorción** en el fango activo.

3

Tratamiento Terciario

- Generalmente, el fin del tratamiento terciario no es la eliminación de este tipo de compuestos.
- La **Oxidación mediante ozono**, o la **sorción** en sistemas con carbón activo.

SISTEMAS CONVENCIONALES Vs SISTEMAS NO CONVENCIONALES

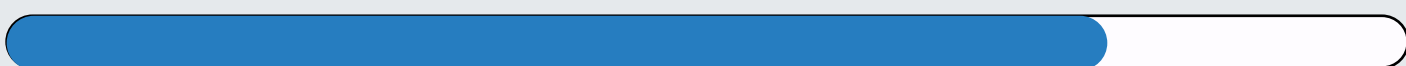
CONVENCIONALES / INTENSIVOS



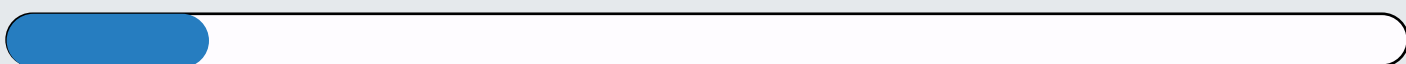
Coste de operación (energía, químicos y mantenimiento)



Coste de construcción



Superficie requerida



NO-CONVENCIONALES / NbS (Nature-based solutions)



Coste de operación (energía, químicos y mantenimiento)



Coste de Construcción



Superficie requerida



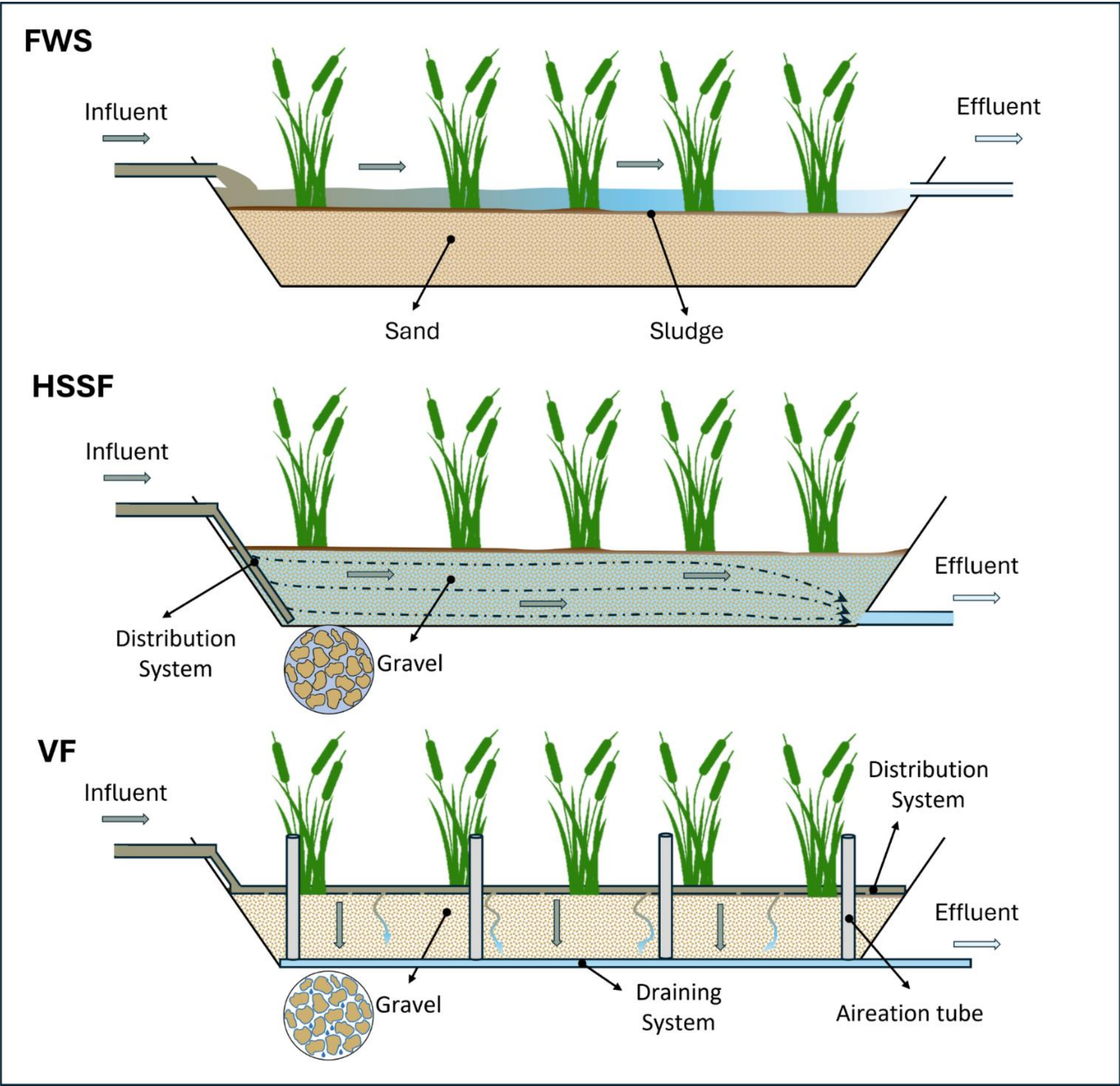
HUMEDALES DE TRATAMIENTO (TW)

Las soluciones basadas en la naturaleza (NbS) engloban un grupo de sistemas, como los Humedales de Tratamiento, diseñados para reproducir las características de los ecosistemas naturales, mejorando la capacidad de tratamiento del agua en condiciones controladas. Estos sistemas, consisten en lagunas poco profundas con plantas, donde procesos químicos, físicos y biológicos actúan conjuntamente para mejorar la calidad del agua.

CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LA CIRCULACIÓN DEL AGUA

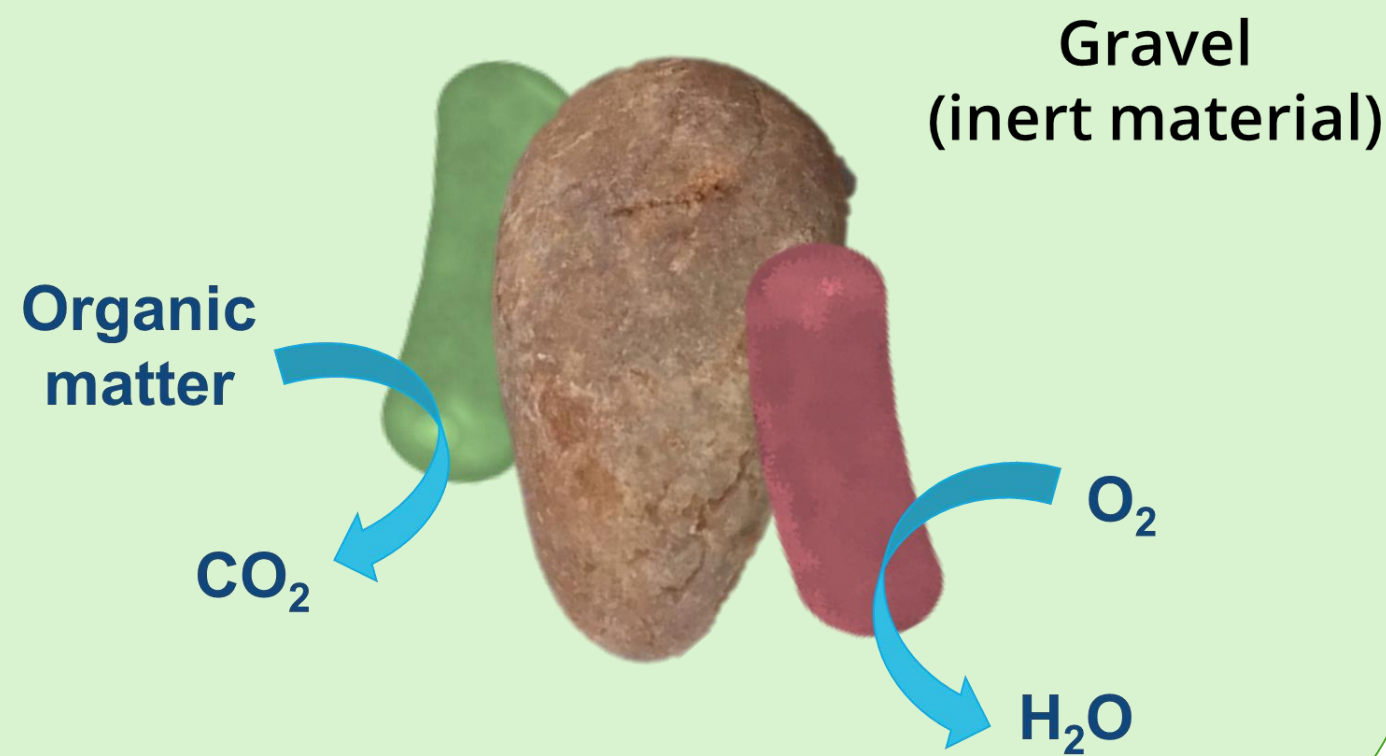
COMPONENTES

VEGETACIÓN	MICROORGANISMOS	SUBSTRATO
		



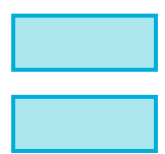
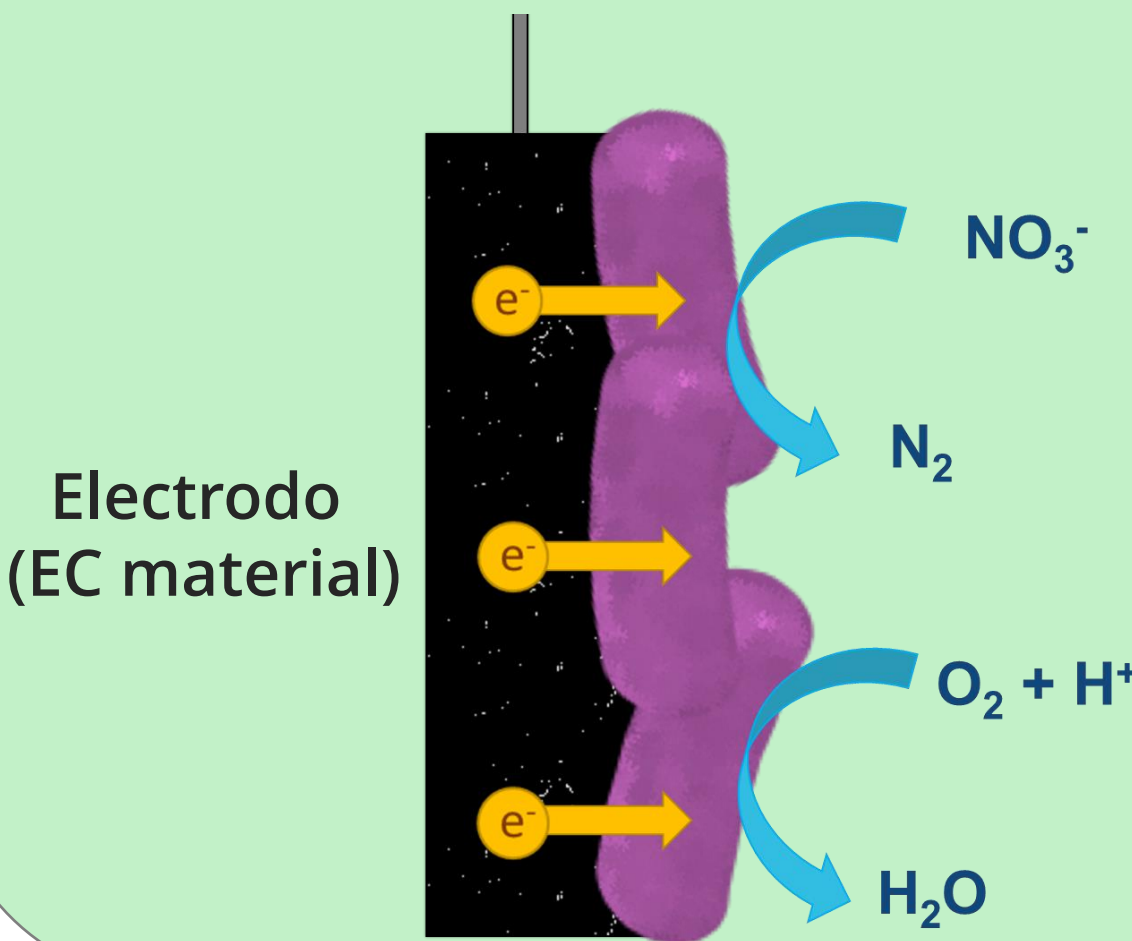
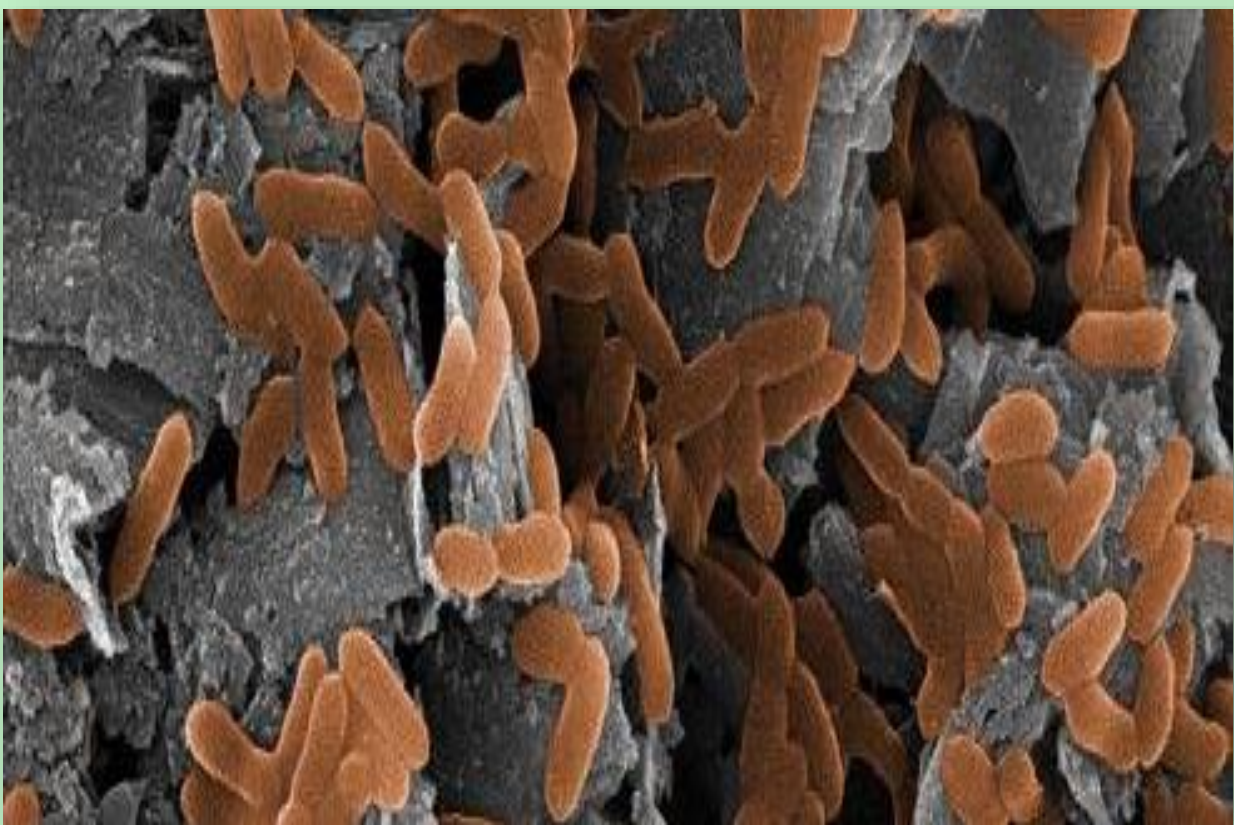
¿CÓMO SURGEN LOS METLAND®?

Treatment wetland

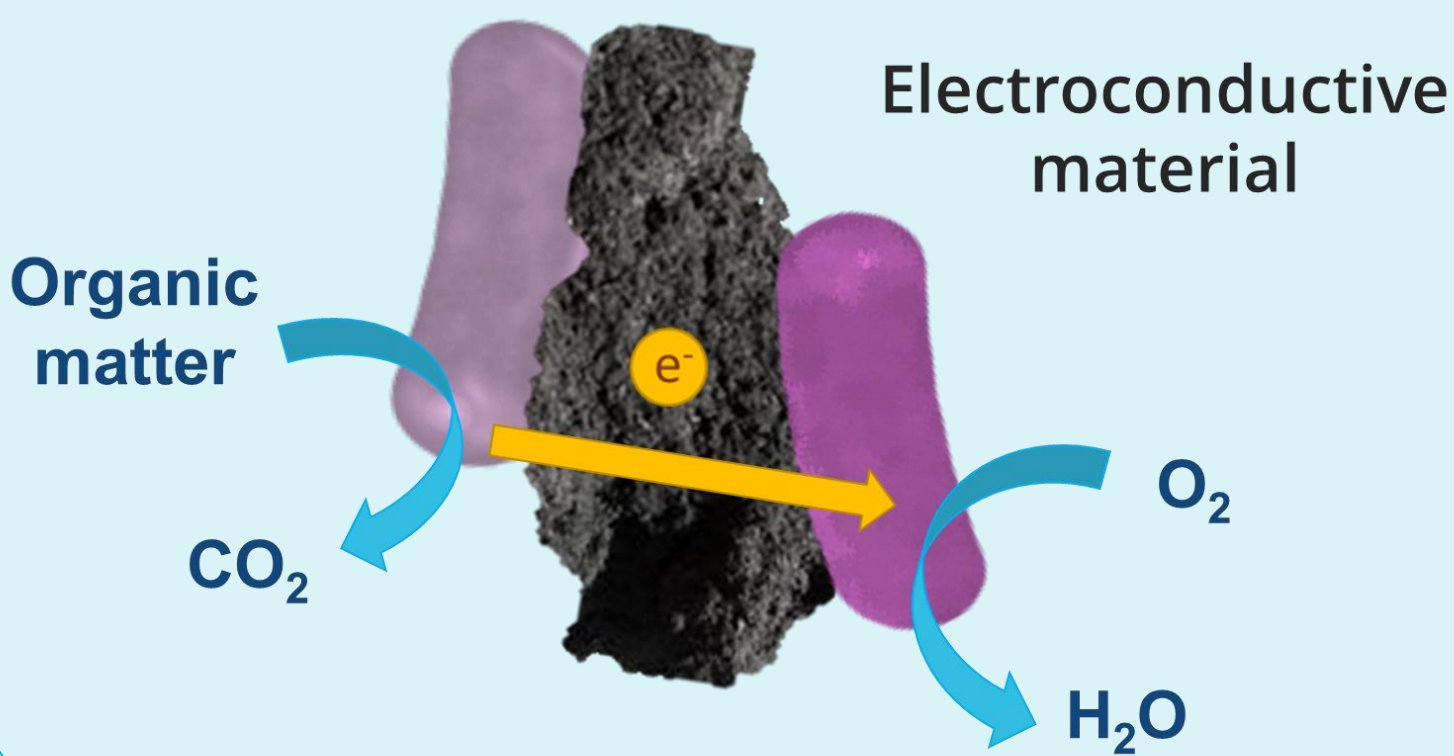


METs

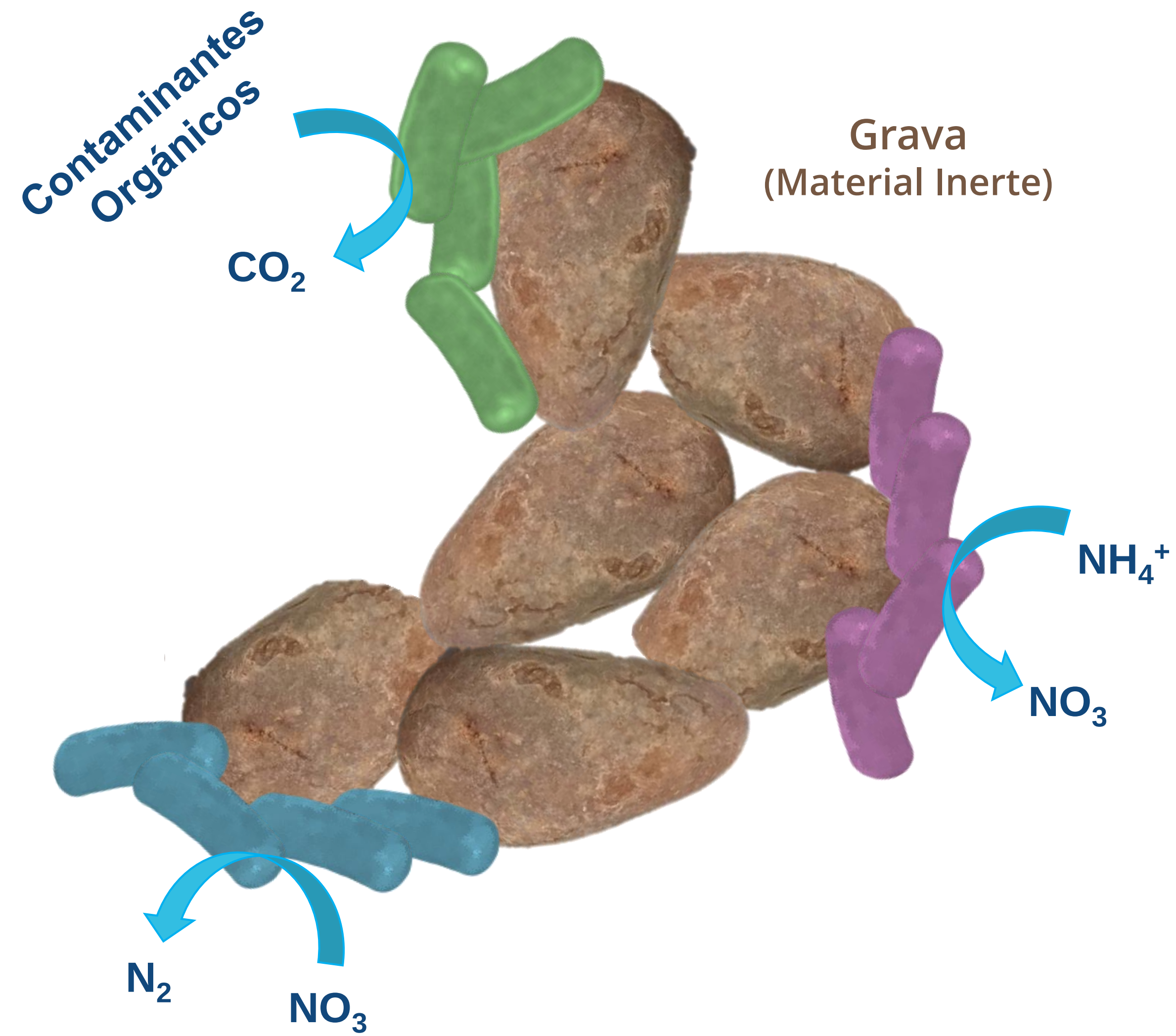
(Microbial Electrochemical Technologies)



