



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

**Diseño, puesta en marcha y evaluación del funcionamiento de un jardín vertical para tratamiento de agua residual situado en una escuela de formación profesional**

Treball realitzat per:

**Alex Biosca Bosque**

Dirigit per:

**Rubén Díez, Enrica Uggetti**

Màster en:

**Enginyeria Ambiental**

Barcelona, **18 de Juny de 2021**

Departament d'Enginyeria Ambiental i Civil

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

## Índice

Resumen.....	4
Glosario .....	5
1. Introducción .....	6
1.1. Jardines verticales .....	6
1.2. Humedales artificiales en el marco de las NBS .....	8
1.2.1. Humedales de flujo subsuperficial verticales.....	11
2. Objetivos .....	12
3. Organización.....	13
3.1. Participantes.....	13
3.2. Ubicación del piloto.....	13
3.3. Planificación temporal.....	14
3.4. Historial de reuniones .....	15
3.5. Visita de reconocimiento .....	15
4. Estado del arte .....	16
5. Diseño.....	19
5.1. Agua gris sintética .....	19
5.2. Modularidad: sustrato y vegetación .....	20
5.3. Diseño teórico .....	21
5.3.1. Condiciones iniciales .....	21
5.3.2. Caudal efectivo, frecuencia de alimentación y autonomía.....	22
5.3.3. Cargas efectivas y tiempos de retención .....	22
5.3.4. Eliminación teórica de DQO .....	24
5.4. Diseño real.....	25
6. Plan experimental .....	27
6.1. Construcción y presupuesto del piloto .....	27
6.2. Análisis.....	30
7. Resultados .....	32
7.1. Tratamiento de resultados.....	35
7.1.1. Estadística de resultados.....	35
7.1.2. Porcentajes de eliminación de parámetros .....	37
7.1.3. Evolución de pH y conductividad .....	39

7.1.4.	Distribución de valores.....	40
7.2.	Reutilización del agua.....	41
7.3.	Incidencias y futuras mejoras.....	43
7.4.	Especies vegetales y estética .....	44
7.5.	Colaboración de sectores educativos.....	45
8.	Conclusiones.....	47
9.	Referencias.....	48
	Anexo I – Historial de reuniones .....	50
	Anexo II – Bitácora de muestreos .....	52
	Anexo III – Estadística de resultados analíticos.....	53
	Anexo IV – Evolución de SV y sulfatos.....	54
	Anexo V – Distribución de valores de nitrógeno amoniacal y aniones.....	55

## Resumen

Se ha implementado un sistema piloto de jardinería vertical para el tratamiento de agua residual, a partir de las guías de diseño de humedales de flujo subsuperficial vertical. El sistema se ha situado en el Institut Les Salines (El Prat de Llobregat) para tratar aguas grises de lavado de manos de los baños del instituto. El proyecto es colaboración entre el Grup d'Enginyeria i Microbiologia del Medi Ambient (Universitat Politècnica de Catalunya) y el instituto.

El diseño del sistema piloto, su puesta en marcha y plena operación tuvo lugar de este modo:

- Se realizó una visita de reconocimiento para identificar la ubicación del piloto y caracterizar el agua gris. Durante la elaboración del diseño teórico del sistema y la investigación del estado del arte de sistemas similares, se obtuvieron resultados reducidos de la DQO del agua gris. Puesto que éste fue el parámetro de dimensionamiento principal, se decidió añadir fango primario de depuradora en el tanque previo al sistema y se diseñó el sistema asumiendo una concentración de DQO de entrada de 200 mg/L.
- La construcción del piloto se llevó a cabo en el periodo 10/03/2021 – 23/04/2021 y se concibió como un sistema modular de macetas con alimentación por la parte superior mediante ramales con goteros incorporados, de modo que el agua circulaba por goteo vertical en cada columna de macetas, hasta unos canalones de recogida. Se escogieron 2 módulos de sustratos con porosidades diferentes, uno de perlita y grava (mineral) y otro de sustrato orgánico comercial (orgánico).
- El funcionamiento del piloto tuvo lugar durante el periodo 30/04/2021 – 31/05/2021, en el que se realizaron 9 muestreos. A partir de los resultados, se distinguió entre 2 periodos: puesta en marcha y plena operación (a partir del día 10/05/2021, correspondiente al 4º muestreo). Salvo los valores de entrada del muestreo del día 14/05/2021, se consideraron válidos todos los resultados del periodo de plena operación del piloto para el tratamiento de resultados.

A partir de los muestreos, se realizaron analíticas de demanda química de oxígeno (DQO), pH, conductividad, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV),  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_2^-$ ,  $\text{N-NO}_3^-$  y  $\text{P-PO}_3^{4-}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Al final del proyecto se realizaron analíticas de turbidez y coliformes totales.

Los resultados más destacados del proyecto han sido:

- La mayoría de valores de DQO de alimentación han sido superiores a los 200 mg/L fijados en el diseño teórico; principalmente se ha operado con entre 250 – 400 mg/L.
- Se han obtenido eliminaciones de DQO y ST superiores a 60% en ambos módulos, destacando una eliminación mínima de DQO mayor al 50% en el módulo mineral.
- $\text{N-NH}_4^+$  y aniones han mostrado generalmente valores muy reducidos o no-detectados.
- Se han obtenido resultados que incumplen los límites legislados de reutilización del agua. Con el agua gris del instituto sin fango primario, se cumpliría con la Calidad 1.2 de Riego de zonas verdes urbanas.
- Otros resultados del proyecto han sido el planteamiento de futuras mejoras para el sistema a partir de la experiencia adquirida y valoraciones positivas de la función estética del piloto y de la colaboración entre el instituto y la universidad.

## Glosario

DBO	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EDAR	Estación depuradora de agua residual
GEMMA	Grup d'Enginyeria i Microbiologia del Medi Ambient
HFSH	Humedal de flujo subsuperficial horizontal
HFSV	Humedal de flujo subsuperficial vertical
MES	Materia en suspensión
MO	Materia orgánica
NBS	Nature-based solutions
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya

## 1. Introducción

### 1.1. Jardines verticales

Estos sistemas de jardines, aunque son de una enorme variedad, tienen en común disponer diversas especies vegetales en vertical. Algunos ejemplos de configuraciones pueden ser: una estructura que contenga diferentes compartimentos con sustrato, una red geotextil que contenga la totalidad del sustrato con las especies emergiendo en dirección horizontal, o directamente sin sustrato, mediante plantas hidropónicas.

Las posibilidades son diversas, pero en cualquier caso, el objetivo principal de la jardinería vertical es traer la estética verde al plano vertical, cubriendo muros o verjas, y por lo tanto, aumentar la presencia vegetal en las ciudades. A su vez, estos jardines mejoran el aislamiento de los edificios y son puntos de consumo de dióxido de carbono y producción de oxígeno.

También es frecuente el cumplimiento de todos o parte de los siguientes principios (Dani & Falcó, 2020):

- Utilización de materiales ligeros capaces de sostener la vegetación.
- Favorecer la oxigenación del sistema jardín.
- Optimizar el aporte y reparto de nutrientes.
- Ser amigable con el entorno natural, disminuir impacto visual.
- Adaptabilidad a inclemencias meteorológicas.

Por ejemplo, en la figura 1 se muestra la implementación de un sistema de jardín vertical en la fachada de un edificio (Edificio Consorcio Vida, Las Condes, Chile), con el objetivo de disminuir el impacto visual de este y ser más amigable con el entorno:



Figura 1. Jardín vertical con función estética en fachada de edificio (Dani & Falcó, 2020)

Cabe destacar que la filosofía de los jardines verticales no busca necesariamente implementar materiales y componentes ecológicos o potenciar la autosuficiencia de los sistemas jardín. Sin embargo, esta filosofía está presente en gran parte de los jardines verticales diseñados y se trata de implementar como mínimo hasta cierto grado. En otras palabras, se busca dotar de cierto carácter ecológico al sistema.

Los jardines verticales pueden implementarse mediante plantación horizontal o plantación vertical (Dani & Falcó, 2020). Los sistemas de plantación horizontal consisten en la plantación en un punto específico del jardín, con desarrollo de las plantas en toda la superficie vertical como enredaderas por adherencia, enredaderas con guías, o plantas colgantes. También se pueden disponer contenedores o macetas de cultivo ubicados a diferentes alturas del jardín, desde las que crecen o cuelgan las plantas. Los sistemas de plantación vertical suelen consistir en celdas de superficie ajardinada que se disponen verticalmente. Pueden ser sistemas modulares o bien ser construidos in situ.

Los elementos habituales en jardines verticales convencionales incluyen una estructura de soporte y fijación, un medio de cultivo (ya sea modular o superficial), un sistema de riego y fertilización, un canalón de recogida del agua sobrante, el propio sistema vegetal compuesto por diferentes variedades de plantas, el sistema de control del riego y la fertilización, y en algunos casos, un sistema de iluminación artificial.

Finalmente, es de interés tener la referencia de un sistema de jardín vertical de gran dimensión, como es el que recientemente se ha instalado en la ciudad de Santander, en el Centro Cívico de Tabacalera (Ayuntamiento de Santander, 2021). Es de destacar que se trata de un jardín interior y que tiene una superficie de 560 m<sup>2</sup>, siendo el más grande de Europa, y está formado por 26 especies diferentes, algunas de las cuáles florecen, de modo que se habla de una estética dinámica, es decir, variable a lo largo del ciclo anual. Además el jardín dispone de un sistema automático de iluminación con LED cuando la luz natural es insuficiente en el jardín. En la figura 2 se muestra una imagen de este sistema:





Figura 2. Jardín vertical del Centro Cívico de Tabacalera (Guía verde, 2020)

Uno de los principales inconvenientes de los jardines verticales es el consumo de agua y fertilizantes, necesario para su correcto desarrollo. En caso de un inadecuado diseño o mantenimiento, puede tener lugar el deterioro o colapso del jardín.

En este contexto, en el presente proyecto se plantea la utilización de un jardín vertical como sistema de fitorremediación, con el doble objetivo de evitar el consumo de agua y fertilizantes en el jardín, y tratar in situ las aguas residuales generadas en el edificio. En concreto, se plantea la utilización de aguas grises (aguas residuales de lavabos y desagües excluyendo las aguas de origen fecal). Esta aplicación es bastante innovadora, ya que apenas se han encontrado referencias en la bibliografía técnica y la literatura científica. Además, se plantea la posibilidad de que el agua efluente, depurada en el jardín, pueda ser posteriormente reutilizada para usos urbanos cercanos al jardín (limpieza de calles y/o colectores de saneamiento, riego de zonas ajardinadas, riego de huertos urbanos, etc.).

## 1.2. Humedales artificiales en el marco de las NBS

En el ámbito europeo (European Union, 2021), se definen las Nature-Based Solutions (NBS) como soluciones rentables inspiradas y soportadas por la naturaleza, que proveen de beneficios ambientales, sociales y económicos, y contribuyen a la resiliencia. Estas soluciones aportan aspectos y procesos naturales, en mayor cantidad y diversidad, en ciudades, paisajes terrestres y marinos. Ello se lleva a cabo mediante intervenciones sistemáticas, adaptadas localmente y de uso eficiente de recursos.

Este tipo de tecnologías suelen ser de reducidos costes (mantenimiento, energéticos, de recursos) y reducida generación de residuos, permiten substituir tecnologías más



contaminantes y promueven un efecto reparador de carácter ambiental. Es por estas razones por las que constituyen una alternativa de interés e implantación creciente, especialmente debido a las diferentes alertas ambientales del siglo XXI.

Dentro del sector del tratamiento de aguas residuales, más allá de las estrategias de tratamiento convencionales, existen tecnologías que incorporan los principios característicos de las NBS para la depuración de aguas residuales, que consiste en la eliminación de nutrientes, materia orgánica (MO) y contaminantes. Entre ellas se encuentran los lagunajes, humedales artificiales, filtros verdes, zanjas y lechos filtrantes, entre otros.

Concretamente, los humedales artificiales son sistemas construidos que replican los mecanismos de eliminación de contaminantes que suceden en humedales naturales bajo procesos fisicoquímicos y biológicos. Las características principales de estos sistemas son (Gullón, 2020):

- Se suelen construir en lagunas o canales, con poca profundidad (30 – 80 cm). Es un proceso extensivo que requiere gran superficie (2 – 7 m<sup>2</sup>/habitante equivalente)
- Se impermeabiliza el fondo y se rellena con material granular que puede tener una configuración variable. Se trata de una obra sencilla.
- Se suelen utilizar macrófitos (especies vegetales) propios de la zona para la plantación. Sus funciones son la absorción del agua residual mediante las raíces, apoyar el crecimiento de microorganismos y filtrar el agua, junto con el material granular.
- Requieren pocas tareas de mantenimiento y operarios. No generan grandes cantidades de fango de forma continuada. Buena integración en el medio, sin insectos ni malos olores.
- Temperaturas extremas pueden dificultar los procesos de eliminación de nutrientes, materia en suspensión (MES) y MO.
- El consumo energético se reduce a las acciones de bombeo del sistema, especialmente en cabecera.

Existen humedales artificiales de diferente tipología. Por lo general, la clasificación suele ser la siguiente (García & Corzo, 2008):

- De flujo superficial: El agua está en contacto con la atmósfera en todo momento y circula entre tallos de las plantas. Suelen ser equivalentes a muchos sistemas de lagunaje. En la figura 3 se muestra el perfil de un humedal de flujo superficial:

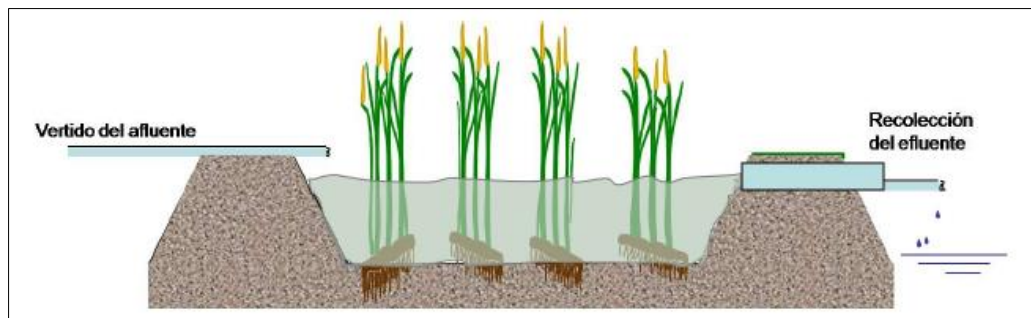


Figura 3. Perfil de humedal de flujo superficial (García & Corzo, 2008)

- De flujo subsuperficial: El agua circula de manera subterránea y entre raíces, de modo que en general, se trata de un proceso menos aeróbico. La MES se filtra en el medio granular. Se forma una biopelícula en el material granular que permite una mayor depuración y admite mayor carga orgánica. Los humedales de flujo subsuperficial se dividen, según la dirección del flujo, en horizontales o verticales. Seguidamente se expresa el funcionamiento de los humedales de flujo subsuperficial horizontales (HFSH) y humedales de flujo subsuperficial verticales (HFSV) respecto diferentes parámetros a considerar en la tabla 1 (Gullón, 2020):

Tabla 1. Diferencias entre humedales de flujo subsuperficial horizontales y verticales para diferentes parámetros

Parámetro	HFSH	HFSV
MES	Concentración de salida habitual <20 mg/L. Reducción habitual >90%. Puede conllevar colmataciones	Rendimientos similares, pero proceso tiene lugar en sentido vertical
MO particulada	Retención en los primeros centímetros, parte asimilada por bacterias. Puede conllevar colmataciones de la zona de entrada	Ídem, en sentido vertical. No se colmatan
MO disuelta	Retención por adsorción y degradación anaeróbica bacteriana. Reducción habitual de 75-95%	Similar, mayor degradación debido a aireación del sistema mediante alimentación intermitente y procesos de oxidación en los poros del material granular. Reducciones variables
Nitrógeno	Reducción <30%, condiciones aeróbicas escasas	Nitrificación total gracias a condiciones aeróbicas
Fósforo	Eliminación de 10-20%. Mayores rendimientos requieren reactivos	Ídem
Patógenos	Depende del tiempo de permanencia y el medio granular. Reducción de 1-2 logaritmos de concentración. A menudo insuficiente eliminación para uso de riego	Ídem

Las diferencias entre ambos sistemas son relevantes. Destaca especialmente la capacidad que tienen los HFSV de incorporar procesos aeróbicos que favorecen los ratios de oxidación de la MO y por lo tanto, la capacidad de asumir mayores cargas orgánicas. Además, estos no requieren de superficies tan extensas como los HFSH, hecho que economiza espacio y también facilita la modularidad de estos sistemas, permitiendo implementar procesos de diferentes etapas. Valores habituales de superficie requerida para HFSH son 5 – 7 m<sup>2</sup> por persona equivalente mientras que para HFSV son 2 – 4 m<sup>2</sup> por persona equivalente.

