



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Modelación de la calidad del agua de un Humedal Artificial  
de Flujo Superficial en la Urbanización Los Monasterios,  
Puzol, Valencia.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Palpa Chavez, Gino

Tutor/a: Asensi Dasí, Enrique Javier

Cotutor/a: Hernández Crespo, Carmen

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

# Trabajo Fin de Máster

## *MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL EN LA URBANIZACIÓN LOS MONASTERIOS, PUZOL, VALENCIA*

**Intensificación:** *TRATAMIENTOS DE AGUAS*

**Autor:**

*GINO PALPA CHAVEZ*

**Tutor:**

*DR. ENRIQUE JAVIER ASENSI DASÍ*

**Cotutor/es:**

*DRA. CARMEN HERNÁNDEZ-CRESPO*

**SETIEMBRE, 2024**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## **Dedicatoria**

A mis padres Pedro y Raquel, maestros que supieron educarme con amor y disciplina.

A mi esposa Johanna, por su gran amor y soporte que fue fundamental para lograr esta meta y que poco a poco seguimos creciendo juntos.

A mi hijo Zhair, porque que es la razón de mi vida y gran motivo para superar todo obstáculo.

A mis hermanos Pedro e Irwin, siempre serán parte de todo éxito.

A mis grandes amigos del máster: Chile, Ecuador, México y España siempre estarán en mi corazón.

## **Agradecimientos**

A Enrique y Carmen por su paciencia y dedicación que me ayudaron a que este trabajo culmine.

A la Universidad Politécnica de Valencia y en especial al MIHMA que me permitió vivir esta experiencia.

# ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

1. Introducción .....	9
1.1. Antecedentes .....	10
1.2. Definición del problema y justificación .....	12
2. Objetivos .....	13
2.1.1. Objetivos generales .....	13
2.1.2. Objetivos específicos .....	13
3. Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	14
4. Marco teórico .....	16
4.1. Humedales Artificiales (Constructed Wetlands).....	16
4.1.1. Humedales Artificiales de Fujo Superficial (FWS CW) .....	18
4.1.2. Humedales Artificiales de Fujo Sub-Superficial (HSSF/VSSF CW).....	19
4.2. Influencia de la geometría en Humedales Artificiales .....	19
4.3. Influencia de factores ambientales .....	21
4.4. Remoción de patógenos en Humedales Artificiales.....	22
4.5. Modelación basada en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) .....	25
4.6. COMSOL Multiphysics .....	26
4.7. Legislación sobre coliformes fecales para uso de aguas residuales.....	30
5. Área de Estudio.....	33
6. Metodología .....	39
6.1. Análisis de los datos disponibles del humedal .....	40
6.1.1. Caudales afluentes al humedal .....	40
6.2. Construcción del modelo.....	45
6.2.1. Construcción de la geometría .....	45

---

6.2.2. Generación del mallado computacional .....	54
6.2.3. Análisis de independencia de malla.....	61
6.3. Simulación del modelo de calidad .....	66
6.3.1. Definición de la herramienta Eventos .....	66
6.3.2. Estudio de Flujo Laminar.....	68
6.3.3. Estudio de Especies Diluidas.....	69
7. Resultados y Discusión .....	70
7.1. Implementación del modelo .....	70
7.2. Calibración del modelo de calidad de agua.....	74
8. Conclusiones y recomendaciones.....	80
9. Referencias bibliográficas.....	82
10. Anexos .....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor máximo admisible para uso residencial y servicios de riego.....	32
Tabla 2. Valor máximo admisible para uso de riego agrícola.....	33
Tabla 3. Valor máximo admisible para uso de riego en campos de golf .....	33
Tabla 4. Medición de caudal en entradas al humedal .....	44
Tabla 5. Calidad de las celdas en la malla .....	55
Tabla 6. Mallas y sus principales características de calidad .....	56
Tabla 7. Histogramas de calidad por tipo de malla .....	59
Tabla 8. Propiedades del fluido para flujo laminar.....	68
Tabla 9. Valores iniciales para flujo laminar .....	68
Tabla 10. Condiciones de contorno para flujo laminar .....	69
Tabla 11. Propiedades del fluido para especies diluidas .....	69
Tabla 12. Valor inicial de concentración .....	69
Tabla 13. Condiciones de contorno para estudio de especies diluidas .....	70
Tabla 14. Valores bibliográficos de las constantes de velocidad de degradación .....	74
Tabla 15. Valores de concentración de E. Coli medidos experimentalmente.....	75
Tabla 16. Calibración con cinéticas de muerte natural, fotooxidación y depredación	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación.....	34
Figura 2. Unidades de tratamiento EDAR Monasterios.....	36
Figura 3. Esquema de distribución del CF CW y FWS CW (laguna 1).....	37
Figura 4. FWS CW (Laguna 1).....	38
Figura 5. Medición de caudal.....	41
Figura 6. Registro de caudales medidos desde el 25/01/24 al 23/02/24.....	42
Figura 7. Registro de caudales medidos desde el 30/01/24 al 06/02/24.....	42
Figura 8. Entrada de agua Izquierda (I) y Derecha (D).....	44
Figura 9. Laguna 1 en la fase de construcción..	46
Figura 10. Resultados de la batimetría de la laguna 1.....	46
Figura 11. Puntos de la periferia de la laguna 1.....	47
Figura 12. Cálculo de las pendientes de la laguna 1.....	48
Figura 13. Parámetros definidos para la construcción de la geometría.....	48
Figura 14. Pasos de la generación de la geometría de la laguna.....	51
Figura 15. Geometría final con masa de agua.....	54
Figura 16. Cantidad de elementos por tipo de malla.....	58
Figura 17. Calidad promedio por tipo de malla medida por oblicuidad.....	59
Figura 18. Gráficos de velocidad por tipo de malla en estado transitorio.....	62
Figura 19. Velocidad en punto de salida en Estado Transitorio (minuto 90).....	62
Figura 20. Velocidad en punto de salida en Estado Estacionario.....	63
Figura 21. Costo computacional en Estado Transitorio.....	64
Figura 22. Costo computacional en Estado Estacionario.....	64
Figura 23. Error cuadrático medio según tipo de malla.....	65
Figura 24. Ubicación de la herramienta "Eventos" en COMSOL.....	67

---

Figura 25. Variable de Estado Discreto.....	67
Figura 26. Evento Explícito: Inicio, fin y periodo del evento.....	68
Figura 27. Concentración de E. Coli Entrada y Salida .....	76
Figura 28. Gráficas de salida experimental y calibrada con Cinética única de E. Coli	77
Figura 29. Gráfica al inicio del calibrado .....	78
Figura 30. Gráfica con mejor error relativo.....	79



## RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo general realizar un estudio integral de la hidrodinámica y la eficiencia de depuración de un humedal artificial de flujo superficial (FWS CW) utilizando simulaciones con el software COMSOL Multiphysics. Este estudio se centra en la eliminación de la bacteria *Escherichia coli* (*E. coli*), un indicador común de contaminación fecal en cuerpos de agua.

Los humedales artificiales, como el FWS CW estudiado, son soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, pero su eficacia puede verse comprometida por la falta de comprensión de los procesos hidrodinámicos y biológicos que ocurren en estos sistemas. Este trabajo aborda estos desafíos con el objetivo de mejorar la calidad del agua tratada en la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de la Urbanización Los Monasterios en Puzol, Valencia.

El estudio combina métodos experimentales y simulaciones computacionales. Se realizaron mediciones en campo para construir una geometría precisa del humedal y se utilizaron modelos basados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en COMSOL para simular el flujo de agua y el transporte de contaminantes, particularmente *E. coli*. Las simulaciones se calibraron utilizando datos experimentales, incluyendo las cinéticas de procesos de degradación como la decadencia natural, la desinfección solar y la depredación.

El estudio concluye que es posible mejorar la eficiencia de depuración de *E. coli* en humedales artificiales mediante la optimización del diseño y las condiciones operativas basadas en simulaciones CFD. Además, destaca la importancia de este tipo de estudios para contribuir a la sostenibilidad ambiental y a la salud pública, asegurando que el agua tratada sea segura para su reutilización en diversos contextos.

## ABSTRACT

The general objective of this work is to carry out a comprehensive study of the hydrodynamics and purification efficiency of a surface flow artificial wetland (FWS CW) using simulations with COMSOL Multiphysics software. This study focuses on eliminating the *Escherichia coli* (*E. coli*) bacteria, a common indicator of fecal contamination in water bodies.

Artificial wetlands, such as the FWS CW studied, are sustainable solutions for wastewater treatment. Still, their effectiveness can be compromised by the lack of understanding of the hydrodynamic and biological processes that occur in these systems. This work addresses these challenges to improve the treated water quality at the Wastewater Treatment Plant (WWTP) of the Los Monasterios Urbanization in Puzol, Valencia.

The study combines experimental methods and computational simulations. Field measurements were performed to construct an accurate wetland geometry. Computational Fluid Dynamics (CFD)-based models in COMSOL were used to simulate water flow and contaminant transport, particularly *E. coli*. Simulations were calibrated using experimental data, including the kinetics of degradation processes such as natural decay, solar disinfection and predation.

The study concludes that it is possible to improve the purification efficiency of *E. coli* in constructed wetlands by optimizing the design and operating conditions based on CFD simulations. Furthermore, it highlights the importance of this type of studies to contribute to environmental sustainability and public health, ensuring that treated water is safe for reuse in various contexts.

## RESUM

El treball té com a objectiu general realitzar un estudi integral de la hidrodinàmica i l'eficiència de depuració d'un aiguamoll artificial de flux superficial (FWS CW) utilitzant simulacions amb el programari COMSOL Multiphysics. Este estudi se centra en l'eliminació del bacteri *Escherichia coli* (E. coli), un indicador comú de contaminació fecal en cossos d'aigua.

Els aiguamolls artificials, com el FWSCW estudiat, són solucions sostenibles per al tractament d'aigües residuals, però la seua eficàcia pot veure's compromesa per la falta de comprensió dels processos hidrodinàmics i biològics que ocorren en estos sistemes. Este treball aborda estos desafiaments amb l'objectiu de millorar la qualitat de l'aigua tractada en l'Estació Depuradora d'Aigües Residuals (EDAR) de la Urbanització Els Monestirs a Puçol, València.

L'estudi combina mètodes experimentals i simulacions computacionals. Es van realitzar mesuraments en camp per a construir una geometria precisa de l'aiguamoll i es van utilitzar models basats en la Dinàmica de Fluids Computacional (CFD) en COMSOL per a simular el flux d'aigua i el transport de contaminants, particularment E. coli. Les simulacions es van a calibrar utilitzant dades experimentals, incloent-hi les cinètiques de processos de degradació com la decadència natural, la desinfecció solar i la depredació.

L'estudi conclou que és possible millorar l'eficiència de depuració d'E. coli en aiguamolls artificials mitjançant l'optimització del disseny i les condicions operatives basades en simulacions CFD. A més, destaca la importància d'esta mena d'estudis per a contribuir a la sostenibilitat ambiental i a la salut pública, assegurant que l'aigua tractada siga segura per a la seua reutilització en diversos contextos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los humedales naturales son beneficiosos para mejorar la restauración ecológica; sin embargo, debido al calentamiento global y las actividades humanas más frecuentes, los humedales naturales en todo el mundo han disminuido drásticamente.

Con el agravamiento de la contaminación ambiental y la demanda de mejorar la calidad del agua para la reutilización de los recursos hídricos, se hace necesario mejorar la función de los Humedales Artificiales (CW, por sus siglas en inglés, *Constructed Wetlands*) como tecnología de purificación de aguas residuales.

La investigación en el campo del tratamiento de aguas residuales con CW se centra frecuentemente en la mejora de la calidad del agua y considera a los humedales artificiales como un sistema de caja negra. Sin embargo, el estudio de las aguas residuales como un ecosistema completo (columna de agua, vegetación y sedimentos) constituye una cuestión esencial de considerable importancia, pero a menudo pasada por alto (Arroyo et al., 2013).

La comprensión de la influencia entre los parámetros de diseño/operación y la eficiencia de la purificación en CW es crucial, ya que proporciona datos confiables para explicar la razón de las fluctuaciones en la eficiencia de la purificación. Prestar más atención a la aplicación extensiva a gran escala de CW integrados con diferentes condiciones de diseño y operación en el campo puede ser una perspectiva futura.

El énfasis en el análisis del mecanismo de funcionamiento de los CW podría ser un paso importante hacia su desarrollo, esencial para el diseño, la gestión y tratamiento. Es así por ejemplo que resulta importante un estudio de la comunidad bacteriana funcional para revelar el mecanismo de eliminación de contaminantes, lo que podría ser un paso significativo hacia la gestión y el tratamiento de CW. El desarrollo de tecnologías de tratamiento avanzado de humedales, mediante la optimización de parámetros y el análisis del mecanismo de eliminación de contaminantes, también puede ser una prioridad de investigación.

Para mejorar la eficiencia en la eliminación de compuestos difíciles de depurar, es necesario combinar los CW con varias técnicas adicionales de descontaminación del

agua como la aireación artificial y la floculación. Además, es esencial desarrollar tecnologías específicas para los diferentes grados de contaminación. En otras palabras, debería existir un sistema de revisión caso por caso.

Asimismo, se pueden combinar varios tipos de CW para lograr un mayor efecto de tratamiento, especialmente para el nitrógeno. Los sistemas híbridos comprenden con mayor frecuencia sistemas flujo vertical y flujo horizontal dispuestos de manera escalonada, pero en general, todos los tipos de humedales artificiales podrían combinarse para lograr una eficiencia de tratamiento más compleja (Vymazal, 2010).

En el contexto actual de escasez hídrica, la reutilización de aguas residuales regeneradas es una excelente oportunidad para tener garantizado un recurso hídrico para usos agrícolas o ambientales (mantenimiento de humedales, caudales ecológicos, silvicultura, recarga de acuíferos, entre otros). Por lo tanto, es crucial evaluar la capacidad de los humedales artificiales para desinfectar las aguas residuales.

Autores anteriores han realizado avances recientes en el modelado de humedales artificiales de flujo superficial (FWS CW) con dinámica de fluidos computacional (CFD), que generalmente simulan la descomposición de *Escherichia Coli* (E. Coli) a través de un proceso de reacción único (Dahl et al., 2021; Hernández-Crespo et al., 2022b; Sah et al., 2011; Wu et al., 2014).