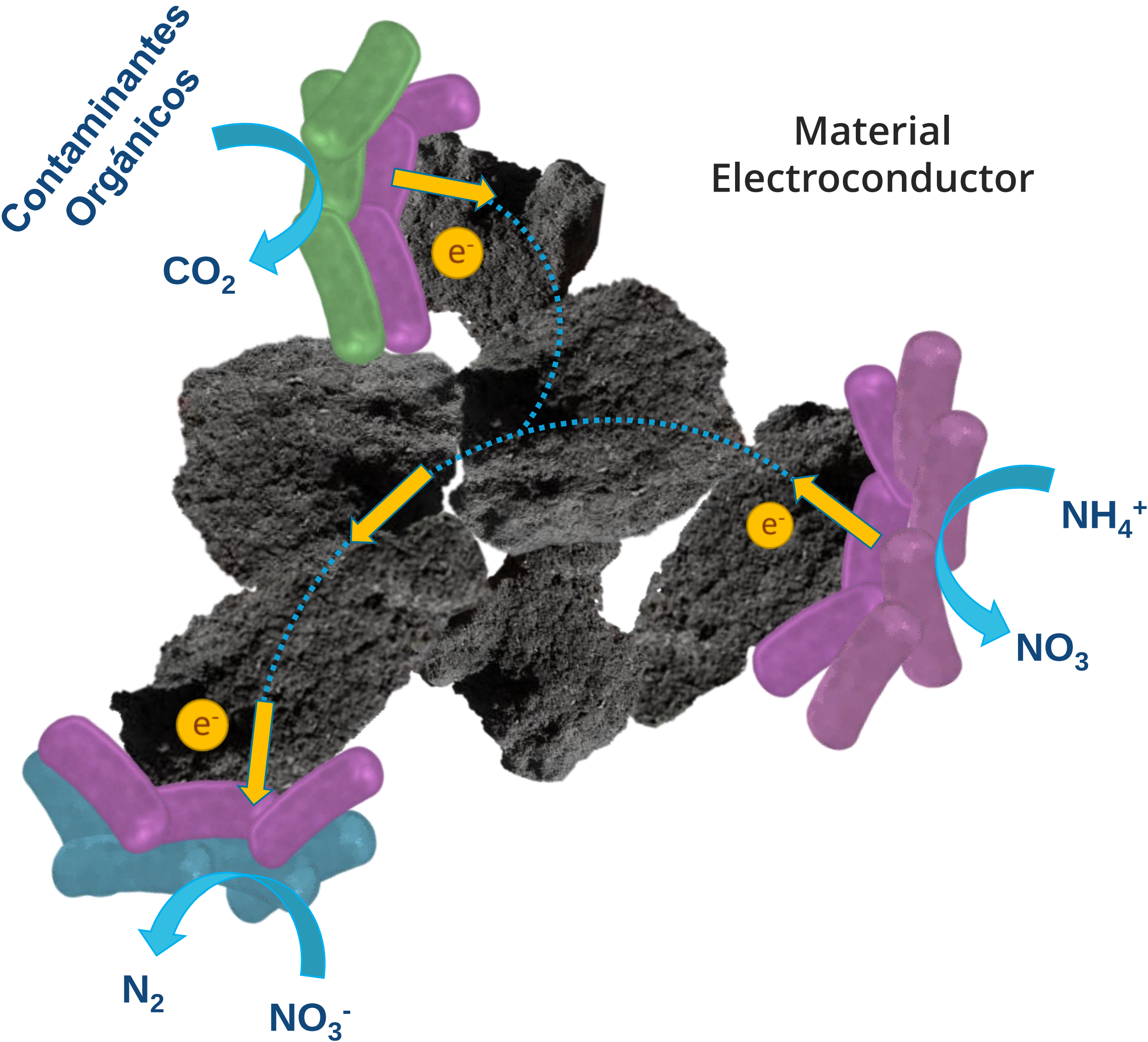
METland®



HUMEDAL DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL



METland®



CONFIGURACIONES DE LOS METland®

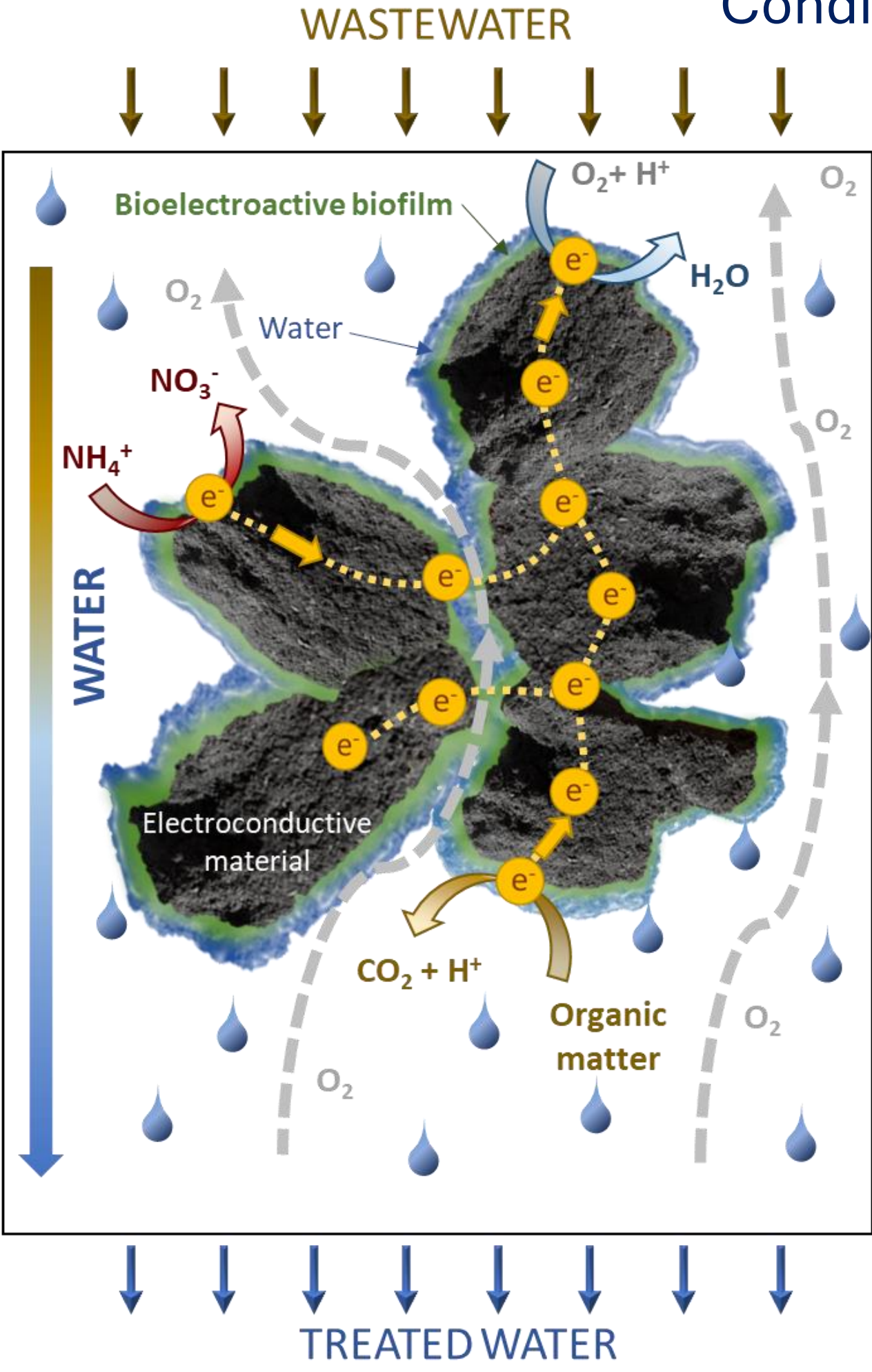
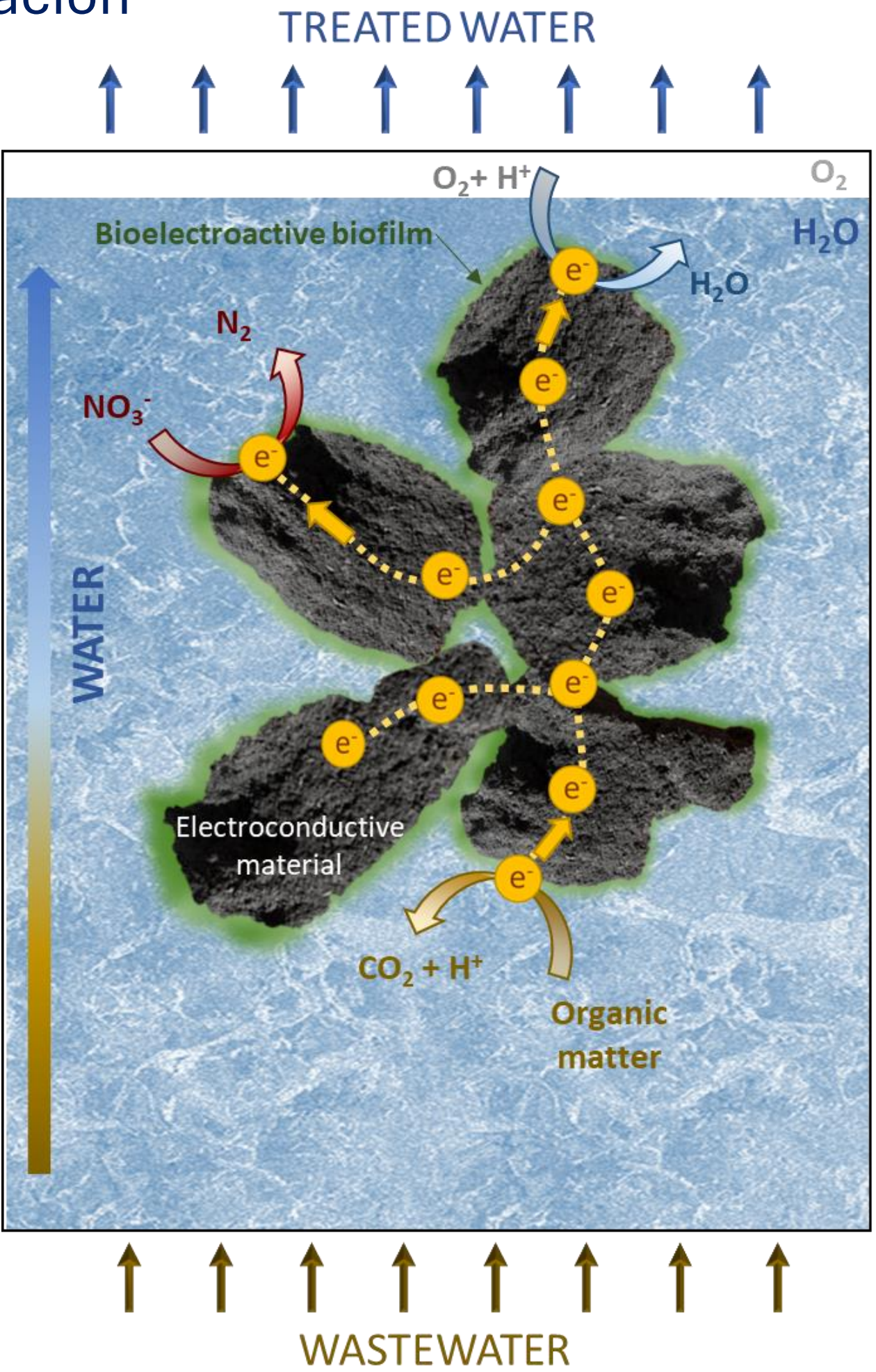
FLUJO ASCENDENTE

DEMISTICACIÓN DEL FLUJO DE ELECTRONES

FLUJO DESCENDENTE

Condiciones de Inundación

Condiciones de No-Inundación



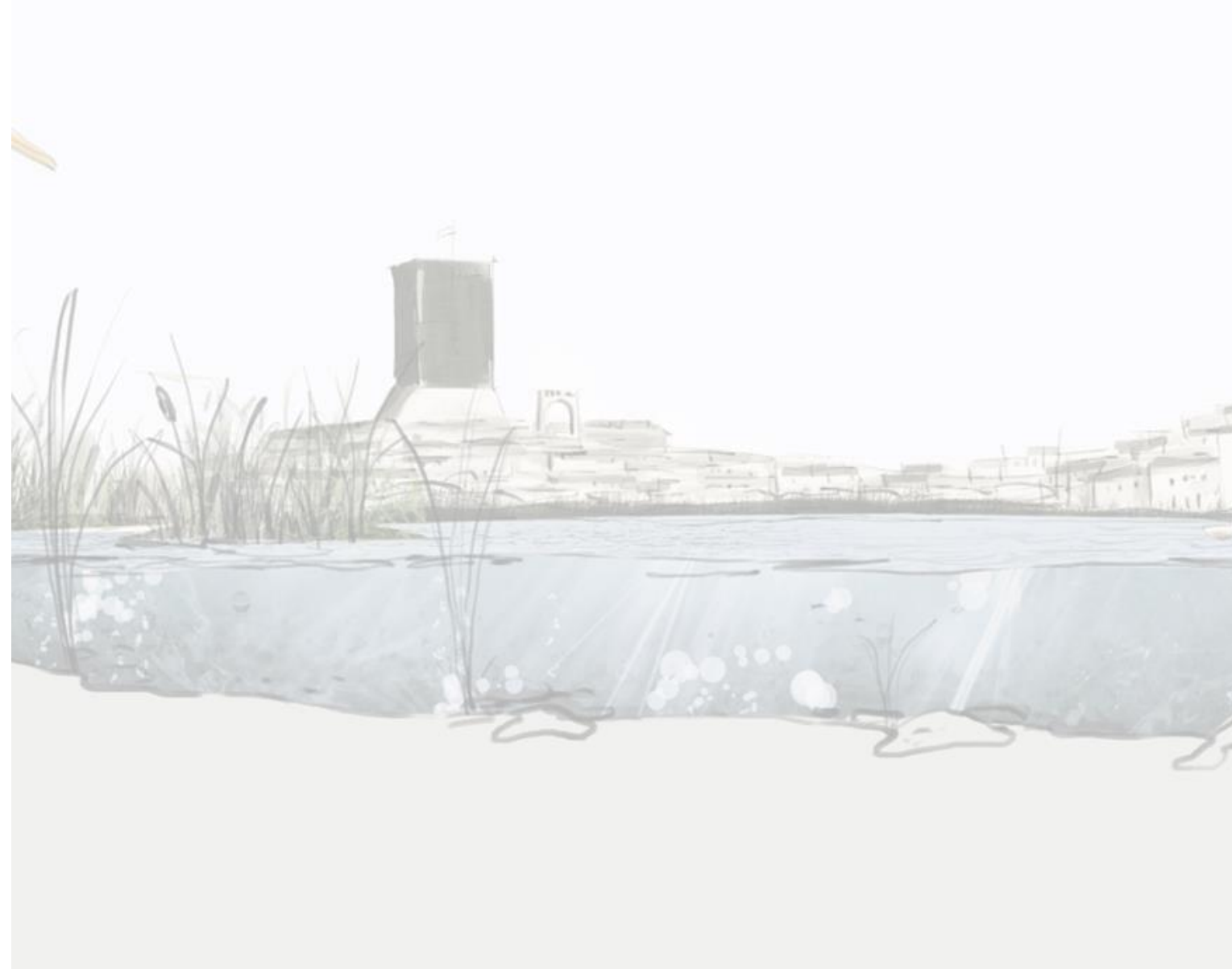
- Reducción de Nitrato
- Oxidación de DQO

- Oxidación de Amonio
- Oxidación de DQO

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO 2

OBJETIVOS



OBJETIVOS

1

Evaluar la capacidad de la tecnología METland® para la eliminación de nitrógeno en aguas con baja carga de DQO, estudiando las configuraciones y modos de operación más eficientes.

2

Explorar el papel de las bacterias electroactivas en los procesos de transformación del nitrógeno en METland® y estudiar sus interacciones con el material electroconductor.

3

Evaluar las eficiencias y tasas de eliminación de contaminantes emergentes mediante la tecnología METland®, operando como sistema cuaternario bajo diferentes configuraciones.

4

Diseñar sistemas METland® a escala real para hacer frente a los retos que plantean los distintos efluentes reales de las EDAR.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 6

CAPÍTULO 7

CAPÍTULO 8

CAPÍTULO 9

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



SECCIÓN I: Carpio (Valladolid)

TIPO DE AGUA:

Agua tratada de la salida de EDAR de Carpio

Lab Scale

Demo Scale

Full Scale

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 6

CARACTERÍSTICAS:

- Bajas concentraciones de DQO.
- Nitrógeno en forma de Nitrato.
- Presencia de Contaminantes Emergentes.

SECCIÓN II: Ootos (Murcia)

TIPO DE AGUA:

Agua tratada EDAR de OTOS

Lab Scale

Demo Scale

Full Scale

CAPÍTULO 7

CAPÍTULO 8

CAPÍTULO 9

CARACTERÍSTICAS:

- Bajas concentraciones de DQO.
- Nitrógeno en forma de Amonio y Nitrato.
- Presencia de Contaminantes Emergentes.

SECCIÓN I: AGUA RESIDUAL TRATADA DE CARPIO

CAPÍTULO 4

EXPLORING ELECTROBIOREMEDIATION OF NITROGEN SPECIES AND EMERGING POLLUTANTS
IN REAL CASE. DISCHARGE EFFLUENT OF CARPIO WASTEWATER TREATMENT PLANT

LAB SCALE

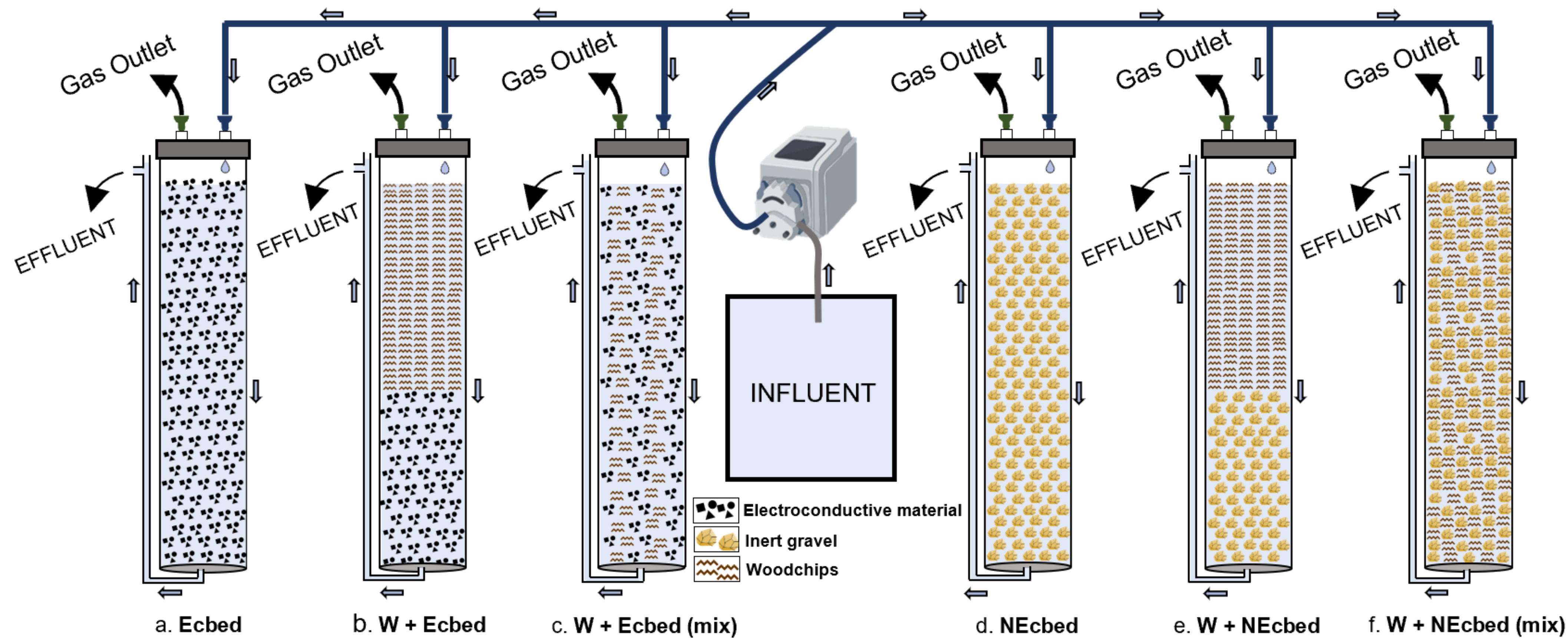
CAPÍTULO 5

DEMO SCALE

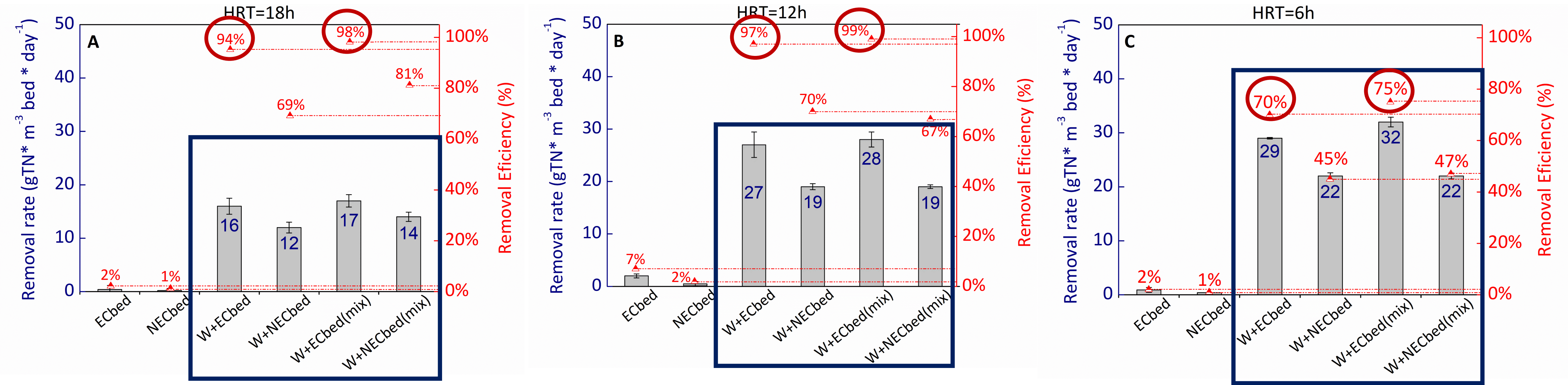
CAPÍTULO 6

FULL SCALE

DISEÑO EXPERIMENTAL



ELIMINACIÓN DE NITRATO

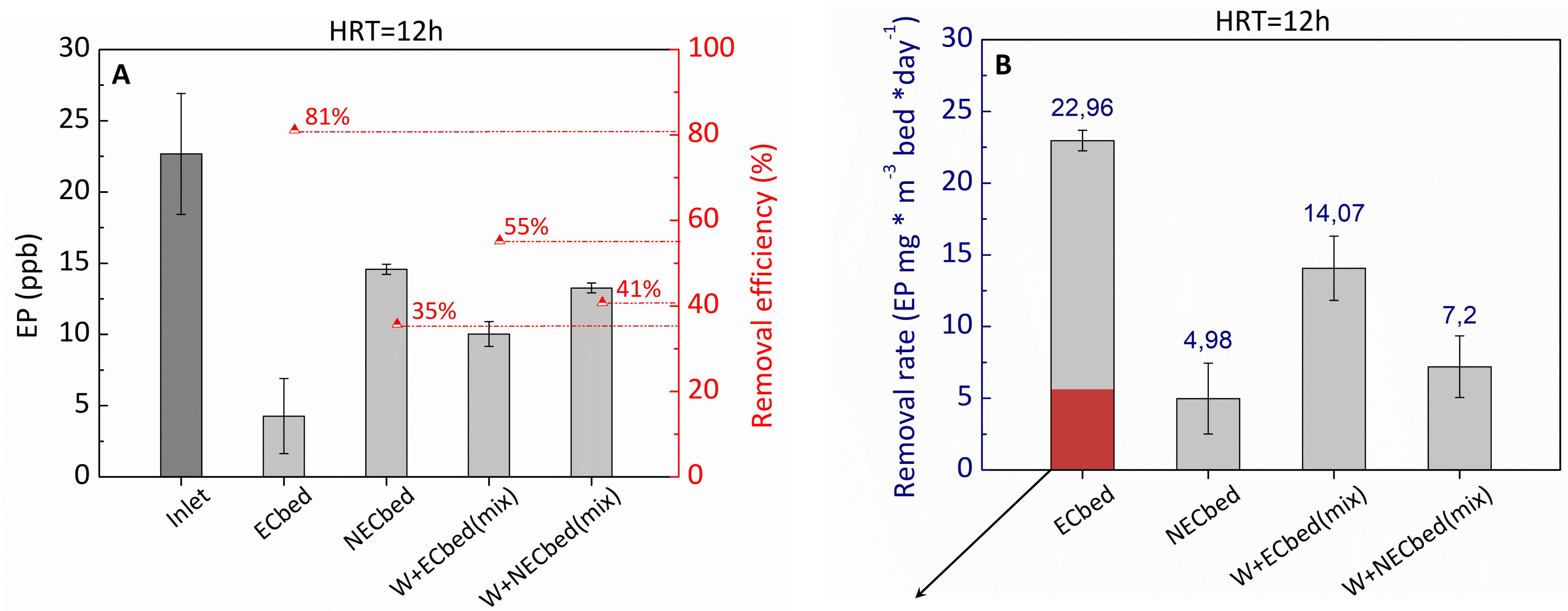


1 La adición de materia orgánica en los Sistemas es un Factor Clave en los procesos de Desnitrificación.

2 Desde los Tiempos de Retención Hidráulica altos (18h), se observa un mejor rendimiento de en los sistemas con material Electroconductor.

ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES

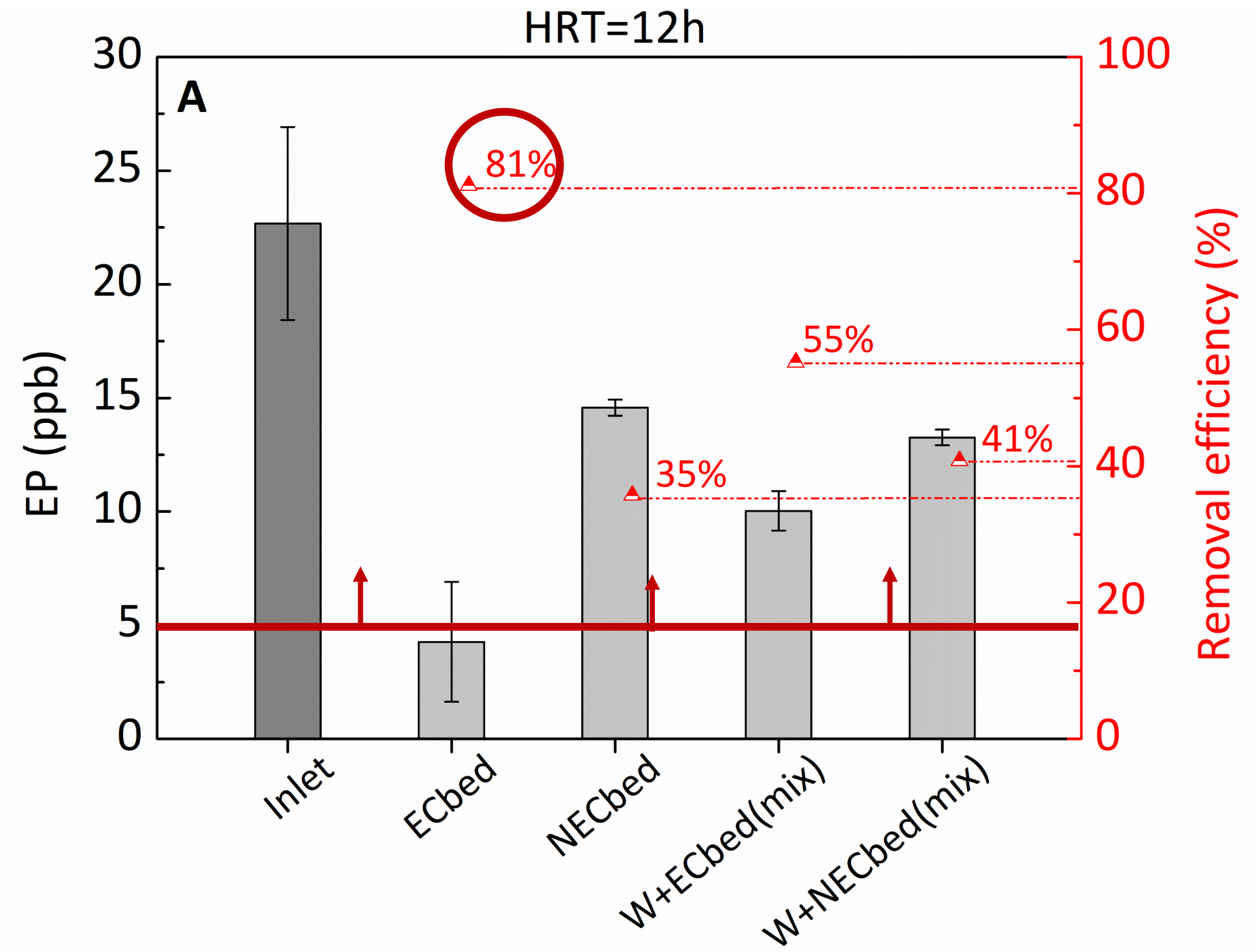
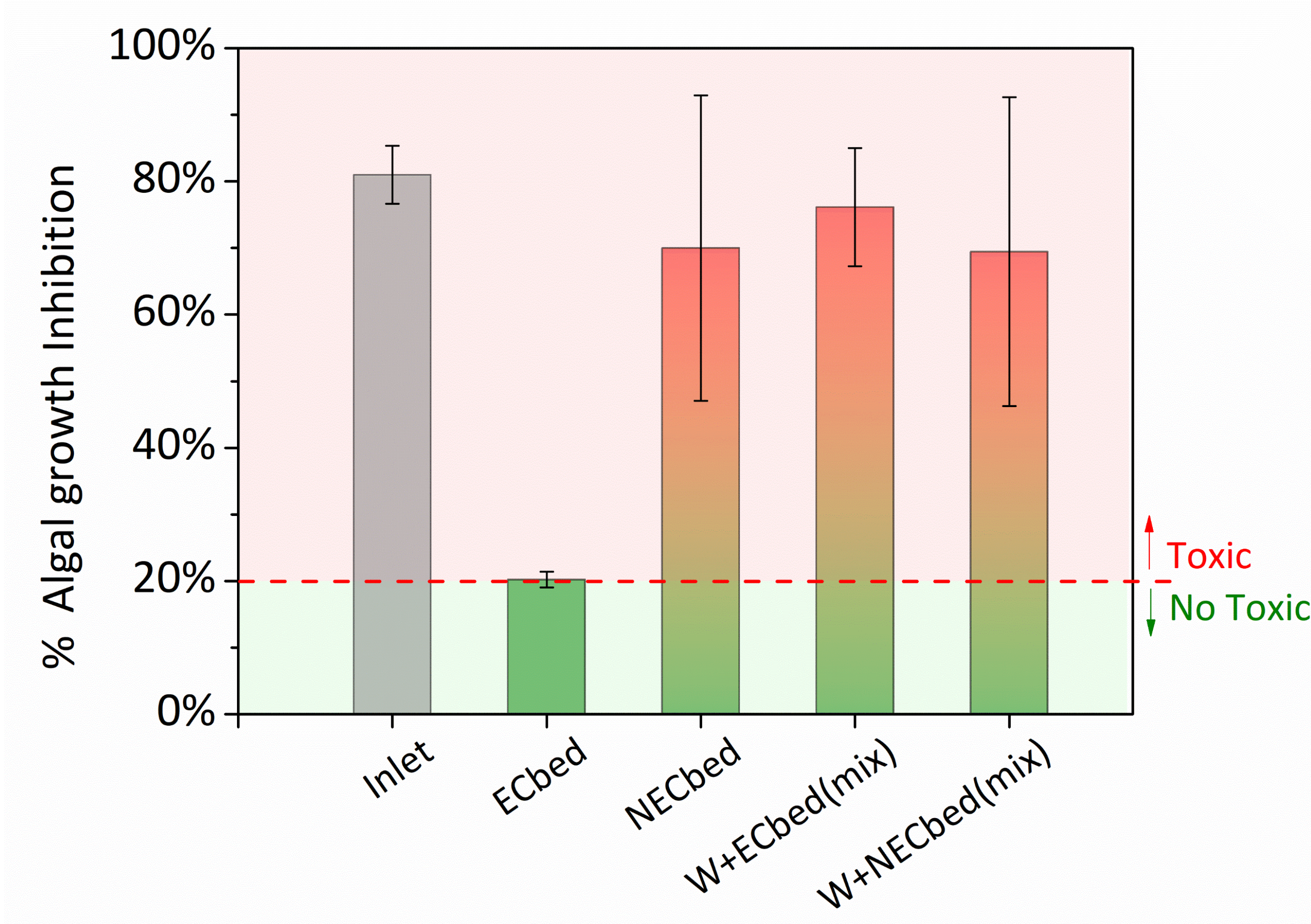
*En las barras se representa el sumatorio de un total de 52 compuestos considerados Contaminantes Emergentes.



Máxima concentración
de Adsorción

EVALUACIÓN DE ECOTOXICIDAD

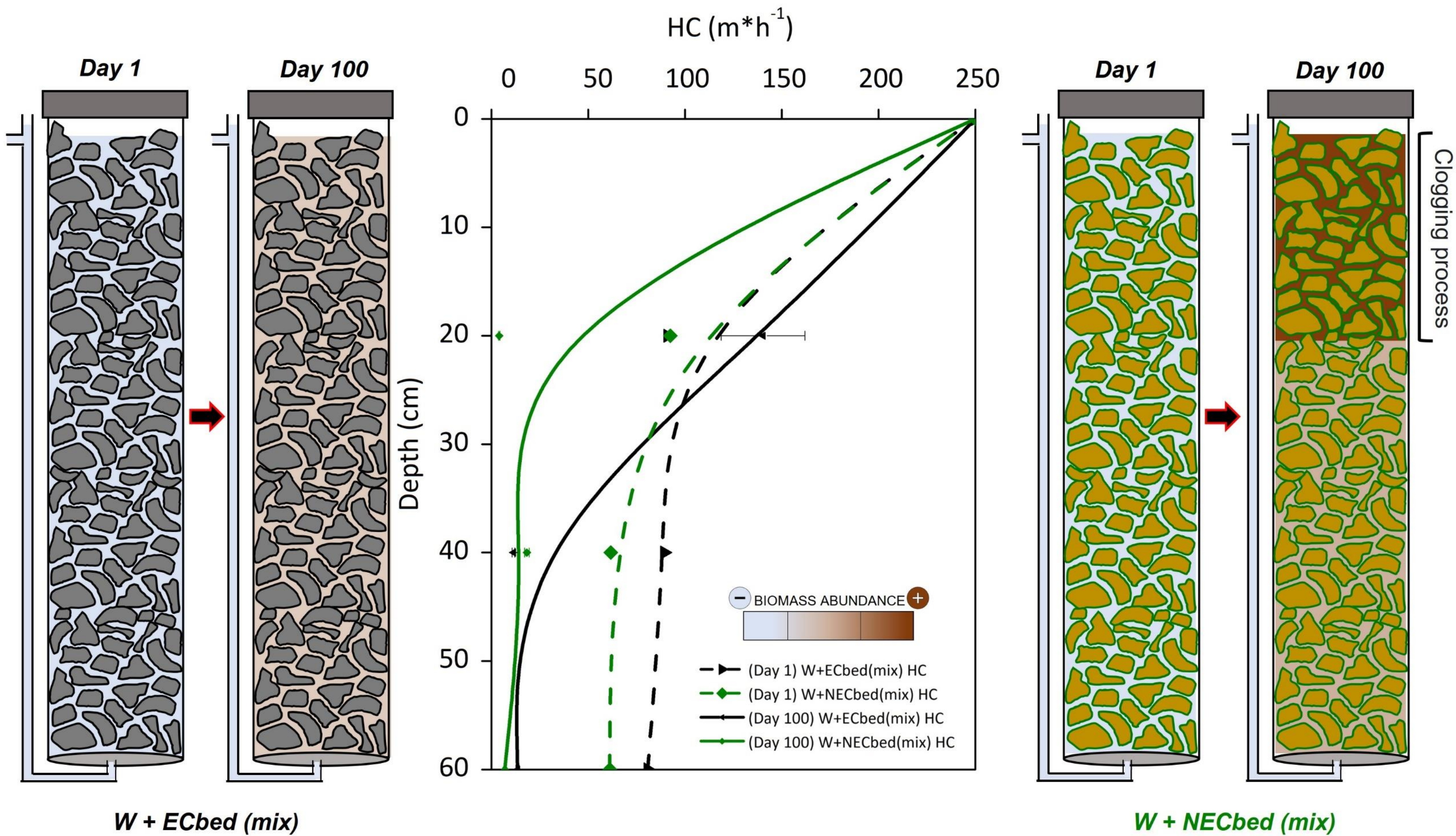
Especie Control: *P. Subcapitata*



1

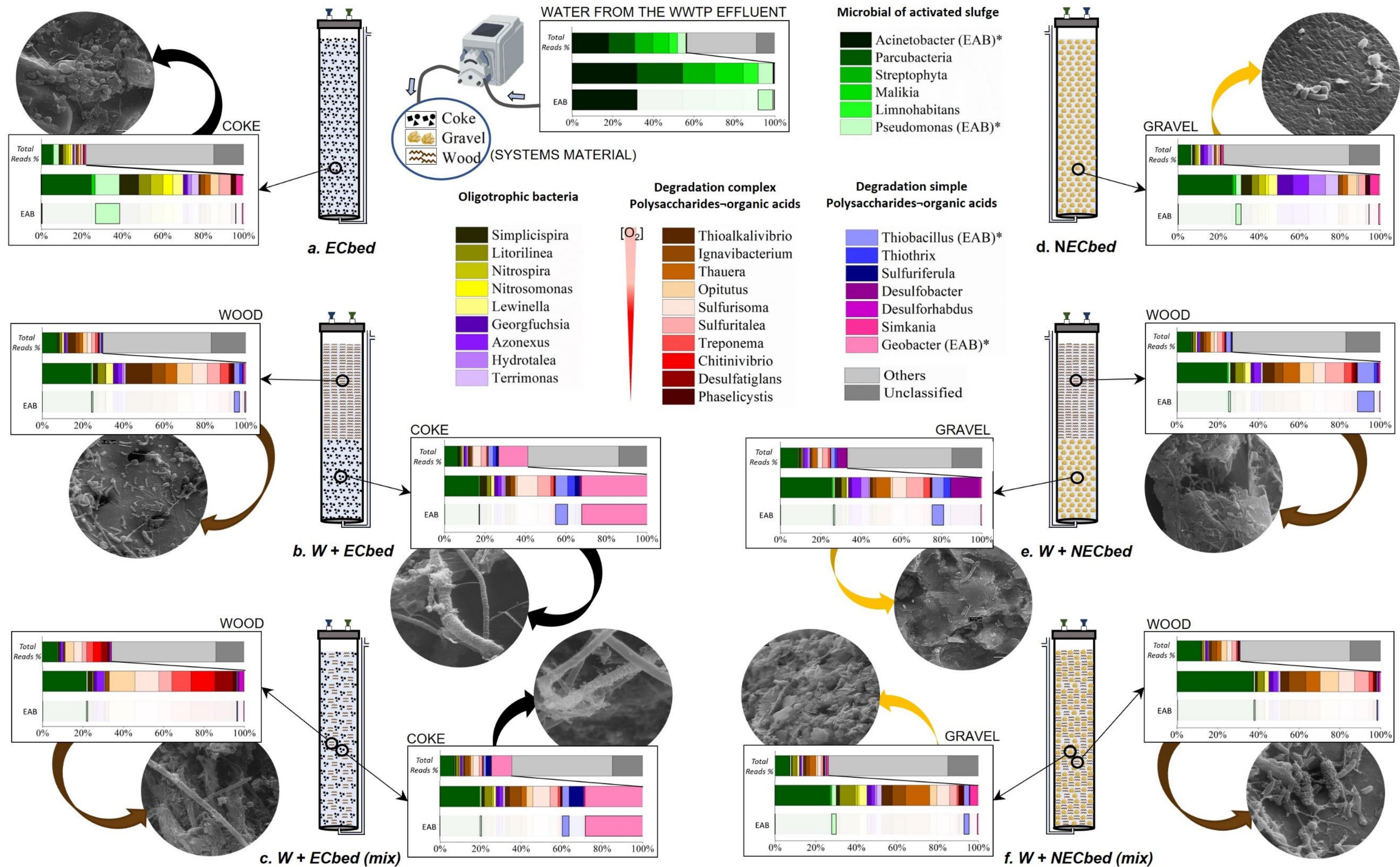
Si nos basamos en que la variable que pueda producir toxicidad es la concentración de Contaminantes Emergentes, 5 ppb sería el punto de inflexión.

EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE COLMATACIÓN



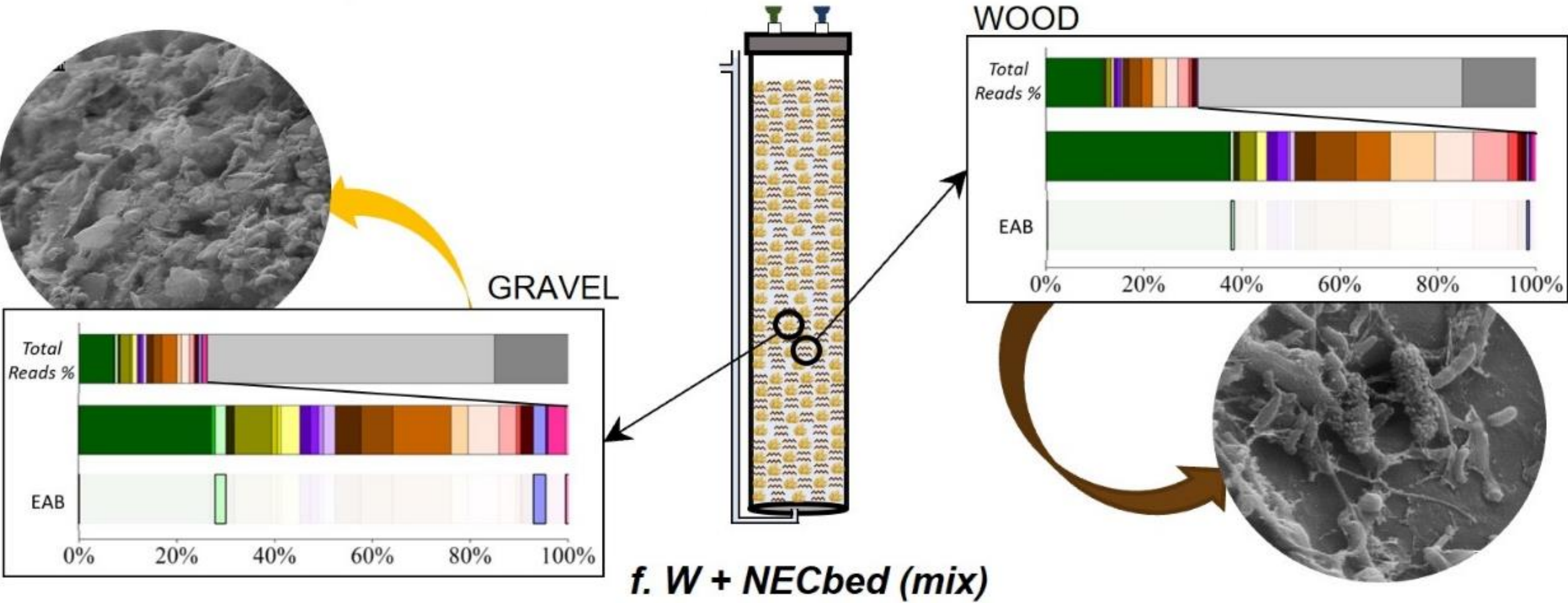
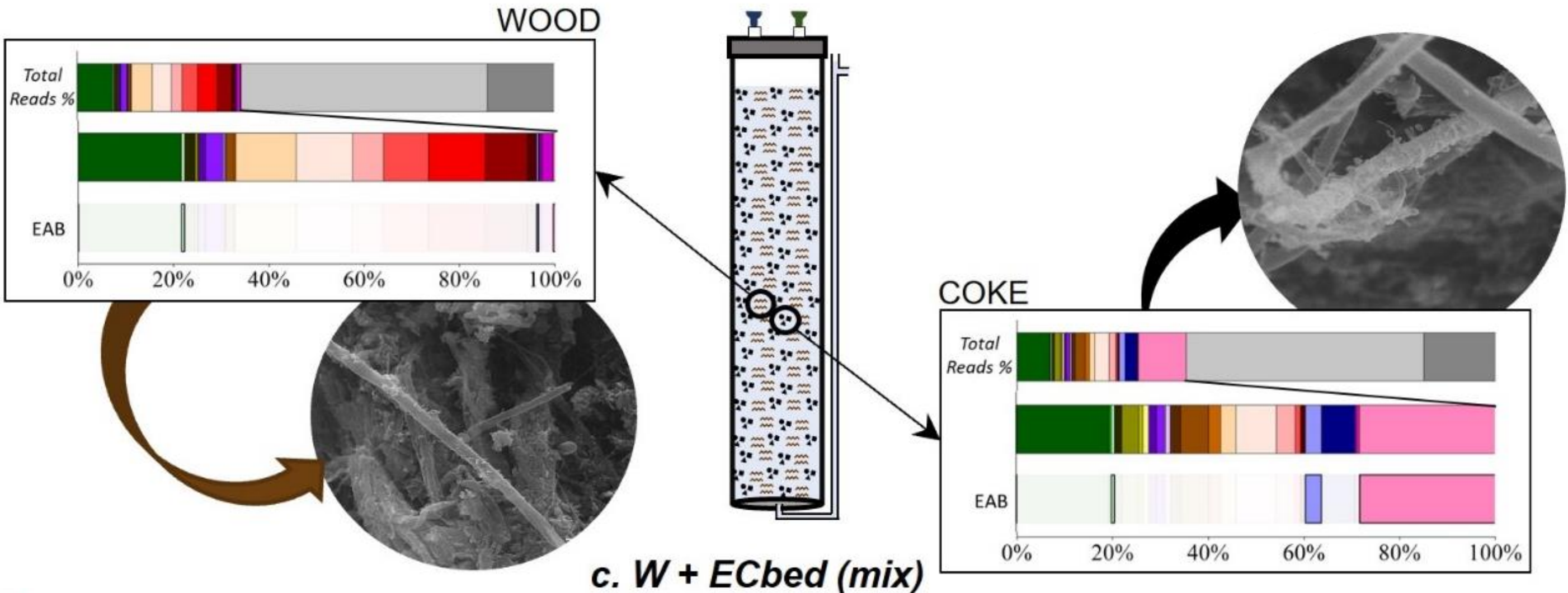
- 1 La mayor colmatación se da en el sistema de grava inerte, en la parte superficial.
- 2 Podría relacionarse por el tipo de comunidad microbiana y por la disponibilidad de oxígeno en la superficie, superior a la del material electroconductor.