En la figura 4 se muestran los perfiles de los HFSH y HFSV:

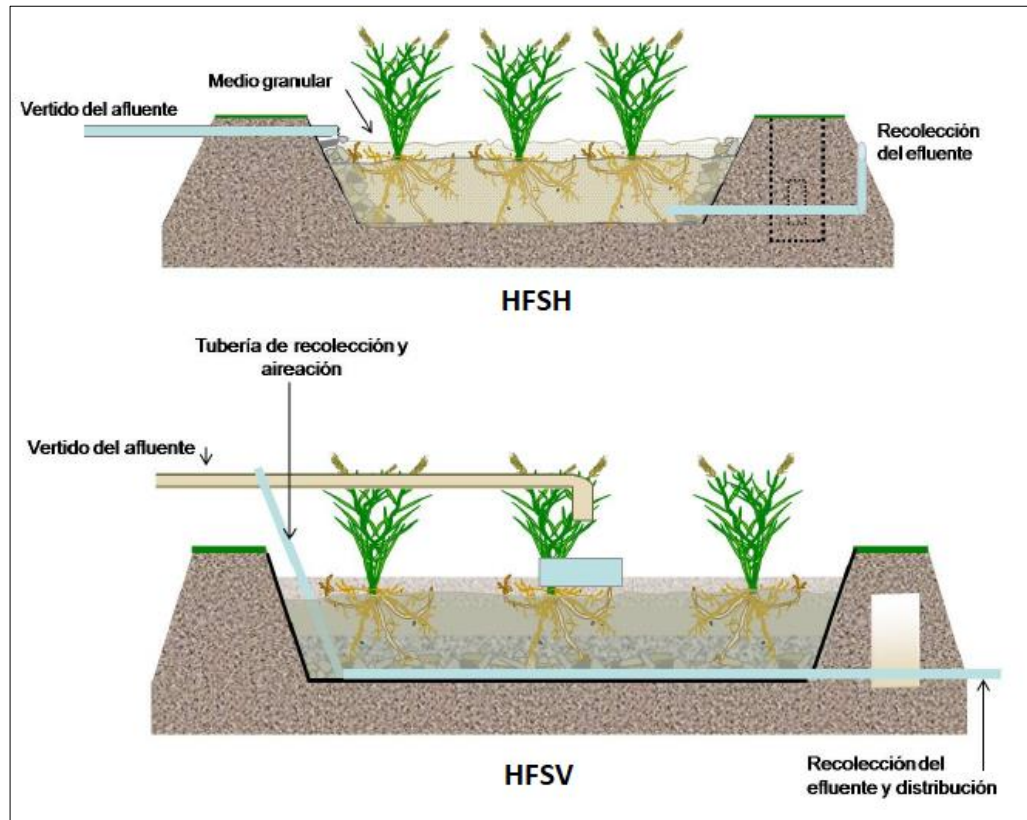


Figura 4. Perfiles de los humedales de flujo subsuperficial horizontales y verticales (García & Corzo, 2008)

Seguidamente se profundiza en las características de los HFSV, objeto de interés de este proyecto.

### 1.2.1. Humedales de flujo subsuperficial verticales

Las características principales de los HFSV son las siguientes (Gullón, 2020):

- Permiten una nitrificación completa y se pueden incorporar tras procesos de HFSH como etapa final.
- Suelen ser de flujo intermitente, con fases de llenado, reacción y vaciado. Esto favorece procesos aeróbicos en los que sucede transferencia de oxígeno. Determinar la frecuencia de alimentación del sistema es un factor clave para su diseño.
- Permiten mayores capacidades de carga superficiales que en los HFSH, con valores de  $4 - 6 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2\text{-día}$  para los horizontales en contraste con valores de carga a partir de  $20 \text{ DBO}_5/\text{m}^2\text{-día}$  para los verticales. A su vez requieren menor superficie.
- La distribución vertical del agua se trata de repartir sobre la superficie de la manera más homogénea posible. Es habitual el uso de tuberías perforadas por encima del medio granular.
- Sin embargo, el proceso de alimentación implica inundación periódica del terreno, con lo cual se suelen escoger especies resistentes a tales condiciones.
- La profundidad del medio granular suele ser de  $50 - 80 \text{ cm}$ . La recogida del agua se lleva a cabo mediante tuberías de drenaje enterradas.

Una vez listadas estas características, cabe mencionar que, a nivel español, hay un mayor número de HFSH implementados que de HFSV. A grandes rasgos no se dispone de guías técnicas o diseño teórico en ámbito nacional para estos y se suelen solucionar las problemáticas de diseño mediante los conocimientos que se tienen de HFSH.

En cualquier caso, el parámetro de referencia que se suele tener presente para diseñar HFSV es la carga orgánica admisible, que también es el parámetro que los hace destacar en contraste con los HSFH. En la bibliografía se encuentran disponibles rangos de carga superficial orgánica asumible para los HFSV, como por ejemplo de 22,8 – 29,8 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·día (José Juan Salas Rodríguez, 2007), alrededor de 20 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·día (Ortega et al., 2010) o 20-40 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·día (García & Corzo, 2008).

## 2. Objetivos

El propósito de este proyecto es el diseño, implementación y seguimiento del funcionamiento de un jardín vertical en una localización concreta, como sistema natural para el tratamiento de aguas residuales.

El piloto se ha diseñado inspirado en los HFSV, de modo que el proyecto es una confluencia de los conceptos que se tienen de HFSV, desde el ámbito ingenieril, y de la jardinería vertical. La ubicación escogida ha sido el Institut Les Salines (Av. Onze de Setembre, 36, 08820 El Prat de Llobregat, Barcelona, España).

Para responder al objetivo principal del proyecto se han establecido los siguientes objetivos secundarios:

- Realizar un estudio del estado del arte sobre implementación de sistemas similares de jardines verticales para el tratamiento de aguas grises o residuales.
- Elaborar un diseño del sistema mediante la aplicación de la metodología de diseño de HFSV para la configuración del piloto. Realizar de un listado de materiales y presupuesto para la implementación del sistema.
- Analizar la puesta en marcha del sistema, llevada a cabo mediante la aportación en pequeñas dosis de un efluente primario de depuradora, con el fin de aumentar la carga del sistema.
- Analizar el funcionamiento del sistema en plena operación y comprobar su desarrollo en cuanto a eliminación de materia orgánica, sólidos y nutrientes, a partir de las analíticas de muestras tomadas en la entrada y salida del sistema.
- Determinar la viabilidad de reutilización del agua de salida del piloto, comparando con los límites legislados.
- Transmitir la casuística del proyecto a los alumnos del Institut Les Salines e impulsar de este modo la concienciación ambiental y el uso sostenible del agua.
- Plantear mejoras del sistema a partir de la experiencia adquirida con el funcionamiento del piloto.

### 3. Organización

#### 3.1. Participantes

Las partes implicadas en este proyecto son las siguientes:

- Autor del proyecto: Alex Biosca, estudiante del Máster de Ingeniería Ambiental en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Grup d'Enginyeria i Microbiologia del Medi Ambient (GEMMA), del Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental, UPC.
- Institut Les Salines, centro de formación de ciclos de grado medio y superior (El Prat de Llobregat).

#### 3.2. Ubicación del piloto

En la figura 5 se muestra la ubicación del Institut Les Salines (Av. Onze de Setembre, 36, 08820 El Prat de Llobregat, Barcelona, España), situado al suroeste de El Prat de Llobregat:



Figura 5. Ubicación del Institut Les Salines (Google, 2021a)

En la figura 6, se aprecia una imagen satélite del instituto y el punto del piloto y en la figura 7, se aprecia una fotografía del exterior del edificio en la ubicación de los baños, antes de la instalación del piloto:



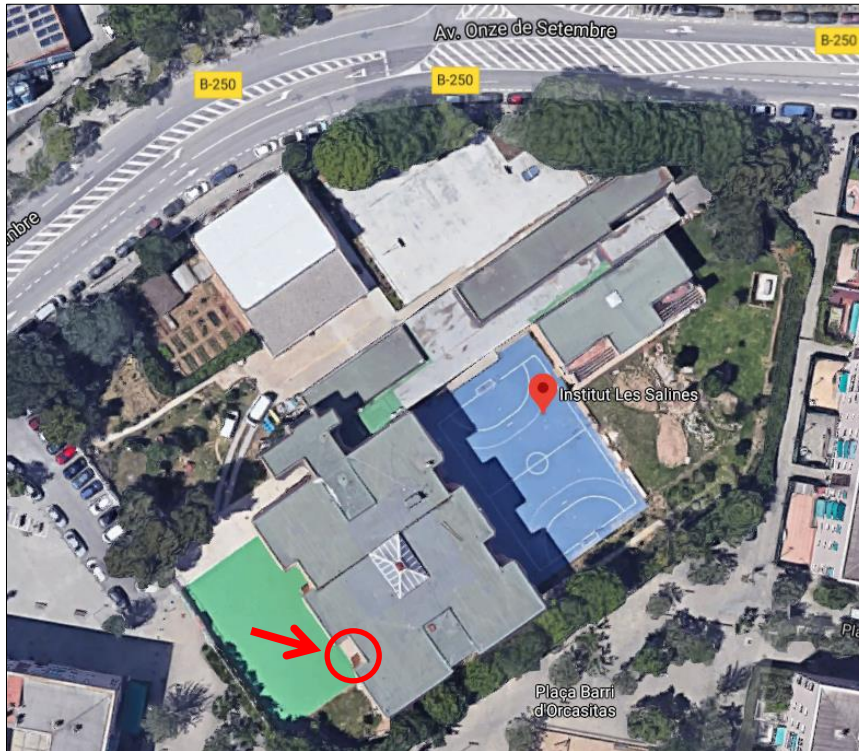


Figura 6. Ubicación del piloto, ala sur del Institut Les Salines (Google, 2021b)



Figura 7. Ubicación del piloto, ala sur del Institut Les Salines

### 3.3. Planificación temporal

De cara a organizar el proyecto, se ha llevado a cabo una planificación temporal de las diferentes tareas a realizar en un gráfico de barras. Se muestra en la figura 8 la planificación temporal del proyecto:

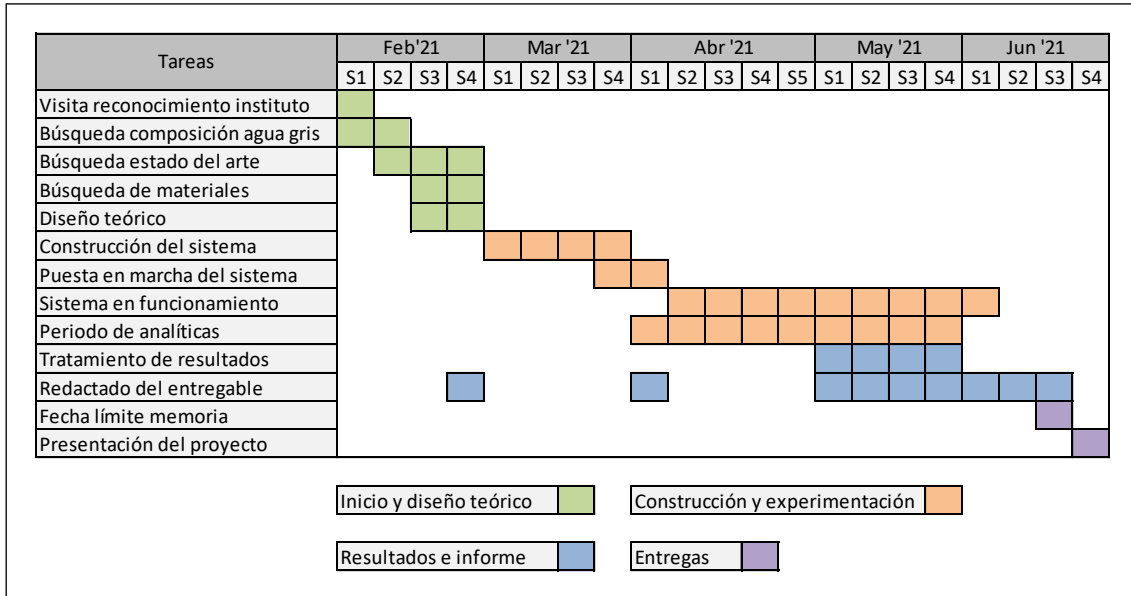


Figura 8. Planificación temporal del proyecto

Cabe destacar que durante la realización del proyecto hubo una demora en la construcción del sistema, que concluyó el día 23/04/2021 (semana 3 de abril). Debido a esto, el periodo de funcionamiento del piloto y la realización de muestreos y analíticas se vieron recortados respecto a esta planificación inicial.

### 3.4. Historial de reuniones

En el Anexo I – Historial de reuniones, se muestran las reuniones que han tenido lugar a lo largo del proyecto. Se indican las fechas, los motivos y los puntos tratados en cada reunión. Otro tipo de comunicaciones entre los participantes se han llevado a cabo mediante correo electrónico.

### 3.5. Visita de reconocimiento

El día 25/01/2021 se hizo la visita de reconocimiento al Institut Les Salines. La jornada comprendió los siguientes puntos:

- Primera reunión presencial de todas las partes: Autor, GEMMA e Institut Les Salines.
- Análisis de la ubicación del piloto y toma de medidas, mostrado en la anterior figura 7.
- Análisis de los lavaderos de manos de los baños y toma de medidas. Se muestra en la figura 9:





Figura 9. Grifos de los lavaderos de manos de alimentación para el piloto

- Recogida de muestras de 2 L de agua de salida de los lavaderos de manos del baño de mujeres (muestras del 18/01/2021 y 25/01/2021), del baño de hombres (muestra del 18/01/2021) y de una balsa de riego de donde se podría extraer agua para llevar a cabo dopajes del agua de grifo (muestra del 25/01/2021). Esta tarea se llevó a cabo para poder establecer cuál sería el agua influente que se podría tratar en el sistema.

Las muestras se llevaron al laboratorio de Análisis Ambiental del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, UPC. Allí se analizaron pH, conductividad, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), nitrógeno de nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Con ello se buscó caracterizar la composición del agua gris del instituto. También se analizó el agua de la balsa de riego para un posible futuro uso durante el plan experimental, aunque finalmente esta opción fue descartada.

#### 4. Estado del arte

El diseño del piloto de este proyecto requiere una confluencia de los conocimientos que se tienen de jardinería vertical y HFSV. Para ello, es necesaria una investigación en el estado del arte de diseños similares para que sirvan de referencia de este proyecto.

En esta investigación acerca de jardines verticales de depuración de aguas grises se detecta que estos sistemas también son referidos como *greenwalls*. En la tabla 2 se recogen las características principales de sistemas piloto y de laboratorio que se han encontrado el literatura:

Tabla 2. Parámetros de diseño para sistemas de tratamiento de aguas grises en *greenwalls*. Recorte de imagen de la fuente (Fulvio Boano, 2020)

Authors	Size	Operational factors			
		Flow (L/day)	HLR (L/m <sup>2</sup> /day)	OLR (g <sub>COD</sub> /m <sup>2</sup> /day)	HRT (hours)
(Frazer-Williams, et al., 2008)	6.86 m <sup>2</sup>	480 (continuous flow)	70	5.7	50.4
(Svete, 2012)	2.34 m <sup>2</sup> vertically	360	670–980	161.5	1.5–3.3
(Gattringer, et al., 2016)	2 m <sup>3</sup> substrate volume, 5 m in length, 1.50 m in width and 2.50 m in height	500–1500 L/day (semi-continuous batch)	250	100	–
(Masi, et al., 2016)	0.72 m <sup>2</sup>	240 (an hourly flush of 10 L)	1000	60	0.2–0.67
(Eregno, et al., 2017)	0.078 m <sup>2</sup>	45	580	–	–
(Fowdar, et al., 2017)	70 columns, 0.05 m <sup>2</sup> each column	2.50–5	55–110	5.7–15.4	96–48
(Prodanovic, et al., 2017)	0.00785 m <sup>2</sup>	3	382	95.5	0.25–2.5
(Ramprasad, et al., 2017)	1.84 m <sup>3</sup> , 15 cm depth	62, 70, 82, 100, 120	7.75–15	1.62–4.8	16.8–31.2
(Chowdhury and Abaya, 2018)	2.64 m <sup>2</sup> (4 modules, 0.66 m <sup>2</sup> each)	6.0–7.0	–	10.2	≪24
(Prodanovic, et al., 2018)	0.00785 m <sup>2</sup>	3	382	48.1–122.2	–

Los parámetros que caracterizan el diseño de estos tipos de sistemas son: la superficie perpendicular a la entrada de agua, el caudal, las cargas hidráulica y orgánica, y el tiempo de retención. Por otra parte, algunas de las referencias solo incluyen diseños a escala de laboratorio, y no pilotos.

Entre las publicaciones detectadas, las más semejantes al diseño que se pretende llevar a cabo en este proyecto y a las necesidades detectadas han sido las de Masi (Masi et al., 2016) y Svete (Svete, 2012).

El estudio de Svete (Svete, 2012) consistió en un sistema de jardín vertical de depuración formado por 3 módulos de sustrato separados de manera vertical. El agua gris de alimentación del sistema era agua de dormitorios y duchas, con lo que los valores de MO o nutrientes son más elevados que en el agua gris de este proyecto. Por otro lado, el estudio de Masi (Masi et al., 2016) hace referencia a un sistema de depuración compuesto por macetas en filas y columnas y el agua gris de alimentación del sistema era agua de lavado de manos, como en el caso de este proyecto.

En la tabla 3 se muestran las principales características de diseño de ambos proyectos, que se utilizaron como referencias para el diseño del piloto en el Institut Les Salines:

Tabla 3. Características de diseño de (Svete, 2012) y (Masi et al., 2016)

Ítem de diseño	(Svete, 2012)	(Masi et al., 2016)
Tipo de sistema	Columna de sustrato contenido con fibra geotextil	Macetas en filas y columnas
Caudal (L/día)	360	240
Frecuencia de alimentación (día <sup>-1</sup> )	48	24
Carga hidráulica superficial (L/m <sup>2</sup> ·día)	670	1000
DQO entrada (mg/L)	240	40 - 90
Carga orgánica superficial (g DQO/m <sup>2</sup> ·día)	46,5	60,0
Área del sistema (m <sup>2</sup> )	1,86	0,72
Tiempo de retención del sistema (h)	2,5 - 3,0	0,2 - 0,7
Sustratos utilizados	Agregados ligeros de arcilla	Agregados ligeros de arcilla y mezclas iguales de este con arena o fibra de coco
% eliminación DQO	90 %	20 - 50 %

A partir del estudio detallado de ambos sistemas se obtienen diferentes piezas de información que sirven para conformar una primera idea de diseño del piloto:

- La construcción del piloto en forma de macetas es más sencilla y permite una mayor modularidad del sistema: permite instalar o retirar macetas, así como probar diferentes condiciones de trabajo (plantas, sustratos, etc) en paralelo. Así pues, estructuralmente, el piloto se parecerá más al caso de Masi.
- Sin embargo el sistema con macetas implica tiempos de retención pequeños, de menos de una hora, lo cual preocupa respecto a la capacidad de eliminación de DQO. No obstante, menor tiempo de retención implica mayor aireación y por lo tanto nitrificación y oxidación de la MO. Además, se espera un agua gris con valores reducidos de DQO.
- En cuanto a la carga hidráulica, se observa que hay una gran capacidad de alimentación en sistemas en los que las especies vegetales sean resistentes a condiciones de inundación. Se toma nota de los valores de caudal y frecuencia de alimentación para el posterior diseño del piloto.
- Por lo que respecta a la carga orgánica superficial de DQO, se aprecia que son valores similares a los valores de carga orgánica superficial de DBO<sub>5</sub> detectados en las guías técnicas para el diseño de HFSV: teniendo en cuenta que, de manera aproximada, los valores de concentración de DQO son aproximadamente el doble de los valores de DBO<sub>5</sub>. De este modo, se pueden asimilar valores de carga orgánica superficial de DQO de 46,5 y 60 g DQO/m<sup>2</sup>·día a valores de diseño de HFSV de 20-40 g DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·día (presentados en el apartado 1.2.1. Humedales de flujo subsuperficial verticales).