En el presente estudio, se simula la hidrodinámica del fluido usando CFD y la bacteria *Escherichia Coli* como parámetro de calidad de agua usando la interfaz de transporte de especies diluidas donde se incluye las cinéticas de los principales procesos de degradación para el FWS CW existente en la EDAR estudiada.

### **1.1. Antecedentes**

Varios estudios han aplicado modelos CFD para analizar y mejorar el rendimiento de humedales artificiales.

Los primeros experimentos destinados a la posibilidad de tratamiento de aguas residuales mediante plantas de humedales fueron realizados por Käthe Seidel en Alemania a principios de la década de 1950 en el Instituto Max Planck en Plön (Vymazal, 2010).

En América del Norte, los FWS CW comenzaron con la ingeniería ecológica de humedales naturales para el tratamiento de aguas residuales a finales de los años 1960 y principios de los años 1970. Esta tecnología de tratamiento fue adoptada en América del Norte no sólo para las aguas residuales municipales sino también para todo tipo de aguas residuales. La tecnología de flujo subterráneo se extendió más lentamente en América del Norte, pero en la actualidad, hay miles de CW de este tipo en funcionamiento (Vymazal, 2010).

Langergraber et al., (2009) utilizó CFD para modelar la transferencia de oxígeno en el comportamiento de los patógenos en humedales de flujo superficial. Este modelo permitió predecir cómo las variaciones en la temperatura, el pH, la concentración de oxígeno y el diseño del humedal afectaban la eliminación de E. Coli, proporcionando una herramienta útil para la optimización del diseño y operación de humedales.

Otro estudio de Rousseau et al., (2004) integró la modelación CFD con datos empíricos para evaluar la eficiencia de diferentes configuraciones de humedales en la depuración de aguas residuales. Los resultados mostraron que la geometría del humedal y la distribución de la vegetación son cruciales para maximizar la eliminación de patógenos como E. Coli. Este estudio destacó la importancia de optimizar el diseño del humedal para mejorar su rendimiento.

Wu et al., (2016) utilizaron modelación CFD para estudiar el efecto de diferentes configuraciones de flujo en la eliminación de E. Coli en humedales de flujo superficial. Los resultados mostraron que las configuraciones de flujo que promovían una mayor mezcla y dispersión del agua mejoraban la eliminación de E. Coli. Este estudio proporcionó información valiosa para el diseño de humedales más eficientes y efectivos.

Estudios anteriores han demostrado altas eficiencias de los CW para la eliminación de E. Coli, especialmente en humedales de flujo superficial (FWS CW). Las eficiencias de eliminación varían entre 94 y 99,999 % para E. Coli (reducción de 2,7 a 5,4 unidades logarítmicas) para los sistemas de tratamiento generales, siendo los sistemas híbridos e intensificados los más eficientes (Hernández-Crespo et al., 2022b).

## 1.2. Definición del problema y justificación

El humedal artificial de flujo superficial (FWS CW) en estudio, ubicado en la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de la Urbanización Los Monasterios en Puzol (Valencia), presenta desafíos en la evaluación y optimización de su eficiencia de depuración, particularmente en la eliminación de *Escherichia coli*. Si bien los humedales artificiales son una solución ecológica y efectiva para el tratamiento de aguas residuales, la comprensión detallada de los procesos hidrodinámicos y de depuración que ocurren dentro de estos sistemas es limitada. Esa falta de comprensión impide la optimización de su diseño y operación, y por ende, la maximización de su eficiencia en la eliminación de contaminantes.

La necesidad de mejorar la calidad del agua tratada en instalaciones de tratamiento de aguas residuales es crucial para la protección del medio ambiente y la salud pública. Los humedales artificiales, como el FWS CW en la EDAR Los Monasterios, ofrecen una alternativa sostenible y efectiva a los métodos tradicionales de tratamiento. Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas puede verse afectada por una serie de factores hidrodinámicos y biológicos que requieren un estudio detallado para ser comprendidos y optimizados.

La *Escherichia coli* se elige como indicador de calidad de agua, especialmente para detectar contaminación fecal, debido a que es un tipo de bacteria coliforme que se encuentra de manera natural en el intestino de los humanos. Su presencia en el agua es un indicativo de contaminación fecal reciente, lo que sugiere que otros patógenos, como bacterias, virus o parásitos que también residen en el intestino, podrían estar presentes; y es lo que lo convierte en un indicador confiable de riesgo sanitario asociado al contacto o consumo de agua contaminada. Asimismo, esta bacteria es fácil de detectar y cuantificar en laboratorios usando métodos estándar, como las pruebas de fluorescencia, lo que facilita su uso rutinario en el monitoreo de la calidad del agua (Fewtrell, 2002; World Health Organization (WHO), 2022).

Diversas organizaciones internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), y agencias nacionales, como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), han adoptado *Escherichia coli* como el estándar para evaluar la calidad

del agua en términos de contaminación fecal. Esto asegura la comparabilidad y consistencia en los monitoreos de calidad de agua a nivel global.

El estudio es esencial por diversas razones:

- Proporciona conocimiento específico: Utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en COMSOL Multiphysics y experimentos de campo, se puede obtener una comprensión detallada de los procesos de depuración en el humedal. Esto incluye como el flujo del agua y la distribución de contaminantes como E. Coli varían en diferentes puntos del humedal.
- Ayuda a optimizar de Diseño y Operación: Al identificar las áreas del humedal donde la eficiencia de eliminación de E. Coli es menor, se puede proponer y aplicar mejoras en el diseño y operación del sistema, lo que lleva a una mayor eficiencia general.
- Impacto Ambiental y Salud Pública: Mejorar la eficiencia de los humedales artificiales no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también tiene un impacto directo en la reducción de riesgos para la salud pública asociados con la presencia de patógenos en el agua tratada.

Este estudio no solo aborda una necesidad específica de la EDAR Los Monasterios, sino que también contribuye a la base del conocimiento general sobre el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales, proporcionando datos y herramientas que pueden ser aplicados en otros contextos y sistemas similares.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.1. Objetivos generales**

El presente trabajo fin de máster tiene como objetivo general realizar un estudio integral de la hidrodinámica y la eficiencia de depuración de un humedal artificial de flujo superficial, utilizando simulaciones en un programa de dinámica de fluidos computacional (COMSOL Multiphysics), que servirá como estrategia efectiva y sostenible para alcanzar varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

### **2.1.2. Objetivos específicos**

Para alcanzar el objetivo general se plantea los siguientes objetivos específicos:



- Construir la geometría del humedal artificial de flujo superficial, nombrada como "laguna 1" en la EDAR de la Urbanización Los Monasterios, utilizando COMSOL Multiphysics, asegurando una representación precisa de su estructura física.
- Analizar la independencia de mallas para garantizar la estabilidad y exactitud de los resultados de la simulación hidrodinámica en COMSOL.
- Simular la hidrodinámica del humedal en COMSOL utilizando la interfaz CFD para entender el flujo de agua y su comportamiento dentro del sistema.
- Simular la calidad del agua en COMSOL, analizando específicamente la eficiencia de la depuración de E. Coli incorporado a la hidrodinámica, con el fin de conocer su concentración en cada espacio del humedal.
- Proponer recomendaciones basadas en los hallazgos del estudio para optimizar la eliminación de E. Coli y mejorar la eficiencia general del humedal artificial, lo cual no solo mejoran la calidad del agua y protegen la biodiversidad, sino que también contribuyen a la mitigación del cambio climático y al desarrollo de ciudades más sostenibles y resilientes.

### **3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

Los humedales artificiales de flujo superficial (FWS CW) contribuyen significativamente a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, y el FWS CW del presente estudio no es ajeno a estos objetivos.

A continuación, se detallan cómo este humedal se relaciona con el apoyo a algunos ODS específicos:

#### **ODS 6: Agua limpia y saneamiento**

Meta 6.3: "Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando los vertidos y minimizando la liberación de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales no tratadas y aumentando sustancialmente el reciclado y la reutilización segura del agua a nivel mundial."

Como se mencionará más adelante, los FWS CW son efectivos en la eliminación de contaminantes, incluidos nutrientes, metales pesados y patógenos, mejorando así la calidad del agua tratada.

### **ODS 13: Acción por el clima**

Meta 13.1: “Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.”

Los humedales pueden actuar como sumideros de carbono, captando carbono a través de la biomasa de las plantas y el suelo, ayudando a mitigar el cambio climático (Hu et al., 2023), así como a regular la temperatura. Sin embargo, también es importante gestionar las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de estos sistemas.

### **ODS 14: Vida submarina**

Meta 14.1: “Para 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la procedente de actividades realizadas en tierra, incluidos los desechos marinos y la contaminación por nutrientes”.

Al tratar eficientemente las aguas residuales y reducir la carga de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, y bacterias fecales, los humedales de flujo superficial contribuyen a la disminución de la eutrofización en cuerpos de agua receptoras, protegiendo así los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad marina (Hu et al., 2023).

### **ODS 15: Vida y ecosistemas terrestres**

Meta 15.1: “Para 2020, asegurar la conservación, restauración y uso sostenible de los ecosistemas terrestres y de agua dulce y sus servicios, en particular de los bosques, humedales, montañas y zonas áridas, de conformidad con las obligaciones de los acuerdos internacionales”.

Los FWS CW contribuyen a la restauración y mantener la funcionalidad de humedales naturales degradados y al mantenimiento de la biodiversidad local, proporcionando hábitats para diversas especies de plantas y animales acuáticos.

## **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles**

Meta 11.6: “Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo”.

Los humedales construidos pueden ser parte de soluciones basadas en la naturaleza en áreas urbanas, mejorando la gestión del agua y contribuyendo a la resiliencia urbana frente a inundaciones y otros eventos climáticos.

### **4. MARCO TEÓRICO**

#### **4.1. Humedales Artificiales (Constructed Wetlands)**

Los humedales artificiales son una atrayente solución en el tratamiento de aguas residuales, ya que son ecosistemas construidos por el hombre que funcionan o simulan la capacidad de los humedales naturales para eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua. Es decir, han sido diseñados y construidos para aprovechar muchos de los procesos que ocurren en los humedales naturales, pero dentro de un ambiente más controlado (Vymazal, 2007).

En comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales, los humedales artificiales son una opción sostenible y económica. Los bajos requerimientos energéticos, la sencilla operación y los trabajos de mantenimiento son algunas de las ventajas más atractivas de estos sistemas naturales. Además, los humedales artificiales mejoran la estética del paisaje circundante y producen menores cantidades de lodo (Arroyo et al., 2013).

Las características de estos ecosistemas que los hacen especialmente adecuados para el tratamiento de aguas residuales es que: son sistemas semiacuáticos que normalmente contienen grandes cantidades de agua; cuentan con suelos oxigenados y parcialmente anóxicos donde se produce la biodegradación de la materia orgánica; y sustentan una vegetación emergente alta y altamente productiva capaz de absorber grandes cantidades de nutrientes y responder al enriquecimiento con nutrientes con un crecimiento mejorado (Verhoeven & Meuleman, 1999).

Los humedales de aguas residuales generalmente funcionan bien en materia de DQO, DBO y contaminación bacteriana, pero muestran una capacidad limitada para la eliminación de nutrientes. Las altas tasas de eliminación de DQO y DBO se deben a la sedimentación de sólidos suspendidos y a los rápidos procesos de descomposición en el agua y las capas superiores del suelo. Como la eliminación de nutrientes suele ser también un objetivo importante, siempre se debe intentar optimizar los procesos de eliminación de nutrientes (Verhoeven & Meuleman, 1999).

Es así como la tecnología de Humedales Artificiales actúa como un complejo ecosistema en el que intervienen como principales actores los siguientes elementos:

- El agua para tratar, que circula a través del sustrato filtrante y/o de la vegetación.
- El sustrato, generalmente compuesto por un material diferente al terreno original (suelo, grava o arena). Este permite el enraizamiento y crecimiento de plantas acuáticas, además de la fijación de la población microbiana en forma de biopelícula, que participa en la mayoría de los procesos de depuración.

Las plantas emergentes acuáticas, que proporcionan superficie para la formación de películas bacterianas, facilitan la filtración y adsorción de los constituyentes del agua residual, contribuyen a la oxigenación del sustrato y a la eliminación de nutrientes, y controlan el crecimiento de las algas al limitar la penetración de la luz solar. Además, la vegetación contribuye notablemente a la integración paisajista de estos módulos de tratamiento. La vegetación utilizada en los humedales artificiales es la misma que coloniza los humedales naturales (carrizo, juncos, aneas, etc), desarrollándose en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo y con tallos y hojas emergiendo fuera del agua. Estos tipos de vegetación tiene buena tolerancia a la falta de oxígeno generada en suelos encharcados.

Un buen diseño conceptual de cualquier humedal de aguas residuales antes de su construcción es de suma importancia para una operación exitosa (Verhoeven & Meuleman, 1999). El diseño debe tener en cuenta el clima y estaciones, ya que la eficiencia del tratamiento depende de la temperatura; la carga de contaminantes y

sobre todo requiere monitorie y mantenimientos regulares, como la remoción de plantas muertas y sedimentos acumulados.

Los distintos tipos de humedales artificiales difieren en sus principales características de diseño, así como en los procesos responsables de la eliminación de la contaminación. Hay tres diseños básicos de sistemas de humedales artificiales: humedales de superficie de agua libre (FWS), de flujo subterráneo horizontal (HF) y de flujo subterráneo vertical (VF) (Arroyo et al., 2013).

#### **4.1.1. Humedales Artificiales de Fujo Superficial (FWS CW)**

Los Humedales Artificiales de Superficie de Agua Libre (Free Water Surface Constructed Wetlands) o también conocidos como de Flujo Superficial, tienen una configuración que consiste en una serie de estanques poco profundos donde el agua fluye lentamente por encima del sustrato, permitiendo un contacto prolongado con el sustrato y las raíces de las plantas.

En cierta medida estos humedales pueden considerarse como una variedad del sistema de tratamiento con lagunas, con las diferencias ya mencionadas en cuanto a menor profundidad de lámina de agua y a la existencia de vegetación arraigada en el fondo.