ANÁLISIS DE LA COMUNIDAD MICROBIANA



ANÁLISIS DE LA COMUNIDAD MICROBIANA

1 Clara diferencia en la comunidad microbiana del material conductor con un 10% de presencia de *Geobacter*, frente a los compuestos orgánicos donde no se detecta.



2 Mayor similitud de la comunidad microbiana de la grava y la madera. No se detectó presencia del género *Geobacter*.

SECCIÓN I: AGUA RESIDUAL TRATADA DE CARPIO

CAPÍTULO 4

**EXPLORING ELECTROBIOREMEDIATION OF NITROGEN SPECIES AND EMERGING POLLUTANTS
IN REAL CASE. DISCHARGE EFFLUENT OF CARPIO WASTEWATER TREATMENT PLANT**

LAB SCALE

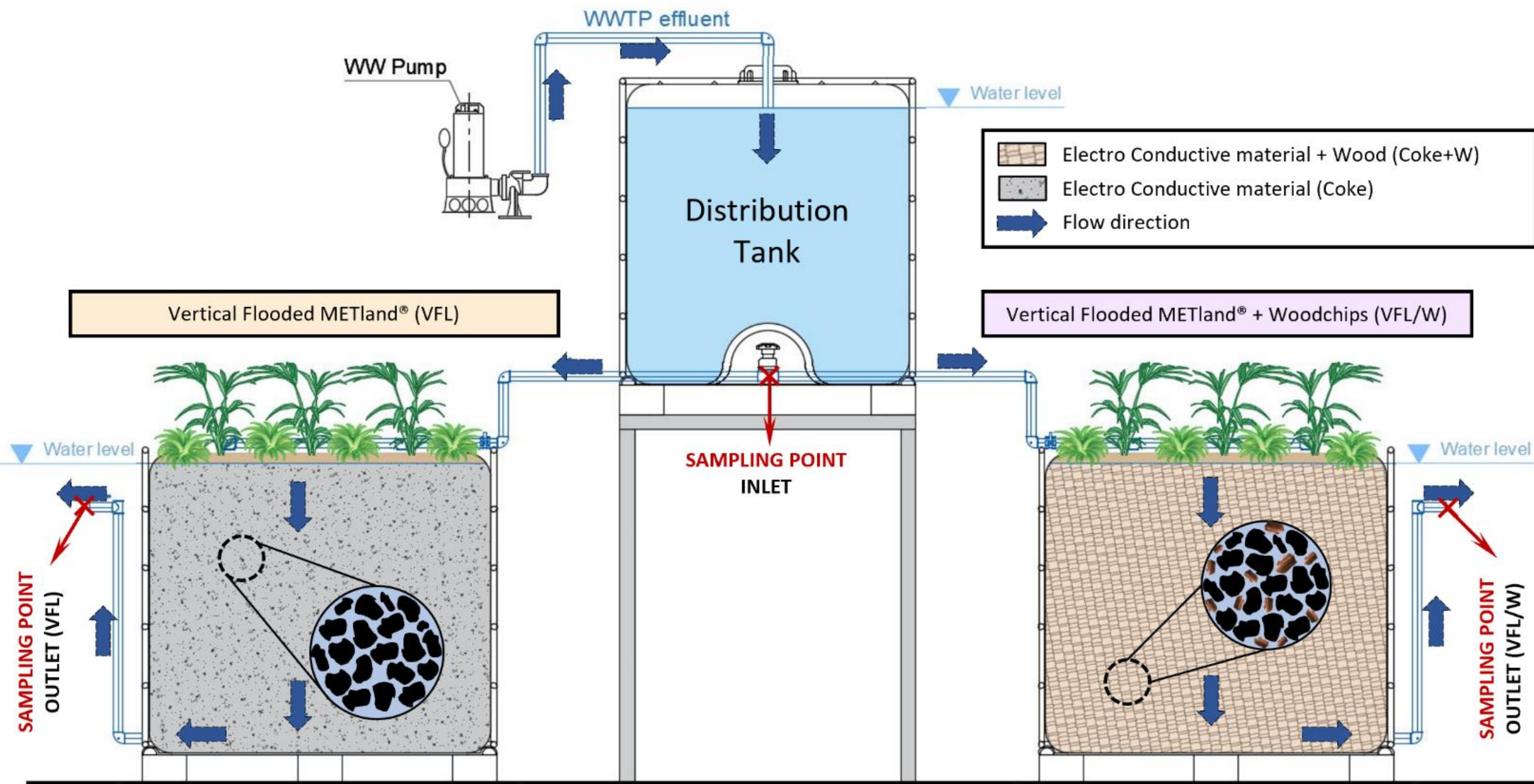
CAPÍTULO 5

DEMO SCALE

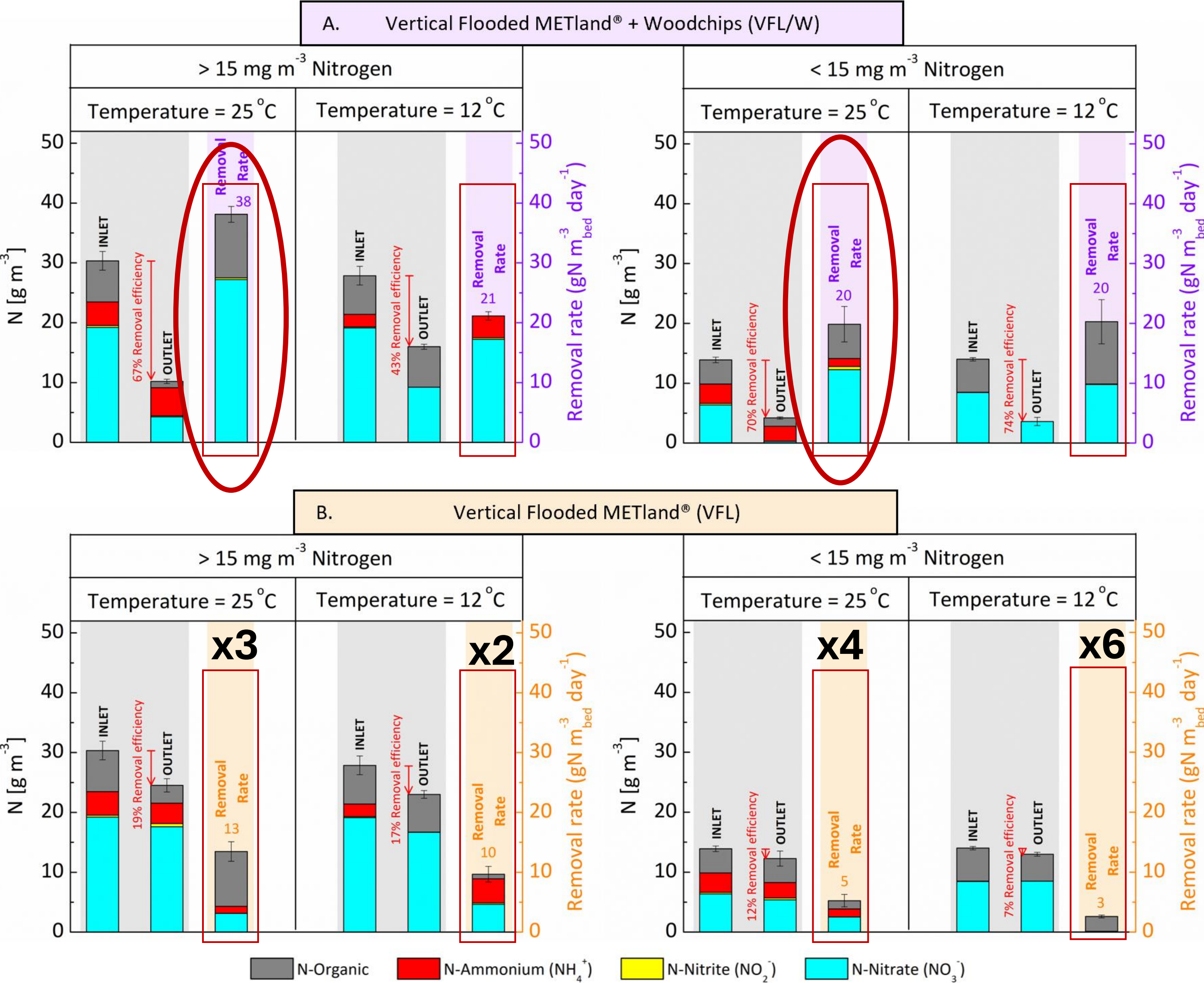
CAPÍTULO 6

FULL SCALE

DISEÑO EXPERIMENTAL: ESCALA DEMOSTRATIVA



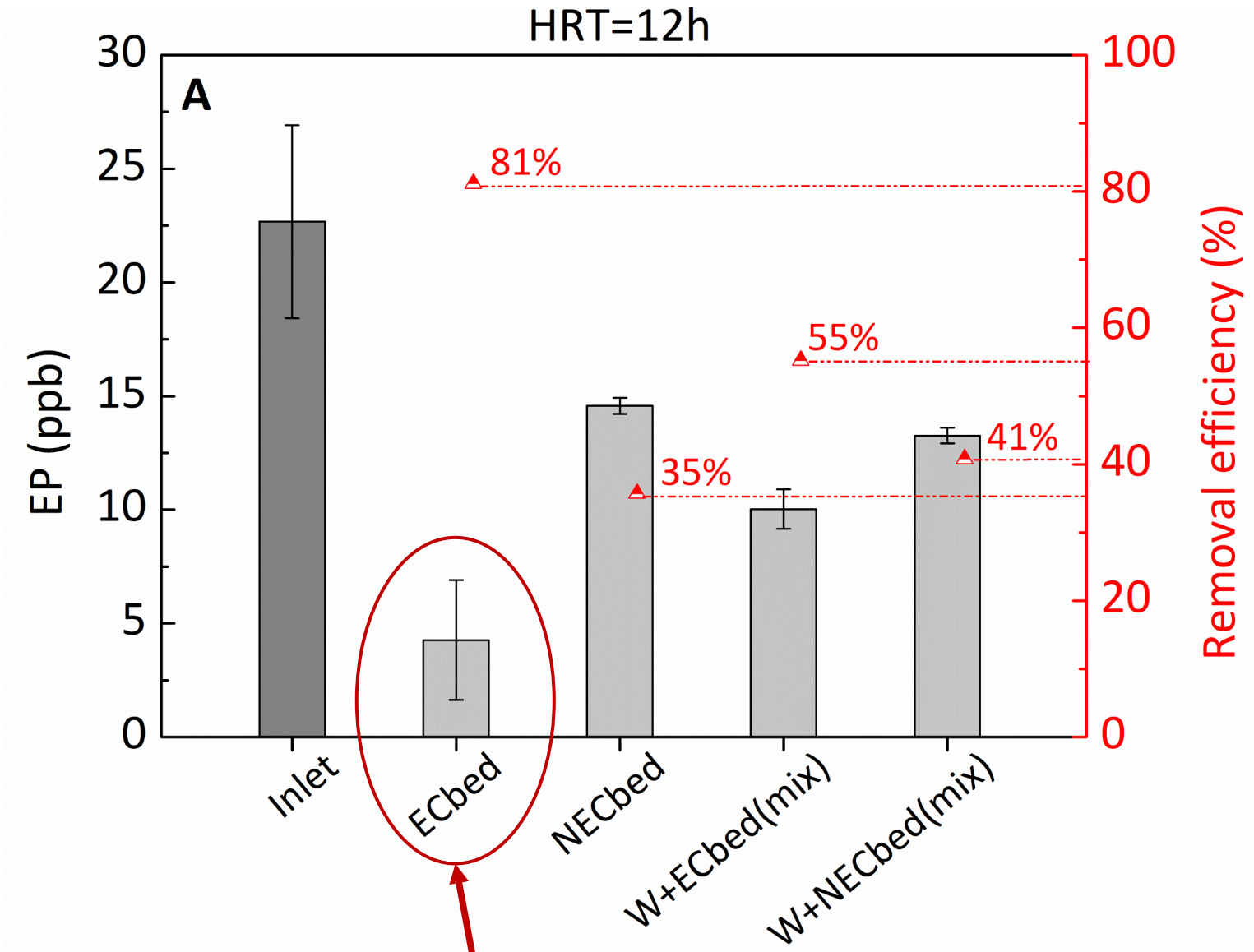
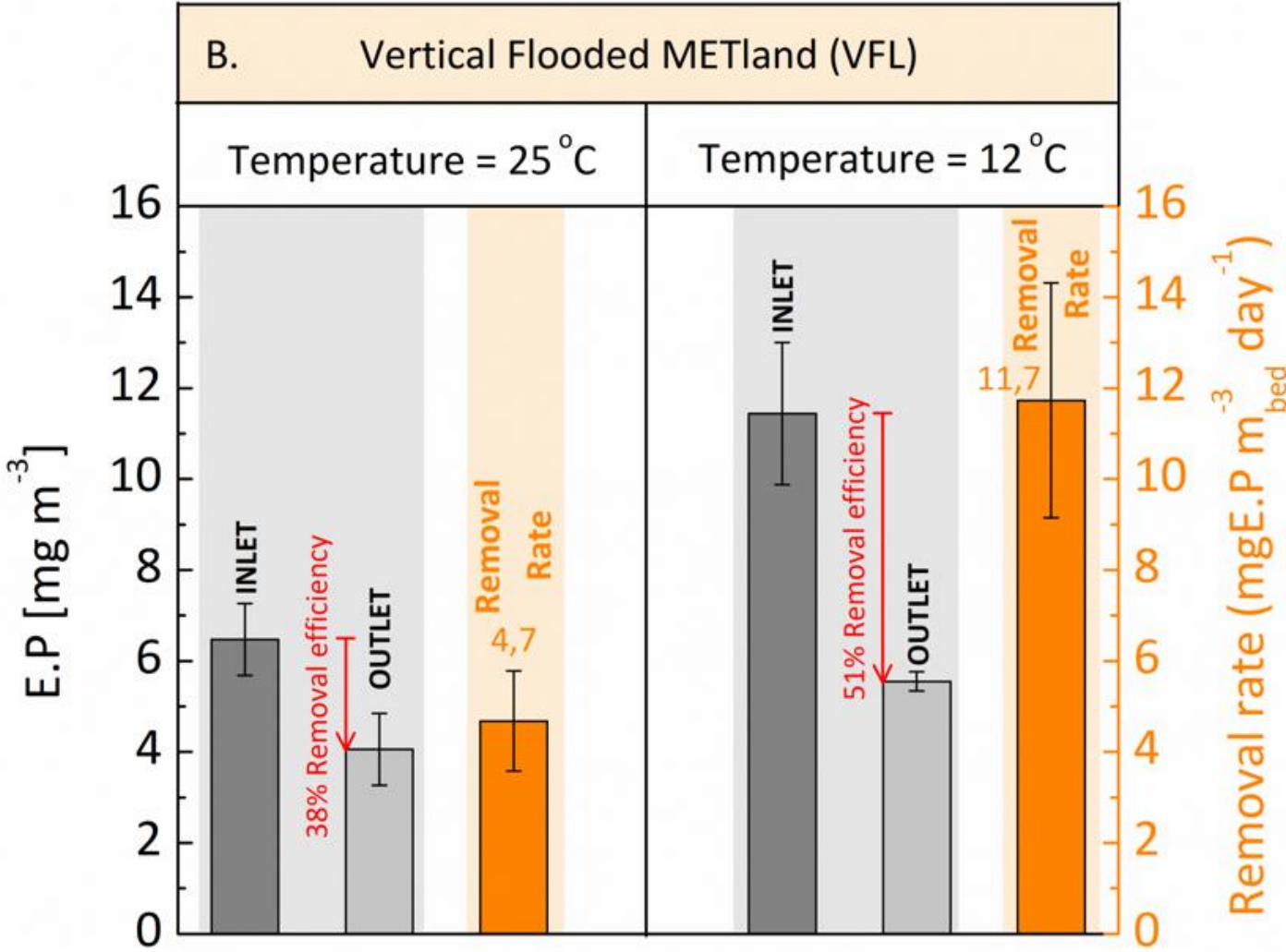
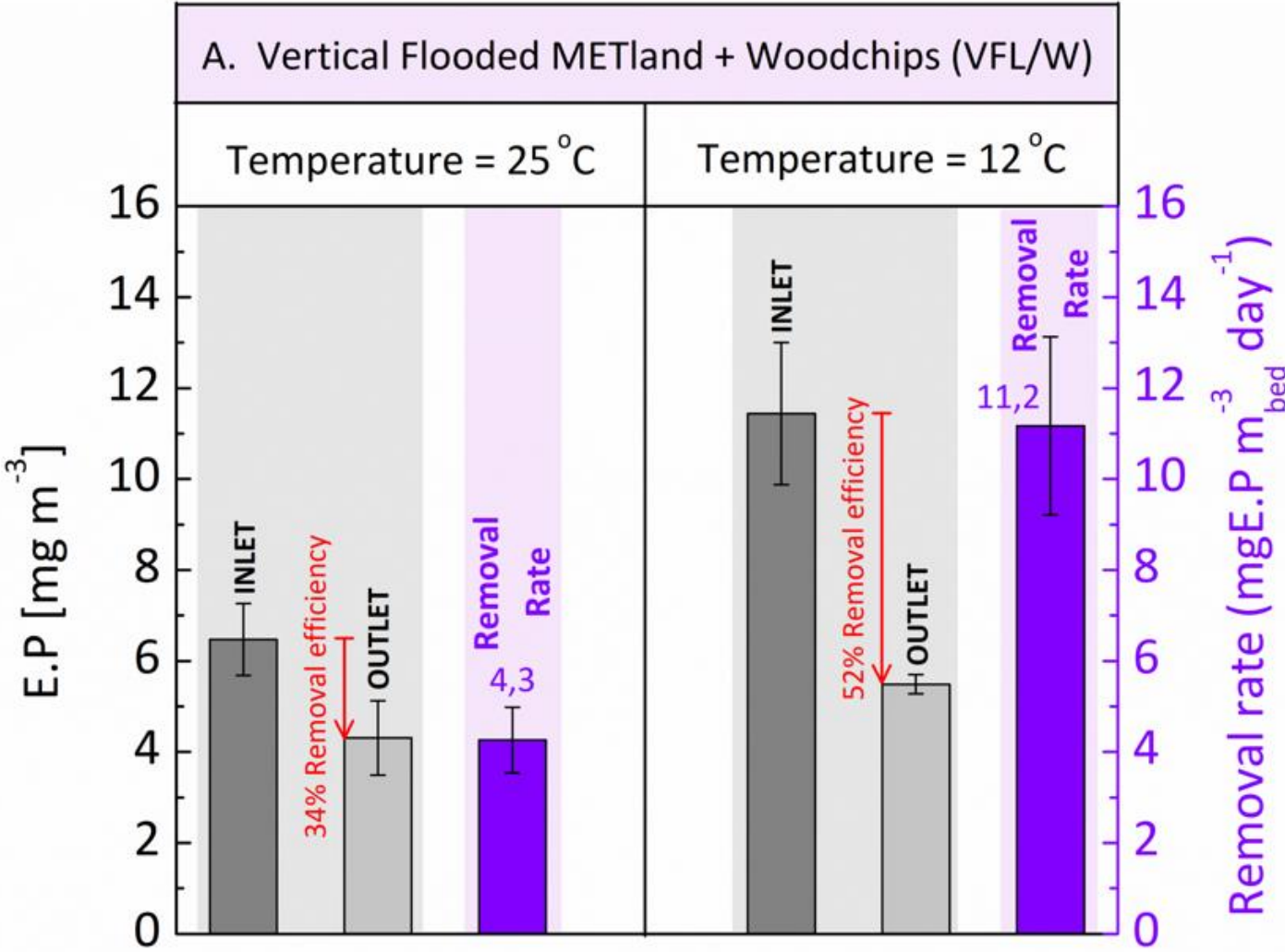
ELIMINACIÓN DE NITRATO



- 1 La presencia compuestos orgánicos vuelve a mostrarse como un **Factor Clave** en los procesos de Desnitrificación.
- 2 Aumentos en la concentración de nitrato mejoran la capacidad de eliminación del sistema con madera en un 48%.
- 3 La temperatura se muestra como un factor clave en los procesos de desnitrificación, especialmente cuando hay una alta presencia de nitrato.

ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES

*En las barras se representa el sumatorio de un total de 52 compuestos considerados Contaminantes Emergentes.



1

No se observan diferencias de eliminación significativas entre ambos Biofiltros en ninguna de las variables.

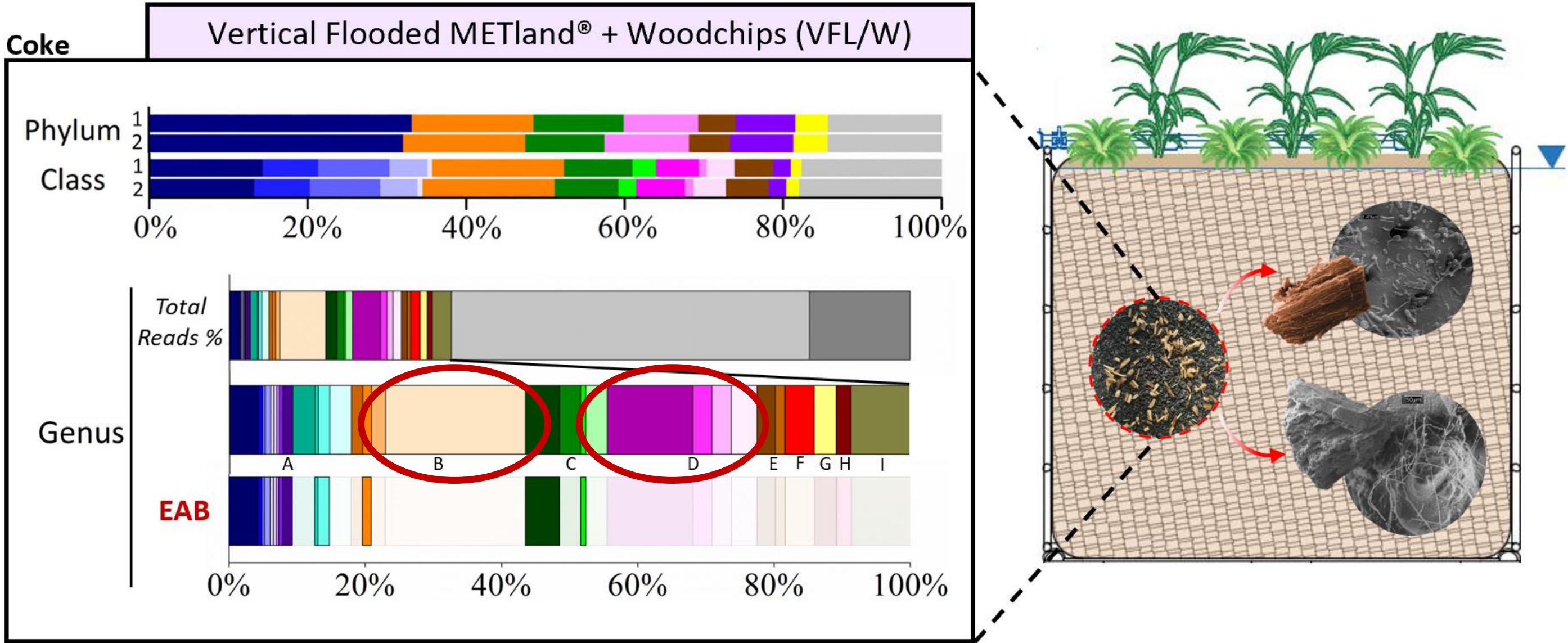
2

La concentración de entrada de los contaminantes emergentes (superior en el periodo de temperaturas bajas) tiene un efecto directo en la mejora de los rendimientos.