Anticipando que la DQO del agua de lavado de manos presentará valores reducidos, se plantea disponer de un efluente concentrado que permita diseñar el piloto con valores de DQO de entrada de 200 mg/L. Este aspecto de diseño se asemeja más al caso de Svete, y se buscará

poner a prueba el sistema con condiciones más duras que en el caso de Masi, pese a que la configuración final será más similar a este último.

## 5. Diseño

### 5.1. Agua gris sintética

Tras la visita en el Institut Les Salines, se llevaron muestras de agua gris de lavado de manos a laboratorio para una primera caracterización. Bajo la sospecha de que el agua gris del instituto presentaría valores reducidos, se realizó una búsqueda bibliográfica acerca de aguas grises de naturaleza similar para poder realizar una comparación una vez se obtuvieran los resultados.

En la tabla 4 se muestra dicha comparativa, donde se observan las muestras del instituto: baño de mujeres (muestras del 18/01/2021 y 25/01/2021), baño de hombres (muestra del 18/01/2021) y el promedio de ambas, junto con casos de la bibliografía:

**Tabla 4. Caracterización de muestras de agua gris de lavado de manos del Institut Les Salines y otras aguas grises similares detectadas en bibliografía**

Origen muestra	Tipo muestra	pH	Cond. 20 °C (µS/cm)	DQO	ST	SV	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
				(mg/L)					
Institut Les Salines	Manos hombres 18/01/21	7,8	770,0	69,3	1,5	1,3	0,01	5,0	62,0
	Manos mujeres 18/01/21	7,4	852,0	161,7	14,4	9,6	0,02	4,6	63,0
	Manos mujeres 25/01/21	7,6	826,0	127,7	7,2	7,0	0,03	5,0	69,0
Promedio baños Institut Les Salines		7,6	816,0	119,6	7,7	6,0	0,02	4,9	64,7
Origen muestra	Tipo muestra	pH	Cond. 20 °C (µS/cm)	DQO	ST	SV	NH <sub>3</sub>	N <sub>total</sub>	P <sub>total</sub>
				(mg/L)					
(Santos, 2012)	Manos vestuario	7,3	-	166	83	71	<1	-	0,6
	Manos restaurante	7,2	-	209	55	51	<1	-	0,8
	Duchas	6,9	-	197	58	43	8,6	-	1,3
(Santas masas, 2013)	Duchas y manos	7,7	1267	302	57,5	-	-	23,0	3,0
Promedio referencias		7,3	7,3	1267,0	218,5	63,4	55,0	3,5	23,0

De la comparación entre las aguas grises se extrae que son habituales valores más altos de DQO, ST y SV y que por lo general, el agua gris de lavado de manos del Institut Les Salines, es un agua gris poco contaminada. Los valores de agua gris de lavado de manos de DQO son 100 mg/L mayores a los del instituto y tanto ST como SV suelen presentar valores de 50 mg/L más que en el instituto, aproximadamente.

Por lo que respecta al resto de parámetros, la conductividad es algo superior en aguas grises de las referencias, el pH es similar y los valores de nitrógeno amoniacal del instituto son muy reducidos. Los valores de  $\text{N-NO}_3^-$  son de 5 mg/L, también reducidos y los de  $\text{SO}_4^{2-}$  superan los 60 mg/L. Se muestran valores de concentración de  $\text{P-PO}_4^{3-}$  habituales en aguas grises similares, también muy reducidos, y se detecta en la bibliografía valores de aguas grises de lavandería de  $\text{SO}_4^{2-}$  que alcanzan como máximo valores de 120 mg/L (Abed & Scholz, 2016).

Tras confirmar que los valores de DQO del instituto son reducidos, se llevará a cabo una dosificación de un efluente concentrado junto con el agua gris de lavado de manos del instituto para alcanzar una DQO de entrada de 200 mg/L. El concentrado escogido es fango primario de la EDAR (Estación Depuradora de Agua Residual) de El Prat de Llobregat. El 23/04/2021 se tomó una primera muestra de este lodo y se llevó a cabo su caracterización, lo cual se muestra en la tabla 5:

Tabla 5. Caracterización del fango primario de la EDAR del Prat de Llobregat

Fecha	Tipo de agua	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)
23/04/2021	Fango primario EDAR Prat de Llobregat	52633,3	35915,6	178,5

Esta agua contiene valores muy altos de DQO, lo cual permite que, con una pequeña dosificación en un depósito colector de las aguas de lavado de manos, se pueda preparar una concentración más elevada para la alimentación del piloto.

## 5.2. Modularidad: sustrato y vegetación

El sistema de macetas a construir se plantea compuesto por 3 filas de 4 macetas cada una (un total de 12 macetas), después de haber tomado medidas en la visita de reconocimiento en el instituto. De esta manera, la altura real del sistema es la suma o conjunto de la profundidad de 3 macetas, pudiendo proporcionar una profundidad total y un tiempo de retención del agua adecuados para el tratamiento.

Además, se plantea dividir el piloto en dos módulos de 2 columnas y 3 filas por lo que respecta al sustrato empleado, de manera que se pueda probar el piloto obteniendo 2 salidas distintas. Se plantea que el primer módulo contenga perlita, sustrato de gran porosidad, sobre grava a partes iguales (sustrato mineral), de modo que el sustrato no aportará nutrientes, que ya provendrán de la alimentación de agua gris. Por lo que respecta al segundo módulo, será de sustrato orgánico comercial (sustrato orgánico). Ello conlleva diferentes porosidades y por lo tanto, diferentes tiempos de retención y eliminaciones de componentes del agua. La porosidad de los sustratos se determinó en el laboratorio, de modo que:

- Sustrato mineral: porosidad promedia de 0,57 (perlita: 0,69 y grava: 0,44)
- Sustrato orgánico: porosidad promedia de 0,65

En cuanto a las especies vegetales fueron escogidas a raíz de ensayos llevados a cabo por los estudiantes del instituto. Se escogen especies macrófitas, resistentes a condiciones de riego frecuente. Las especies escogidas han sido *Canna indica* (caña de las Indias), *Mentha aquatica* (menta de agua), *Carex* (cárice), *Isolepis* (junco), *Lythrum salicaria* (arroyuela) y *Hemerocallis* (lirio de día).

Finalmente, considerando la organización del proyecto y teniendo presente que el período de funcionamiento del piloto se planifica de finales de marzo a principios de junio, las horas de sol al día que se tienen a lo largo de este aumentan de 12 a 14 horas de sol (Voshod-Solnca, 2021), aproximadamente. Se planea una alimentación frecuente y un caudal diario elevado que se detallará más adelante, y no preocupa que las especies no dispongan de suficiente agua.

### 5.3. Diseño teórico

Se realiza a continuación el diseño teórico del sistema piloto a construir posteriormente. Este se realiza a partir de los conocimientos de diseño disponibles para la configuración de humedales artificiales.

#### 5.3.1. Condiciones iniciales

Se muestran en la tabla 6 las condiciones iniciales para el diseño del piloto, incluyendo las 2 porosidades distintas para cada uno de los 2 módulos del piloto:

Tabla 6. Condiciones iniciales marco para la construcción del diseño teórico del piloto

DQO entrada (mg/L)	Volumen depósito regulador y de mezcla (m <sup>3</sup> )	Carga hidráulica superficial máxima (L/m <sup>2</sup> ·día)	Carga orgánica superficial máxima (g/m <sup>2</sup> ·día)	Porosidad sustrato mineral	Porosidad sustrato orgánico
200	1000	1000	60	0,57	0,65

Previo al sistema de macetas del propio jardín vertical, se dispondrá de un depósito de capacidad de 1000 L, en el que se recogerán las descargas de agua de lavado de manos y se añadirá el lodo de EDAR (caracterizado en la tabla 5). Tal y como se ha decidido anteriormente, se busca alimentar el jardín vertical con una DQO de entrada de 200 mg/L, y es en el depósito donde se preparará la mezcla. Este aspecto del diseño se asemeja más al estudio de Svete, mientras que los valores de referencia máximos de carga hidráulica superficial y carga orgánica superficial se toman del estudio de Masi.

Se calcula la aportación necesaria de lodo en el tanque para alcanzar el valor de DQO de entrada de 200 mg/L de la manera que muestra (1):

$$V_{lodo} = \frac{DQO_{entrada} \cdot V_{tanque} - DQO_{agua\ gris} \cdot V_{agua\ gris}}{DQO_{lodo}} \quad (1)$$

Se utilizarán unas macetas comerciales con geometría de prisma trapezoidal, que se aproximan a nivel de dimensiones a un prisma rectangular. Estas tienen orificios en la base que permiten el goteo del agua de una fila de macetas a la siguiente, de modo que el goteo tiene lugar en cada columna de macetas. Las características geométricas de las macetas se muestran en la tabla 7, siendo L, a y h, largo, ancho y altura:

Tabla 7. Características geométricas del modelo de maceta escogido

n	Filas	Columnas	L (cm)	a (cm)	h (cm)	A (m <sup>2</sup> )	V (m <sup>3</sup> )
12	3	4	0,49	0,19	0,16	0,093	0,015

Mientras que la altura de la maceta participará en el cálculo de los tiempos de retención del agua a través del sistema, la superficie perpendicular a la alimentación (A) participará en la determinación de las cargas hidráulica y orgánica efectivas. A partir de estos datos, empieza el diseño teórico.

### 5.3.2. Caudal efectivo, frecuencia de alimentación y autonomía

Lo primero que se calcula es la carga orgánica máxima de DQO (g/día) que podrá recibir el piloto. El valor máximo de carga orgánica se recibirá en la primera fila de macetas, por lo que el cálculo de la carga orgánica máxima se realiza según (2):

$$Carga\ org.\ máx. \left( \frac{g}{día} \right) = \frac{Carga\ org.\ sup.\ máx.}{Superficie\ 1a\ fila} = \frac{60 \frac{g}{m^2 \cdot día}}{4 \cdot 0,093\ m^2} = 22,3 \frac{g}{día} \quad (2)$$

Conociendo este valor y fijando una DQO de entrada del sistema de 200 mg/L, se puede calcular el caudal máximo con el que puede funcionar el piloto, tal y como se muestra en (3):

$$Caudal\ máx. \left( \frac{L}{día} \right) = \frac{Carga\ org.\ máx.}{DQO_{entrada}} = \frac{22,3 \frac{g}{día}}{0,2 \frac{g}{L}} = 111,7 \frac{L}{día} \quad (3)$$

Por lo tanto, este caudal máximo viene determinado por la capacidad del sistema de asumir 200 mg/L de DQO. Disponiendo de un depósito regulador de 1000 L, permite una autonomía del sistema de 9 días a caudal máximo sin ser rellenado.

En el interior del tanque se situará una bomba que elevará el agua hasta la altura de alimentación. Más tarde, con pruebas en el piloto y con el material disponible, se instalan dos ramales de riego con goteros, y se obtiene un ritmo de alimentación de 6 L/min. Con un programador, se decide regar durante 1 minuto cada 2 horas durante el funcionamiento del piloto, de modo que son 12 riegos al día de 6 L. Así pues, se adopta un caudal efectivo de 72 L/día, lo que conlleva una mayor autonomía del sistema también.

### 5.3.3. Cargas efectivas y tiempos de retención

A partir de las condiciones de funcionamiento adoptadas, se calculan la carga hidráulica superficial efectiva y la carga orgánica superficial efectiva, tal y como muestran (4) y (5). En



ambos casos, va referenciado a la superficie de la primera fila de macetas, donde se reciben las mayores cargas:

$$Carga\ hidr.\ sup. \left( \frac{L}{m^2 \cdot día} \right) = \frac{Caudal\ efectivo}{Superficie\ 1a\ fila} = \frac{72\ L/día}{4 \cdot 0,093\ m^2} = 193,3 \frac{L}{m^2 \cdot día} \quad (4)$$

$$Carga\ org.\ sup. \left( \frac{g}{m^2 \cdot día} \right) = \frac{DQO_{entrada}}{Carga\ hidr.\ sup.} = \frac{0,2 \frac{g}{L}}{193,3 \frac{L}{m^2 \cdot día}} = 38,7 \frac{g}{m^2 \cdot día} \quad (5)$$

Se observa que no se superan los valores máximos de carga hidráulica superficial máxima de 1000 L/m<sup>2</sup>·día y carga orgánica superficial máxima de 60 g/m<sup>2</sup>·día de DQO, del estudio de Masi.

El siguiente cálculo a realizar es el tiempo de retención del sistema, para los dos módulos con diferentes porosidades. El tiempo de retención para cada maceta se calcula según (6):

$$T.\ retención\ (h) = \frac{V_{maceta} \cdot porosidad}{Caudal \cdot columnas} = \frac{0,015\ m^3 \cdot n}{0,072 \frac{m^3}{día} \cdot 4} \cdot \frac{1\ día}{24\ h} \quad (6)$$

Introduciendo en (6) el valor de porosidad (n) para cada módulo, se obtienen los tiempos de retención por maceta que se muestran en la tabla 8. Teniendo en cuenta que en cada columna hay 3 macetas, se pueden calcular los tiempos de retención para los dos módulos:

Tabla 8. Tiempos de retención para cada maceta y módulo

	Sustrato mineral (perlita + grava)	Sustrato orgánico
Porosidad media	0,57	0,65
Tiempo de retención por maceta (h)	0,71	0,81
Tiempo de retención por módulo (h)	2,12	2,42

Ya que la alimentación sucede cada 2 horas, es interesante poder garantizar condiciones aerobias durante el funcionamiento del sistema para favorecer la oxidación de la MO y potenciar el comportamiento de HFSV. Desde el punto de vista teórico, obteniendo tiempos de retención en la primera fila de macetas menores a una hora, se garantiza una aireación del sustrato para la siguiente alimentación, de modo que el diseño se considera óptimo.

En cuanto al tiempo total de retención por módulo, se superan las 2 horas en ambos casos. En comparación, en el estudio de Svete se alcanzaban valores de tiempo de retención del sistema de hasta 3 horas.

### 5.3.4. Eliminación teórica de DQO

Con el sistema diseñado, queda por conocer la eliminación teórica de DQO para cada uno de los dos módulos. Ello se realiza a partir de (7):

$$DQO_{salida} = DQO_{entrada} \cdot e^{K \cdot t \cdot m} \quad (7)$$

Dónde:

- $DQO_{entrada}$ : 200 mg/L
- m: número de filas de macetas, en este caso 3
- t: tiempo de retención (h). Se debe calcular la eliminación de DQO para cada módulo
- K: constante cinética de primer orden, dependiente de la temperatura ( $h^{-1}$ ). Se usa el valor de  $0,046 h^{-1}$  como constante cinética a  $20\text{ }^{\circ}C$  para DQO (Gullón, 2018). Se debe adaptar mediante la ecuación (8), que deriva de la ecuación de Arrhenius, donde  $\Theta = 1,06$  (Gullón, 2018). La temperatura adoptada para la eliminación de la DQO es el peor escenario posible, es decir, con la temperatura más baja del agua que se pueda registrar en el emplazamiento a lo largo del ciclo anual. Se decide un valor de  $5\text{ }^{\circ}C$ :

$$K_{5\text{ }^{\circ}C} = K_{20\text{ }^{\circ}C} \cdot \Theta^{5-20} = 0,046 h^{-1} \cdot 1,06^{-15} = 0,019 h^{-1} \quad (8)$$

En la tabla 9, se muestran los resultados de eliminación teórica de DQO para cada uno de los módulos, y considerando condiciones de trabajo a  $5\text{ }^{\circ}C$  y  $20\text{ }^{\circ}C$  (temperatura más representativa del período de prueba del piloto). Se calcula a partir de (7):

**Tabla 9. Valores teóricos de DQO de salida para cada módulo, considerando la temperatura del agua más baja del ciclo anual y una temperatura más representativa del periodo de funcionamiento del piloto. Se considera una DQO de entrada de 200 mg/L**

	Salida del módulo mineral		Salida del módulo orgánico	
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	5	20	5	20
DQO salida (mg/L)	192,0	181,5	191,0	179,0

Se observa como en todos los casos, la eliminación de DQO es muy reducida respecto a los 200 mg/L de la entrada. Se espera que en el funcionamiento real la eliminación sea mayor debido a que intervienen otros procesos de eliminación de DQO. Estos son, principalmente, la oxidación de la MO debido a las condiciones aerobias de HFSV, pero también la actividad microbiana y vegetal. Además, se obtienen mayores ratios de eliminación en las referencias detectadas en el apartado 4. Estado del arte. Estado del arte, de modo que se esperan ratios de eliminación más parecidos a estos.