El rendimiento del tratamiento, altamente relacionado con los beneficios ecológicos y económicos, es una de las características más importantes de los FWS CW. Varios estudios han informado que los FWS CW se utilizan para eliminar una amplia gama de contaminantes, como los sólidos suspendidos (SS), compuestos orgánicos, nitrógeno y fósforo, metales pesados y patógenos. Se podría lograr una eficiencia de reducción relativamente satisfactoria por encima de 70% para SS, DQO y DBO (Kadlec & Wallace, 2009), mientras que la eficiencia en la eliminación de Nitrógeno y Fósforo se encontraban en un estado relativamente estable, fluctuando entre 40% y 50% y 40% y 60%, respectivamente.

Este tipo de humedales suelen ser instalaciones que se emplean como tratamiento terciario (reciben efluentes procedentes de tratamientos secundarios), a modo de reutilización ambiental de las aguas tratadas.

La alimentación a estos humedales puede llevarse a cabo de forma continua o intermitente y la depuración tiene lugar en el tránsito de las aguas a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente implantada.

#### **4.1.2. Humedales Artificiales de Flujo Sub-Superficial (HSSF/VSSF CW)**

Los Humedales de Flujo Subsuperficial utilizan un lecho de tierra o grava como sustrato para el crecimiento de plantas de humedal enraizadas. En estos sistemas, el agua residual fluye por gravedad, horizontal o verticalmente, a través del sustrato que viene a ser un medio granular (arena, gravilla, grava) de permeabilidad suficiente donde establece contacto con una mezcla de microorganismos facultativos que viven asociados con el sustrato y las raíces de las plantas. En estos ambientes tienen lugar diferentes procesos físicos, químicos y biológicos debido a la combinación de comunidades microbianas, plantas, suelo y sedimentos (Arroyo et al., 2013).

Este tipo de humedales se encuentran confinados en recintos impermeabilizados, que contienen al material de soporte para el enraizamiento de la vegetación. En la mayoría de los casos se emplean como tratamiento secundario de las aguas residuales de pequeñas poblaciones.

Las principales ventajas frente a los humedales artificiales de flujo subterráneo en comparación de los de flujo superficial es que, debido a la naturaleza subterránea del flujo de agua, presenta menor incidencia de malos olores, un bajo riesgo de exposición directa de las personas y disminuye la probabilidad de aparición de insectos.

Entre los inconvenientes cabe destacar que tienen mayores costes de construcción por unidad de superficie, debido fundamentalmente a la adquisición e instalación del sustrato. Otro inconveniente que es importante tener en cuenta ya que afecta su eficiencia y funcionamiento, es el riesgo de colmatación del lecho filtrante, en especial en los de flujo horizontal.

#### **4.2. Influencia de la geometría en Humedales Artificiales**

La geometría de los humedales artificiales es un aspecto crucial en su diseño y operación, ya que influye directamente en la eficiencia del tratamiento de aguas

residuales. Los humedales artificiales se diseñan en diferentes formas y tamaños, adaptándose a las condiciones del sitio y los objetivos específicos del tratamiento.

Los Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HSSF) típicamente tienen una forma rectangular alargada para maximizar el área de contacto y el tiempo de retención del agua. El agua fluye horizontalmente a través de un lecho de sustrato filtrante, en contacto con las raíces de las plantas y los macroorganismos.

Los Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical (VSSF) generalmente tienen una configuración rectangular o cuadrada. El agua se aplica en la superficie y fluye verticalmente a través del lecho del sustrato hasta ser recogida en el fondo.

Los humedales de flujo superficial (FWS) suelen ser de forma irregular o alargada, dependiendo del espacio disponible y los requisitos de tratamiento. El agua fluye sobre la superficie del sustrato, interactuando con la vegetación emergente y sumergida. El cortocircuito hidráulico y las zonas muertas hidráulicas son problemas comunes en humedales FWS de gran tamaño. La vegetación alterna y las zonas de agua abiertas a lo largo de la ruta del flujo pueden ayudar, pero las estructuras de las entradas y salidas diseñados para distribuir y recolectar el flujo en todo el ancho son componentes esenciales.

Formas muy estrechas hacen que la zona inicial se colmate enseguida porque recibe mucha carga y se pierda el volumen útil correspondiente, también provoca que se generen flujos preferenciales en superficie porque el agua no puede penetrar en el lecho filtrante.

Una relación Largo: Ancho adecuada es crucial para evitar problemas como el cortocircuito hidráulico, donde el agua fluye rápidamente a través del humedal sin suficiente tiempo de contacto con los microorganismos y las plantas. La relación L/A para humedales de flujo horizontal a nivel secundario generalmente oscila entre 2:1 y 4:1, mientras que típicamente para sistemas terciarios el ancho es mucho mayor que el largo para maximizar el área transversal y reducir el potencial colmatación debido a las altas tasas hidráulicas aplicadas. Formas muy estrechas en sistemas secundarios hacen que la zona inicial se colmate en sistema altamente cargados y se pierda el

volumen útil correspondiente, también provoca que se generen flujos preferenciales en superficie porque el agua no puede penetrar en el lecho filtrante. Muchas guías de diseño especifican una tasa de carga máxima asociada al área como una forma simple de explicación a constructores y usuarios del sistema (Dotro et al., 2021).

La geometría de los humedales de tratamiento es crucial para maximizar el tiempo de retención hidráulica y asegurar una distribución uniforme del flujo de agua.

La geometría del humedal tiene una gran influencia en la eficiencia de depuración, pues la creación de áreas de estancamiento, la formación de canales de preferencia, limitadas áreas de contacto entre agua, plantas y microorganismos son algunas de los inconvenientes que son originados por la forma del humedal.

### **4.3. Influencia de factores ambientales**

Los factores climáticos y ambientales juegan un papel crítico en el diseño y la eficiencia de los humedales de tratamiento. La adaptación a las condiciones ambientales locales, tales como el clima y la geología, es crucial para el éxito de los humedales, pues los diseños deben de considerar variaciones estacionales y geográficas para mantener una alta eficiencia de tratamiento (Vymazal, 2010).

Estos factores ambientales influyen significativamente en el diseño, operación y eficiencia de los humedales artificiales. Estos factores incluyen temperatura, precipitación, radiación solar, y características del suelo y agua.

A continuación, se describe cómo influye estos factores ambientales:

- **Temperatura.** Afecta directamente a la actividad biológica dentro de los humedales, incluyendo la tasa de descomposición de materia orgánica y la actividad microbiana. En los humedales de flujo superficial de agua libre, la eficiencia de eliminación de nutrientes como nitrógeno y fósforo también depende de la temperatura, siendo más efectiva superiores a 20°C (Yang et al., 2024).
- **Radiación solar.** Influye en la fotosíntesis de las plantas acuáticas emergentes, lo que a su vez afecta la absorción de nutrientes y la oxigenación del agua. En humedales con alta exposición solar, la actividad fotosintética es mayor,



mejorando la eficiencia en la eliminación de contaminantes por procesos de fotooxidación y fotólisis.

- Características del suelo y agua. El tipo de suelo utilizado como sustrato en los humedales afecta la comunidad microbiana y, por ende, la eficiencia de los procesos de depuración. Diferentes materiales como arena, grava y zeolita tienen propiedades físicas y químicas que influyen la diversidad y estructura de las comunidades microbianas, o favorecen la adsorción de contaminantes, impactando la eliminación de nutrientes y contaminantes (Yang et al., 2024).
- Factores climáticos. Factores como la precipitación y las variaciones estacionales afectan los niveles de agua y la dilución de contaminantes, los que puede influir en la eficiencia del tratamiento. En regiones con alta variabilidad estacional, el diseño de humedales debe considerarse la capacidad de manejar flujos variables para mantener la eficiencia durante todo el año (Yang et al., 2024)

#### **4.4. Remoción de patógenos en Humedales Artificiales**

Los organismos patógenos son microorganismos que tienen la capacidad de afectar negativamente la salud humana. Se encuentran comúnmente en las aguas residuales como un producto de excreción de seres humanos infectados o portadores de una enfermedad específica causada o generada por dichos microorganismos. En el ámbito del tratamiento de aguas residuales y la gestión de la calidad del agua, los patógenos representan una preocupación significativa debido a su potencial para propagarse a través de fuentes de agua contaminadas, lo que puede desencadenar brotes de enfermedades infecciosas.

Los patógenos en general se clasifican en tres grandes categorías: bacteria, parásitos (Protozoarios y Helmintos) y virus. Se destacan por su impacto las bacterias patógenas Salmonella, Shigella, Vibrio y Leptospira que son bastante persistentes y pueden también contaminar alimentos que han estado en contacto con aguas con algún contenido de aguas residuales (Garcia, 2010).

El principal hábitat de los organismos patógenos es el tracto intestinal, sin embargo, cuando llegan a ambientes naturales empiezan a decaer y ser eliminados, pero pueden

ser riesgosos para el hombre. Por esta razón, es de gran interés para la salud pública la persistencia y sobrevivencia de organismos patógenos en el ambiente y en las aguas residuales (García, 2010).

La eliminación de patógenos en los CW es extremadamente compleja debido a la variedad de procesos que pueden conducir a la eliminación o inactivación de bacterias, virus, protozoos o parásitos. La tecnología de humedales para tratamiento necesarios para eliminar organismos patógenos. Los factores incluyen una combinación adecuada de mecanismos físicos, químicos y biológicos, que con respecto a los físicos incluyen filtración y sedimentación, y los factores químicos incluyen oxidación y adsorción a la materia orgánica. Los mecanismos de eliminación biológica incluyen la liberación de oxígeno y la actividad bacteriana en la zona de la raíz (rizosfera), así como la agregación y retención en biopelículas, muerte natural, depredación y competencia por nutrientes limitantes u oligoelementos.

En general, se acepta que los diseños convencionales de humedales para tratamiento del tipo subsuperficial pueden eliminar hasta 3 Unidades Logarítmicas ( $\log_{10}$ ) de indicadores de bacterias fecales, pero aún se desconoce la importancia relativa de los mecanismos de eliminación específicos (Dotro et al., 2021).

Para que sea posible la remoción de contaminantes y microorganismos patógenos en los CW, deben llevarse a cabo una serie de procesos entre los principales componentes del sistema (vegetación, sustrato y microorganismo), tales como: degradación natural, fotooxidación, sedimentación, depredación y asimilación por parte de la vegetación (Montero, 2021).

Con respecto a las bacterias patógenas, éstas se podrían encontrar en partículas o en suspensión en el afluente. Cuando se encuentran en la fracción de sólidos, estos microorganismos se separan del agua mediante procesos de sedimentación, interceptación y adsorción/absorción. Posteriormente, las bacterias patógenas una vez separadas pueden quedar retenidas en las biopelículas, sustrato o podrían incorporarse al flujo. En cualquier caso, para sobrevivir deben competir con otros organismos no patógenos y soportar las condiciones ambientales de los humedales. Estas condiciones

no resultan ser las adecuadas para ellas, ya que necesitan sustratos abundantes y altas temperaturas por tratarse de microorganismos intestinales.

En conclusión, la mayoría de los microorganismos patógenos no sobrevive por falta de adaptación al medio. Algunos son depredados por otros microorganismos y aquellos cercanos a la superficie, son eliminados por el efecto foto oxidante de la radiación ultravioleta. Por otra parte, con la finalidad de conocer la remoción de patógenos en el sistema del CW, se debe de obtener una muestra líquida del afluente y efluente mediante un muestreo microbiológico, luego realizar los análisis microbiológicos de interés a cada una y comparar ambos resultados (Montero, 2021).

Ante la necesidad de conocer la calidad del agua en temas de contaminación microbiológica, se efectúa evaluaciones de indicadores de contaminación aprobados por los estándares internacionales y nacionales, por ser análisis más sencillos, rápidos, económicos y fiables.

Debido a la gran variedad y cantidad de organismos patógenos presentes en aguas residuales y cuerpos de agua contaminados, se suele emplear indicadores biológicos para determinar la presencia o ausencia de patógenos. El indicador más usado corresponde al grupo de los Coliformes Totales. Las bacterias coliformes se caracterizan por ser bacterias gram negativas de forma alargada, capaces de fermentar lactosa con producción de gas a una temperatura de 35 o 37 °C. Sin embargo, una de las principales limitaciones como indicador es que incluye microorganismos que se encuentran tanto en el suelo y agua como en el tracto intestinal, lo que puede reducir su especificidad como indicador exclusivo de contaminación fecal.

El segundo indicador corresponde a Coliformes Fecales, que son bacterias gram negativas de forma alargada capaces de fermentar lactosa con producción de gas a temperaturas más elevadas, generalmente entre 44 o 44.5 °C. Esta prueba es más específica que la de los Coliformes Totales, ya que se enfoca en organismos más estrechamente asociados con la contaminación fecal. Sin embargo, este grupo también incluye una amplia variedad de microorganismos. Se estima que cada persona descarga de 100 a 400 billones de bacteria coliformes al día, además de otros tipos de

bacterias, lo que subraya la importancia de monitorear estos indicadores en el tratamiento de aguas residuales (García, 2010).

La presencia de bacteria Coliforme (Totales o Fecales) es un indicador que organismos patógenos pueden estar presentes. Su ausencia es tomada como un indicador de que el agua está libre de organismos causantes de enfermedades. El tercer indicador, aun más específico, corresponde a *Escherichia Coli* y es más representativa de contaminación fecal, por ser exclusiva del tracto intestinal de animales de sangre caliente. Su presencia da por confirmado la presencia de heces Fecales y por tanto de patógenos (García, 2010).

En resumen, los microorganismos indicadores más comúnmente utilizados son los coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli*. Los coliformes fecales son microorganismos con una estructura muy similar a la bacteria *Escherichia coli*. Cuando los niveles de coliformes fecales es baja, indican ausencia de microorganismos patógenos, este análisis es directo y simple de realizar, pero, su presencia en sistemas acuáticos indica contaminación de origen fecal.

La desinfección del agua es importante para proporcionar agua recuperada segura para el riego agrícola, para proteger el medio ambiente y la salud humana y animal (Reglamento UE 2020/741). Este reglamento ha seleccionado huevos de *E. Coli* y nematodos intestinales como indicadores de la calidad del agua regenerada, y *Legionella spp.* sí existe riesgo de aerosolización. También prevé un seguimiento de validación basado en diferentes indicadores de patógenos (*E. Coli* para bacterias, colifagos para virus patógenos y esporas de *Clostridium perfringens* o bacterias reductoras de sulfato formadoras de esporas para protozoos) para instalaciones de recuperación nuevas o renovadas.