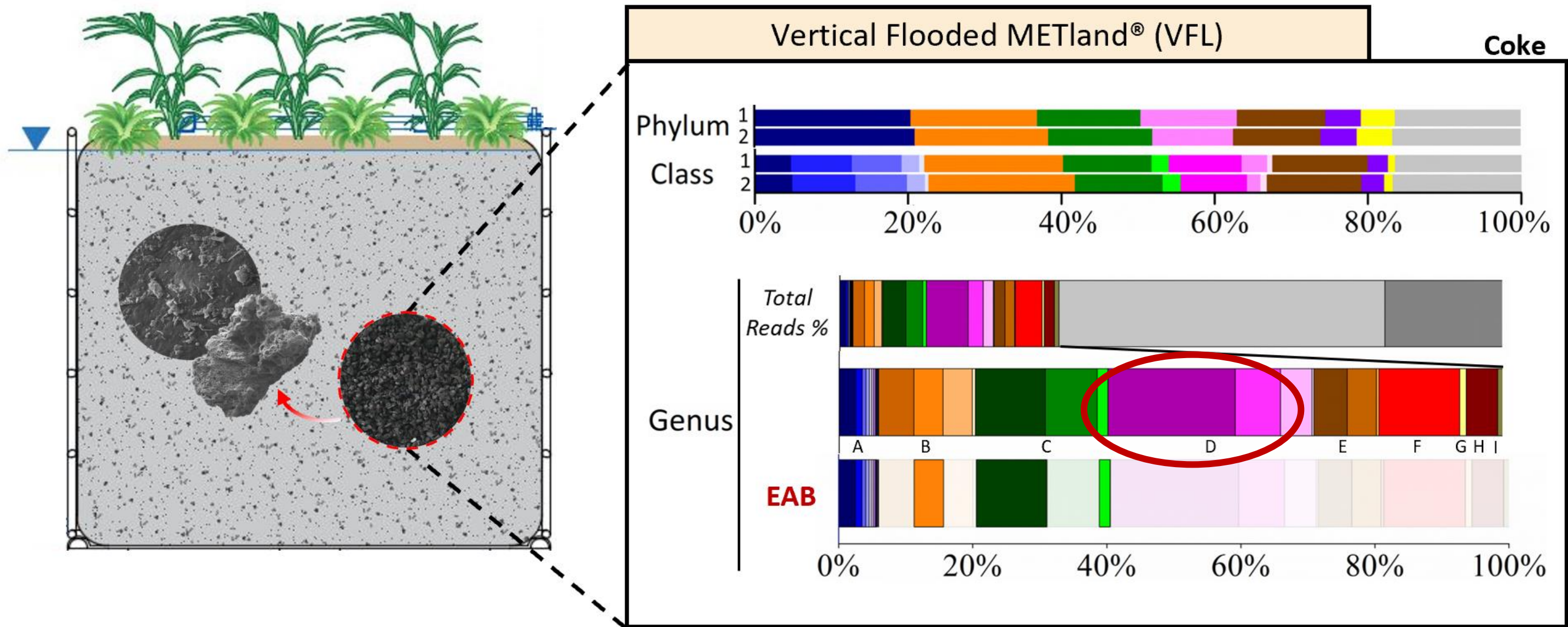
3

Los valores en la salida en todos los casos son muy similares a los obtenidos en los estudios a escala laboratorio en el biofiltro que mejores prestaciones tubo.

ANÁLISIS DE LA COMUNIDAD MICROBIANA

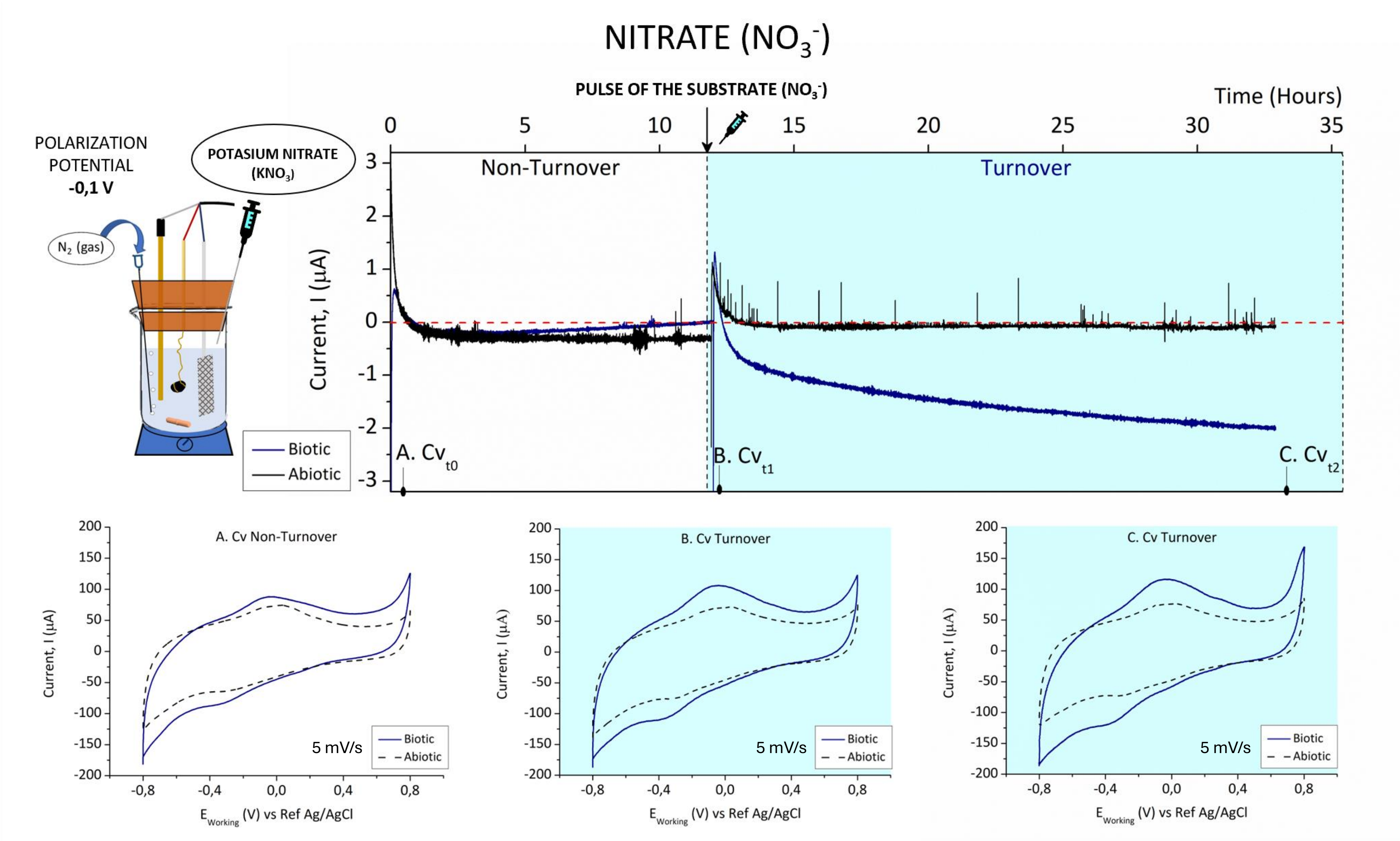


1 Se detecta una alta presencia de bacterias del género *Streptomyces*- Este género ha sido relacionado con la degradación de estructuras de lignocelulosa.

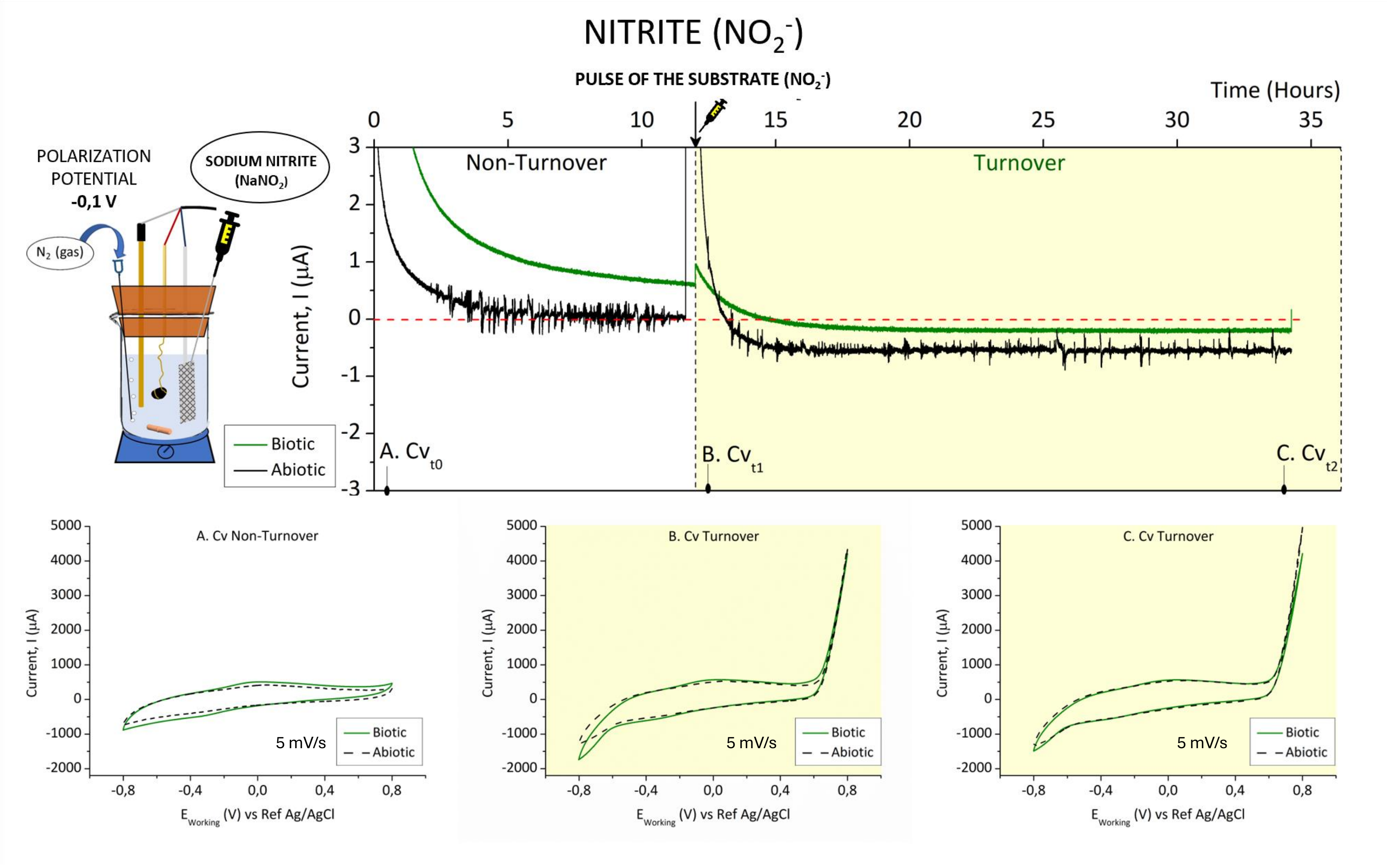


2 En ambos Biofiltros aparecen los géneros *Litorilinea* y *Caldilinea* pertenecientes al phylum *Chloroflexi*. Ambos géneros se asocian a la degradación de estructuras celulares muertas.

ESTUDIO DE LOS PROCESOS BIOELECTROQUÍMICOS



ESTUDIO DE LOS PROCESOS BIOELECTROQUÍMICOS



SECCIÓN I: AGUA RESIDUAL TRATADA DE CARPIO

CAPÍTULO 4

**EXPLORING ELECTROBIOREMEDIATION OF NITROGEN SPECIES AND EMERGING POLLUTANTS
IN REAL CASE. DISCHARGE EFFLUENT OF CARPIO WASTEWATER TREATMENT PLANT**

LAB SCALE

CAPÍTULO 5

DEMO SCALE

CAPÍTULO 6

FULL SCALE

SECCIÓN I: AGUA RESIDUAL TRATADA DE CARPIO

PROBLEMÁTICA



01

Presencia de nitratos con fluctuaciones significativas en su concentración.

RIESGO DE EUTROFIZACIÓN.

02

Presencia en el agua de Contaminantes Emergentes que la depuradora no es capaz de eliminar.

RIESGO DE TOXICIDAD Y DE FACILITAR LA APARICIÓN DE RESISTENCIA A LOS ANTIBIÓTICOS.

03

La irregularidad del funcionamiento del clarificador da lugar a vertidos puntuales de fango.

RIESGO DE ACUMULACIÓN Y DE APARICIÓN DE PATÓGENOS.

SECCIÓN I: AGUA RESIDUAL TRATADA DE CARPIO

EFFECTOS

An aerial photograph of a rural landscape featuring a central canal. The canal is flanked by green fields on the right and brown, tilled agricultural land on the left. A dirt path runs alongside the canal. Three callout boxes with black lines pointing to specific areas are overlaid on the image. The sky is blue with scattered white clouds.

**CRECIMIENTO MASIVO DE
PLANTAS MACRÓFITAS**

**DESBORDE DEL AGUA DEL CANAL A LAS
TIERRAS DE CULTIVO ADYACENTES.**

**BLOQUEO DEL PASO DEL AGUA EVITANDO
QUE LLEGUE AL HUMEDAL**

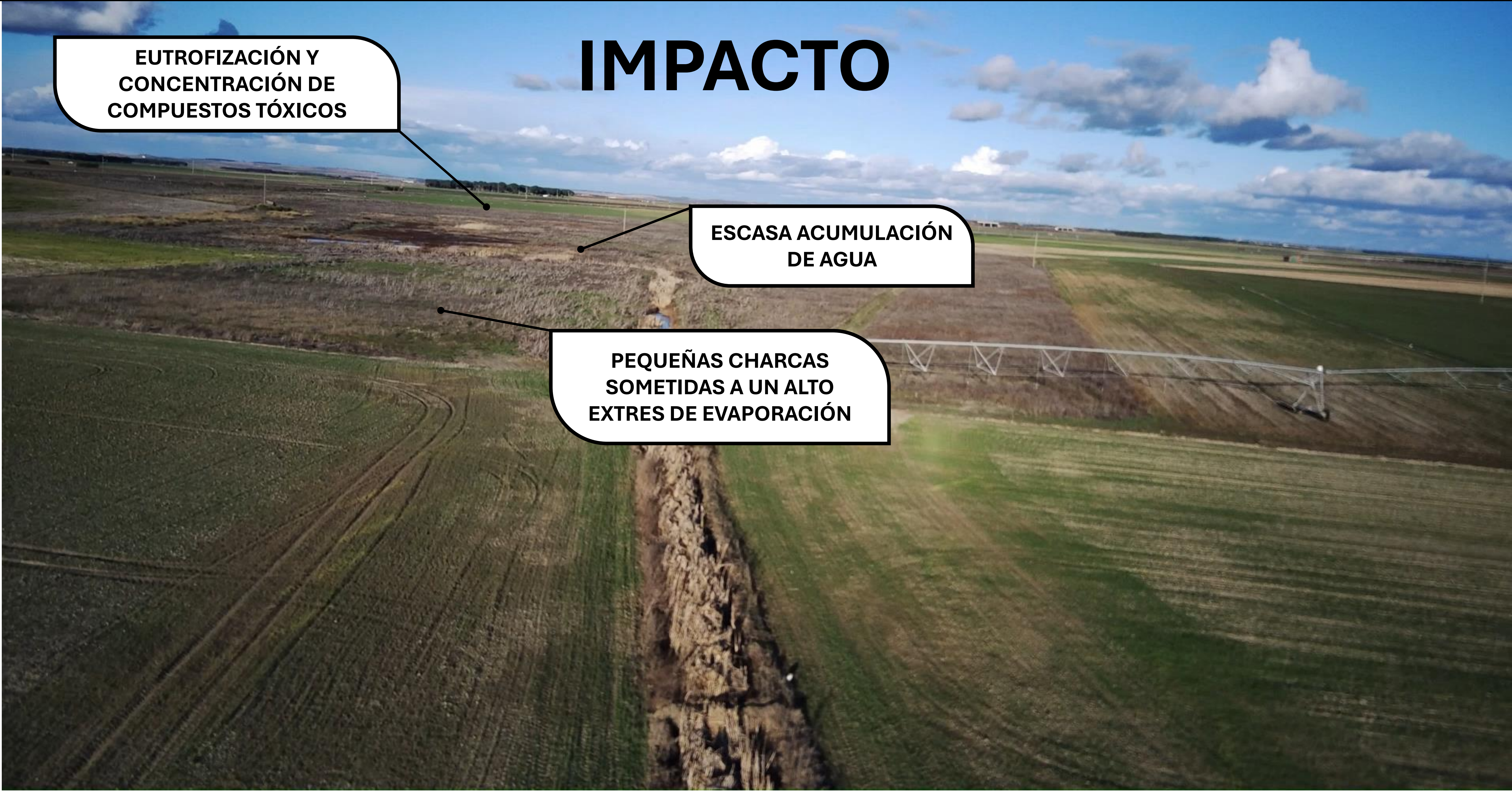
SECCIÓN I: AGUA RESIDUAL TRATADA EN EDAR DE CARPIO

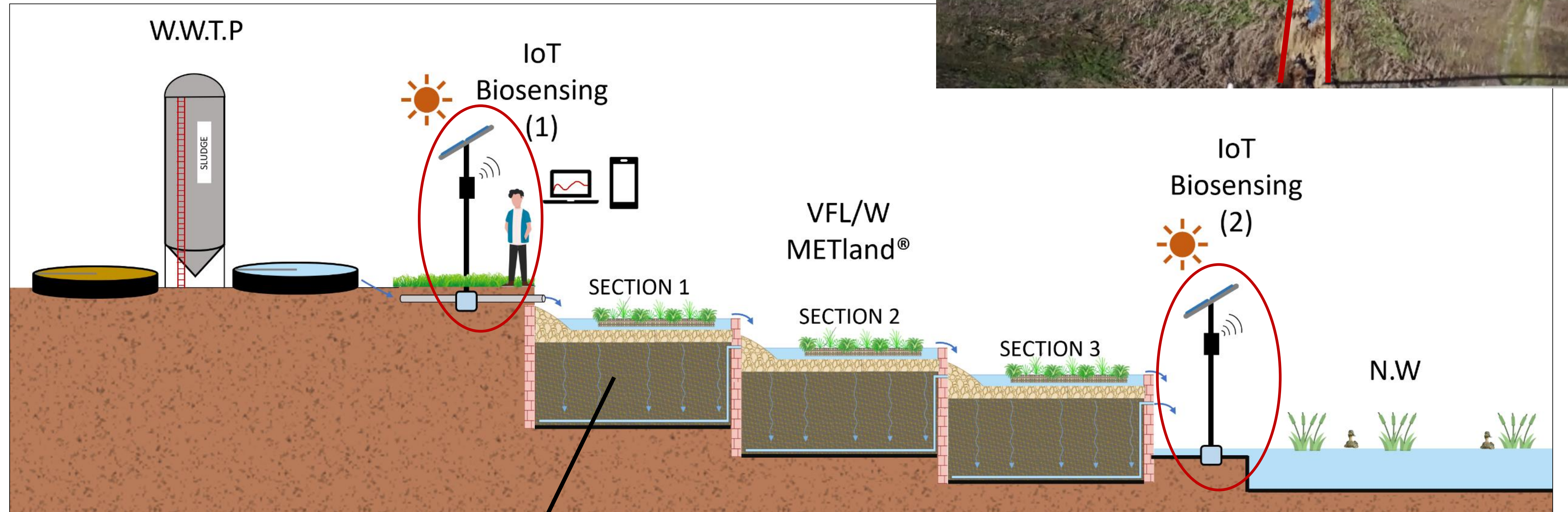
IMPACTO

**EUTROFIZACIÓN Y
CONCENTRACIÓN DE
COMPUESTOS TÓXICOS**

**ESCASA ACUMULACIÓN
DE AGUA**

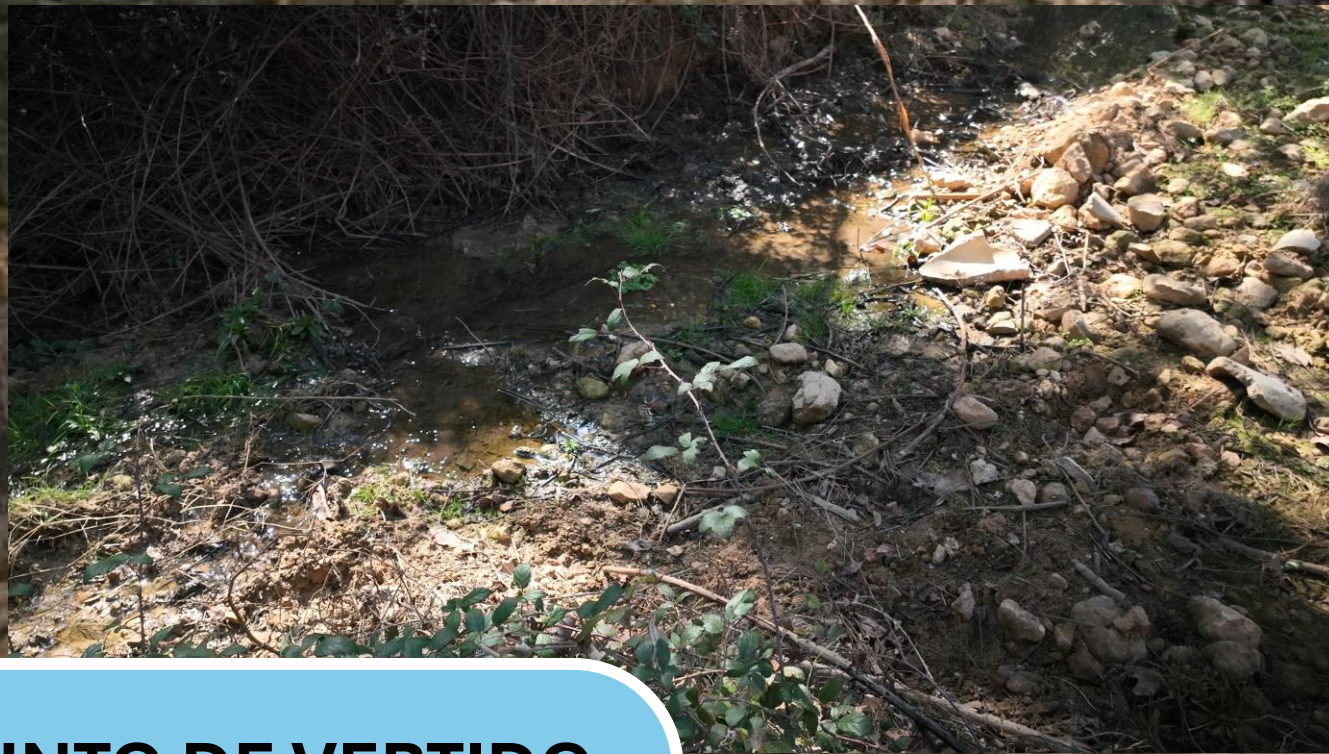
**PEQUEÑAS CHARCAS
SOMETIDAS A UN ALTO
EXTRES DE EVAPORACIÓN**





15 m³ Material Electroconductor + 15 m³ de substratos orgánicos

SECCIÓN II: AGUA RESIDUAL TRATADA EN EDAR DE OTOS



PUNTO DE VERTIDO



SECCIÓN II: AGUA RESIDUAL TRATADA DE OTOS

CAPÍTULO 7

EXPLORING ELECTROBIOREMEDIATION OF NITROGEN SPECIES AND EMERGING POLLUTANTS
IN REAL CASE. DISCHARGE EFFLUENT OF OTOS WASTEWATER TREATMENT PLANT