Se aprecia también que a mayor temperatura y mayor tiempo de retención se obtiene mayor eliminación de DQO en la salida, respuesta lógica según la formulación de (7). Finalmente, con el diseño teórico finalizado y aplicados todos los cálculos de diseño, se concibe un diseño

efectivo del sistema, que servirá como referencia para la obtención de materiales, equipos y la construcción del sistema piloto.

#### 5.4. Diseño real

En la figura 10 se muestra el diseño efectivo del sistema piloto a implementar en el instituto:

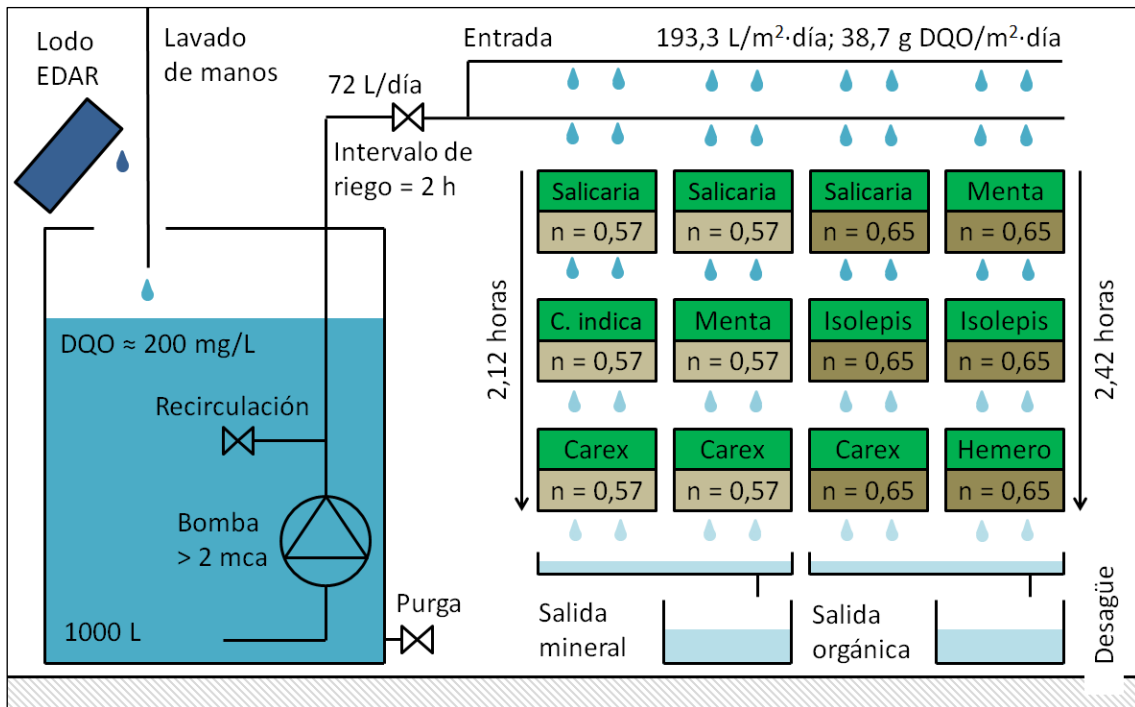


Figura 10. Diseño efectivo final para la construcción del piloto en el Institut Les Salines

De manera avanzada, se muestra en la figura 11 el resultado final tras la construcción del piloto, dónde se pueden apreciar los dos sustratos diferentes y los dos ramales de riego:



Figura 11. Diseño efectivo final para la construcción del piloto en el Institut Les Salines

Destacan diversos elementos en el diseño final:

- Depósito: con una capacidad de 1000 litros, este recibe el agua de lavado de manos por la parte superior. Concretamente, los baños escogidos para el funcionamiento del piloto han sido los baños de hombres de la planta 1 y los baños de mujeres de la planta 2 del ala sur del instituto. Manualmente, se añadirá la cantidad necesaria de lodo primario de EDAR para alcanzar una DQO en el depósito de 200 mg/L (según diseño teórico), que será el agua de alimentación del sistema de macetas.
- En el interior del tanque se situará una bomba con la suficiente potencia (a partir de 2 metros de columna de agua) para aportar el agua al sistema. Esta debe ser adecuada para funcionamiento con aguas residuales, con sólidos y turbidez. También debe disponer de una boya para detenerse automáticamente si el tanque queda vacío. Su conexión eléctrica incorporará un temporizador para efectuar alimentaciones cada 2 horas, aportando un total de 72 L/día al sistema de macetas.
- El circuito hidráulico desde la bomba hasta la alimentación por encima del sistema de macetas incorpora una recirculación en forma de T en el interior del tanque para homogeneizar el fango de EDAR en el volumen de agua de lavado de manos. Seguidamente tiene una válvula que da paso a dos ramales de riego con goteros incorporados, que riegan la primera fila de macetas. Se asume un riego repartido y homogéneo en la superficie de cada maceta, habiendo de promedio, 2 goteros riegando para cada ramal en cada maceta.

- La distribución de las plantas queda reflejada en la figura 10. El módulo de perlita y grava a la izquierda del sistema y el módulo 2 de sustrato orgánico, a la derecha. Las macetas del primer piso riegan a las del segundo piso, y estas a las del tercero. Puesto que las porosidades son diferentes, también lo son los tiempos de retención de ambos módulos.
- El agua de salida de los dos módulos se recoge en canalones de recogida y se redirige a unas bandejas de recogida de muestra, para cada módulo. En caso de no tomar muestra, ambos canalones se pueden conectar con manguera para evacuar la salida del sistema al desagüe de reja contiguo. Del mismo modo, el depósito se puede purgar mediante su válvula de vaciado acoplando una manguera y enviando el contenido al desagüe.

## 6. Plan experimental

### 6.1. Construcción y presupuesto del piloto

La construcción del piloto tuvo lugar en el periodo 10/03/2021 – 23/04/2021, incluyendo no solamente la construcción y montaje del diseño, sino también la corrección de algunos aspectos y algunos cambios de última hora. Todo ello supuso una demora en la planificación temporal fijada para tener el sistema piloto listo, y el plan analítico no se pudo ejecutar hasta el día 30/04/2021.

En la tabla 10 se muestra el listado de material utilizado para la construcción del piloto. También se incluye una aproximación de presupuesto, a pesar de que gran parte de los materiales usados en la construcción del piloto pertenecían ya al conjunto de material disponible en el instituto. No se incluyen las plantas (pertenecientes al instituto) y solamente se incluyen costes de construcción:

Tabla 10. Inventario y presupuesto de materiales de construcción del sistema piloto:

Materiales	Coste (€)	Cantidad	Coste total (€)
Macetas con ganchos	10 €	12 u	120 €
Perlita (10 L)	10 €	1 u	10 €
Grava (10 L)	15 €	1 u	15 €
Sustrato orgánico (10 L)	10 €	1 u	10 €
Tanque (1000 L)	300 €	1 u	300 €
Bomba para aguas residuales (6 mca)	30 €	1 u	30 €
Temporizador para enchufe	15 €	1 u	15 €
Manguera 20 metros	20 €	1 u	400 €
Válvula jardinería	10 €	2 u	20 €
Ramal con goteros	5 €	10 m	50 €
Canalón de recogida PVC	5 €	3 m	15 €
Desagüe canalón	5 €	2 u	10 €
Maderas (soporte piloto)	5 €	10 m	50 €
Otros materiales hidráulicos	-	-	50 €
Otros materiales de construcción	-	-	50 €
Presupuesto total (incluyendo margen de 10%)			841,5 €



En primer lugar, se anclaron unos tabloncillos en el muro del lugar del piloto para poder colgar las macetas, provistas de ganchos, y acoplar también tanto los ramales de riego como las canaletas de recogida. Las macetas se llenaron con los sustratos y especies vegetales definidas anteriormente. Se situó el depósito con la bomba en su interior, conectada con temporizador en el punto eléctrico del armario contiguo. En la figura 12 se muestra el depósito junto con el sistema de macetas, siguiendo el diseño de la figura 10:



Figura 12. Sistema piloto implementado en el Institut Les Salines para el tratamiento de agua gris

Se aprecia en la imagen la cañería de aportación del agua de lavado de manos al depósito de mezcla. También se aprecian las diferentes especies macrófitas y los dos módulos de sustrato. Esto último se aprecia con mayor claridad en la figura 13:



Figura 13. Sistema de macetas del piloto implementado en el Institut Les Salines para el tratamiento de agua gris

En esta fotografía se visualizan mejor los dos módulos de sustrato diferente. Otros aspectos como la válvula de entrada para los ramales de riego y la ubicación del desagüe en la ubicación del piloto también se pueden apreciar mejor en esta figura.

En cuanto al aspecto del agua del depósito, se muestra en la figura 14 el volumen de agua contenido antes y después de la aportación de lodo primario de la EDAR de El Prat de Llobregat:

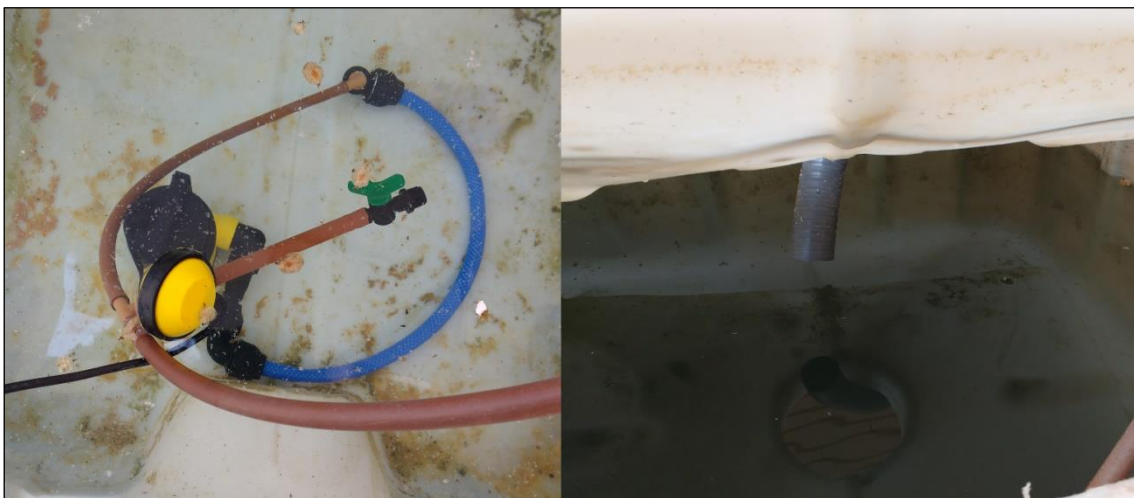


Figura 14. Interior del depósito de mezcla y captación antes y después de la aportación de lodo primario de EDAR



Con la aportación del lodo, el volumen de agua resultaba oscuro y opaco, a pesar de tratarse de una dosis pequeña para alcanzar el valor objetivo de DQO de 200 mg/L en el tanque. Por ello, y para evitar la decantación de los sólidos, es necesaria la recirculación del tanque, realizada mediante la configuración que se puede apreciar en el lado izquierdo de la figura 14 o en el circuito hidráulico del interior del tanque de la figura 10. Mediante una válvula se regulaba la capacidad de recirculación y también se disponía de una boya de apagado automático de la bomba.

## 6.2. Análisis

El objetivo de las analíticas realizadas fue caracterizar la entrada y salidas de los 2 módulos respecto MES, MO, nutrientes y parámetros físicos. Es por ello que se analizaron los siguientes parámetros:

- DQO total, pH, conductividad: a partir de la muestra cruda. El pH fue determinado con pH-metro Crison 506 y la conductividad con conductímetro. La obtención de valores de DQO se llevó según el método definido en métodos estandarizados (APH/AWWA/WEF, 2001) y las analíticas se hicieron por triplicado. En la figura 15 se muestra el aspecto de las muestras de la entrada (E), salida mineral (P) y salida orgánica (O), en plena operación del piloto:



Figura 15. Muestras de entrada y salida del día 17/05/2021

- ST y SV: se miden a partir del filtrado de la muestra con kitasato y bomba de vacío sobre un papel de filtro de 45  $\mu\text{m}$  que después del filtrado se secaban en estufa a 120  $^{\circ}\text{C}$  durante un mínimo de 24 horas. Después se pasaban 20 minutos por mufla a 550  $^{\circ}\text{C}$  para eliminar los sólidos volátiles. Los ST y SV se calculan a partir de la diferencia de peso antes y después de los secados como se define en métodos estandarizados (APH/AWWA/WEF, 2001). En la figura 16 se muestran papeles de filtro antes y después de pasar por la mufla, relativos a un día de muestreo en plena operación del piloto. De nuevo la identificación de las muestras es: entrada (E), salida mineral (P) y salida orgánica (O):

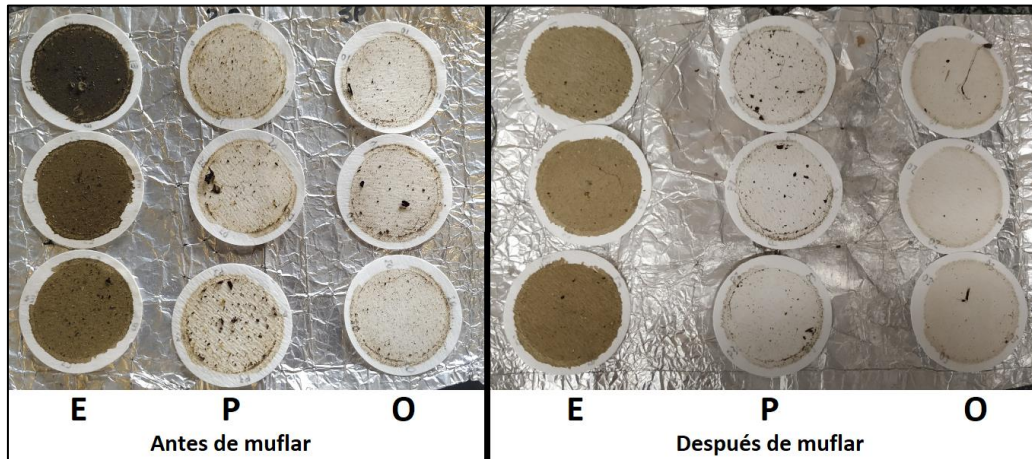


Figura 16. Papeles de filtrado de sólidos de muestras de entrada y salida del día 17/05/2021

- $\text{N-NH}_4^+$ : se mide partir del volumen de muestra filtrado con kitasato y bomba de vacío, se realizaron las analíticas de nitrógeno amoniacal según el método Solorzano (Solorzano, 1969). En la figura 17 se aprecia la coloración azulada final de muestras en plena operación del piloto, antes de la determinación de la absorbancia (el color más oscuro corresponde a más concentración de amonio en la muestra). De nuevo la identificación de las muestras es: entrada (E), salida mineral (P) y salida orgánica (O):



Figura 17. Coloración azulada de muestras de entrada y salida del día 19/05/2021 para la determinación de nitrógeno amoniacal

- Aniones: Se miden a partir del volumen de muestra filtrado con el kitasato y la bomba de vacío, se realizaron las analíticas de aniones mediante espectrofotometría. Concretamente se obtuvieron resultados de nitrógeno de nitrito ( $\text{N-NO}_2^-$ ), nitrógeno de nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ), fósforo de ortofosfato ( $\text{P-PO}_3^{4-}$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).
- Coliformes totales y turbidez: Una vez se estabilizó el funcionamiento del piloto, se decidió analizar coliformes totales y turbidez en las salidas de los módulos, con el propósito de poder llevar a cabo una comparación los límites fijados en reutilización de agua en la normativa vigente. Es por ello que para las salidas de los últimos 3

muestreos se obtuvieron valores de turbidez, mediante un turbidímetro HI93703 Hanna Instruments y para 2 de los últimos muestreos valores de coliformes totales, mediante cultivo en placa de Petri; ambos parámetros determinados a partir de muestra directa.

Para llevar a cabo el total de analíticas a lo largo de la semana laboral, incluyendo el periodo en el que además se realizaban analíticas de turbidez y coliformes totales, se siguió a lo largo del plan experimental, una organización similar a la mostrada en la tabla 11:

Tabla 11. Organización semanal representativa de tareas analíticas realizadas durante el plan experimental.

	Lunes	Martes	Jueves	Viernes
13h a 15h	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lectura SV y ST</li> </ul>	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lectura SV y ST</li> </ul>
15h	<p><b>Recepción muestra</b></p>	-	<p><b>Recepción muestra</b></p>	-
15h a 19h	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH</li> <li>• Conductividad</li> <li>• Turbidez</li> <li>• DQO</li> <li>• SV y ST</li> <li>• N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></li> <li>• Aniones: N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></li> <li>• <i>E. coli</i> y coliformes totales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lectura <i>E. coli</i> y coliformes totales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>E. coli</i> y coliformes totales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH</li> <li>• Conductividad</li> <li>• Turbidez</li> <li>• DQO</li> <li>• SV y ST</li> <li>• N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></li> <li>• Aniones: N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></li> <li>• Lectura <i>E. coli</i> y coliformes totales</li> </ul>

Cada semana se recibían 2 veces las 3 muestras (los lunes y los jueves) y las analíticas relativas a cada una de ellas se ven indicadas con los dos tonos diferentes de color de la tabla 11 (verde claro las de los lunes y verde oscuro la de los jueves). Explicadas las analíticas realizadas y la organización semanal de tareas en el laboratorio, se pasa a explicar los resultados obtenidos.

## 7. Resultados

El muestreo tuvo lugar en el período 30/04/2021 – 31/05/2021, con un total de 9 días de muestreo. Los puntos de muestreo fueron el propio depósito como muestra de entrada del sistema y las bandejas de recogida del agua de los canalones, para cada uno de los dos módulos. De este modo, se busca estudiar la evolución de los parámetros a través de cada módulo del piloto.