#### **4.5. Modelación basada en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**

Existen diversos modelos matemáticos y de simulación que se utilizan para estudiar y diseñar humedales artificiales. Estos modelos ayudan a comprender mejor los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales, así como a predecir su desempeño en la depuración de aguas residuales.

Como herramienta complementaria a las técnicas experimentales, existen los modelos basados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Los modelos CFD utilizan métodos numéricos para aproximarse a las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos. Utilizan las ecuaciones de continuidad y conservación de la cantidad de movimiento, además de incorporar las ecuaciones constitutivas apropiadas. De este modo, es posible hacer predicciones de las propiedades del fluido y visualizar su comportamiento con grandes detalles dentro de un dominio definido (Salcedo et al., 2017).

La ejecución de un análisis CFD cuenta con tres etapas. La primera de ellas consiste en un planteamiento previo para determinar cómo abordar el problema a simular, en donde se genera y define la geometría, se selecciona el fluido a modelar y el tipo de flujo definiendo así las ecuaciones que gobiernan el caso de estudio, se establecen las condiciones iniciales y de contorno y se genera la malla de volúmenes finitos.

La segunda etapa es la principal de la modelación, ya que consiste en la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema.

La tercera etapa es el análisis de los resultados, estos resultados obtenidos se corresponden con el valor de las variables de campo (velocidad, temperatura, presión, etc) determinados en cada punto de la malla. Una parte importante de esta etapa es la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, para tener una visión rápida y amena de los resultados obtenidos. Parte del análisis también incluye, la comparación de los resultados obtenidos con estudios previos, resultados experimentales y resultados tabulados existentes en normativas (Andrade Rosero, 2021).

#### **4.6. COMSOL Multiphysics**

Existen diferentes Software comerciales y de código abierto, cada uno con sus ventajas y desventajas. Sin embargo, para la modelización de nuestro caso de estudio, se ha utilizado el módulo de CFD de COMSOL Multiphysics, que permite el modelado de problemas de flujo de fluidos estacionarios y dependientes del tiempo en espacios bidimensionales y tridimensionales.

COMSOL Multiphysics es un software potente y versátil que permite realizar simulaciones virtuales de cualquier fenómeno físico, incluyendo el movimiento de fluidos.

La estructura sobre la que COMSOL trabaja es un Sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales que describe matemáticamente varios fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia. Siendo una de sus ventajas la simplificación del desarrollo de aplicaciones a través de uso de bibliotecas de modelos, que incorpora ejemplos de diversas áreas de aplicación. A través de ellos, sin necesidad de tener conocimientos profundos sobre matemáticas o análisis numérico, se puede construir el modelo requerido.

Las características principales de COMSOL para CFD son las siguientes:

- **Interfaz intuitiva.** La interfaz gráfica permite la construcción y visualización de modelos de manera intuitiva, facilitando la configuración de simulaciones complejas sin necesidad de codificaciones extensas.
- **Multifísica.** Una de las principales ventajas de COMSOL es su capacidad para combinar CFD con otras físicas como el transporte de especies químicas, transferencia de calor y electroquímica, reduciendo la necesidad de transferir datos entre diferentes programas, lo cual es muy útil en aplicaciones donde múltiples fenómenos interactúan.
- **Construcción de malla.** Ofrece herramientas avanzadas para la generación de mallas, lo que permite una mejor resolución de detalles en geometrías complejas y una mayor precisión en los resultados.
- **Procesado y visualización de datos.** Permite visualizar y analizar los resultados de manera detallada, incluyendo la creación de gráficos, animaciones y estudios paramétricos.

Con relación a su interfaz física, esta se basa en las leyes de conservación de la cantidad de movimiento, la masa y la energía. Estas leyes se expresan mediante ecuaciones diferenciales parciales, junto con las condiciones iniciales y de contorno especificadas.

Dentro del módulo CFD de dinámica de fluidos se ha utilizado la interfaz de *Flujo laminar (spf)* para el cálculo de velocidades dentro del FWS CW. Además, se ha utilizado la interfaz de *Transporte de especies diluidas (tds)* para la simulación de E. Coli.

La interfaz de *Flujo laminar* nos permite calcular los campos de velocidad y presión para el flujo de un fluido monofásico en el régimen laminar. Dichos campos son calculados mediante las ecuaciones de Navier-Stokes de continuidad y de momento. Dichas ecuaciones describen como la temperatura, velocidad, presión y densidad de un fluido en movimiento se encuentran relacionadas (Andrade Rosero, 2021).

La ecuación de continuidad Ec. (1), representada en la forma llamada Euleriana de la ley de conservación de la masa, describe un fenómeno de transporte de partículas que no se crean ni se destruyen. En la ecuación de conservación del momento Ec. (2), los términos de la izquierda representan la aceleración del fluido, el primer término corresponde al término temporal y el segundo al de aceleración convectiva. Mientras que los términos de la derecha corresponden al gradiente de presión, tensiones viscosas y otras fuerzas corporales respectivamente.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{F} \quad (2)$$

Donde:

$\rho$ es la densidad (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ es la capacidad calorífica específica a presión constante (K/(Kg·k))
$\mathbf{u}$ es el vector de velocidad (m/s)	$T$ es la temperatura absoluta (K)
$p$ la presión (Pa)	$\mathbf{q}$ es el vector de flujo de calor (W/m <sup>2</sup> )
$\mathbf{F}$ es el vector de fuerza de volumen (N/m <sup>3</sup> )	$\mathbf{Q}$ contiene las fuentes de calor (W/m <sup>3</sup> )

Bajo condiciones normales el agua se comporta como un flujo incompresible, reduciendo las ecuaciones de la continuidad de la masa Ec. (1) en la Ec. (3), y la conservación del momento Ec. (2), en la Ec. (4).

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + F \quad (4)$$

La interfaz de *Transporte de especies diluidas* permite estudiar la evolución de especies químicas transportadas por difusión y convección. En ella se asume que todas las especies, en este caso E. Coli, están diluidas.

En esta interfaz COMSOL siempre incluye el transporte de masa debido a la difusión molecular. En este caso, el flujo de masa  $\mathbf{J}_i$  define el vector de flujo difusivo. La *Ley de Fick* gobierna la difusión de los solutos, mezclas diluidas o soluciones. Esta ley afirma que la densidad de corriente de partículas es proporcional al gradiente de concentración Ec. (5).

$$J_i = -D\nabla C \quad (5)$$

De tal modo, la ecuación de conservación de masa queda descrita en la Ec. (6).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot J_i + \mathbf{u} \cdot \nabla C_i = R_i \quad (6)$$

El nodo de *Reacciones* en la interfaz de transporte de especies diluidas en COMSOL Multiphysics es fundamental para modelar cómo las concentraciones de especies químicas o biológicas (como E. Coli) cambian debido a reacciones dentro del dominio. El campo de *Tasa de reacción*  $R_i$  (*Reaction Rate en mol/ (m<sup>3</sup>.s)*) de este nodo, permite definir las tasas de reacción que afectan a las especies modeladas, proporcionando una forma de simular procesos como la degradación, la descomposición, o cualquier otro tipo de reacción que modifique la concentración de la especie. Describe cómo cambia la concentración de una especie debido a reacciones químicas o biológicas. En el contexto de E. Coli, esto podría representar su decadencia natural, depredación, desinfección solar, o cualquier otro proceso que reduzca la concentración de la bacteria. COMSOL permite definir la tasa de reacción en cinéticas de primer orden y de orden superior.

Las ecuaciones de Navier Stokes conforman un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales parciales no lineales que proporcionan un modelo matemático completo



de flujo de fluidos. No existe una solución analítica para las cuatro variables independientes de estas ecuaciones (excepto en casos especiales). Sin embargo, la utilización de modelos CFD hace posible generar soluciones numéricas que habrían sido demasiado complejo de calcular previamente (Andrade Rosero, 2021).

Para reproducir el funcionamiento del ingreso de agua a nuestro humedal de estudio (laguna 1), utilizamos la herramienta de COMSOL denominada "*Eventos*", la cual nos permite definir cambios instantáneos en las variable o parámetros del modelo cuando se cumple una condición específica. Su uso es generalmente para introducir discontinuidades o cambios instantáneos en una simulación. Esta herramienta es especialmente útil para modelar fenómenos que involucran cambios abruptos o que dependen de ciertas condiciones que cambian con el tiempo.

COMSOL te permite definir dos tipos de *Eventos*:

**Eventos Temporales:** Se activan en un tiempo específico.

**Eventos Condicionales:** Se activan cuando una condición lógica se cumple durante la simulación.

Los beneficios del empleo de *Eventos* es que nos permite simular cambios abruptos con precisión, capturando fenómenos que no pueden ser modelados con ecuaciones continuas. Asimismo, las interfaces de COMSOL facilitan la definición y gestión de estados discretos y eventos explícitos, haciendo más sencillo manejar sistemas complejos.

#### **4.7. Legislación sobre coliformes fecales para uso de aguas residuales**

El agua es un recurso limitado y vital tanto para la salud humana como para el equilibrio medioambiental, Sin embargo, su uso intensivo está llevando a situaciones cada vez más de estrés hídrico e incluso de escasez, cada vez más frecuentes, en todos los continentes del planeta. La Unión Europea (UE) no es ajena a esta problemática, ya que un tercio de su territorio enfrenta escasez de agua debido a la creciente demanda por parte de la población y los efectos del cambio climático. Este cambio está provocando sequías cada vez más intensas y frecuentes, cuyos daños

medioambientales superan ampliamente las pérdidas económicas (Comisión Europea, 2018).

Es por ello que en la última década la búsqueda de nuevas fuentes alternativas de agua dulce ha llevado a diferentes países a proponer la recuperación del agua de salida de EDAR como una vía para reducir la escasez hídrica y establecer regulaciones y normativas respecto a esta actividad. En España, la reutilización del agua residual urbana se regula a través del Real Decreto de Reutilización 1620/2007 (RD 1620/2007, 2007), donde se establecen los límites máximos permitidos en distintos parámetros microbiológicos y fisicoquímicos que el agua tratada debe cumplir para ser reutilizada en diferentes sectores/actividades. Esto se debe al hecho de que esta fuente de agua no es apta para muchas actividades tales como usos urbanos, domésticos, industriales y riego en agricultura sin un tratamiento previo debido a los altos niveles de contaminación tanto química como microbiológica que presentan. Por ello es imprescindible la incorporación de un tratamiento terciario que permita alcanzar niveles seguros para evitar problemas de salud medioambiental.

El Real Decreto 1620/2007, aprobado el 7 de diciembre de 2007, regula el régimen jurídico del uso de aguas regeneradas en España. Este decreto es clave para fomentar la reutilización de aguas tratadas, asegurando que se realice de manera segura y sostenible, pues establece los requisitos de calidad que deben cumplir las aguas regeneradas para su uso en diferentes aplicaciones, como el riego agrícola, usos urbanos (como riego de jardines y limpieza de calles), usos industriales, recarga de acuíferos y usos recreativos (como campos de golf). Estos requisitos de calidad vienen definidos por parámetros que incluyen límites para contaminantes microbiológicos, físicos y químicos, adaptados al tipo de uso que se le vaya a dar al agua.

La regeneración y reutilización de agua residual tratada se ha identificado como una fuente hídrica alternativa crucial por dos razones fundamentales: incrementar la disponibilidad de agua y reducir el nivel de contaminación medioambiental al disminuir el volumen de descarga de aguas residuales. Por tanto, un mayor aprovechamiento del agua residual regenerada en actividades tales como el riego de cultivos de jardines,

el control de incendios, lavado de automóviles o la limpieza de calles, contribuiría notablemente a disminuir el uso agua potable y mejorar la calidad medioambiental.

Dada esta predominancia de las aguas reutilizadas en el sector agrícola, en mayo de 2020, se publicó el Reglamento del Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua, aplicado desde junio de 2023 (Reglamento UE 2020/741), cuyo objetivo es garantizar que las aguas regeneradas sean seguras para el riego, la salud humana, y la animal, promover la economía circular y contribuir al desarrollo sostenible, promover la economía circular, contribuir a los objetivos de la Directiva 2000/60/CE y al objetivo de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

En lo que al consumo humano en crudo y con contacto directo con el agua regenerada se refiere, la legislación europea es más exigente en varios aspectos, reduciendo los niveles de tolerancia tanto en sólidos en suspensión, turbidez y E. Coli, además de añadir un nivel exigible de DBO<sub>5</sub> más estricto del que se impone en la normativa española.

A continuación, se muestra algunos de los valores máximos admisibles indicados en el Real Decreto de Reutilización 1620/2007, siendo los valores de interés el riego de campos de golf, que es uno de los usos que se le da al agua tratada de la EDAR Los Monasterios.