LAB SCALE

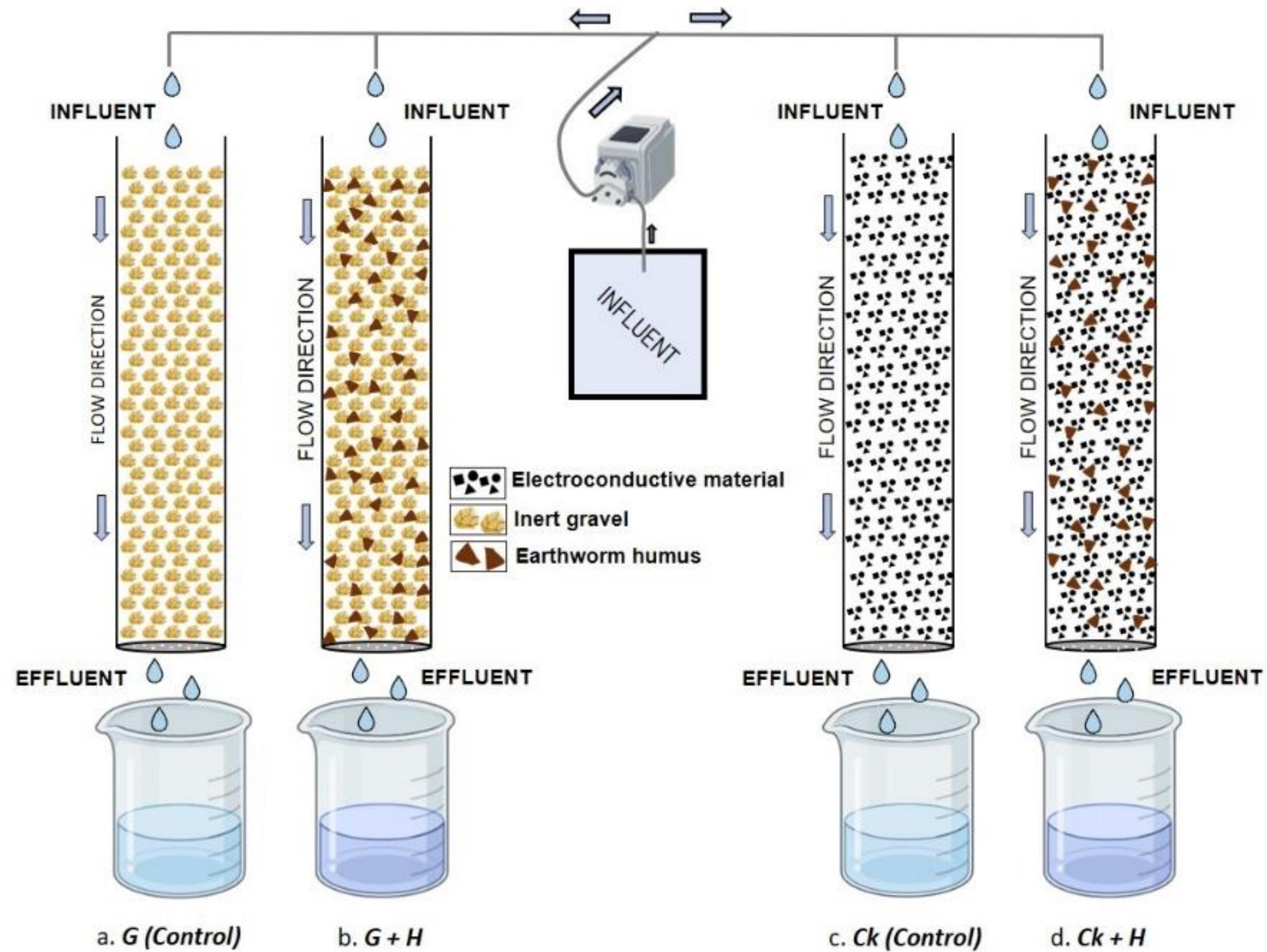
CAPÍTULO 8

DEMO SCALE

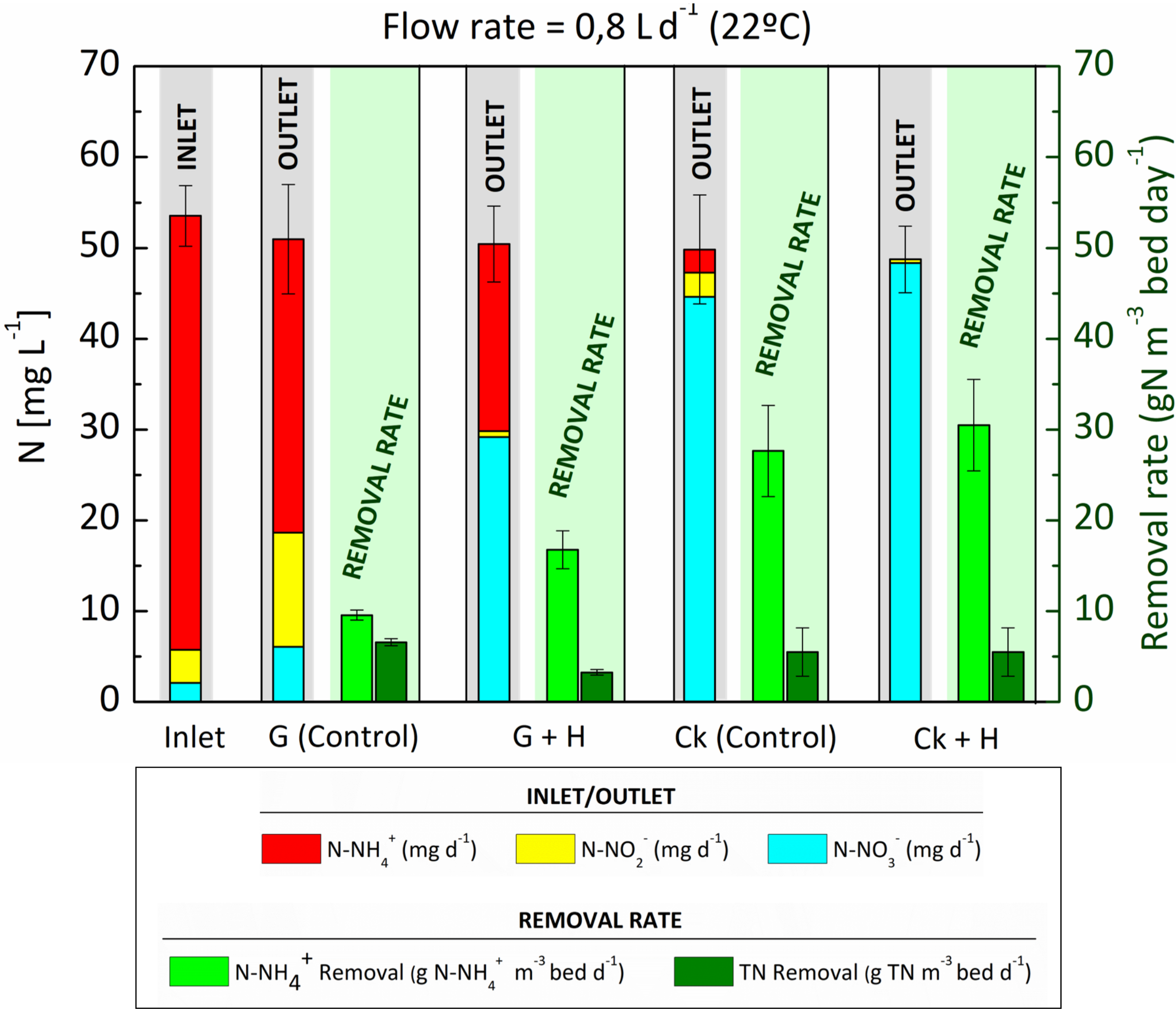
CAPÍTULO 9

FULL SCALE

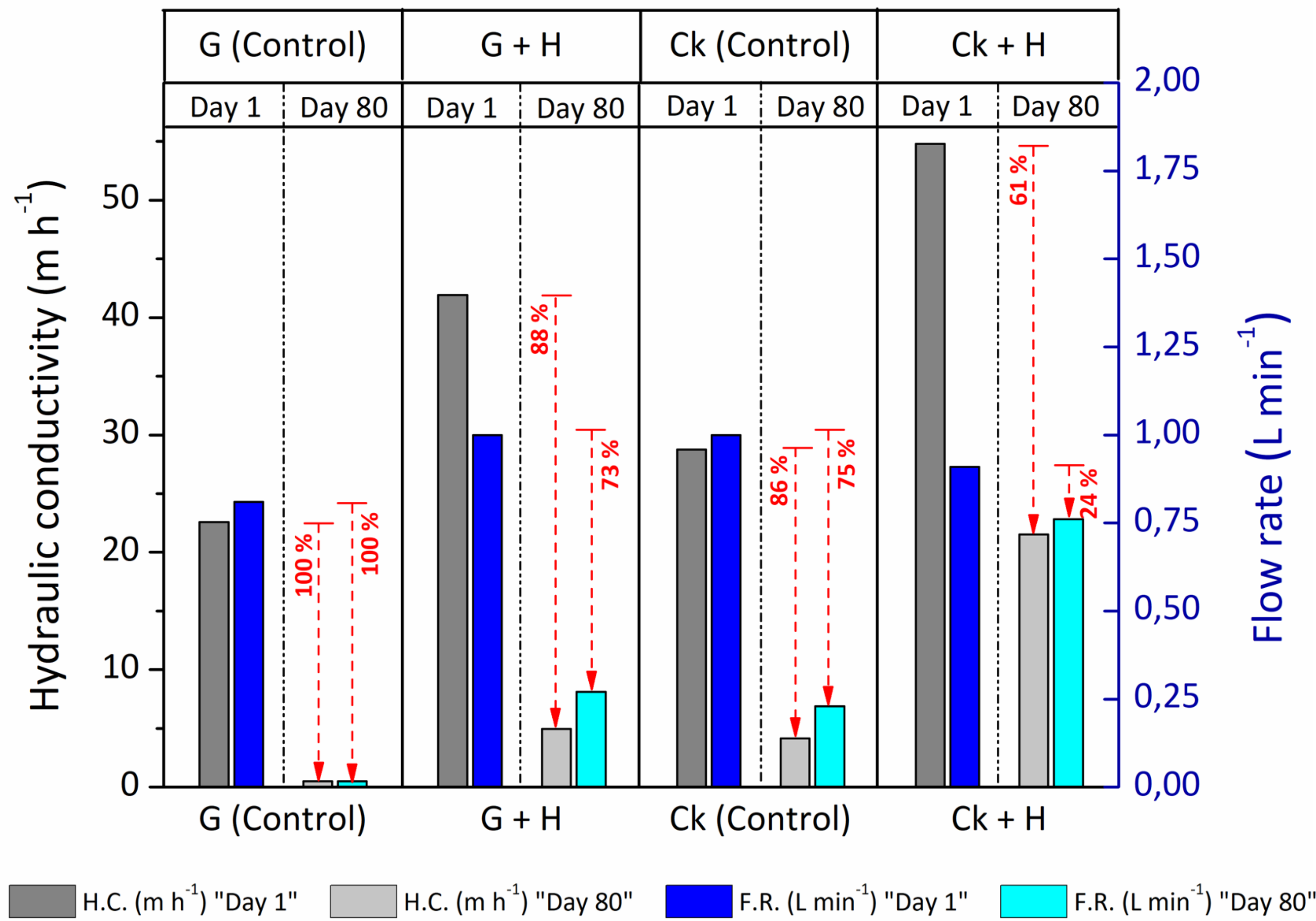
DISEÑO EXPERIMENTAL: ESCALA LABORATORIO



EVALUACIÓN DE LA NITRIFICACIÓN Y DEL EFECTO DEL HUMUS



EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE COLMATACIÓN



SECCIÓN II: AGUA RESIDUAL TRATADA DE OTOS

CAPÍTULO 7

EXPLORING ELECTROBIOREMEDIATION OF NITROGEN SPECIES AND EMERGING POLLUTANTS
IN REAL CASE. DISCHARGE EFFLUENT OF OTOS WASTEWATER TREATMENT PLANT

LAB SCALE

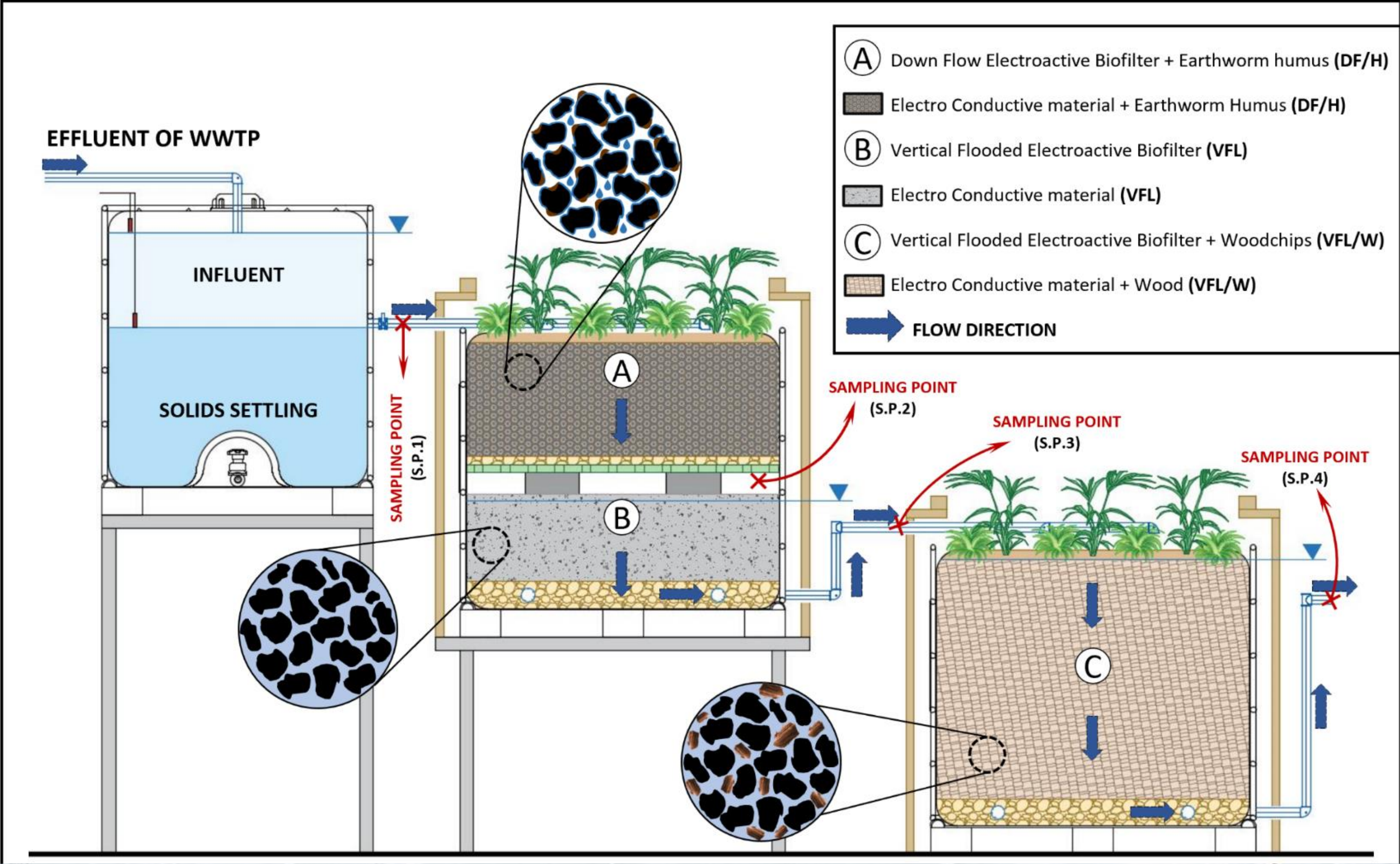
CAPÍTULO 8

DEMO SCALE

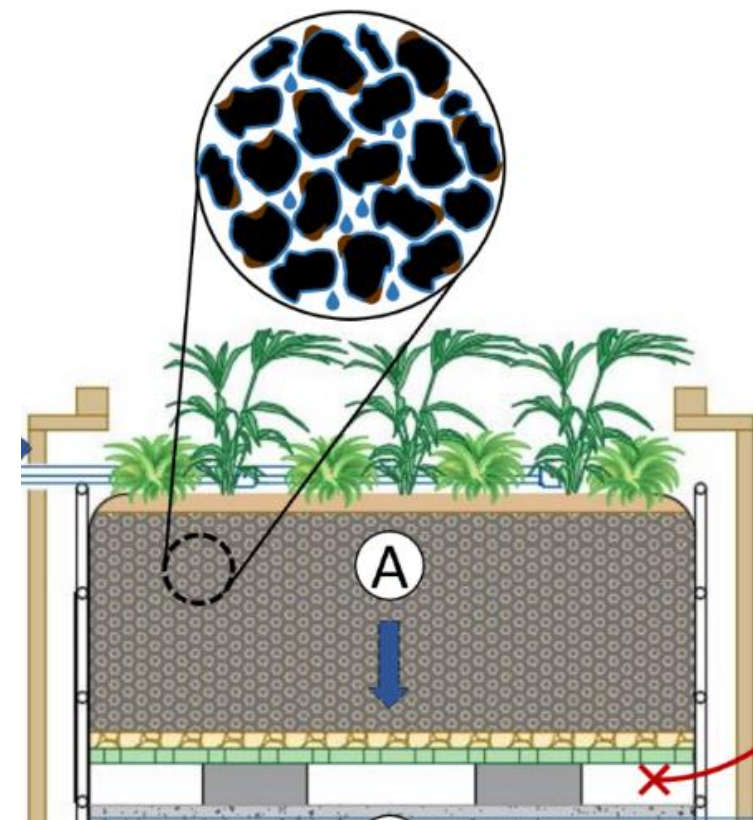
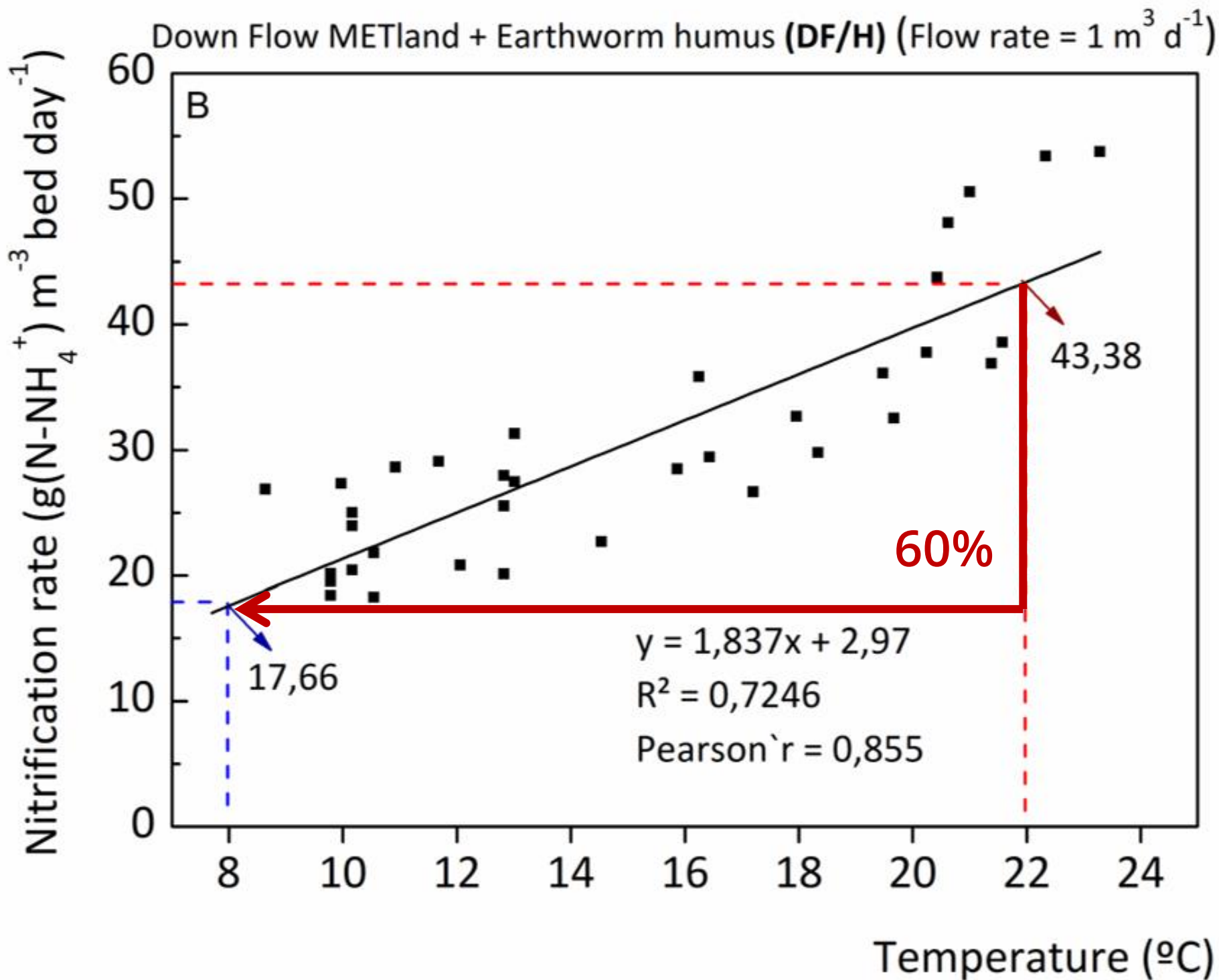
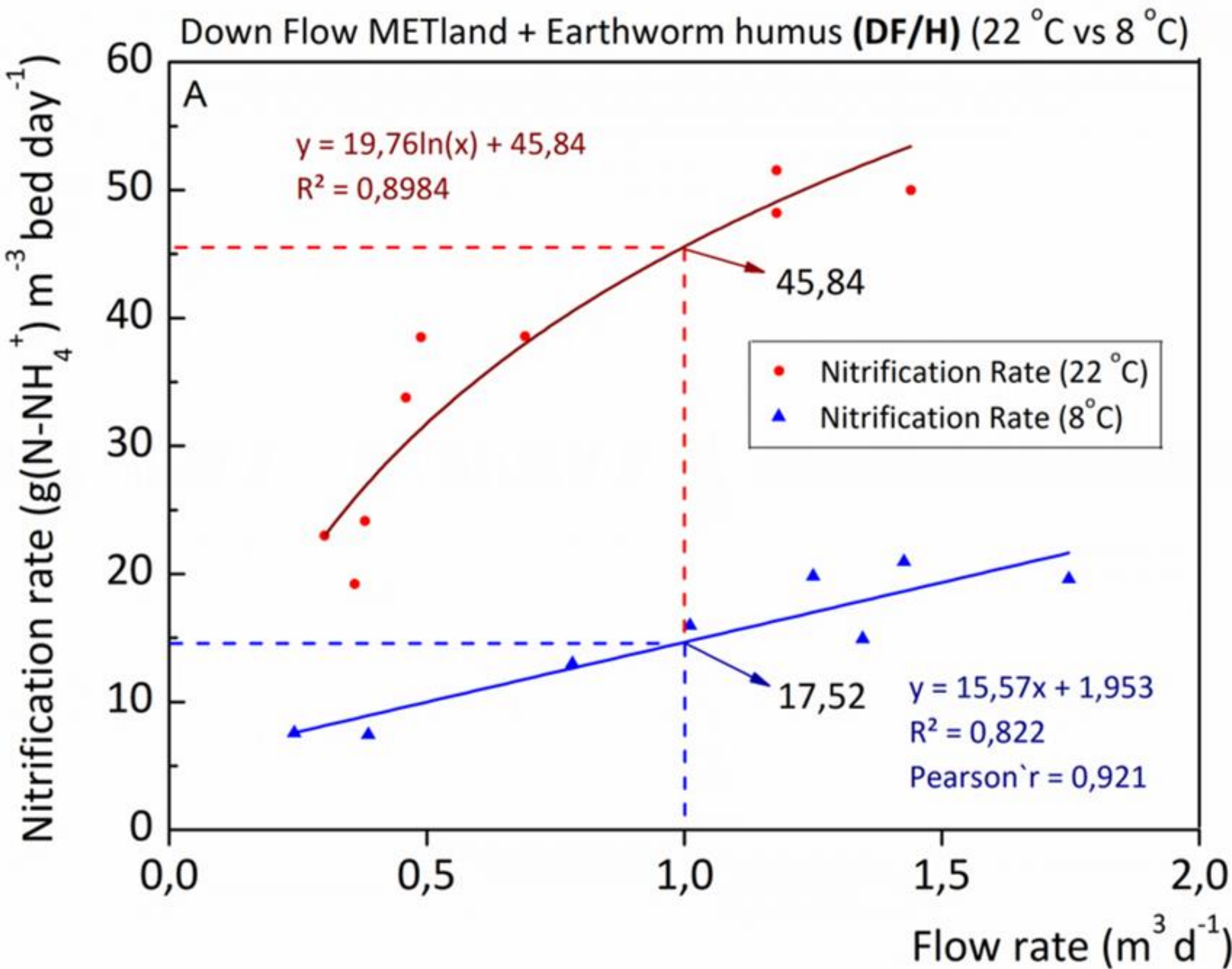
CAPÍTULO 9