En el Anexo II – Bitácora de muestreos se muestra un historial de la situación del piloto en cada uno de los 9 muestreos. A modo de resumen de la experiencia con el piloto, destaca que:

- A lo largo del plan experimental, se dopó el depósito con dos lodos primarios diferentes de la EDAR de El Prat de Llobregat, uno del 23/04/2021 y el otro del 14/05/2021. Aunque los fangos se mantuvieron en nevera, el cambio se realizó para no utilizar un fango demasiado digerido o mineralizado. Entre un fango y el otro, se hizo un vaciado del tanque mediante la válvula de purga y se llevó a cabo un lavado de los restos de lodo en el interior del tanque mediante manguera y diversos vaciados.
- Se detectaron diversas incidencias con los goteros incorporados en los ramales de riego, que fácilmente se obstruyen. Tras algunos recambios de ramales, aunque se apreciaba cierta obstrucción de estos, la alimentación se pudo llevar a cabo, y se realizaron comprobaciones para determinar si el caudal aportado era adecuado.
- Al margen de esto, apenas hubo más incidencias; quizás destaca el desconocimiento de una válvula que hacía falta cerrar de uno de los baños para impedir la aportación de agua al tanque de mezcla y evitar así la dilución de la aportación de fango. Por otra parte, la bomba se atascó en el penúltimo muestreo con sólidos del lodo, pero se pudieron retirar manualmente y volvió a funcionar.

Por lo que respecta al régimen de funcionamiento del piloto, los 3 primeros muestreos pertenecen a un periodo de puesta en marcha del piloto, ya que se añadieron pequeñas cantidades de fango para que el sistema y las especies vegetales se adaptaran a la carga final de DQO de 200 mg/L. Durante la puesta en marcha:

- Las muestras de entrada eran visualmente más limpias y analíticamente mostraban valores de DQO y ST reducidos. Ello sucedía a pesar de que el volumen de agua del depósito de mezcla lucía oscuro y opaco. Sin embargo, tras la toma de muestra, esta parecía razonablemente transparente.
- Las muestras de salida de los módulos eran visualmente más sucias y analíticamente mostraban valores de DQO y ST mayores a los de la entrada. Se apreció que con los primeros días de funcionamiento del piloto el agua que recorría el sistema de macetas llevó a cabo un lavado de los propios sustratos, destacando especialmente el lavado del sustrato orgánico.

En la figura 18 y la figura 19 se muestran las evoluciones de la DQO y ST a lo largo de la experimentación y se distingue entre los valores de puesta en marcha y de plena operación del piloto:

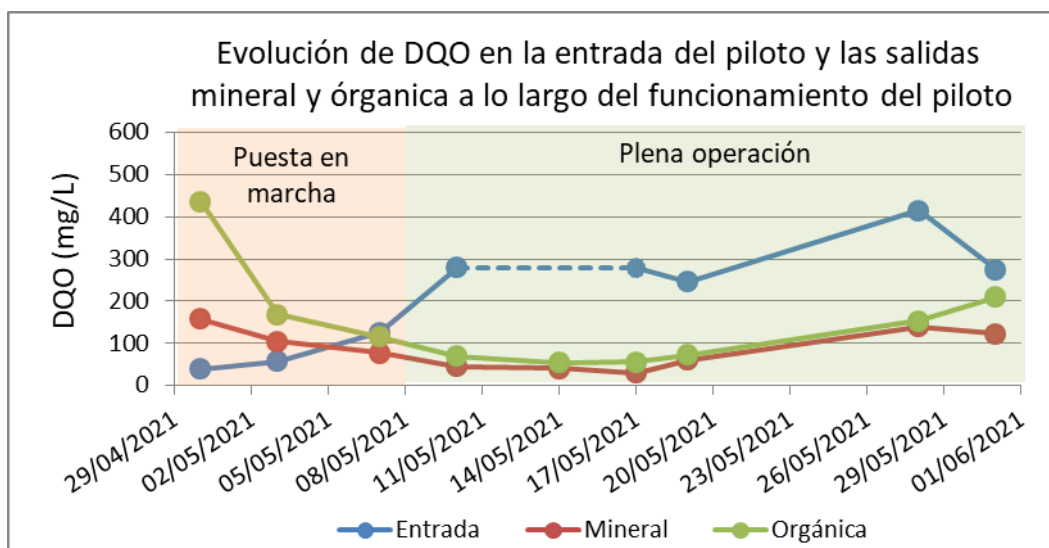


Figura 18. Evolución de DQO total en la entrada y las salidas a lo largo de la experimentación

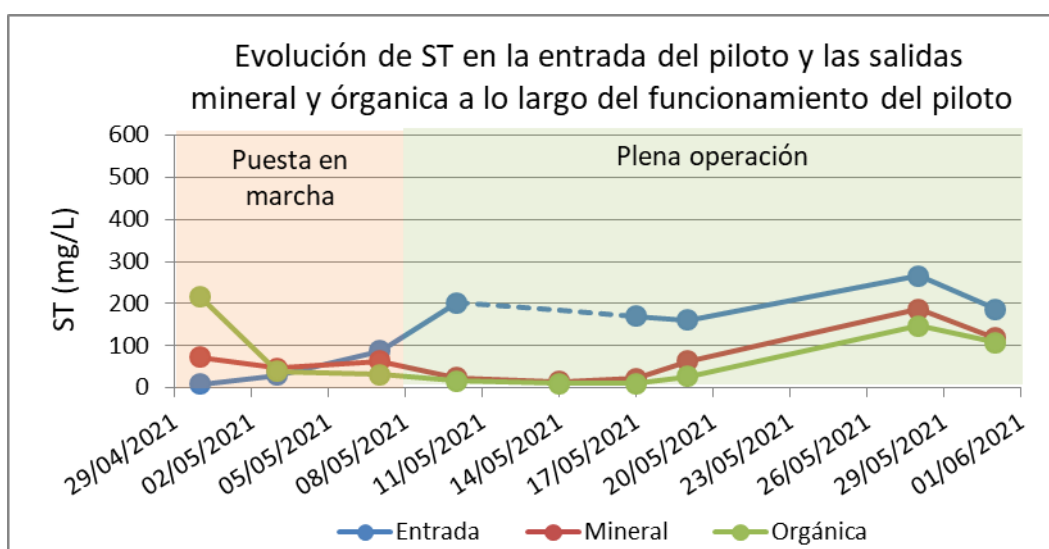


Figura 19. Evolución de ST en la entrada y las salidas a lo largo de la experimentación

Hasta que la aportación de fango no fue la suficiente para alcanzar valores de DQO de entrada óptimos, y hasta que los valores de entrada no fueron superiores a los de salida, se consideraron días de funcionamiento del piloto en modo de puesta en marcha. A su vez, tuvo lugar el lavado de los sustratos, y los valores de DQO de salida descendieron, dando lugar al período de mejor rendimiento. De manera análoga, se puede apreciar la misma evolución para los ST.

Cabe también destacar la situación dada alrededor del día de muestreo 14/05/2021, en el que el fango presente en el tanque tenía ya varios días, quedaba poca agua y tanto los valores de DQO como de ST fueron mucho más elevados que durante el resto del plan experimental (2698 mg/L y 2285 mg/L, respectivamente). Siendo esto así, los datos de entrada de este día no se incluyeron en el tratamiento de datos de plena operación del piloto. Fue por ello que, a partir del día 17/05/2021 se usó un nuevo fango y se realizó un lavado del tanque.

Así pues, para alcanzar conclusiones en este proyecto, de ahora en adelante solamente se tendrán en cuenta los muestreos en régimen de plena operación del piloto. A lo largo de este, se operó con valores de DQO de entrada de 250 – 400 mg/L, algo superiores a los 200 mg/L de diseño y se obtuvieron valores de salida de hasta 200 mg/L. Por otra parte, los valores de entrada de ST fueron de 150 – 300 mg/L mientras que los de las salidas alcanzaron valores máximos de 150 – 200 mg/L.

## 7.1. Tratamiento de resultados

Se consideran como datos de plena operación todos los resultados de entrada y salidas a partir del muestreo del 10/05/2021, con la excepción de los resultados de entrada del 14/05/2021.

### 7.1.1. Estadística de resultados

Se realiza un estudio estadístico básico de todos estos resultados y se calculan valores mínimos, máximos, promedios y desviación estándar de los parámetros analizados en el laboratorio. A continuación, en la tabla 12 se muestran los valores promedio para todos los parámetros en la entrada y las 2 salidas, mientras que el resto de estadística se puede consultar en el Anexo III – Estadística de resultados analíticos:

Tabla 12. Valores promedio de entrada y las 2 salidas para los parámetros analizados en laboratorio

Valores promedio	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	pH	Cond. (μS/cm)	Turbidez (NTU)
Entrada	298,6	197,0	17,0	7,4	532,2	97,3
Mineral	73,1	71,8	6,5	8,1	731,0	92,7
Orgánica	102,4	53,6	10,1	8,0	781,8	31,3
Valores promedio	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Col. totales (ufc/100mL)
Entrada	0,196	0,025	0,255	0,064	33,352	-
Mineral	0,044	0,013	0,480	0,244	43,640	1,8E+6
Orgánica	0,105	0,154	1,255	1,364	55,343	3,4E+6

A partir de estos resultados destaca que a lo largo de la experimentación en régimen de plena operación:

- DQO: En la entrada, tras operar con valores alrededor de 300 mg/L, se cumplió con la DQO objetivo de 200 mg/L definida en el diseño teórico y se operó en condiciones de mayor carga para el sistema. Los valores de salida indican cierta eliminación de DQO, con valores promedio de 70 mg/L y 100 mg/L para la salida mineral y la salida orgánica, respectivamente.
- ST y SV: Los valores se comportan de manera análoga a la DQO para la entrada y las salidas mineral y orgánica, con promedios de ST de 200 mg/L, 70 mg/L y 50 mg/L, respectivamente, y promedios de SV de 17 mg/L, 7 mg/L y 10 mg/L. Son valores del mismo orden que los encontrados en las referencias sobre agua gris (apartado 5.1. Agua gris sintética), incluso algo más reducidos. Se calculará el porcentaje de eliminación del parámetro posteriormente.



- pH y conductividad: Los valores promedio muestran un aumento en las salidas respecto a la entrada: en el caso del pH se pasa de 7,5 a 8,0, mientras que para la conductividad se pasa de valores de 530  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a valores promedio superiores a 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se estudiará más adelante la evolución de ambos parámetros, incluyendo el período de puesta en marcha.
- Turbidez y coliformes totales: Hay pocos resultados porque se decidieron estudiar cuando el piloto ya estaba en régimen de plena operación, con el propósito de estudiar la viabilidad de reutilización del agua de salida. Los valores promedio de turbidez son similares en entrada y salida mineral, alrededor de 95 NTU, mientras que el valor promedio para la salida orgánica es de 30 NTU. Por lo que respecta a coliformes totales, se alcanzan valores de orden de magnitud 6 en ambas salidas.
- Nitrógeno amoniacal y aniones: Se obtienen valores promedio muy reducidos, siguiendo los valores de referencia de composición de agua gris (apartado 7.1. Agua gris sintética). Para  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_2^-$ ,  $\text{N-NO}_3^-$  y  $\text{P-PO}_3^{4-}$  pocos resultados se sitúan por encima de 1 mg/L y no necesariamente los valores de entrada son mayores a los de salida. Puesto que se trata de valores reducidos y no detectados, no es de interés un estudio de eliminación de estos parámetros. Por lo que respecta al  $\text{SO}_4^{2-}$ , se obtienen valores promedio superiores a 30 mg/L en los 3 puntos. En la bibliografía se detectó el valor máximo de 120 mg/L en aguas grises de lavandería, que se espera que contengan una mayor contaminación, de modo que son valores coherentes. Se calculará la eliminación de los sulfatos más adelante.

Puesto que las analíticas de DQO, ST y SV se realizaban de manera triplicada, se muestra seguidamente en la figura 20, la figura 21 y la figura 22 la variabilidad de los triplicados en concepto de desviación estándar a lo largo de la experimentación para DQO, ST y SV, respectivamente:

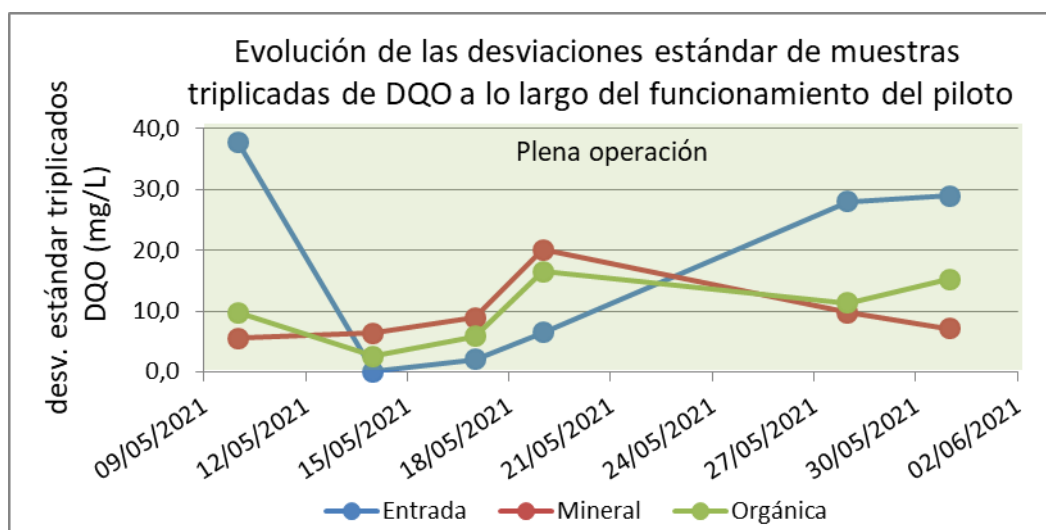


Figura 20. Evolución de las desviaciones estándar de muestras triplicadas de DQO a lo largo de la experimentación



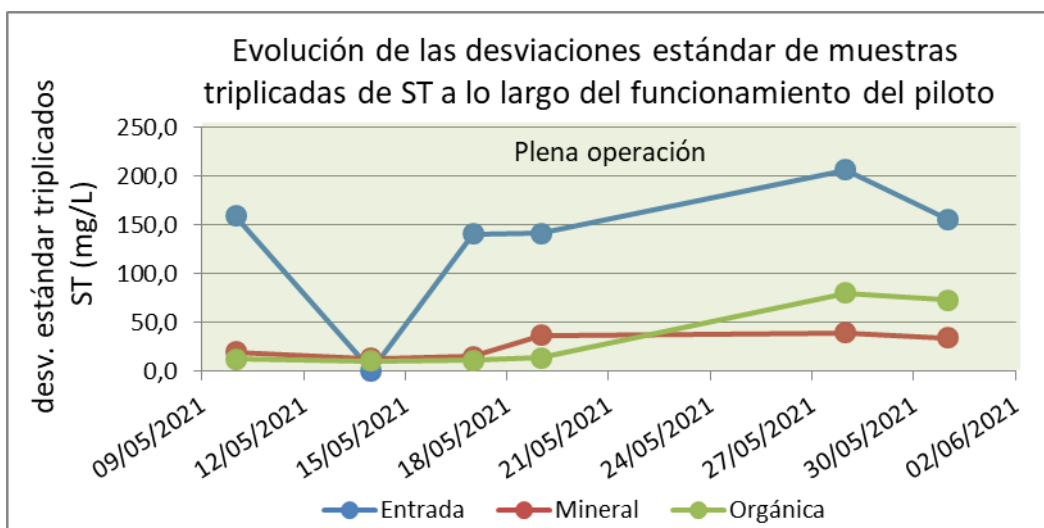


Figura 21. Evolución de las desviaciones estándar de muestras triplicadas de ST a lo largo de la experimentación

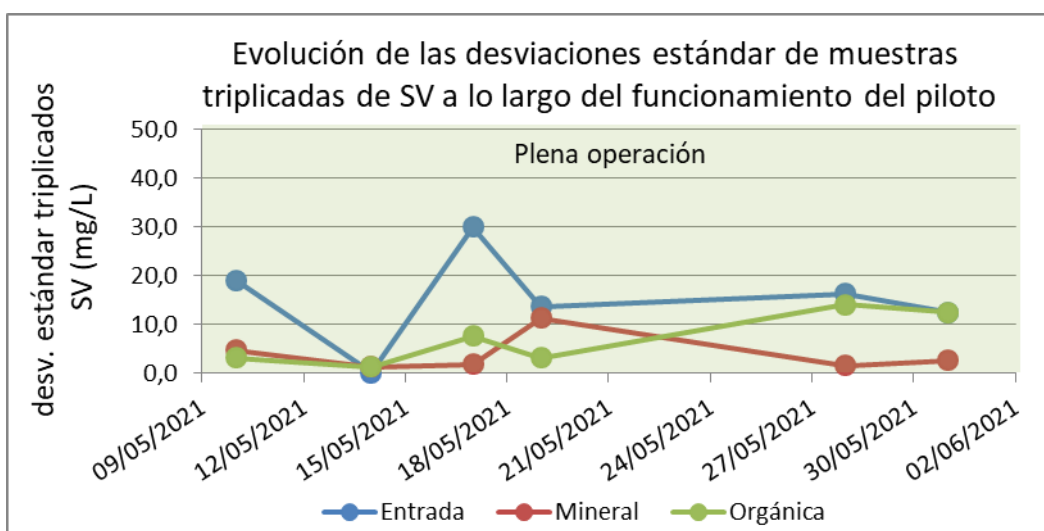


Figura 22. Evolución de las desviaciones estándar de muestras triplicadas de SV a lo largo de la experimentación

Destacan los valores de desviación estándar de las muestras de ST y SV de entrada, teniendo en cuenta que los valores promedio en la entrada han sido de 200 mg/L y 17 mg/L (como se aprecia en la tabla 12). Sin embargo, valores de variabilidad como estos pueden ser debidos a homogeneización irregular del agua gris con lodo primario. Por lo que respecta al resto de valores de desviación estándar, se sitúan por debajo de 20 mg/L para DQO en los 3 puntos, por debajo de 40 mg/L en ST en las salidas y por debajo de 10 mg/L de SV en las salidas.