**Tabla 1. Valor máximo admisible para uso residencial y servicios de riego (RD 1620/2007)**

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES <sup>1</sup>	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
<b>1.- USOS URBANOS</b>					
CALIDAD 1.1: RESIDENCIAL <sup>2</sup> a) Riego de jardines privados. <sup>3</sup> b) Descarga de aparatos sanitarios. <sup>3</sup>	1 huevo/10 L	0 (UFC <sup>4</sup> /100 mL)	10 mg/L	2 UNT <sup>5</sup>	OTROS CONTAMINANTES <sup>6</sup> contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas <sup>7</sup> deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <sup>8</sup> <i>Legionella spp.</i> 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización)
CALIDAD 1.2: SERVICIOS a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos y similares). <sup>9</sup> b) Baldeo de calles. <sup>9</sup> c) Sistemas contra incendios. <sup>9</sup> d) Lavado industrial de vehículos. <sup>9</sup>	1 huevo/10 L	200 UFC/100 mL	20 mg/L	10 UNT	

**Tabla 2. Valor máximo admisible para uso de riego agrícola (RD 1620/2007)**

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				OTROS CRITERIOS
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCMERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	
<b>2.- USOS AGRÍCOLAS<sup>1</sup></b>					
CALIDAD 2.12 a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.	1 huevo/10 L	100 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases <sup>2</sup> con los siguientes valores: n=10 m=100 UFC/100 mL M=1.000 UFC/100 mL c=3	20 mg/L	10 UNT	OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> 1.000 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización) Es obligatorio llevar a cabo la detección de patógenos Presencia/Ausencia (Salmonella, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=1.000

**Tabla 3. Valor máximo admisible para uso de riego en campos de golf (RD 1620/2007)**

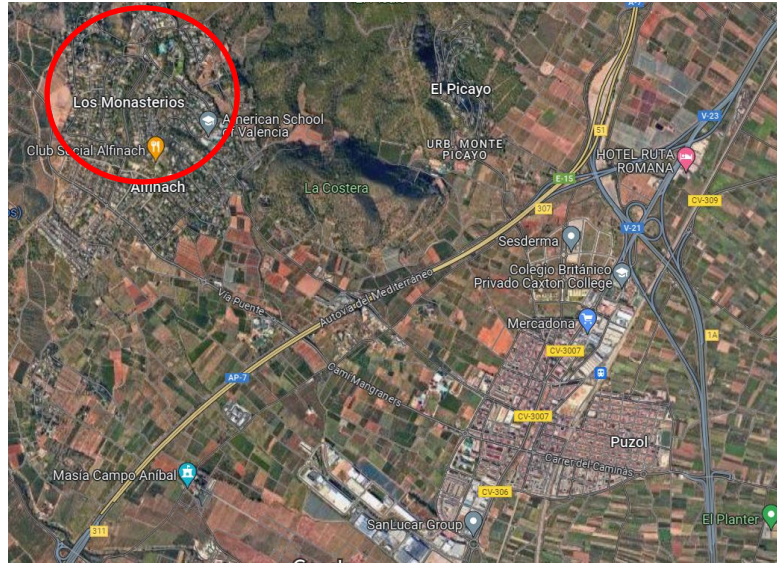
USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				OTROS CRITERIOS
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	
<b>4.- USOS RECREATIVOS</b>					
CALIDAD 4.1 <sup>1</sup> a) Riego de campos de golf.	1 huevo/10 L	200 UFC/100 mL	20 mg/L	10 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. Si el riego se aplica directamente a la zona del suelo (goteo, microaspersión) se fijan los criterios del grupo de Calidad 2.3 <i>Legionella spp.</i> 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización)
CALIDAD 4.2 a) Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua.	No se fija límite	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. P <sub>T</sub> : 2 mg P/L (en agua estancada)

La reutilización del agua no solo incrementa la disponibilidad de los recursos hídricos, sino que también ofrece importantes beneficios ambientales. Sin embargo, la valoración de estos beneficios a suele ser compleja, lo que representa un obstáculo para justificar políticas de inversión y mecanismos de financiación adecuados para promover los proyectos de reutilización de agua. La cuantificación monetaria de estos beneficios a través de la reutilización de agua resulta clave para demostrar la utilidad y viabilidad de este tipo de actuaciones.

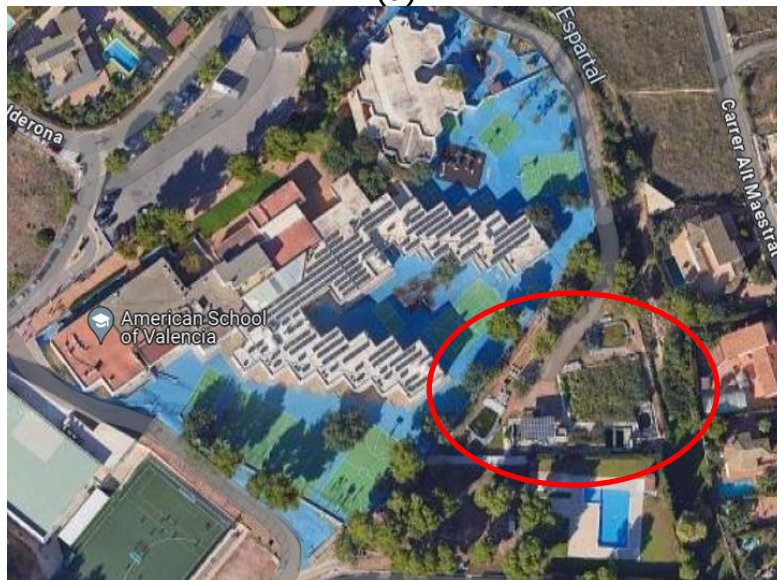
## 5. ÀREA DE ESTUDIO

El caso de estudio se enfoca en el humedal artificial de flujo superficial (FWS CW) identificado también como "Laguna 1", que forma parte de las instalaciones de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de la Urbanización Los Monasterios. Esta instalación se encuentra en la localidad de Puzol, Valencia, a aproximadamente de 30 minutos de la Universidad Politécnica de Valencia (Figura 1).





(a)



(b)

Figura 1. Ubicación. (a) Urb. Monasterios – Puzol. (b) EDAR Los Monasterios

El humedal artificial utilizado en este estudio es un humedal de flujo superficial construido como parte de una EDAR para tratar aguas residuales domésticas de la Urbanización Los Monasterios. El volumen del humedal es de 24 m<sup>3</sup> y está plantado con vegetación emergente, principalmente enea (*Thypha spp.*), que son conocidas por su capacidad de soportar altos niveles de contaminantes y su eficacia en la eliminación de patógenos.

La EDAR Los Monasterios trata exclusivamente aguas residuales urbanas de 480 parcelas incluido el colegio American School of Valencia que se encuentra contiguo a la EDAR (Figura 1b). La producción de agua tratada es alrededor de 100,000 litros diarios que luego son reutilizados para el riego de las áreas verdes del club de campo de la urbanización y las áreas verdes de la propia comunidad.

El sistema de tratamiento consta de (Figura 2):

- **Pretratamiento:** Rejilla de limpieza automática y trampa de grasas.
- **Tratamiento secundario:** Oxidación Total, con una superficie cubierta con macrófitos para optimizar la energía de la aireación, seguida de un Decantador.
- **Tratamiento terciario:** Humedal de flujo subsuperficial.



(a)



(b)



(c)



(d)





(e)



(f)

Figura 2. Unidades de tratamiento EDAR Monasterios. (a) Rejilla. (b) Balsa de homogenización. (c) Ingreso al reactor tratamiento secundario. (d) Decantador y salida del reactor. (e) Humedal de flujo subsuperficial. (f) Esquema del proyecto Life Renaturwat

Con fines investigativos, en el marco del proyecto LIFE Renaturwat, en los últimos dos años se ha implementado tres humedales adicionales: un humedal de flujo vertical (VFCW), que utiliza fango de una potabilizadora como parte de sustrato, y dos humedales de flujo superficial (FWS CW) denominados laguna 1 y laguna 2.

El proyecto LIFE tiene como objetivo demostrar que es posible obtener agua regenerada de los efluentes de EDAR a través de la combinación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) y residuos industriales, a fin de producir agua de alta calidad y apta para usos ambientales, como la recuperación y la conservación de humedales. El proyecto integra los principios de la economía circular, busca generar nuevos recursos con alto valor natural de flujos de aguas residuales, para obtener un flujo de agua naturalizada y un hábitat rico en biodiversidad como zona de transición entre la zona "industrial" (EDAR) y el entorno natural receptor.

Como se observa en la Figura 3, el VFCW desagua a una arqueta de donde una bomba extrae el agua y lo dirige hacia el FWS CW (laguna 1) a donde ingresa a través dos tuberías de manera discontinua; es decir, con bombeos a caudal constante durante una hora, seguidos de una hora de paro. El caudal excedente se desvía para evitar desbordamientos en la arqueta de salida del VFCW. Los tiempos de funcionamiento y paro de la bomba se han establecido para asegurar que siempre haya volumen suficiente en la arqueta de impulsión y, al mismo tiempo, se consiga un funcionamiento

correcto del VF CW (sin zonas secas y sin calado por encima de la capa de material granular).

El FWS CW que es materia de investigación del presente estudio cuenta también con una arqueta de salida en donde se realiza mediciones de caudal usando un vertedero triangular y sondas que miden altura de agua; además que, con el paso del tiempo, el crecimiento de la vegetación ha provocado la formación de cinco islas. La Figura 4 muestra algunas vistas del FWS CW o Laguna 1, la misma que será representada cuando se construya la geometría del modelo en el apartado 7.1.2.

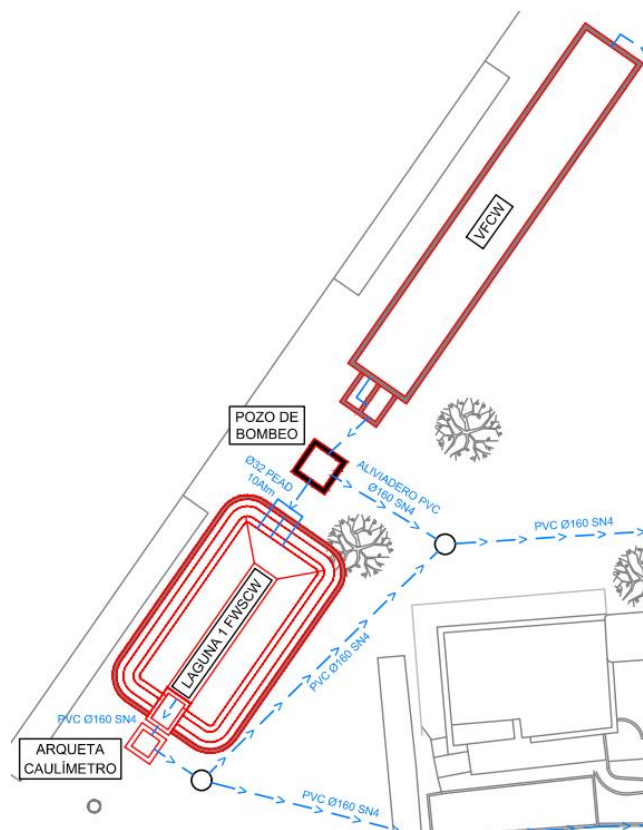


Figura 3. Esquema de distribución del CF CW y FWS CW (laguna 1)





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4. FWS CW (Laguna 1). (a) Arqueta de entrada. (b) Rampa de las dos entradas de agua. (c) Arqueta de salida. (d), y (f) Vistas de islas formadas por vegetación

## 6. METODOLOGÍA

Con la finalidad de cumplir con los objetivos antes citados, la presente investigación combina tanto métodos experimentales como simulaciones computacionales para analizar y optimizar el rendimiento del humedal.

El agua residual utilizada por el humedal del estudio (FWS CW) proviene del efluente de otro humedal de flujo subsuperficial (VSSF CW), cuyas características del agua residual incluyen una concentración variable de E. Coli, con parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura y oxígeno disuelto monitoreados regularmente.

Para la parte experimental se usaron equipos con sensores de Conductividad, pH, temperatura y oxígeno disuelto (OD) para monitorear las condiciones del agua. Para medir concentración de contaminantes se tomaron muestras de agua en frascos estériles. A partir de estos datos, se realizó un análisis con el fin de que los datos puedan ser utilizados para la calibración y como condiciones de contorno de los modelos implementados.

Se usa el software COMSOL Multiphysics para la simulación y análisis de la hidrodinámica y el transporte de contaminantes en el humedal. Se realizaron mediciones en campo para poder construir una geometría del humedal lo más similar posible a la realidad. Una vez construida la geometría, se selecciona la malla, se comprobó la calidad del mallado y se realizaron pruebas de independencia de malla que permitieron asegurarse de que el mallado implementado sea de calidad y optimice recursos de tiempo computacionales.

El primer paso en la realización del modelo CFD consiste en un planteamiento previo para saber cómo tratar el problema a simular. Una vez seleccionada la malla de elementos finitos, el fluido a modelar y el tipo de flujo, se define las condiciones iniciales y de contorno, se selecciona un solucionador, y visualiza los resultados.

Para simular el transporte de los componentes, se utilizó la herramienta de COMSOL *transporte de especies diluidas*. Tal es el caso de la simulación de E. Coli donde se partió de una reacción biológica con una cinética de primer orden. Una vez calibrado en esta cinética, se realizó una calibración del modelo utilizando las velocidades

cinéticas de los principales mecanismos de eliminación como son la decadencia natural, desinfección solar por fotooxidación y depredación. Se realizó también una búsqueda bibliográfica con la finalidad de encontrar valores típicos de las constantes de velocidad de las cinéticas mencionadas para la remoción de coliformes fecales.

## **6.1. Análisis de los datos disponibles del humedal**

### **6.1.1. Caudales afluentes al humedal**

El caudal de entrada utilizado para las simulaciones fue calculado a partir de un procesamiento de datos registrados por una campaña de monitorización que comenzó el 17 de octubre de 2022 y está prevista su finalización el 30 de septiembre de 2024.

En nuestro caso de estudio, se procesaron los datos recopilados por los *dataloggers* conectados a una sonda de ultrasonido. Esta sonda mide la distancia hasta la interfase agua – aire, lo que permite calcular el calado o altura de la lámina de agua dentro de las arquetas, dado que se conoce la distancia entre el sensor y el fondo de la arqueta. La sonda está ubicada en la arqueta de salida del *FW SCW* y realiza mediciones de manera continua, con un intervalo de medición de 2 minutos.

En cuanto a la salida de los *FW/SCW*, esta se produce por gravedad hacia la arqueta de salida donde se encuentran el vertedero triangular y la sonda de ultrasonido (Figura 5a). En función de los caudales de entrada, la salida puede ser continua o discontinua, ya que es necesario que se alcance cierto nivel para que se produzca el desagüe desde la balsa hacia la arqueta.





(a)



(b)

*Figura 5. Medición de caudal. (a) Vertedero triangular y sonda ultrasonido. (b) bomba en arqueta de entrada a Laguna 1*

En el caso de la Laguna 1, el punto de funcionamiento de la bomba es muy variable para los caudales con los que se está trabajando, y pequeñas variaciones en el sistema llevan a cambios significativos en el caudal de entrada a la laguna. En cualquier caso, los caudales medios diarios se calculan siempre a partir de los volúmenes totales.

Tal como se muestra en la Figura 6, de todos los datos disponibles se tomó el intervalo desde el 25 de enero de 2024 (día en que se realizó el segado de la vegetación que forma las islas en el FWS CW) hasta el 23 de febrero de 2024, fecha en que se da inicio las primeras simulaciones.