FULL SCALE

DISEÑO EXPERIMENTAL: ESCALA DEMOSTRATIVA

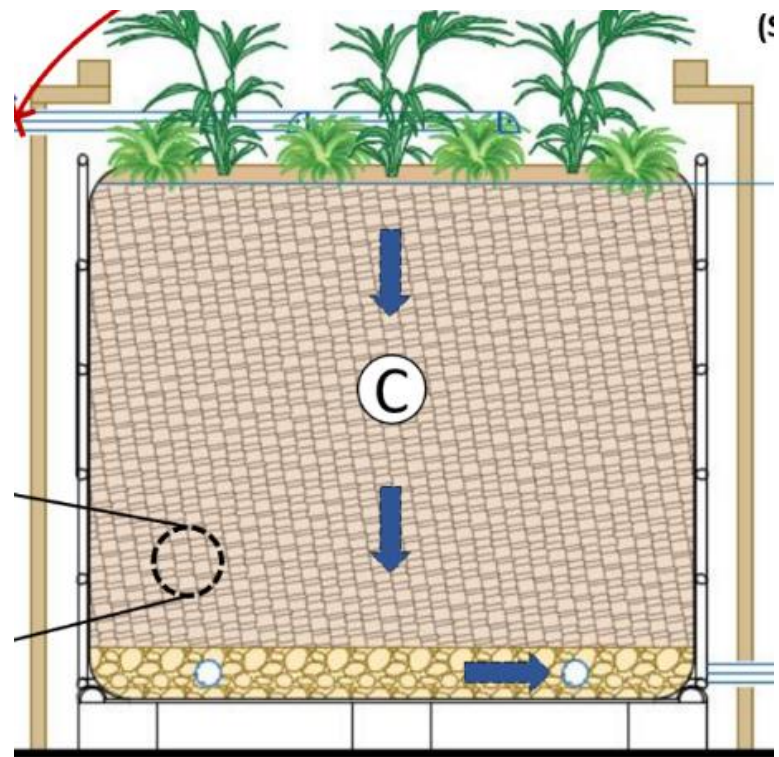
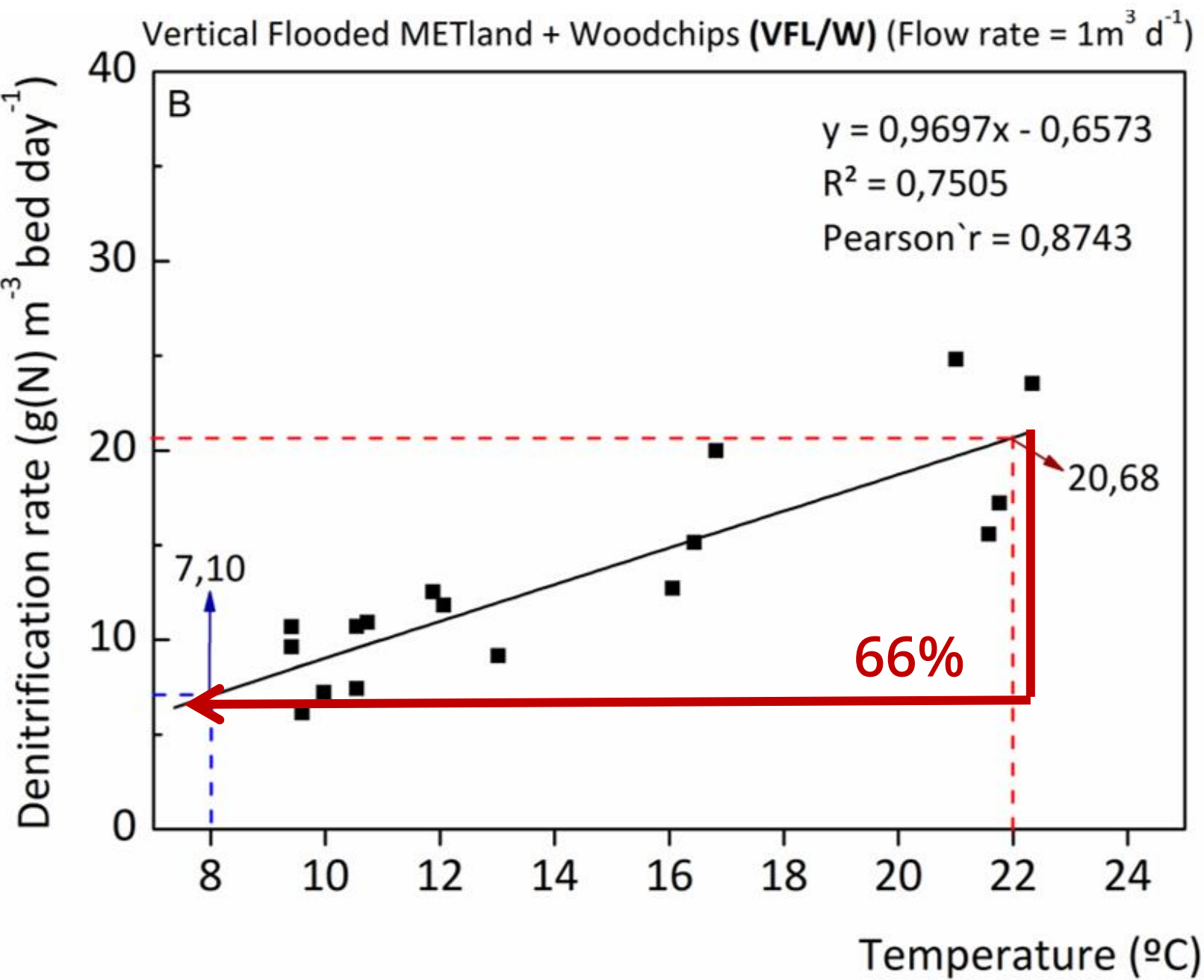
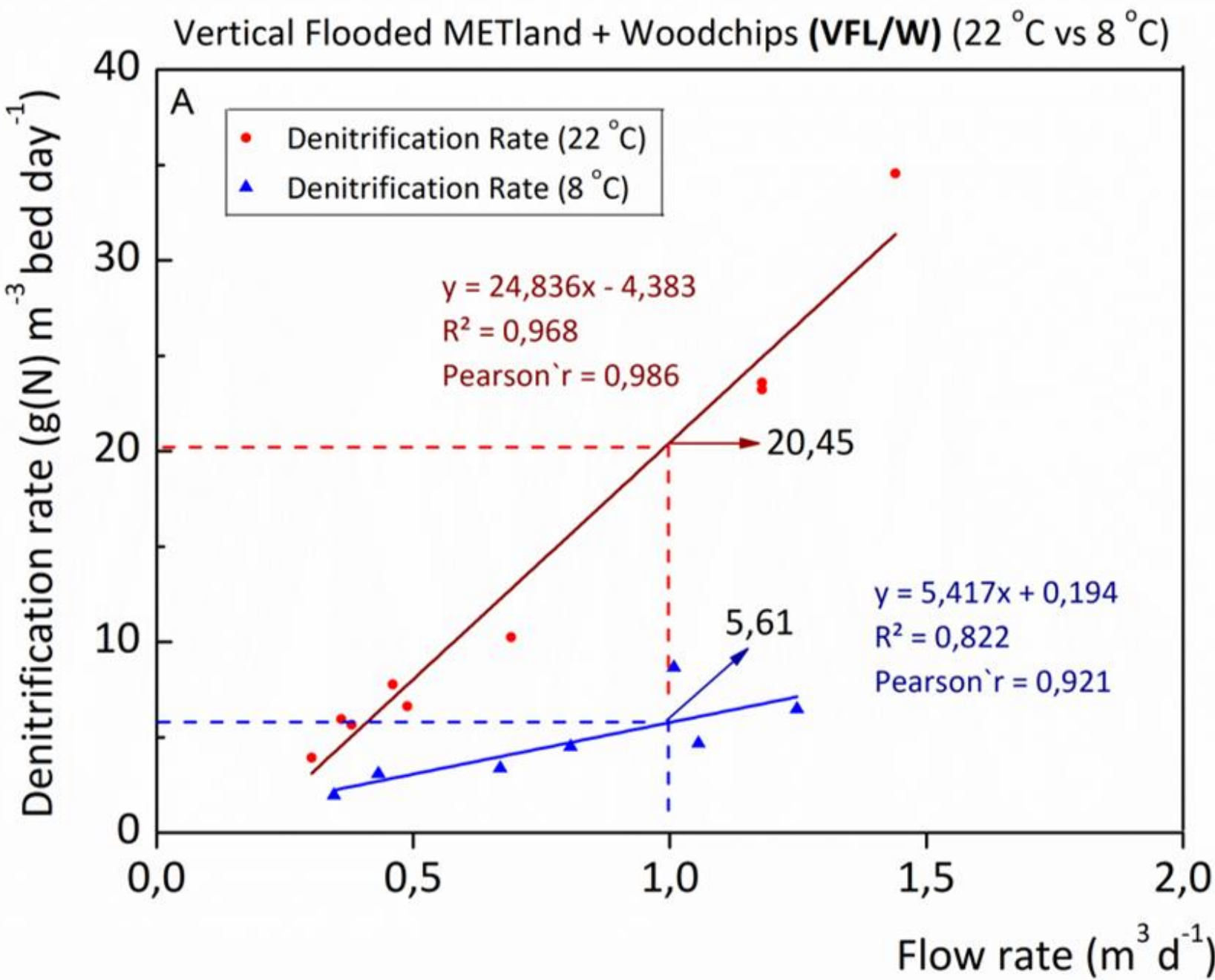


EVALUACIÓN DE LA NITRIFICACIÓN



- 1 El aumento del caudal mejora notablemente los ratios de nitrificación.
- 2 El impacto de la temperatura provoca que a un descenso de 14 °C de la Temperatura se reduzca la ratio de nitrificación en un 60%.

EVALUACIÓN DE LA DESNITRIFICACIÓN



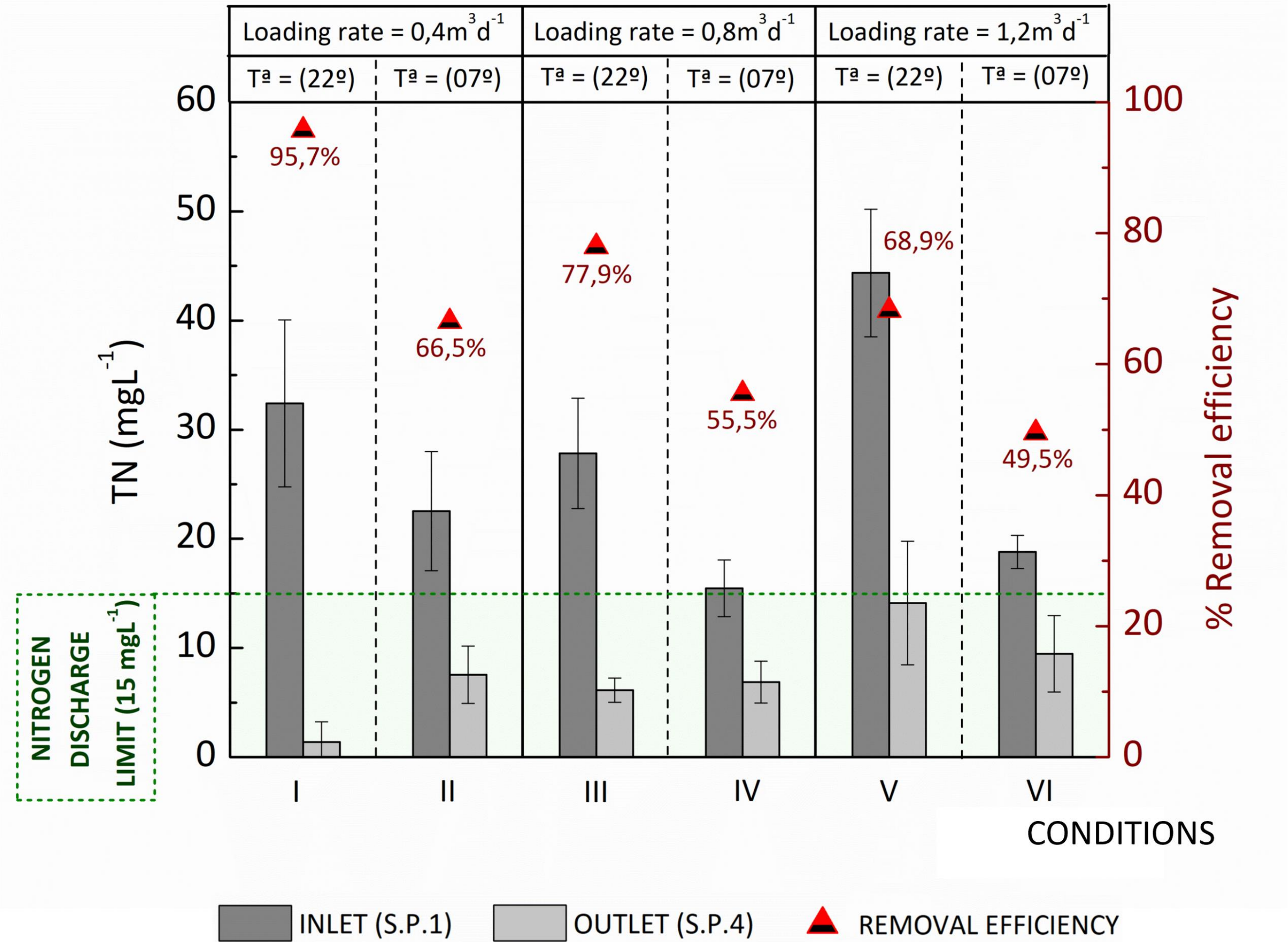
1

El aumento del caudal mejora notablemente las ratios de desnitrificación.

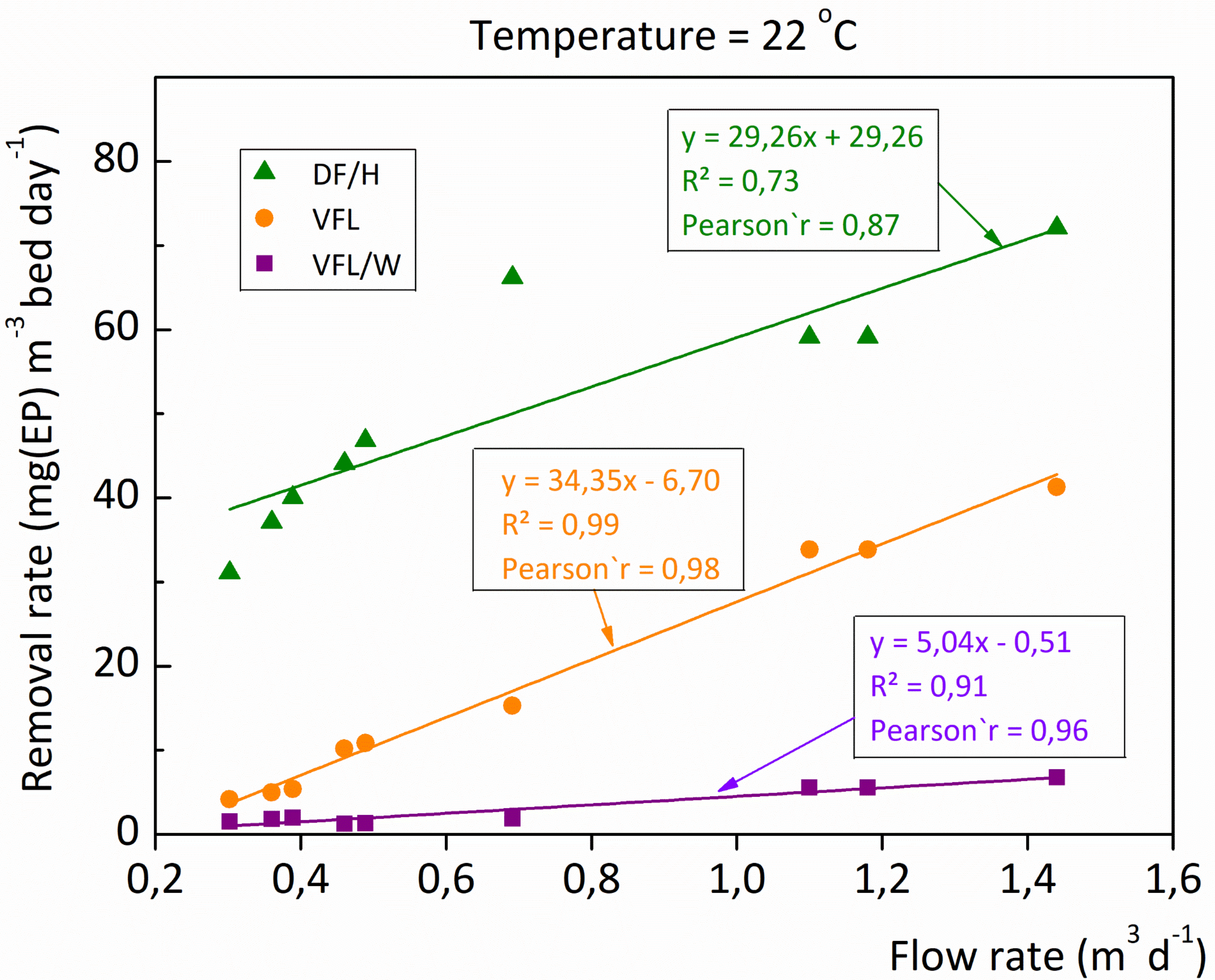
2

El impacto de la temperatura provoca que a un descenso de 14 °C de la Temperatura se reduzca la ratio de desnitrificación en un 66%.

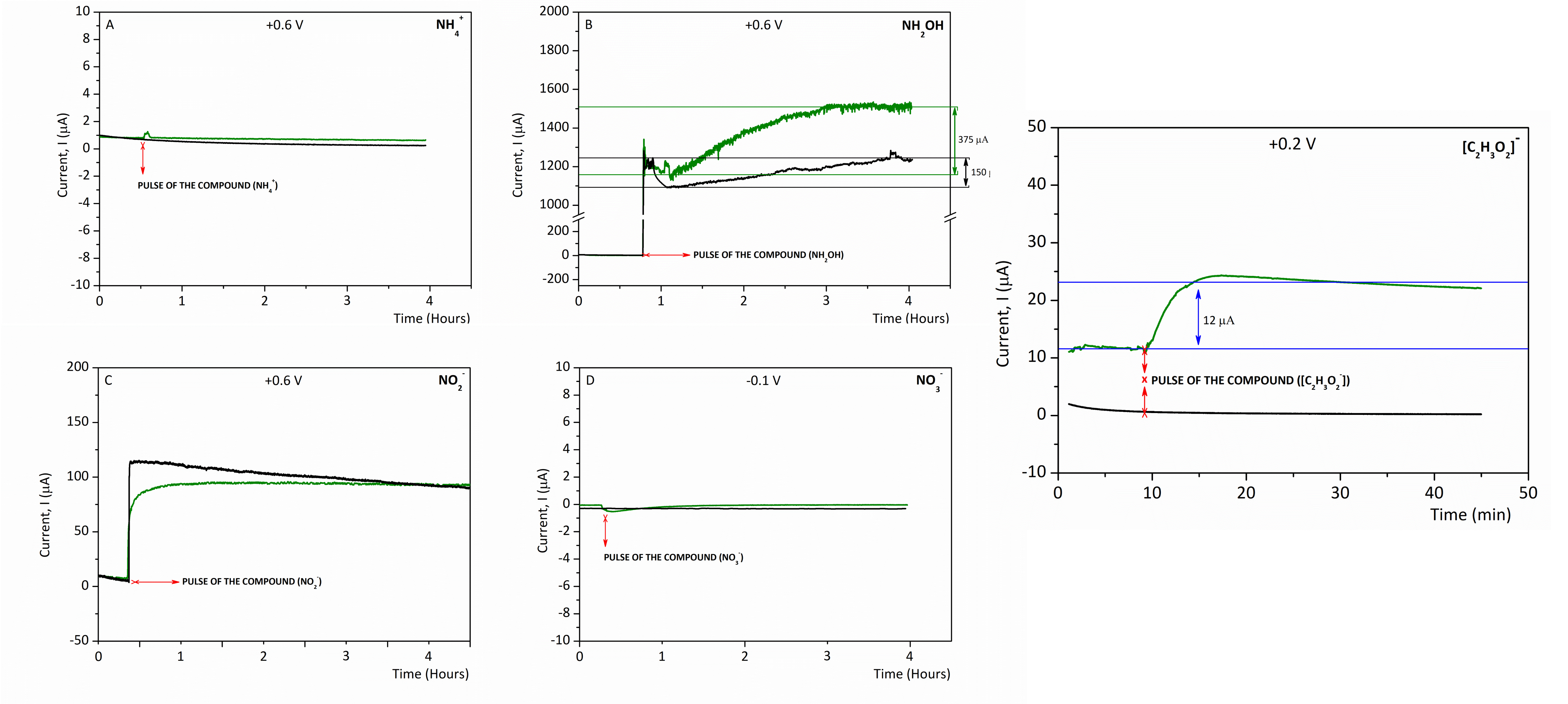
EVALUACIÓN DE LA ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO DE LOS SISTEMAS EN CONJUNTO