Seguidamente se lleva a cabo el estudio de la eliminación de parámetros mencionado tras el análisis de las características estadísticas de los resultados analíticos.

### 7.1.2. Porcentajes de eliminación de parámetros

Se realiza un estudio de eliminación de los parámetros seleccionados en el apartado anterior (DQO, ST, SV y  $SO_4^{2-}$ ) y se extrae que únicamente DQO y ST revelan para todos los días de muestreo una cierta eliminación en las salidas respecto a la entrada, mientras que para SV y

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> los valores son iguales o incluso mayores en las salidas que en la entrada, para diversos de los muestreos. Ello se puede apreciar en el Anexo IV – Evolución SV y sulfatos.

Puesto que se han descartado los datos de entrada del día 14/05/2021, se calcula la eliminación de DQO y ST a partir de una n = 5. Así pues, en la tabla 13 se muestra la estadística obtenida del estudio de estos 5 muestreos respecto a los ratios de eliminación de DQO y ST, para cada salida respecto a la entrada:

**Tabla 13. Estadística del ratio de eliminación de DQO y ST para los dos módulos a lo largo de la experimentación en régimen de plena operación.**

n = 5	DQO		ST	
	%Elim. Mineral	%Elim. Orgánica	%Elim. Mineral	%Elim. Orgánica
Mínimo	55,3%	23,6%	29,6%	42,2%
Máximo	89,2%	80,1%	88,3%	93,6%
Promedio	74,0%	62,5%	60,3%	70,9%
Desviación	13,6%	22,7%	27,2%	25,6%

Se obtiene:

- Eliminación de DQO: se obtiene una eliminación promedia mayor en el módulo mineral (78%) que en el orgánico (62%). Además, el módulo mineral presenta mejores ratios de eliminación tanto en el mínimo como en el máximo y menos variabilidad que el módulo orgánico. Destaca un mínimo de eliminación en el módulo mineral del 55%.
- Eliminación de ST: se obtiene una eliminación promedia mayor en el módulo orgánico (71%) que en el mineral (60%). Además, el módulo mineral presenta mejores ratios de eliminación tanto en el mínimo como en el máximo y menos variabilidad que el módulo orgánico. La variabilidad es similar en ambos módulos.

En resumen, ambos módulos presentan ratios eliminación de DQO y ST similares y variabilidades de eliminación similares. Seguramente el caso que más destaca es la eliminación de DQO en el módulo mineral, puesto que se garantiza una eliminación superior al 50% y la variabilidad es un 10% más reducida que en los demás casos.

Si se comparan los resultados con los del estudio de Masi, que presenta un sistema con una configuración de macetas similar al sistema piloto implementado, los ratios de eliminación de DQO se situaron en un rango de 20 – 50%, de modo que el sistema piloto ha funcionado de forma satisfactoria en ambos módulos por lo que respecta a este parámetro.

Por otro lado, comparándolo con el diseño teórico, se han conseguido ratios de eliminación de DQO mucho mayores que los calculados en el diseño teórico, en el que en el mejor de los casos se preveía eliminar un máximo de 20 mg/L (es decir, un 10% de eliminación). Sin embargo, como se ha explicado en el diseño teórico, se esperaba obtener una eliminación mayor debido a la intervención de otros procesos de eliminación de DQO no considerados en el diseño teórico.

### 7.1.3. Evolución de pH y conductividad

Como se ha explicado en el apartado 7.1.1. Estadística de resultados, es de interés estudiar la evolución del pH y la conductividad a lo largo de la experimentación, incluyendo el periodo de puesta en marcha. En la figura 23 se muestra la evolución de pH:

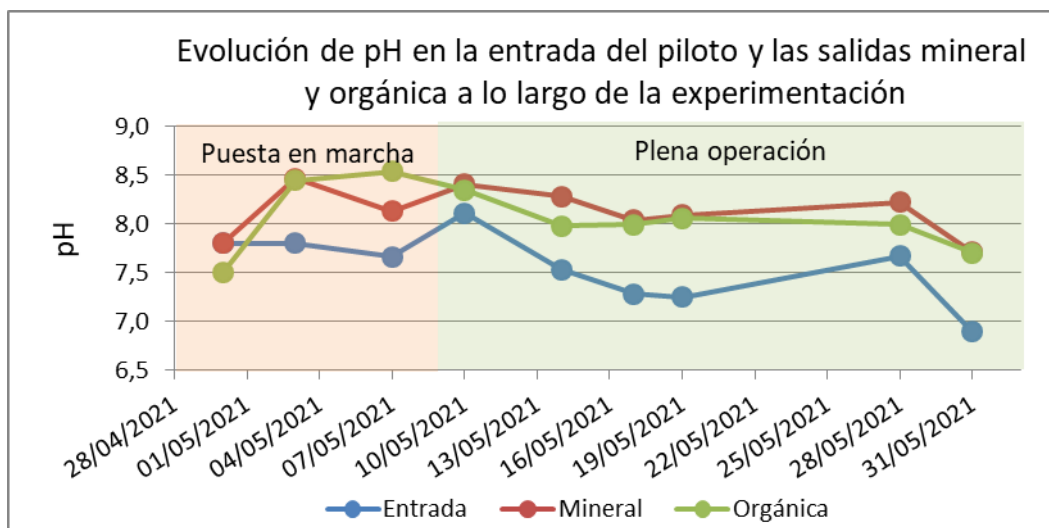


Figura 23. Evolución del pH en entrada y salidas del piloto a lo largo de la experimentación

Se aprecia que en la mayoría de muestreos los valores de pH son mayores en la salida mineral, seguidos de cerca por los de salida orgánica y por último los valores de entrada más reducidos (de manera general 0,5 unidades de pH menos). En cualquier caso, todos los valores de pH quedan comprendidos en un rango razonable para aguas neutras y las variabilidades son reducidas.

Se muestra en la figura 24 la evolución de la conductividad:

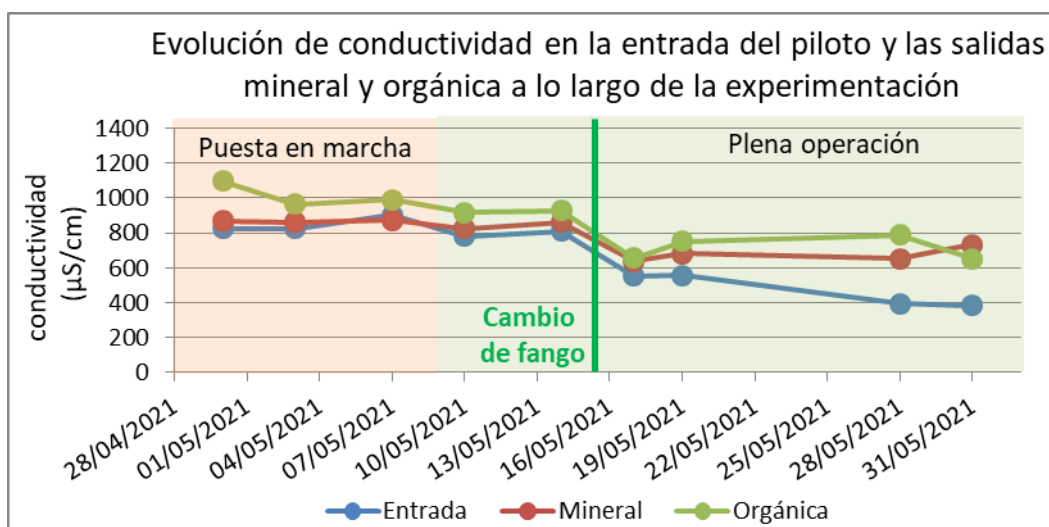


Figura 24. Evolución del pH en entrada y salidas del piloto a lo largo de la experimentación

Destaca un cambio en el comportamiento de los valores de conductividad asociado a la eliminación del tanque de mezcla del primer lodo primario utilizado para concentrar el agua

gris y la aportación del nuevo lodo, pasando de valores para los 3 puntos dentro del rango 800 – 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  al rango 500 – 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Dicho esto, los valores de conductividad han mostrado un cierto descenso continuo a lo largo de la experimentación. También destaca el hecho de que para la mayoría de muestreos los valores de conductividad suelen ser mayores en la salida orgánica, seguidos por los de salida mineral y los de entrada, en este orden.

#### 7.1.4. Distribución de valores

Al margen de la estadística general, es de interés entender la distribución de los valores obtenidos para todos los parámetros. Aunque los valores de nitrógeno amoniacal y aniones han resultado ser no detectados o reducidos (con la excepción de los sulfatos), igualmente se puede estudiar la distribución de valores. Se pueden consultar en el Anexo V – Distribución de valores de nitrógeno amoniacal y aniones.

La representación escogida para la distribución de valores es mediante diagramas de cajas y bigotes. En la figura 25 se muestra la distribución de valores para DQO en la entrada y las salidas del piloto (los puntos rojos indican el valor promedio y el cambio de color de las cajas, la mediana):

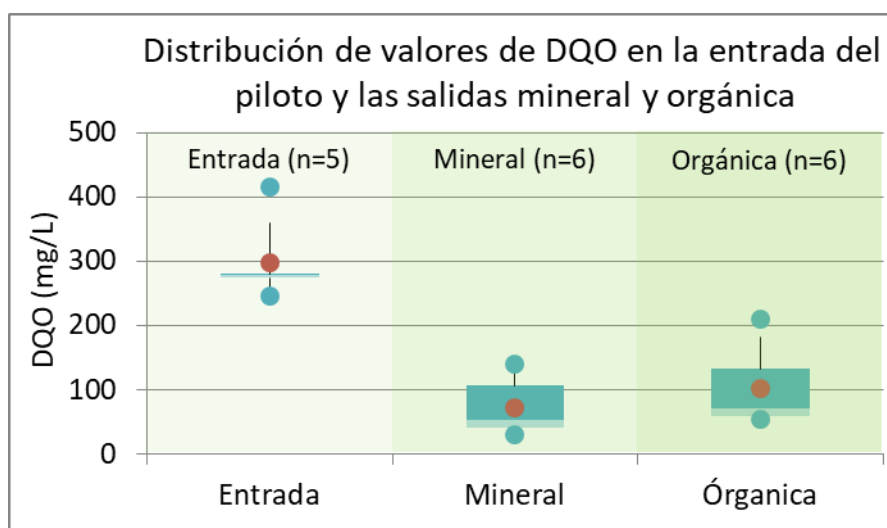


Figura 25. Distribución de valores de DQO en entrada y salidas en régimen de plena operación

Se aprecia la eliminación de DQO a través de los 2 módulos con claridad, añadiendo una mayor comprensión de la distribución de los valores en entrada y salidas: más del 75% de la distribución de entrada queda comprendida en el rango 250 – 300 mg/L, mientras que la distribución de valores de salida mineral queda en el rango 50 – 150 mg/L y la distribución de valores de salida orgánica en el rango 50 – 200 mg/L.

En la figura 26 se muestra la distribución de valores para ST y SV en la entrada y las salidas del piloto:

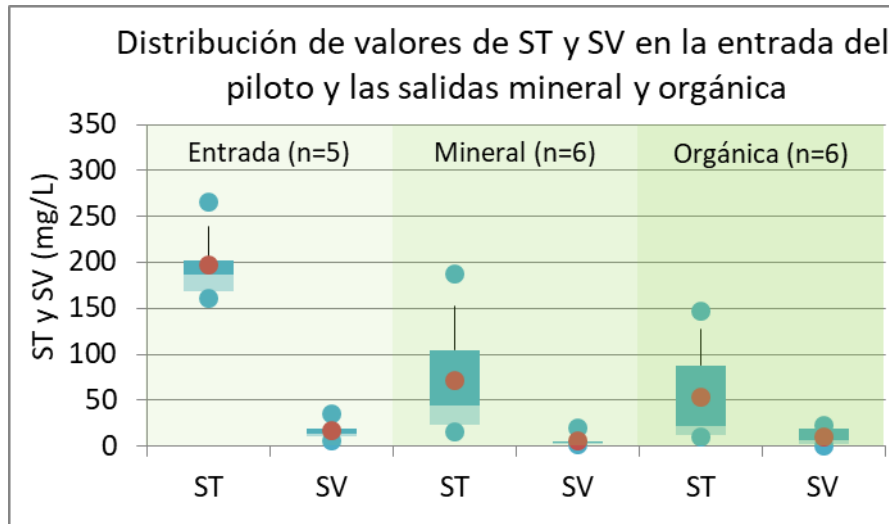


Figura 26. Distribución de valores de ST y SV en entrada y salidas en régimen de plena operación

Se extrae de la figura 26 que:

- ST: Se aprecia la eliminación de ST a través de los 2 módulos con claridad, añadiendo una mayor comprensión de la distribución de los valores en entrada y salidas. El 75% de la distribución de valores de entrada se sitúa en el rango 150 – 200 mg/L, mientras que el 75% de la distribución de valores en las salidas está por debajo de los 100 mg/L, siendo la salida mineral la que presenta mayor variabilidad y alcanza un mayor valor máximo de 200 mg/L, aproximadamente. De forma similar que en el caso de la DQO, la entrada muestra menor variabilidad que las salidas.
- SV: Son valores más reducidos respecto a ST, se aprecia una ligera mayor variabilidad en la entrada, donde se alcanzan valores aproximados de 50 mg/L.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que el piloto ha funcionado de manera satisfactoria, especialmente en términos de DQO y sólidos. Se debe tener presente que el piloto se ha operado con cargas superiores a las del agua gris de lavado de manos del instituto. Ello confirma el correcto diseño del sistema, y supone una garantía del funcionamiento del piloto alimentado solo con las aguas grises del instituto y sin aportación de fango primario.

## 7.2. Reutilización del agua

Para el estudio de viabilidad de reutilización del agua de salida del piloto, es necesario considerar el cumplimiento con la legislación actual de reutilización de agua. Concretamente, se trata del Real Decreto 1620/2007 de reutilización de agua residual (BOE, 2007), que concibe diferentes usos/calidades de aguas residuales y para cada uno de ellos fija unos valores límite para diferentes parámetros.

Puesto que la reutilización del agua del piloto sería para el riego de los espacios verdes de jardinería del instituto, el uso que se le daría al agua sería el de Calidad 1.2 a) Riego de zonas verdes urbanas. Así pues, se han comparado los resultados de las salidas del piloto con los límites de esta calidad. Ello se muestra en la tabla 14:

Tabla 14. Valores límite de Calidad 1.2 del Real Decreto 1620/2007, valores de salida del piloto y valores del agua gris del instituto (sin lodo primario de depuradora). \*Límite aplicable si existe riesgo de aerosolización

ID Calidad	Definición Calidad	ST (mg/L)	Turbidez (NTU)	<i>E. coli</i> (ufc/100mL)	Nematodos (huevo/10L)	<i>Legionella spp.</i> (ufc/L)*
Calidad 1.2	a) Riego de zonas verdes urbanas	20,0	10,0	2,0E+2	1	100
Resultados del piloto		ST (mg/L)	Turbidez (NTU)	10% Col. totales (ufc/100mL)		
Salida Mineral	Promedio	71,8	92,7	1,8E+5		
	Máximo	186,9	186,0	3,3E+5		
Salida Orgánica	Promedio	53,6	31,3	3,4E+5		
	Máximo	147,3	45,7	6,7E+5		
Agua gris instituto	Promedio lavado de manos	7,7	-	-		

Los parámetros que se controlan en el Real Decreto 1620/2007 para la Calidad 1.2 son ST, turbidez, *Legionella*, huevos de nematodos y *E. coli*. Para poder comparar con los datos disponibles, se supone que la concentración de *E. coli* es un orden de magnitud inferior a los resultados de coliformes totales, de modo que se toma el 10% de los resultados obtenidos de coliformes totales. No se dispone de resultados de huevos de nematodos o *Legionella*, aunque se puede obviar el riego aerosolizado en la reutilización del agua del piloto:

Se lleva a cabo la comparación de los límites de la legislación con:

- Resultados de salida: Para la reutilización se debería cumplir en todos los casos con los límites del Real Decreto, pero ni siquiera con los valores promedio se alcanza el cumplimiento en ninguno de los parámetros que se pueden comparar, es decir, ST, turbidez y *E. coli*. Sería necesario instalar a la salida del piloto un sistema de filtración, como un filtro de arena, para eliminar los 2 primeros parámetros. Por otra parte, los valores de *E. coli* serían muy elevados (de orden de magnitud 5) y habría que instalar una unidad de desinfección.
- Agua gris del instituto: Hay que tener presente que el funcionamiento del piloto a lo largo de la experimentación se ha llevado a cabo bajo condiciones desfavorables, añadiendo fango primario de depuradora al agua de lavado de manos del instituto. Tras finalizar la experiencia del proyecto, se plantea la continuación de funcionamiento del piloto únicamente con el agua gris de los lavabos, de modo que se cumple con el parámetro ST y, aunque no se dispone de resultados analíticos para el resto de parámetros, es improbable que no se cumpla en términos de turbidez ni de *E. coli*.

Cabe destacar que desde el inicio del proyecto se estableció que en un futuro el piloto funcionaría con agua de lavado de manos del instituto, pero durante este proyecto se quisieron probar condiciones más desfavorables añadiendo una fuente de contaminación más concentrada (lodo primario) al agua del instituto.