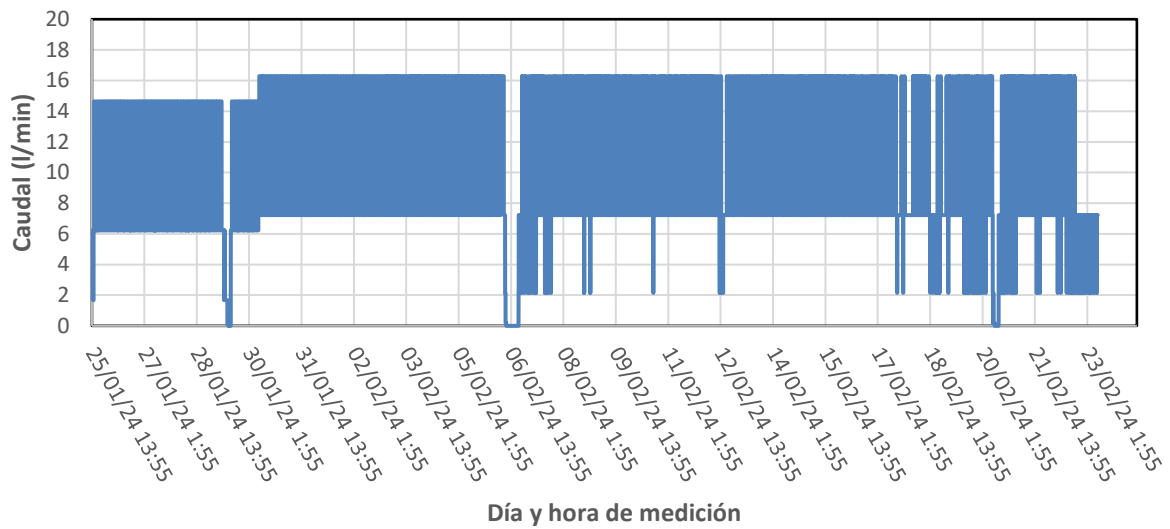


Figura 6. Registro de caudales medidos desde el 25/01/24 al 23/02/24.



Figura 7. Registro de caudales medidos desde el 30/01/24 al 06/02/24.

Como ya se explicó antes, el agua que ingresa es a través dos tuberías de manera discontinua; es decir, con bombes a caudal constante durante una hora, seguidos de una hora de paro, lo que se puede observar mejor en la Figura 7, en un intervalo más corto de la Figura 6.

El caudal medio se determinó a partir de la Figura 6 y mediante las Ec. (7), Ec. (8) y Eq. (9) siendo el valor obtenido de 9.36 l/min (13.47 m<sup>3</sup>/d), lo que significa que el caudal que se bombea cada hora es dos veces el caudal medio, es decir 18.71 l/min,

coincidiendo bastante bien con las lecturas de caudal que se tomaba en las visitas a la EDAR.

$$Vac_i = Q_i \cdot \Delta t + (Q_{i+1} - Q_i) \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (7)$$

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i \quad (8)$$

$$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^n Vac_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (9)$$

Donde:

- Vac es el volumen acumulado en un intervalo de tiempo  $\Delta t$
- $Q_i$  es el caudal en el instante  $t_i$
- $Q_m$  es el caudal medio en un tiempo acumulado

Como ya se ha indicado antes, el FWS CW (laguna 1) cuenta con dos entradas de agua (Figura 8) bombeadas desde una arqueta y para conocer la distribución del caudal por las dos tuberías de entrada, se realizaron mediciones de caudal en campo, en distintos días y en las dos entradas de agua (izquierda y derecha) con intervalos de tiempo representativos.

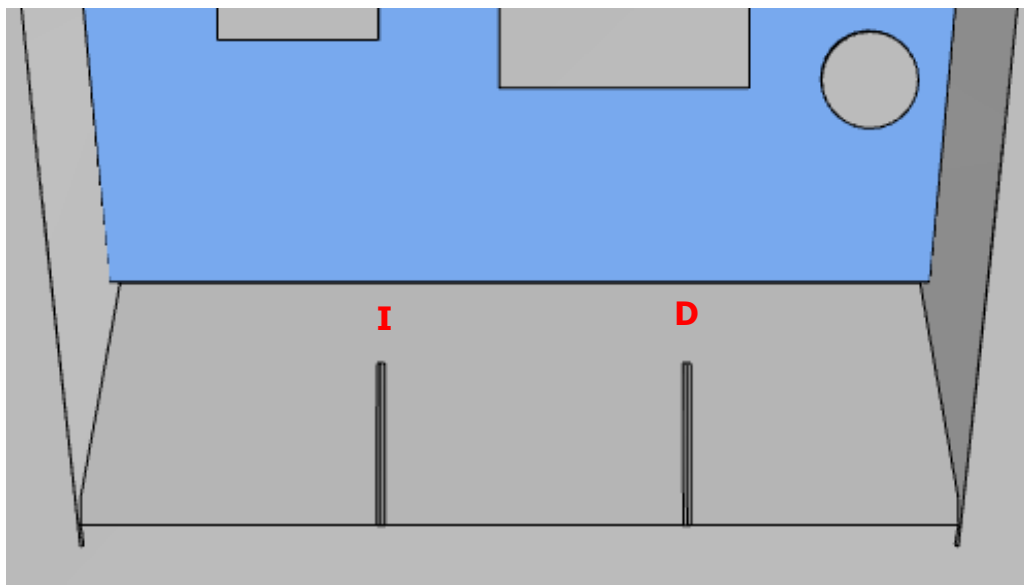
Estas mediciones fueron realizadas utilizando el método de volumen acumulado en un intervalo de tiempo, haciendo hasta 6 repeticiones (Tabla 4).

Finalmente se decidió tomar como dato la distribución la medición realizada el día 02.04.2024 ya que las mediciones muestran consistencia en los caudales, con desviaciones relativamente pequeñas, indicando estabilidad en el sistema durante las mediciones.

Las mediciones indican que la entrada izquierda (64.7%) tiene una mayor contribución al caudal total que la entrada derecha (35.3%) y que el Caudal promedio total proporciona un valor que se asemeja al calculado mediante las ecuaciones Ec. 7, 8 y 9.

**Tabla 4. Medición de caudal en entradas al humedal**

Nº Prueba	Tiempo (seg)	Entrada izquierda		Entrada derecha	
		Vol. Acum (ml)	Qizq (l/min)	Vol. Acum (ml)	Qder (l/min)
1	10	1770	10.62	920	5.52
2	11	2050	11.18	1070	5.84
3	10	1840	11.04	980	5.88
4	10	1890	11.34	1010	6.06
5	10	1840	11.04	1050	6.30
6	10	1830	10.98	1100	6.60
Desviación		<b>0.24</b>		<b>0.38</b>	
Promedio		<b>11.03</b>		<b>6.03</b>	
%Aporte		<b>64.7%</b>		<b>35.3%</b>	



(a)



(b)

Figura 8. Entrada de agua Izquierda (I) y Derecha (D) representada en geometría COMSOL (a) y el real (b)

## 6.2. Construcción del modelo

### 6.2.1. Construcción de la geometría

En la Figura 9 se muestran dos fotografías que ilustran la laguna durante su proceso de construcción. La laguna está delimitada por dos lados laterales inclinados con la misma pendiente; asimismo, tiene un lado con una mayor longitud inclinada de pendiente constante por donde entra el flujo de agua mediante dos tuberías apoyadas en la rampa de entrada; mientras que en el otro lado se encuentra una arqueta con una tubería situada en la parte inferior, por donde sale el agua tratada. Este último lado también está inclinado con una pendiente constante. En el interior de la laguna se han creado dos islas: una de mayor tamaño de forma piramidal, ubicada en la zona plana cerca de la arqueta de salida, y otra más pequeña situada sobre la rampa de entrada.



(a)





(b)

Figura 9. Laguna 1 en la fase de construcción. (a) Vista general. (b) Vista arqueta de salida y rampa ingreso.

Antes de implementar la geometría de la laguna en COMSOL Multiphysics se llevaron a cabo mediciones en el terreno para obtener una batimetría precisa, para lo cual se consideró cinco puntos transversales diferentes (P1, P2, P3, P4 y P5) a lo largo de la laguna. Manteniendo fija la posición (x) de cada punto, se midió la profundidad de la laguna (z) en función de la distancia (dy) al punto fijo. En la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos para la laguna 1. La sección correspondiente al punto P2 representa la zona de calado constante, mientras que las secciones de los puntos P3, P4 y P5 se sitúan sobre la rampa de entrada.

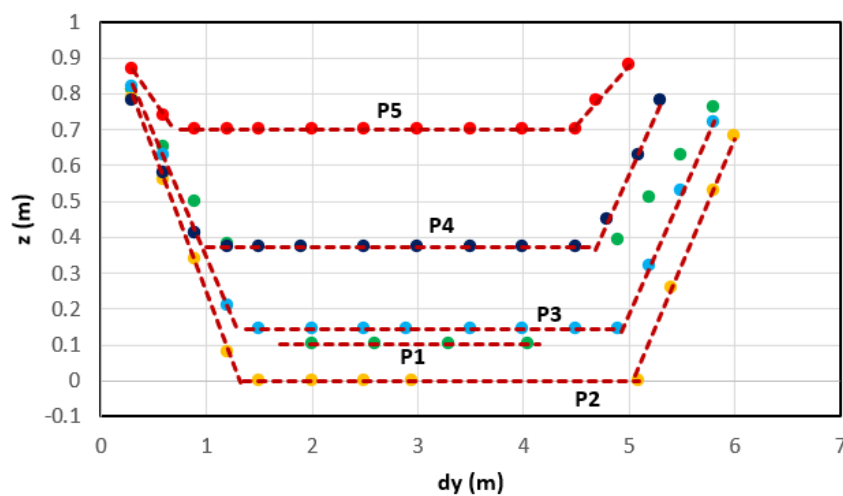


Figura 10. Resultados de la batimetría de la laguna 1.

En la Figura 11 se presenta la posición de los puntos medidos en la periferia de la laguna. El punto P0 representa la zona de entrada de la laguna que no está cubierta por agua, mientras que el punto P5 corresponde con la sección donde se encuentra ubicada la tubería de salida. Además de esto, se realizaron mediciones para determinar y delinear la geometría de las dos islas, la arqueta de salida, de la zona curvada situada entre los puntos P3, P4 y P5, así como los dos puntos de entrada de agua a la laguna.

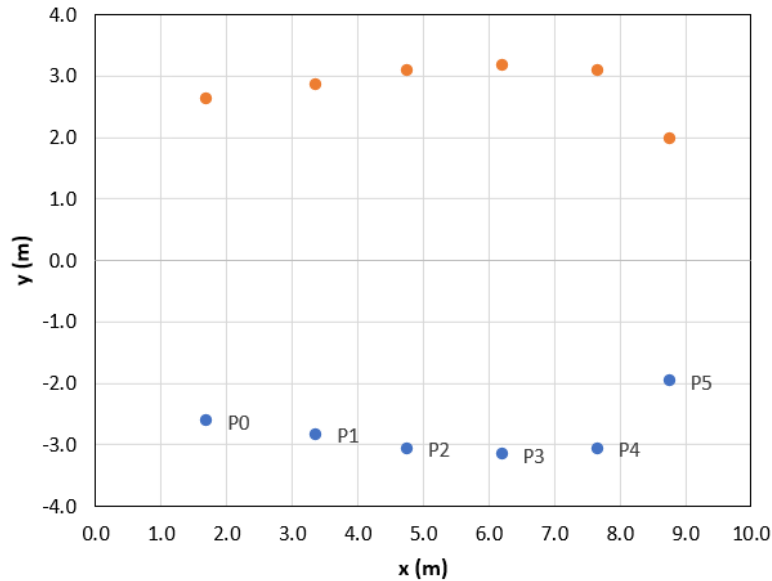
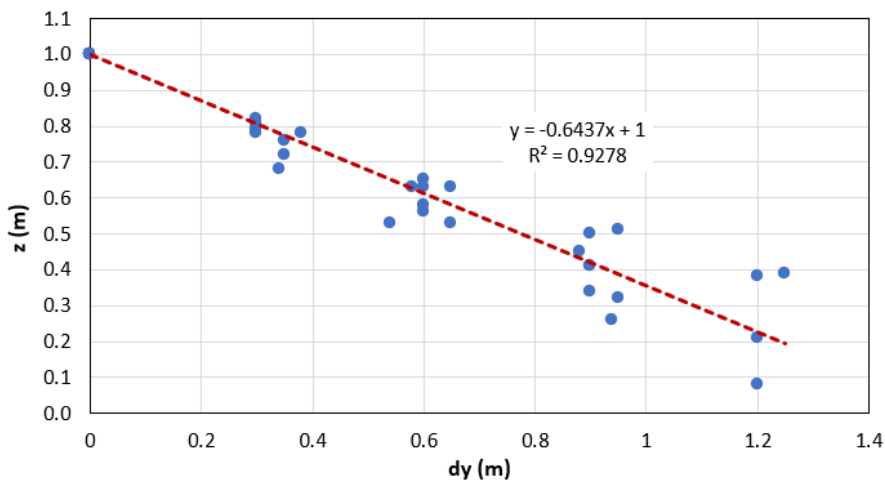


Figura 11. Puntos de la periferia de la laguna 1.

A partir de las mediciones realizadas en la batimetría se determinó la pendiente lateral de la laguna (Figura 12a) y la pendiente de la rampa de entrada (Figura 12b).