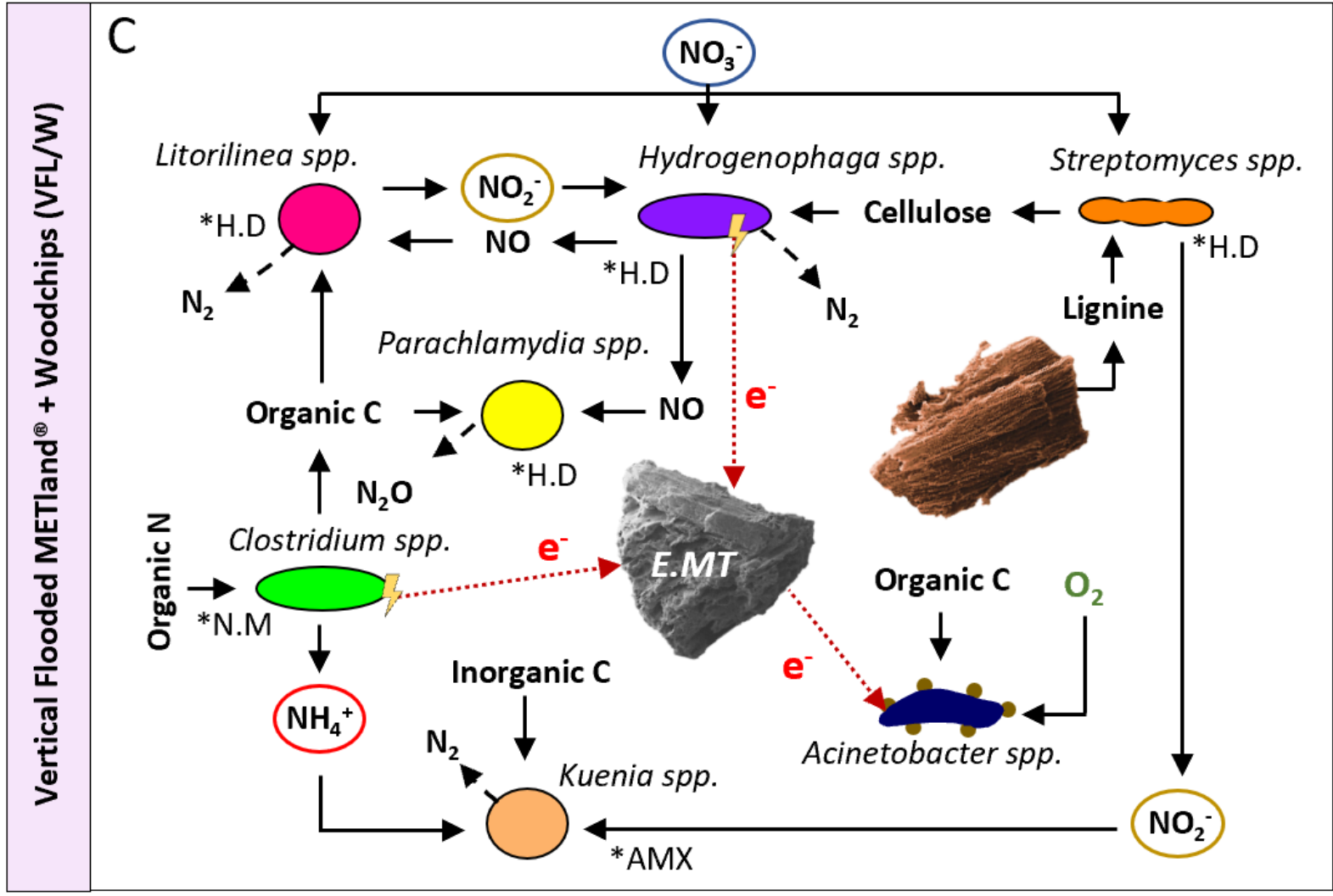
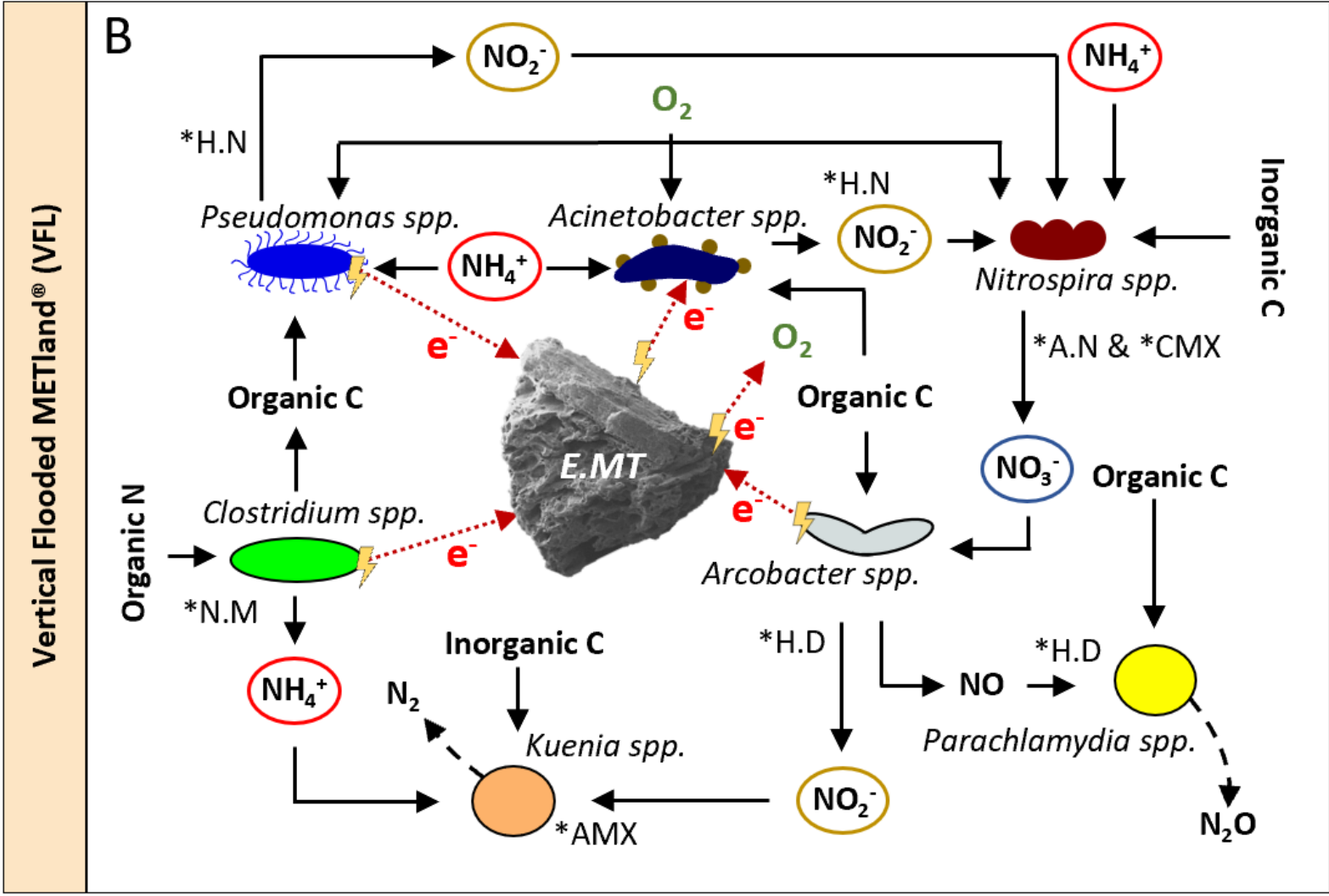
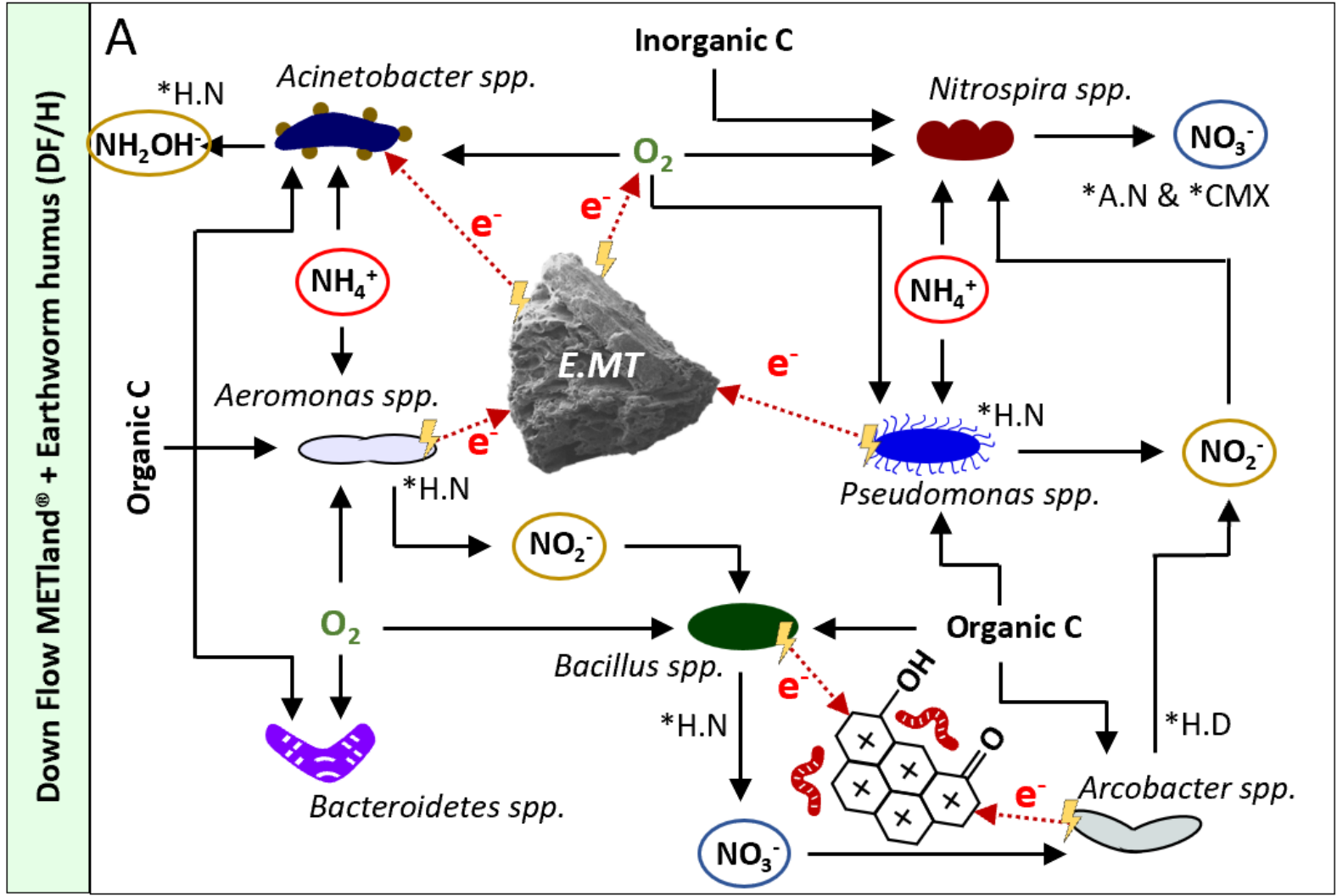
ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES



ESTUDIO DE LOS PROCESOS BIOELECTROQUÍMICOS



ANÁLISIS DE LA COMUNIDAD MICROBIANA



A

Escasa presencia de bacterias autótrofas oxidadoras de amonio.

Alta presencia de bacterias con capacidad de realizar la Nitrificación heterotrófica.

2

Presencia del género nitrospira.

Presencia de bacterias desnitrificantes.

Alta posibilidad de procesos de Nitrificación-Desnitrificación heterotróficas.

3

Se repite la presencia del género *Streptomyces*.

Se identifican bacterias desnitrificantes asociadas a capacidades de bioelectroactividad (*Hydrogenophaga*)

SECCIÓN II: AGUA RESIDUAL TRATADA DE OTOS

CAPÍTULO 7

**EXPLORING ELECTROBIOREMEDIATION OF NITROGEN SPECIES AND EMERGING POLLUTANTS
IN REAL CASE. DISCHARGE EFFLUENT OF OTOS WASTEWATER TREATMENT PLANT**

LAB SCALE

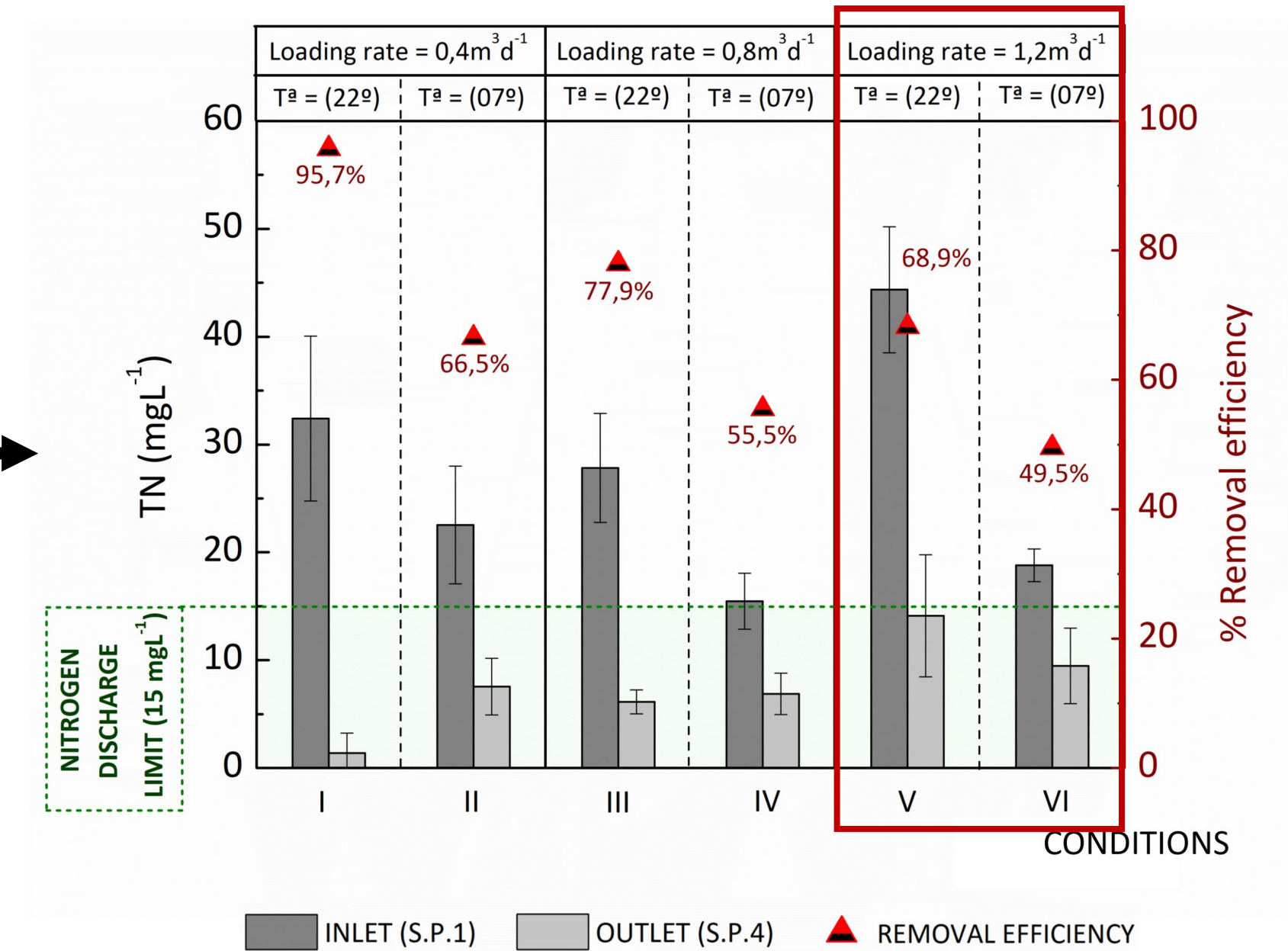
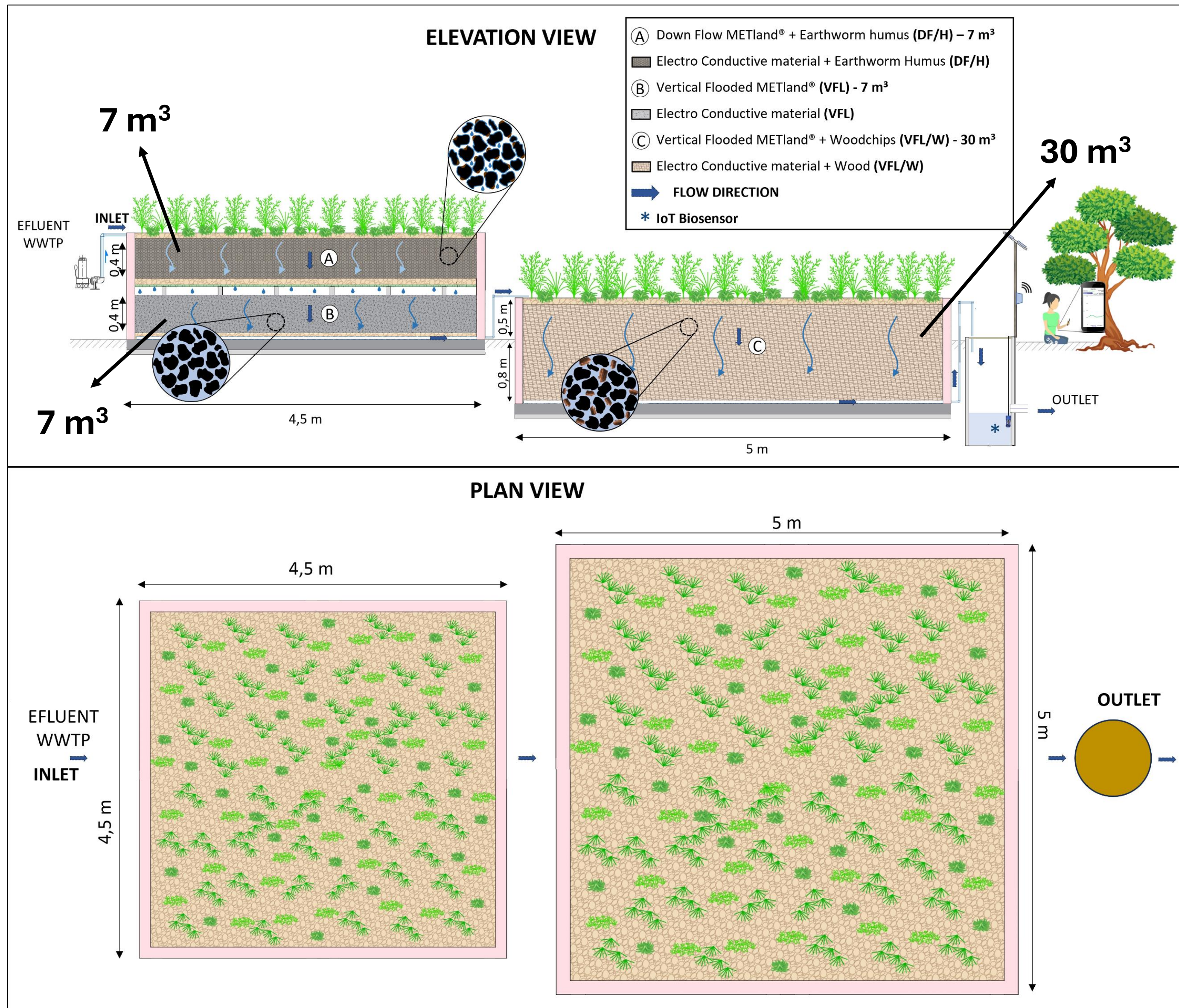
CAPÍTULO 8

DEMO SCALE

CAPÍTULO 9

FULL SCALE

ANÁLISIS DE LA COMUNIDAD MICROBIANA



CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS



1

Las pruebas a escala de laboratorio y demostrativa confirman el potencial de los sistemas METland® para funcionar como tratamientos terciarios y cuaternarios, eliminando Nitrógeno y Contaminantes Emergentes.

2

La combinación de compuestos orgánicos con el material electroconductor se ha revelado como una solución eficaz para el tratamiento de aguas con baja carga orgánica y presencia de nitratos.

3

Los sistemas METland® son más resistentes a los procesos de “clogging”, tanto en sistemas inundados como por percolación. Además, el humus de lombriz mejora esta resistencia.

4

En todos los casos, los METland® a escala demostrativa fueron capaces de reducir la concentración de los 52 Contaminantes Emergentes estudiados a 4-6 ppb. Por tanto, los METland® también pueden considerarse una tecnología eficaz que actúa como sistema de tratamiento cuaternario.

5

Las herramientas electroquímicas detectaron una respuesta electroactiva del biofilm asociada a los procesos de nitrificación y desnitrificación.

6

Los estudios de poblaciones microbianas muestra que el material electroconductor influye significativamente en las bacterias electroactivas, revelando una compleja comunidad microbiana con fuertes relaciones simbióticas.

7

Los resultados obtenidos en los experimentos a escala demostrativa han permitido desarrollar dos propuestas de escalado sobre una base sólida.

- 1 Demostración de la hipótesis sobre la relación entre las Bacterias Electroactivas y la Nitrificación Heterótrofa-Desnitrificación Aeróbica.
- 2 Tecnología METland® para la transformación de aguas residuales en productos de valor añadido.
- 3 Integración de METland® en las ciudades verdes del futuro.
- 4 Desarrollo de nuevos materiales electroconductores con distintas propiedades.

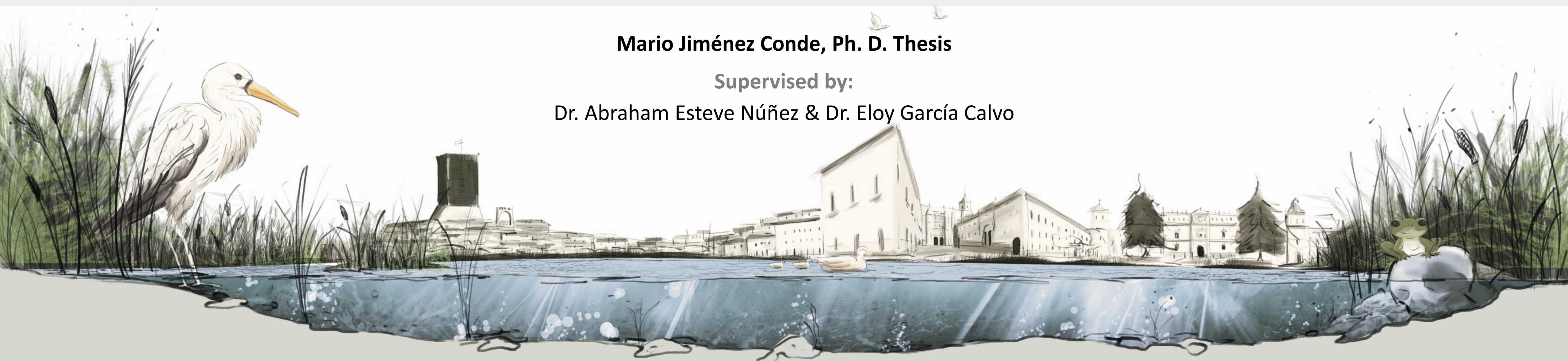
ELECTROBIOREMEDIATION STRATEGIES FOR REMOVING NITROGEN AND EMERGING POLLUTANTS IN URBAN WASTEWATER

The METland Solution as Tertiary & Quaternary Treatment

Mario Jiménez Conde, Ph. D. Thesis

Supervised by:

Dr. Abraham Esteve Núñez & Dr. Eloy García Calvo



Ph. D. Hydrology and Water Resource Management

Department of Analytical Chemistry, Physical Chemistry and Chemical Engineering