### 7.3. Incidencias y futuras mejoras

A lo largo de la experiencia de funcionamiento del piloto, han tenido lugar una serie de incidencias ante las que se ha tenido que dar una respuesta y que se han ido anotando en la bitácora del plan experimental. Ello se recopila en la tabla 15:

Tabla 15. Incidencias sucedidas a lo largo de la experiencia del piloto, detalles de estas y resolución aplicada

Incidencia	Detalles de la incidencia	Resolución de la incidencia
Puesta en marcha	Con el agua de alimentación se estaba llevando a cabo un lavado de los sustratos, de modo que los valores de los parámetros más representativos (DQO, ST) se obtuvieron más altos en las salidas que en la entrada.	Se apreció una tendencia a invertirse la situación y que la entrada presentara mayores valores que las salidas. Se consideraron datos válidos a partir del 4º muestreo.
Obstrucción de goteros	Algunos de los goteros (incorporados en manguera) dejaron de regar por obstrucción de los sólidos del agua de entrada.	Se cambiaron los ramales de riego, aunque algunos goteros dejaron de regar a la larga. Aún y así, se consideró que la alimentación era suficiente y bien repartida en la superficie de las macetas.
Alimentación de agua gris imprevista. Dilución del fango	Después del llenado del depósito no se cerró una de las válvulas que controlaban la alimentación de agua gris del depósito y el depósito se llenó diluyendo el fango aportado.	Se cerró la válvula en cuestión hasta la siguiente ocasión que se necesitó llenar el tanque.
Deposición y envejecimiento de fango	A mitad del periodo de funcionamiento del piloto, el fango ya tenía alrededor de 3 semanas de antigüedad y parte había decantado en el fondo del depósito a pesar de la recirculación-agitación con la bomba. Se obtuvo una muestra de entrada con valores de DQO y ST anormales (2698 mg/L y 2285 mg/L, respectivamente).	Se llevó a cabo un vaciado completo del tanque, y un lavado manual y con manguera del fondo del depósito. Se recogió fango primario nuevo para usar en el tanque durante el resto de la experimentación.
Atasco de bomba	Al recoger la penúltima muestra, se detecta que la bomba no funciona debido a un atasco causado por los sólidos acumulados a lo largo de la experimentación. Algunas especies vegetales acusan señales de necesitar riego, hecho que coincide con el final de la primavera.	El día en cuestión se riega de manera manual el piloto. Luego se extrae la bomba y se desatasca manualmente retirando el tapón formado.

A su vez, a partir de la experiencia adquirida a lo largo de la construcción, puesta en marcha y funcionamiento del piloto, se extraen posibles mejoras para el sistema. Ello se recoge en la tabla 16:



Tabla 16. Posibles mejoras a aplicar al sistema piloto a partir de la experiencia del proyecto

Mejora	Detalles de la mejora
Dispersión de la alimentación y goteros	Cuanto mejor se reparta la alimentación en la superficie de las macetas, más similar es el piloto real al diseño teórico matemático de los HFSV. Esto se traduce en un mejor rendimiento del sistema en términos de eliminación de contaminantes. Se deberían hacer diversas pruebas para encontrar el sistema de goteo que permita mayor dispersión del riego y minimizar los casos de obstrucción. Se debería investigar con goteros incorporados, mangueras horadadas u otros sistemas de riego disperso y además, estudiar diferentes radios de orificio de riego.
Llenado de agua gris automático	A lo largo de la experimentación el llenado del depósito se ha llevado a cabo de manera manual cuando se detectaba falta de agua. Mediante un sistema con boya se podrían usar electroválvulas para garantizar siempre un tanque con un volumen de 1000 L.
Potencia de la bomba	La bomba utilizada pertenecía al instituto previamente y era de una potencia excesiva para el piloto. La regulación del agua de riego aportada se llevaba de manera manual mediante válvula y el caudal era muy sensible a la posición dicha válvula. Sería interesante adquirir una bomba sumergible para aguas residuales de menor potencia.
Sistema de agitación	La recirculación del tanque mediante una T a la salida de la bomba ha resultado ser insuficiente para evitar decantaciones de sólidos en el depósito. Se debería implementar un sistema de agitación de hélice.
Cobertura anticontaminación	Sería interesante incorporar alguna cobertura o estructura para proteger la superficie superior de las macetas y de los canalones de recogida para evitar contaminaciones externas, por ejemplo, durante episodios de viento o lluvia.
Estudio especies vegetales	Se podría realizar un estudio sobre las especies vegetales, su afectación tras ser regadas con agua gris o debida a crecer en diferentes sustratos, así como su contribución en la eliminación de contaminantes contenido en las aguas grises. También se podría medir la altura y las hojas de las plantas y caracterizar su crecimiento
Adecuación para reutilización	Se podría implementar un sistema de desinfección y filtrado del agua de salida del jardín para ser reutilizada en usos que el instituto podría otorgar a esta agua. Debería cumplir con los límites legislado, explicados en el 7.2. Reutilización del agua.

#### 7.4. Especies vegetales y estética

Aunque no ha sido objetivo de este proyecto estudiar el crecimiento y el bienestar de las diferentes especies vegetales, sí lo es estudiar su función estética como jardín vertical. A grandes rasgos, se ha apreciado un crecimiento destacable de todas las especies conforme ha avanzado el plan experimental. Ello se muestra en la figura 27:



Figura 27. Comparativa de crecimiento de las especies vegetales al principio y final del funcionamiento del piloto (26/04/2021 – 10/06/2021)

Se tiene constancia de que con el aumento de las temperaturas con los meses de mayo y junio algunas de las plantas mostraron señales de necesitar más riego, ya que algunas hojas se amarillitaron. Esto coincide con el período de días en los que la bomba dejó de funcionar por atasco.

Al margen de esto, el resultado es que el piloto funciona estéticamente como jardín vertical aportando una configuración de espacio verde en el plano vertical.

### 7.5. Colaboración de sectores educativos

El proyecto ha supuesto una colaboración entre dos entes educativos de sectores diferentes: el grupo GEMMA (UPC) y el Institut Les Salines. Esto enriquece a ambas partes y convierte la frontera entre ambos mundos educativos un tanto más difusa:

- Por parte del grupo GEMMA (UPC), se consigue el beneficio de disponer de gente con motivación para construir el sistema piloto e investigar el desarrollo de su funcionamiento, así como llevar a cabo una mayor divulgación de los campos de investigación del momento para despertar intereses en los alumnos del instituto.
- Por parte del instituto, se consigue el beneficio de estar en mayor contacto con el mundo de la investigación y desarrollo, y poderlo relacionar con los campos de formación del centro colaborando con expertos del campo. A su vez, se lleva a cabo divulgación de los resultados del proyecto, que contienen cierta complejidad técnica.

En la figura 28 y la figura 29 se muestran fotografías tomadas de la visita realizada el día 23/04/2021, tras finalizar la construcción del piloto y empezar el funcionamiento de este con el periodo de puesta en marcha:



Figura 28. Participantes del proyecto: GEMMA (UPC) y Institut Les Salines



Figura 29. Explicación del proyecto y condiciones de funcionamiento del sistema piloto por parte de GEMMA (UPC) en el Institut Les Salines

Cabe destacar la obtención del 1er Premio ImpulsFP Baix Llobregat en la modalidad de grado medio por parte del Institut Les Salines, a partir de la presentación de este proyecto en colaboración con el grupo GEMMA (INS Les Salines, 2021).



## 8. Conclusiones

En el presente proyecto se ha implementado con éxito un piloto resultado de la aplicación de los conceptos de diseño teórico de HFSV para la configuración de un jardín vertical. La función de este ha sido el tratamiento de aguas grises de salida de lavado de manos de baños del Institut Les Salines (Av. Onze de Setembre, 36, 08820 El Prat de Llobregat, Barcelona, España). Este proyecto es fruto de la colaboración entre el grupo GEMMA (UPC) y el instituto.

La ejecución del proyecto ha dado lugar a las siguientes conclusiones:

- Debido a la baja concentración de materia orgánica del agua de los lavabos, se decidió añadir fango primario espesado de depuradora de aguas residuales urbanas en el tanque de captación de agua gris, previo al sistema de tratamiento. Se diseñó el sistema asumiendo una concentración de DQO de entrada de 200 mg/L, conseguida mediante la dosificación de fango primario de la EDAR de El Prat de Llobregat.
- La construcción del piloto se llevó a cabo en un periodo aproximado de un mes y medio (10/03/2021 – 23/04/2021), y se concibió como un sistema modular de macetas que reciben el agua de alimentación por la parte superior mediante mangueras con goteros incorporados, de modo que el agua circula por goteo vertical en cada columna de macetas, hasta unos canalones de recogida. Se escogieron 2 módulos sustratos diferentes: uno de perlita sobre grava a partes iguales (sustrato mineral) y otro de sustrato orgánico comercial (sustrato orgánico).
- El funcionamiento del piloto tuvo lugar durante el periodo 30/04/2021 – 31/05/2021, en el que se realizaron 9 muestreos que se analizaron en laboratorio. A través de los resultados de laboratorio, se distinguió entre un periodo de puesta en marcha de aproximadamente 20 días y el funcionamiento óptimo del piloto a partir del día 10/05/2021, correspondiente al 4º muestreo.
- Por lo general, los valores de DQO en el tanque de mezcla han sido algo superiores a los 200 mg/L fijados en el diseño teórico, de modo que el piloto ha funcionado en condiciones algo más exigentes. Por lo que respecta a ST y SV, se han obtenido valores promedio de 200 mg/L y 17 mg/L, respectivamente.
- Para DQO y ST parámetros se ha podido apreciar una reducción de valores significativa en las salidas del piloto, promediando eliminaciones de >60% en ambos módulos y destacando una eliminación mínima >50% de DQO en el módulo mineral.
- Por lo que respecta a nitrógeno amoniacal y aniones, por lo general, muestran resultados muy reducidos o de no-detectados, coherente con las referencias sobre composición de aguas grises. Los sulfatos alcanzan valores de 80 mg/L, también coherentes con dichas referencias.
- En cuanto a turbidez y coliformes totales, se obtienen resultados que impiden la reutilización del agua de acuerdo con los límites del Real Decreto 1620/2007 (BOE, 2007). No obstante, con el funcionamiento del piloto con el agua gris del instituto sin fango primario, se cumpliría con la Calidad 1.2 de Riego de zonas verdes urbanas.
- Las plantas utilizadas en el jardín vertical crecieron satisfactoriamente durante el periodo experimental siendo regadas con agua residual, tanto en el sustrato orgánico como en el sustrato mineral. Se considera que el sistema cumple el objetivo estético planteado, además de la depuración del agua residual.

- Se plantea un futuro uso del jardín piloto, siendo alimentado con el agua gris de lavado de manos de los baños, sin añadir ningún concentrado. Se podría evaluar la viabilidad de reutilización de esta y destinarla para las actividades de riego del instituto. A su vez se podrían implementar las potenciales mejoras aprendidas tras la experiencia adquirida en este proyecto.
- El proyecto ha dado lugar a una colaboración fructífera entre GEMMA (UPC) y el Institut Les Salines, aumentando la formación y concienciación ambiental de los estudiantes del instituto. Como reconocimiento a este trabajo, la iniciativa ha sido premiada con un 1er Premio ImpulsFP Baix Llobregat.

## 9. Referencias

- Abed, S. N., & Scholz, M. (2016). Chemical simulation of greywater. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 37, 1631–1646. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1123301>
- APH/AWWA/WEF. (2001). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22nd ed.). American Public Health Association.
- Ayuntamiento de Santander. (2021). *El nuevo jardín vertical logra captar la atención de numerosos medios de comunicación internacionales*. <https://www.santanderciudadviva.com/el-nuevo-jardin-vertical-logra-captar-la-atencion-de-numerosos-medios-de-comunicacion-internacionales/>
- BOE. (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. *Boletín Oficial Del Estado*.
- Dani, P., & Falcó, L. (2020). *SUSTRATO, VEGETACIÓN Y RIEGOS EN JARDINERÍA VERTICAL* (ASESCUVE (ed.)).
- European Union. (2021). *Nature-Based-Solutions*. [https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions\\_en](https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_en)
- Fulvio Boano. (2020). *A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design and environmental benefits*.
- García, J., & Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Universidad Politécnica de Cataluña, 108.
- Google. (2021a). *Institut Les Salines*. <https://www.google.com/maps/place/Institut+Les+Salines/@41.3213098,2.0902045,14.79z/data=!4m5!3m4!1s0x0:0x4d248be892a3697d!8m2!3d41.319019!4d2.084763>
- Google. (2021b). *Institut Les Salines (satélite)*. <https://www.google.com/maps/place/Institut+Les+Salines/@41.3190249,2.0841972,171m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x4d248be892a3697d!8m2!3d41.319019!4d2.084763>
- Guía verde. (2020). *Santander bate el récord europeo de jardines verticales de interior*. Jardinería. <https://www.guiaverde.com/noticias/santander-bate-el-record-europeo-de-jardines-verticales-de-interior-5862/>



- Gullón, M. (2018). Tratamiento de Aguas. Problemas resueltos. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Gullón, M. (2020). Humedales construidos. *Tratamiento de Aguas. Caracterización, Gestión y Tratamiento de La Contaminación de Las Aguas. Universitat Politècnica de Catalunya*.
- INS Les Salines. (2021). *Celebrem el 1r premi de la modalitat de grau mitjà al projecte Jardí vertical de l'equip d'Agrària, dels premis ImpulsFP Baix Llobregat*. Twitter.  
<https://twitter.com/Inslessalines/status/1384590865583288327>
- José Juan Salas Rodríguez. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*. CENTA.
- Masi, F., Bresciani, R., Rizzo, A., Edathoot, A., Patwardhan, N., Panse, D., & Langergraber, G. (2016). Green walls for greywater treatment and recycling in dense urban areas: A case-study in Pune. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 6(2), 342–347.  
<https://doi.org/10.2166/washdev.2016.019>
- Ortega, E., Ferrer, Y., Sala, J. ., Aragón, C., & Real, Á. (2010). *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*.
- Santasmasas, C. (2013). Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Santos, C. (2012). Development of an experimental system for greywater reuse. *Desalination*.
- Solorzano, L. (1969). Determination of Ammonia in Natural Waters by the Phenolhypochlorite Method. In *Limnology and Oceanography* (Vol. 14).
- Svete, L. E. (2012). *Vegetated greywater treatment walls : Design modifications for intermittent media filters*. 49.
- Voshod-Solnca. (2021). *Hora de salida y puesta del sol en El Prat de Llobregat*.  
[https://salidaypuestadelosol.com/sun/el\\_prat\\_de\\_llobregat](https://salidaypuestadelosol.com/sun/el_prat_de_llobregat)

## Anexo I – Historial de reuniones

En la tabla 17 se muestra el historial de reuniones de todo el proyecto. Se indican la fecha, el motivo de reunión, los asistentes y los puntos principales de cada reunión:

Tabla 17. Historial de reuniones del proyecto

Fecha	Motivo de reunión	Asistentes	Puntos de la reunión
25/01/2021	Visita de reconocimiento al Institut Les Salines	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> <li>• E. Pagans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de la ubicación escogida, dimensiones y orientación</li> <li>• Análisis del agua de los grifos de los baños</li> <li>• Entrega de las muestras de lavado de manos a laboratorio para su análisis</li> </ul>
10/02/2021	Revisión de la visita de reconocimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comentarios y observaciones de la visita puestos en común</li> <li>• Informe de los resultados de las muestras</li> <li>• Organización de búsqueda de información de composición de aguas grises y guías técnicas de diseño para jardines verticales</li> </ul>
17/02/2021	Resultados de la investigación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comparación entre el agua gris analizada y composiciones de referencia</li> <li>• Lluvia de ideas de materiales, equipos, condiciones del suministro de agua, sustratos y diseño teórico</li> <li>• Diseño del diagrama de flujo del sistema</li> </ul>
24/02/2021	Toma de decisiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> <li>• E. Pagans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El agua de grifo se dopará con agua residual</li> <li>• Suministro de agua de grifo aproximada</li> <li>• Maceta y sistema de inclinación fijados</li> <li>• Modelo de bomba sumergida fijado</li> <li>• Luz verde a caracterizar el agua residual que usar</li> <li>• Luz verde a perforar el muro exterior para habilitar suministro del agua de grifo</li> <li>• Pendiente lista detallada del material</li> </ul>
25/02/2021	Diseño teórico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actualización del diseño teórico</li> <li>• Lista de material y equipos lista</li> </ul>
16/03/2021	Avance de las compras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprobación de las compras</li> <li>• Construcción de la estructura</li> </ul>

Diseño, puesta en marcha y evaluación del funcionamiento de un jardín vertical para tratamiento de agua residual en una escuela de formación profesional

			soporte
15/04/2021	Avance piloto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• E. Uggetti</li> <li>• E. Pagans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elección de especies vegetales</li> <li>• Avance de la construcción</li> </ul>
19/04/2021	Preparación visita piloto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparación de dudas</li> <li>• Planificación de recogida de concentrado en depuradora</li> <li>• Organización para visita del piloto e inicio del muestreo</li> </ul>
23/04/2021	Visita piloto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> <li>• E. Pagans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprobación del sistema de riego</li> <li>• Cambios en los sustratos de maceta</li> <li>• Cambios en la división del piloto en dos módulos</li> <li>• Regulación del caudal</li> <li>• Inicio del muestreo fijado</li> </ul>
14/05/2021	Visita piloto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Pagans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaciado y lavado del tanque de alimentación</li> <li>• Nuevo fango para dopaje</li> <li>• Comprobación del sistema de riego</li> <li>• Toma de muestra de sustratos</li> </ul>
18/05/2021	Reunión de control	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actualización de resultados analíticos</li> <li>• Análisis hasta fin de proyecto <i>E. coli</i> y turbidez</li> <li>• Organización de entregas</li> </ul>
04/06/2021	Fin de las analíticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Repaso del total de resultados analíticos</li> <li>• Adecuación del tratamiento de datos</li> <li>• Resolución de dudas de construcción del informe</li> </ul>
10/06/2021	Organización entrega de la memoria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A. Biosca</li> <li>• R. Díez</li> <li>• E. Uggetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organización temporal de finalización del redactado y revisión</li> <li>• Resolución de dudas del redactado</li> </ul>

## Anexo II – Bitácora de muestreos

Seguidamente se muestran en la tabla 18 la situación del piloto cada uno de los 9 días de muestreo:

Tabla 18. Bitácora del muestreo y desarrollo del sistema piloto durante el plan experimental