(a)

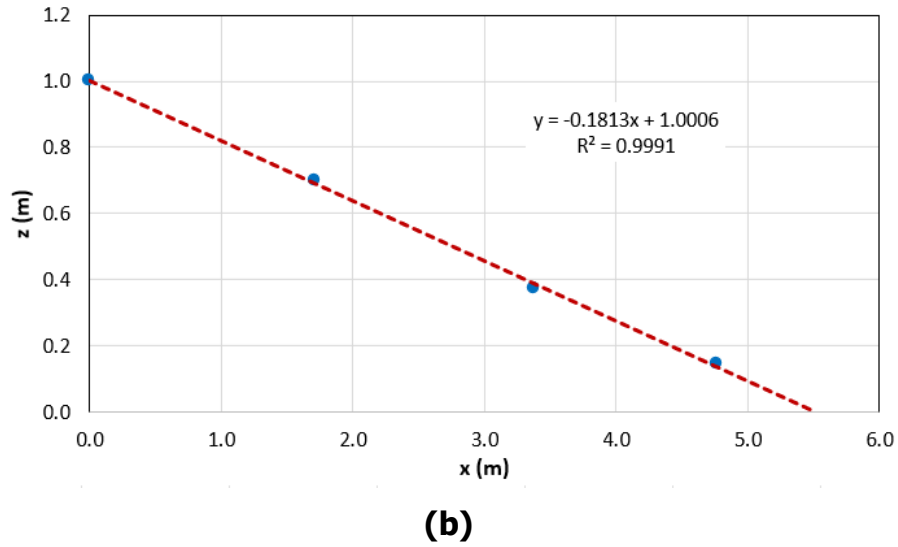


Figura 12. Cálculo de las pendientes de la laguna 1. (a) Pendiente lateral. (b) Pendiente de la rampa de entrada.

Con los datos calculados de la pendiente lateral y de la rampa de entrada, a continuación, se detallan los pasos llevados a cabo para construir la geometría de la laguna en COMSOL Multiphysics.

Las mediciones en terreno y las pendientes calculadas se introducen en COMSOL dentro del fichero *Parámetros* (Figura 13) el cual permite cambiar valores si la geometría lo requiere.

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
Altura	1.2[m]	1.2 m	Altura Total
CotaMax	1.02[m]	1.02 m	Cota máxima de agua
PendLateral	0.6437[m]	0.6437 m	Pendiente lateral
PendEntra...	0.1813[m]	0.1813 m	Pendiente de entrada
CotaPerfil	0.9[m]	0.9 m	Cota perfil batimétrico
CotaAgua	0.96[m]	0.96 m	Cota de agua
hEntrada	0.03[m]	0.03 m	Altura área entrada
lEntrada	0.5[m]	0.5 m	Longitud área entrada
Qmedio	13.47[m <sup>3</sup> /d]	1.559E-4 m <sup>3</sup> /s	Caudal de entrada agua

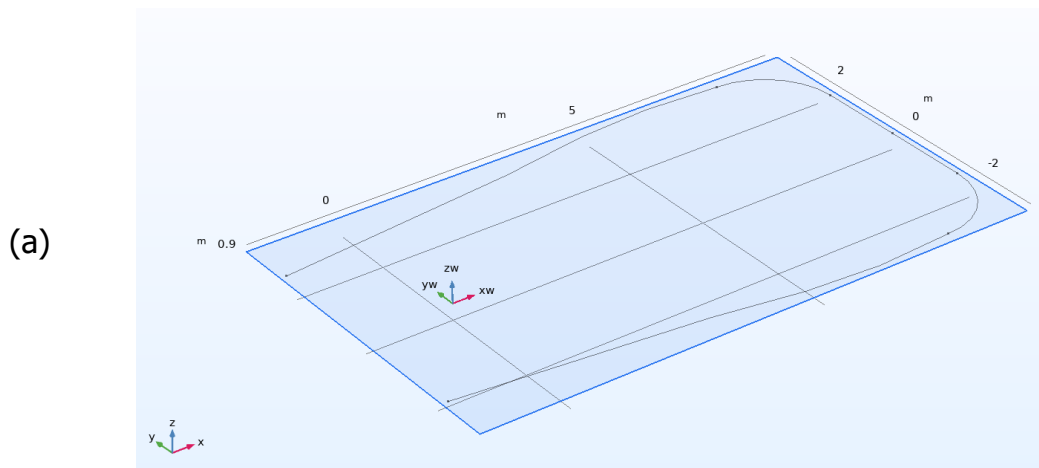
Figura 13. Parámetros definidos para la construcción de la geometría

El primer paso consiste en crear el contorno completo de la laguna, que incluya la zona lateral inclinada, la rampa de entrada y el lado de la arqueta de salida. Para lograr

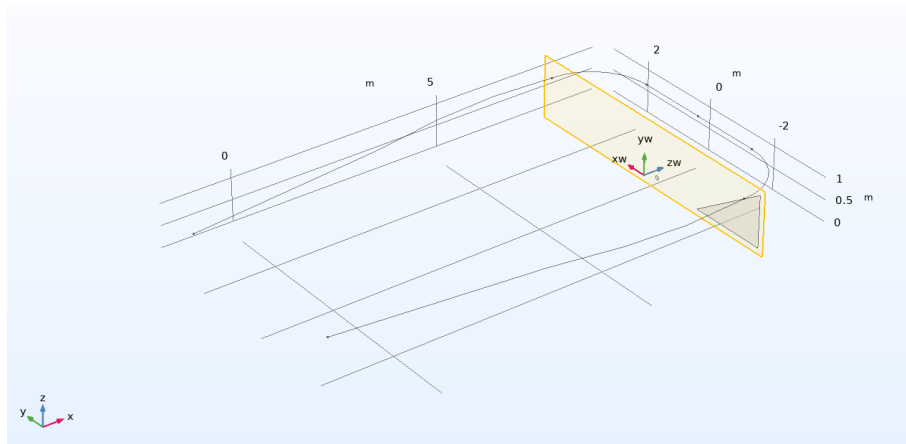
esto, se genera un plano batimétrico ubicado a una altura de 0.9 metros, definida en los Parámetros como "CotaPerfil". En este plano se introducen las coordenadas de los puntos de la Figura 11, lo que resulta en la generación de la curva mostrada en la Figura 14a.

Luego, se define un plano en la sección correspondiente a P4 (Figura 11), donde se crea un triángulo normal a la curva batimétrica. Las aristas de este triángulo normal se definen utilizando los parámetros "Altura", "CotaPerfil" y la pendiente lateral de 0.6437 (Figura 12a). Posteriormente, mediante operaciones geométricas de rotación y barrido, se genera la zona de la laguna lateral inclinada, como se muestra en las Figuras 14b y 14c. Del mismo modo, se crea la rampa de entrada a partir de un triángulo con una pendiente de 0.1813 (Figura 12b) completando así todo el perímetro de la laguna, como se ilustra en las Figuras 14d y 14e.

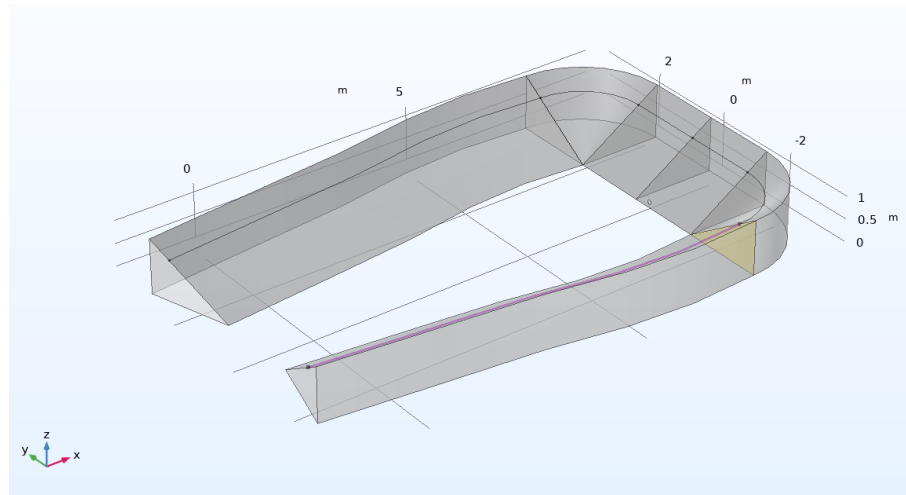
Finalmente, utilizando las mediciones realizadas en terreno y las herramientas de COMSOL, se posiciona la arqueta de salida, las islas dentro de la laguna y las dos tuberías por donde ingresa el agua, como se muestra en la Figura 14f.



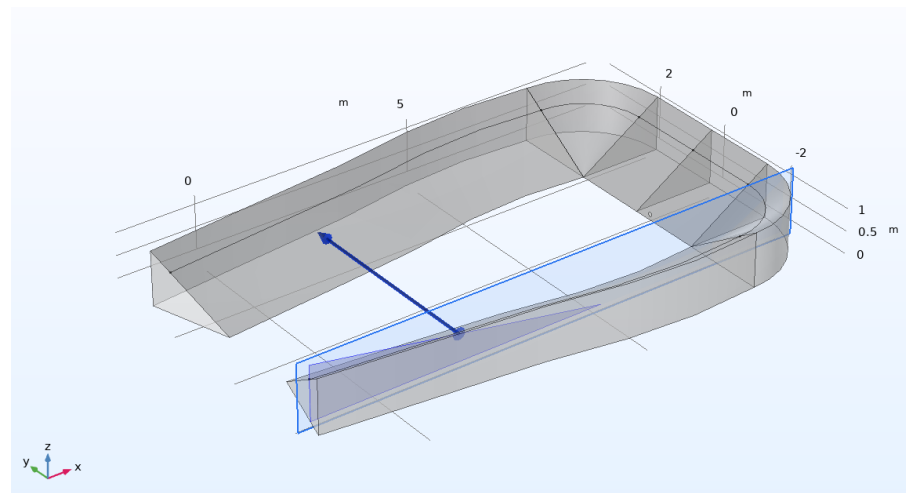
(b)



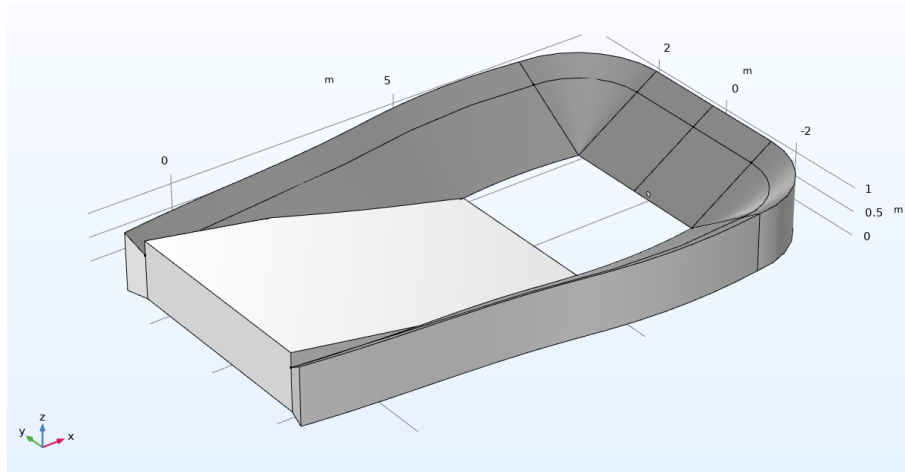
(c)



(d)



(e)



(f)

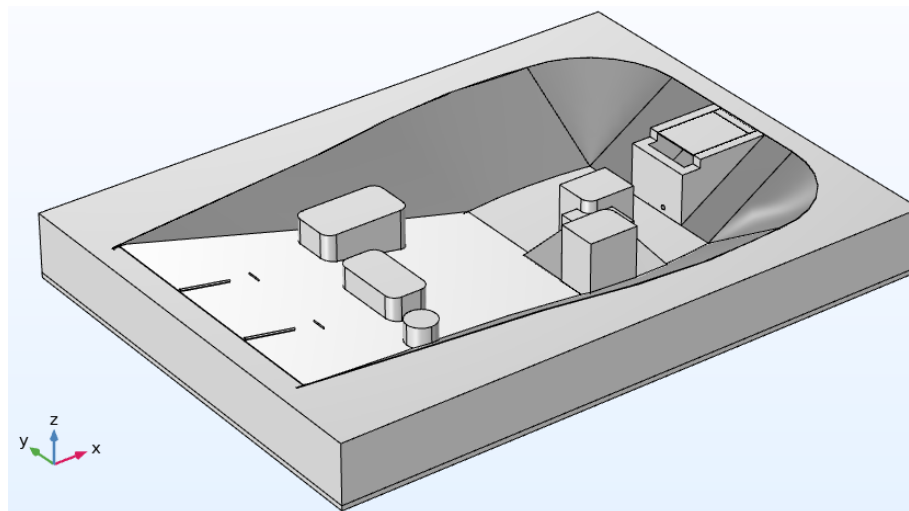


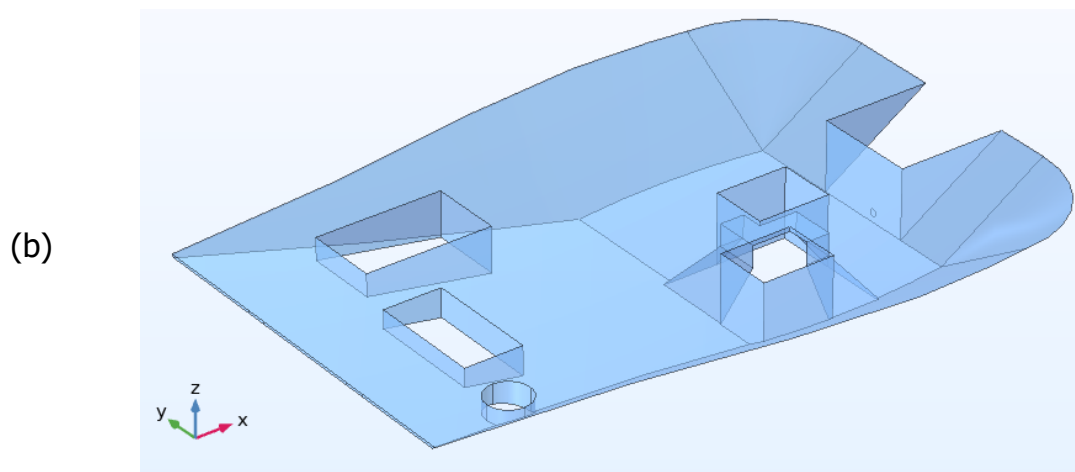
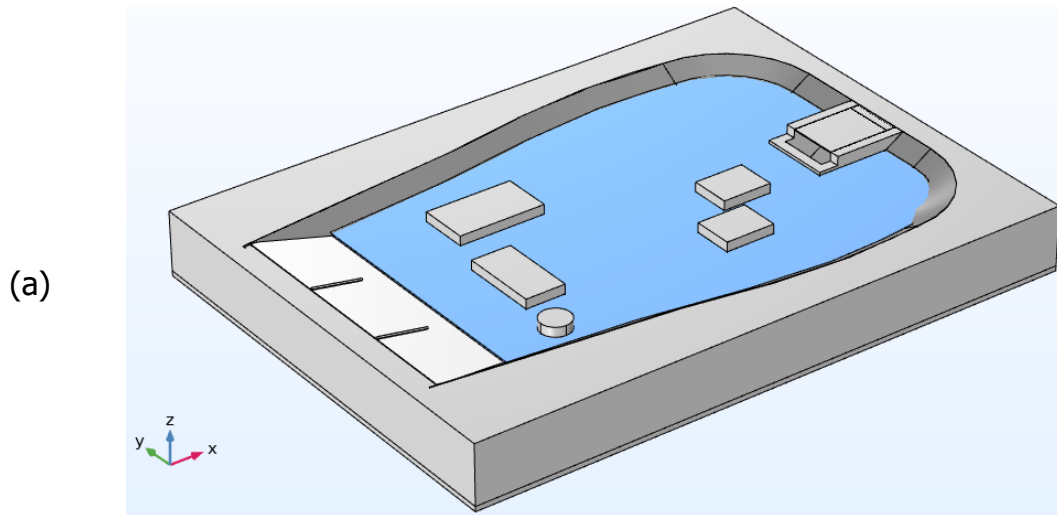
Figura 14. Pasos de la generación de la geometría de la laguna. (a) Perfil batimétrico de la laguna. (b) y (c) Generación de la zona inclinada lateral y de la salida. (d) y (e) Generación de la rampa de entrada. (f) Geometría final de la laguna.