Fecha	Fecha lodo EDAR	Situación	Estado
30/04/2021	23/04/2021	Se añade 1 L de fango a 1000 L en el depósito. Entrada muy limpia, perlita considerablemente limpia y orgánico sucio con sólidos	Puesta en marcha
03/05/2021		Goteros del segundo ramal se obstruyen y el depósito no bajó por debajo de los 700 L (hubo una válvula abierta que suministró agua de los baños). El litro dopado se ha diluido. Se añade otro litro. Entrada muy limpia con algún sólido, perlita considerablemente limpia y orgánico no tan sucio	
07/05/2021		Los dos ramales obstruidos, se ponen nuevos. Se plantea cambiar ambos ramales con unos nuevos disponibles en el instituto. También se plantea comprar una bomba de menos potencia	
10/05/2021			El sistema sigue mostrando problemas de obstrucción, aunque gotea. Se ha añadido un litro de fango más, y el volumen restante de tanque es de 400 L. Se organiza visita y llevar lodo primario nuevo de la EDAR del Prat
14/05/2021		Los ramales resisten y funcionan. Después de la toma de muestra con un restante de 200 L en el tanque, se purga y lava el tanque. Llenado hasta 200 L. Se trae fango de depuradora nuevo para cargar el próximo día de muestreo	Valores elevados de entrada y lavado
17/05/2021	14/05/2021	El depósito se ha podido llenar el fin de semana y el lunes hasta los 500 litros. Se cargan 3 litros del fango nuevo. Entrada con mucha espuma/jabón, algo turbia y con algunos sólidos. Perlita y orgánico visualmente muy limpios con pocos sólidos	Plena operación
19/05/2021		El depósito se mantiene en los 500 litros. Bastante jabón en la entrada de nuevo. Entrada un poco menos turbia. Perlita con varios sólidos aunque se ve transparente, parecen trozos de hojas	
27/05/2021		El depósito se reduce hasta los 200 L. Bastante jabón en entrada y turbidez similar a anteriormente. Salidas más turbias y con más sólidos. La bomba se atasca y se tiene que regar a mano hasta fin de proyecto	
31/05/2021		Llenado hasta 300 L. Bastante espuma en entrada y perlita. La perlita más turbia que la entrada. Se repara la bomba. Fin del muestreo	

### Anexo III – Estadística de resultados analíticos

Seguidamente se muestran en la tabla 19, la tabla 20 y la tabla 21 las principales características estadísticas de los parámetros analizados en laboratorio de la entrada, la salida mineral y la salida orgánica, respectivamente:

Tabla 19. Características estadísticas de todos los parámetros analizados en la entrada del piloto

Entrada	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	pH	Cond. (μS/cm)	Turbidez (NTU)
n	5	5	5	5	5	3
Mínimo	245,7	161,3	5,5	6,9	381,0	78,0
Máximo	414,7	265,3	36,0	8,1	779,0	117,0
Promedio	298,6	197,0	17,0	7,4	532,2	97,3
Desviación	66,4	41,3	11,7	0,5	161,3	19,5
Entrada	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	
n	5	5	5	5	5	
Mínimo	0,012	0,000	0,100	0,000	17,7	
Máximo	0,586	0,067	0,630	0,198	75,1	
Promedio	0,196	0,025	0,255	0,064	33,4	
Desviación	0,230	0,034	0,224	0,078	23,8	

Tabla 20. Características estadísticas de todos los parámetros analizados en la salida mineral del piloto

Mineral	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	pH	cond (μS/cm)	Turbidez (NTU)
n	6	6	6	6	6	3
Mínimo	30,1	15,3	1,5	7,7	636,0	11,0
Máximo	139,3	186,9	19,7	8,4	860,0	186,0
Promedio	73,1	71,8	6,5	8,1	731,0	92,7
Desviación	46,2	68,4	6,7	0,2	93,2	88,1
Mineral	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Coliformes (ufc/100mL)
n	6	6	6	6	6	2
Mínimo	0,004	0,000	0,094	0,104	2,7	2,0E+5
Máximo	0,130	0,076	1,777	0,722	80,8	3,3E+6
Promedio	0,044	0,013	0,480	0,244	43,6	1,8E+6
Desviación	0,049	0,031	0,657	0,241	30,7	2,2E+6



Tabla 21. Características estadísticas de todos los parámetros analizados en la salida orgánica del piloto

Orgánica	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	pH	cond (μS/cm)	Turbidez (NTU)
n	6	6	6	6	6	3
Mínimo	54,6	10,7	0,6	7,7	652,0	12,3
Máximo	209,7	147,3	22,5	8,4	927,0	45,7
Promedio	102,4	53,6	10,1	8,0	781,8	31,3
Desviación	64,1	59,1	10,0	0,2	121,1	17,2
Orgánica	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Coliformes (ufc/100mL)
n	6	6	6	6	6	2
Mínimo	0,049	0,000	0,134	0,590	25,9	1,7E+5
Máximo	0,222	0,489	6,247	1,794	83,9	6,7E+6
Promedio	0,105	0,154	1,255	1,364	55,3	3,4E+6
Desviación	0,063	0,210	2,453	0,441	23,8	4,6E+6

### Anexo IV – Evolución de SV y sulfatos

En la figura 30 y la figura 31 se muestran las evoluciones de SV y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, respectivamente, para los 3 puntos de muestreo a lo largo de la experimentación, incluyendo el periodo de puesta en marcha. Diversos de los valores son iguales o incluso mayores en las salidas que en la entrada, para diversos de los muestreos:

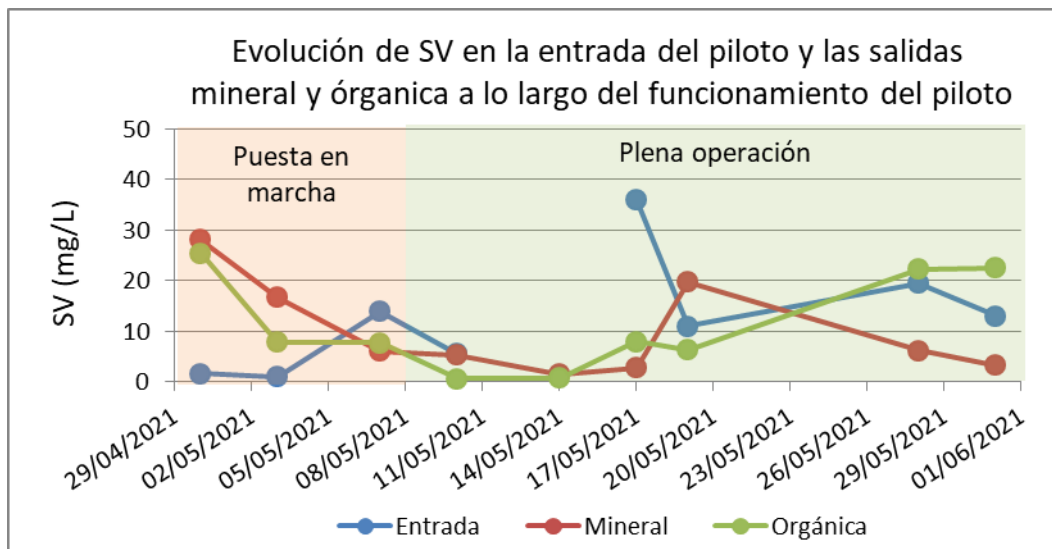


Figura 30. Evolución de SV en la entrada y las salidas a lo largo de la experimentación

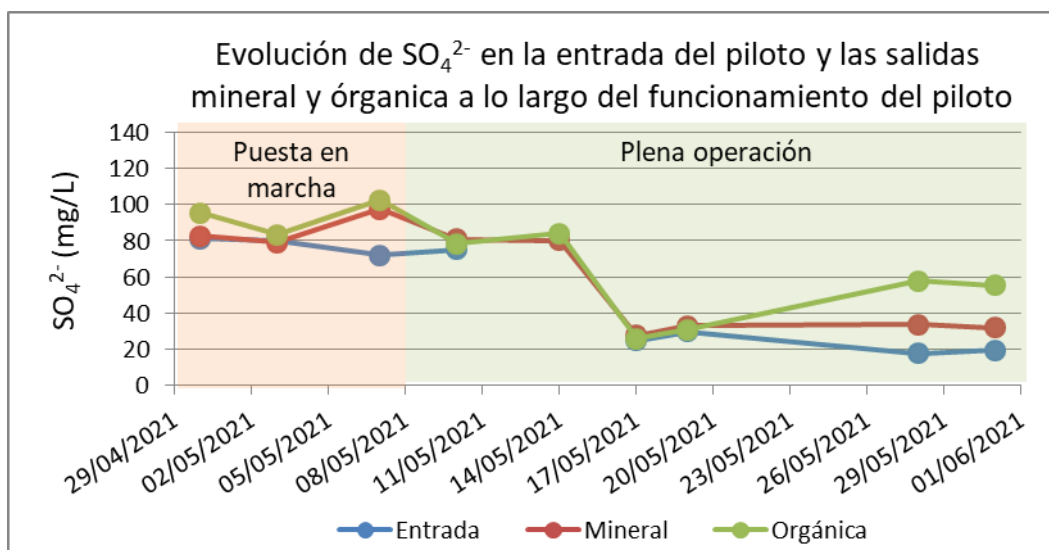


Figura 31. Evolución de  $SO_4^{2-}$  en la entrada y las salidas a lo largo de la experimentación

## Anexo V – Distribución de valores de nitrógeno amoniacal y aniones

Seguidamente se muestran las gráficas de distribución de valores para el nitrógeno amoniacal y los aniones, a lo largo del periodo de plena operación del sistema. En la figura 32 se muestra la distribución de valores de  $N-NH_4^+$ :

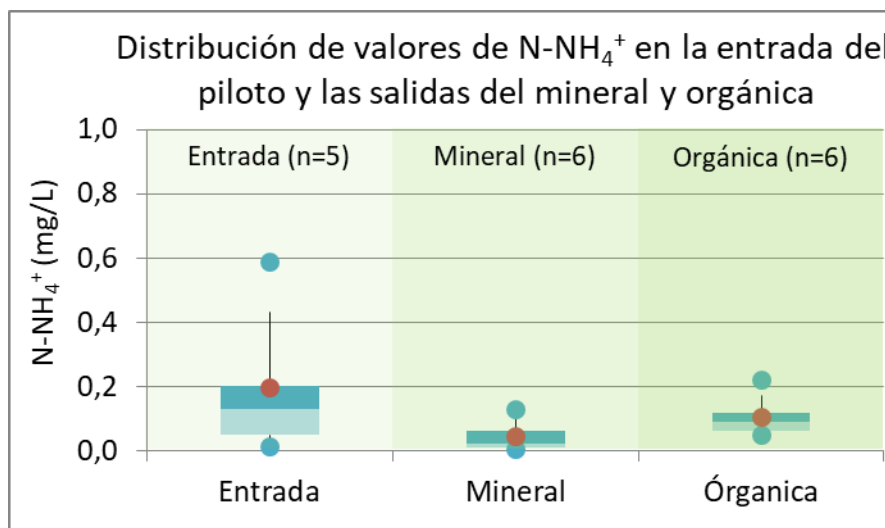


Figura 32. Distribución de valores de  $N-NH_4^+$  en entrada y salidas en régimen de plena operación

En la figura 33 se muestra la distribución de valores de  $N-NO_2^-$ :

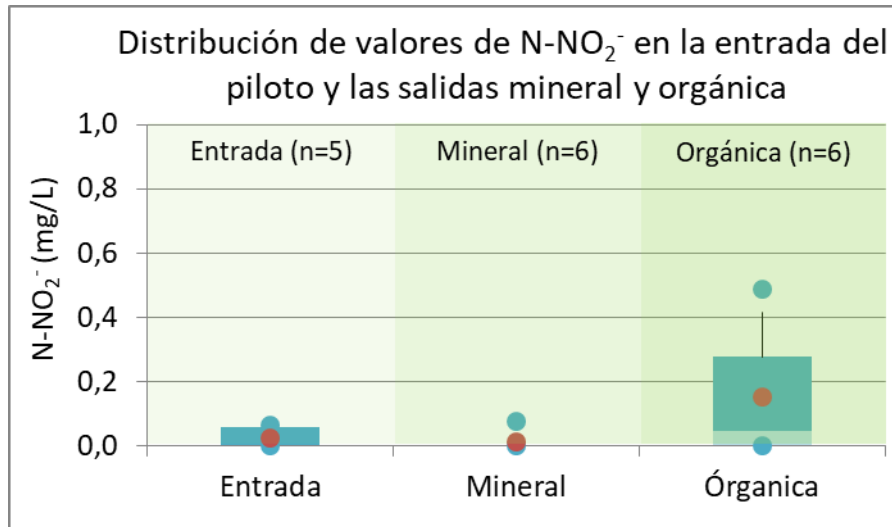


Figura 33. Distribución de valores de  $\text{N-NO}_2^-$  en entrada y salidas en régimen de plena operación

En la figura 34 se muestra la distribución de valores de  $\text{N-NO}_3^-$ :

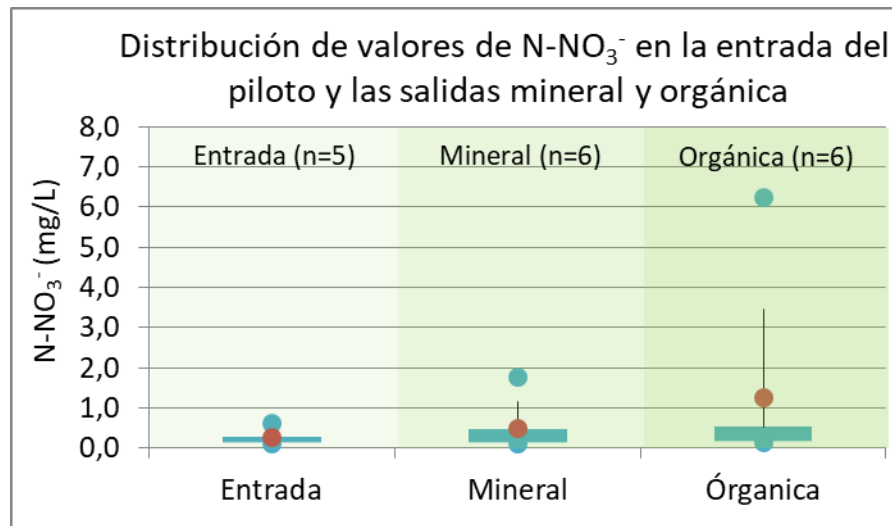


Figura 34. Distribución de valores de  $\text{N-NO}_3^-$  en entrada y salidas en régimen de plena operación

En la figura 35 se muestra la distribución de valores de  $\text{P-PO}_3^{4-}$ :

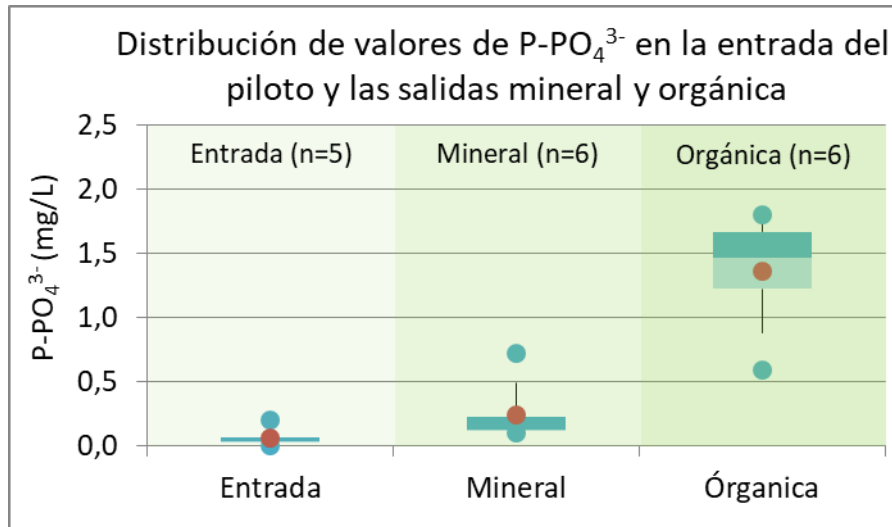


Figura 35. Distribución de valores de  $P-PO_4^{3-}$  en entrada y salidas en régimen de plena operación

Y en la figura 36 se muestra la distribución de valores de  $SO_4^{2-}$ :

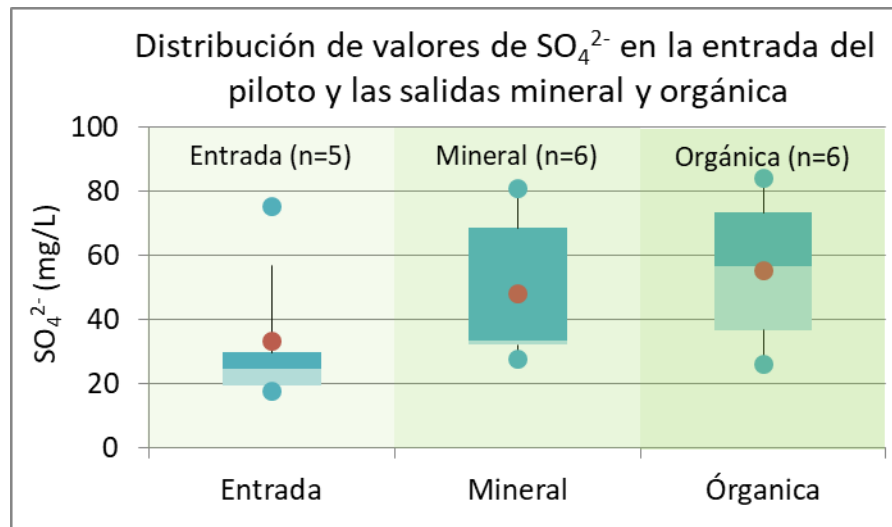


Figura 36. Distribución de valores de  $SO_4^{2-}$  en entrada y salidas en régimen de plena operación