Una vez generada la rampa de entrada y la zona lateral, se introduce la base de la laguna para obtener la zona plana. Luego, utilizando las mediciones realizadas in situ y las herramientas de COMSOL, se colocan la arqueta de salida con la tubería de salida, las dos tuberías de ingreso de agua y las islas, como se muestra en la Figura 14f.

La isla de mayor tamaño está construida con bloques de hormigón formando tres escalones (Figura 9b). Para obtener una forma más homogénea se han rellenado los escalones con piedras (Figura 9a). Esto ha dado lugar a una geometría aproximada de una pirámide truncada con un bloque rectangular en la parte superior. Con el paso del

tiempo, el crecimiento de la vegetación ha provocado la formación de otras islas, por lo que la geometría final de la Laguna 1 queda como se observa en la Figura 14f.

Finalmente, se genera la masa de agua dentro de la laguna usando el parámetro "CotaAgua" en conjunto con las herramientas de COMSOL obteniendo lo mostrado en la Figura 15a. Las distintas vistas de la masa de agua se muestran en la Figuras 15b, 15c, 15d, 15e y 15f.







(f)

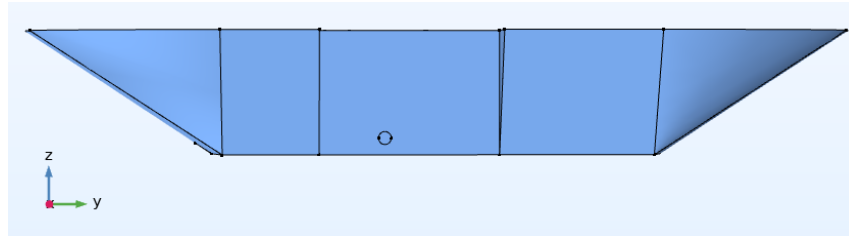


Figura 15. (a) Geometría final con masa de agua. (b) Vista tridimensional x-y-z. (c) Vista superior en plano x-y. (d) Vista inferior en plano x-y. (e) Vista lateral en plano x-z y (f) Vista frontal de zona de salida en plano y-z.

### 6.2.2. Generación del mallado computacional

El proceso de mallado computacional es una parte crítica y de vital importancia en la preparación de cualquier simulación, ya que el método de generación de malla y la calidad influirá directamente en la precisión y la eficiencia de los resultados.

Las ecuaciones de Navier-Stokes, que gobiernan el movimiento de los fluidos, no tienen solución analítica conocida por lo que es necesario recurrir a la aproximación numérica. Para ello, es necesario discretizar el dominio analizado en una gran cantidad de celdas o elementos en los que el modelo aproximará resultados para las variables analizadas.

En dos dimensiones estas celdas son áreas, mientras que en tres dimensiones estas celdas representan un volumen. Una manera de ver estas celdas es considerarlas como si fueran pequeños volúmenes de control en las cuales se resuelven versiones discretas de las ecuaciones de conservación y transporte (Celeita, 2016).

Antes de comenzar con el mallado computacional, es fundamental realizar una limpieza de la geometría. Esto implica evitar, en lo posible, aristas vivas (ángulos adyacentes muy agudos) y bordes con radios muy pequeños. De este modo se asegura que nuestra geometría esté completamente definida y libre de errores.

Una vez definida la geometría, para generar la malla computacional, COMSOL incluye su propio fichero para generar este mallado, por lo que se trabajará directamente con este fichero en donde se especifica que esta sea *controlada por la física*. El índice de calidad predeterminada por COMSOL en estadísticas de malla y gráficos de malla, y el que hemos utilizado nosotros es la *oblicuidad (Skewness)*.







COMSOL dispone de varios índices de calidad (oblicuidad, ángulo máximo, volumen versus circunvalación, volumen versus longitud, número de condición, tasa de crecimiento y asimetría curvada), siendo la oblicuidad el indicador de malla más importante, porque indica que tan próximo está a una celdilla ideal (cada una de las celdas se entiende como celdilla ideal) (Galeano & Aguirre, 2020). La oblicuidad es una medida de la asimetría equiangular que se define como el mínimo de las siguientes cantidades:

$$1 - \max\left(\frac{\theta - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta}{\theta_e}\right) \quad (10)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo sobre un vértice (2D) o un borde (3D) en el elemento,  $\theta_e$  es el ángulo del borde o vértice correspondiente en un elemento ideal y el mínimo se toma sobre todos los vértices (2D) o bordes (3D) del elemento.

El programa genera cada malla aplicando los elementos tetraédricos, prismáticos y piramidales; predominando, por defecto, los tetraedros. Esto es ventajoso, ya que el uso de elementos tetraédricos proporciona una buena calidad de malla (Galeano & Aguirre, 2020). En la Tabla 5 se presenta una comparación de calidad de malla con respecto a sus elementos, proporcionando un indicador visual que facilita la elección de la malla más adecuada.

**Tabla 5. Calidad de las celdas en la malla** (Galeano & Aguirre, 2020)

Características	Buena	Mala
Celda no muy distorsionada		
Celda no muy estirada		
Transición de celdas lisas		

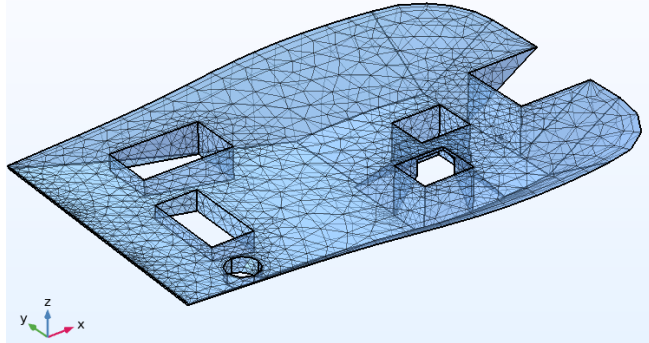
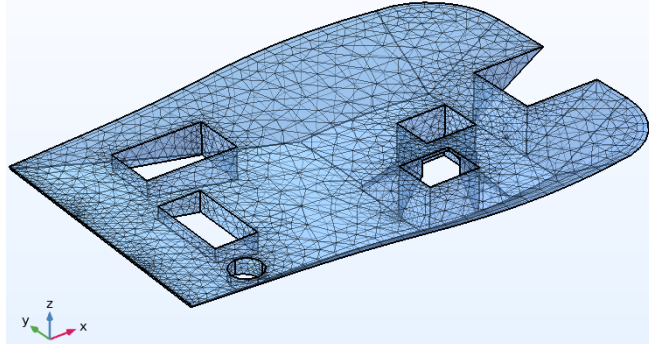
Es fundamental un buen diseño de malla para que los resultados del modelo sean lo más independientes posibles de ésta y que únicamente dependan de las condiciones de contorno y de los parámetros físicos del problema. Generalmente, aunque con excepciones, cuanto mayor sea el número de celdas, mayor será la resolución y, por

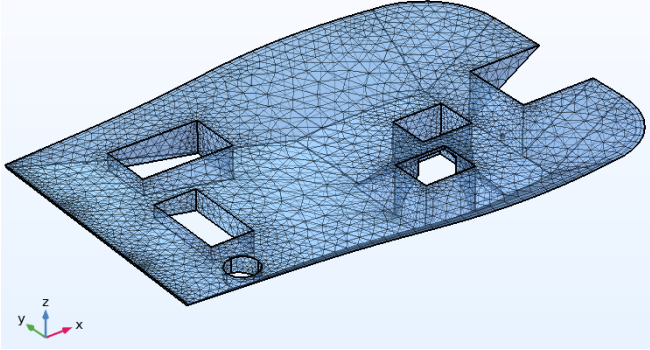
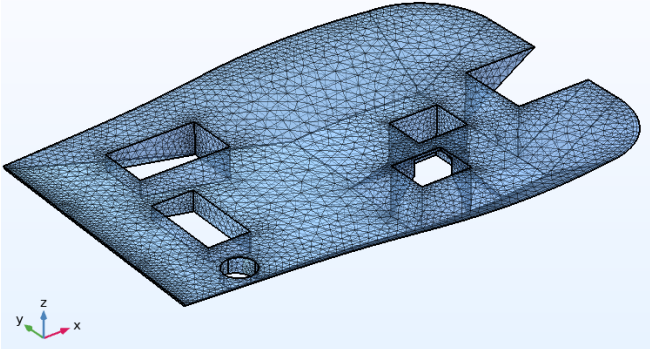
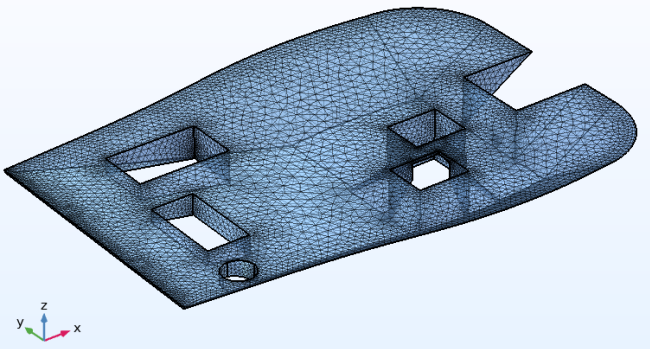
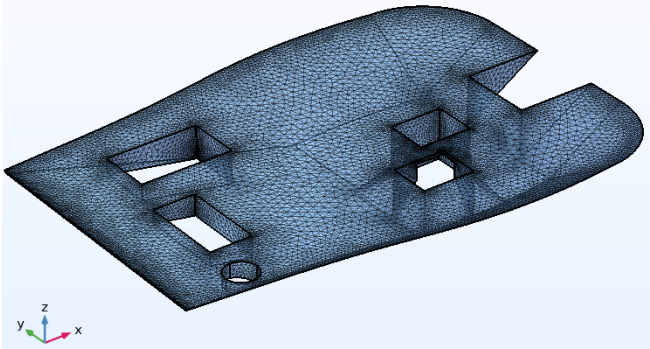
tanto, mejor precisión del modelo. No obstante, a mayor número de elementos, es necesario una mayor capacidad de cálculo, siendo a menudo el coste computacional requerido inalcanzable. Por lo tanto, hay que llegar a un equilibrio entre la precisión de los resultados y la resolución de la malla.

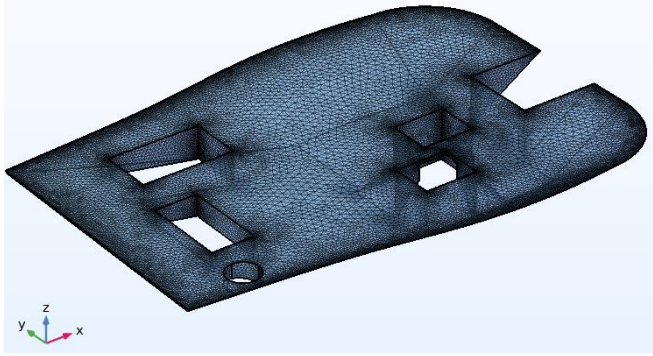
Respecto al tamaño de celda, varios manuales de buenas prácticas en modelización recomiendan hacer un análisis previo de independencia de malla, es decir, análisis para definir a partir de que grado de refinamiento de la malla los resultados alcanzan la independencia de ésta (Salcedo et al., 2017).

En la Tabla 6 se muestra las principales características según el tipo de malla para la geometría generada:

**Tabla 6. Mallas y sus principales características de calidad**

Tipo de Malla	Estadísticas del elemento del dominio		
	Nº de elementos	Calidad mínima	Calidad media
 Extremadamente Gruesa	16071	0.01592	0.5713
 Extra Gruesa	24806	0.03574	0.6020

 <p>Muy Gruesa</p>	47154	0.02992	0.6348
 <p>Gruesa</p>	105245	0.05115	0.6585
 <p>Normal</p>	225043	0.07643	0.6745
 <p>Fina</p>	550727	0.05616	0.6872

 <p style="text-align: center;">Muy Fina</p>	1369631	0.09140	0.6898
---	---------	---------	--------

Como se muestra en la Tabla 6, al utilizar una malla más fina, el número de elementos aumenta significativamente desde 16071 elemento en la malla extremadamente gruesa a 550727 en la malla fina y 1369631 en la malla muy fina. Este crecimiento en el número de elementos es exponencial, siendo particularmente pronunciado al comparar la malla fina con la malla muy fina (Figura 16).

De manera similar, la calidad de la malla, medida mediante el parámetro de oblicuidad, varía entre 0.571 y 0.6898. Las mallas normal, fina y muy fina destacan por tener mayor calidad, con valores de la oblicuidad superiores a 0.67 (Figura 17).

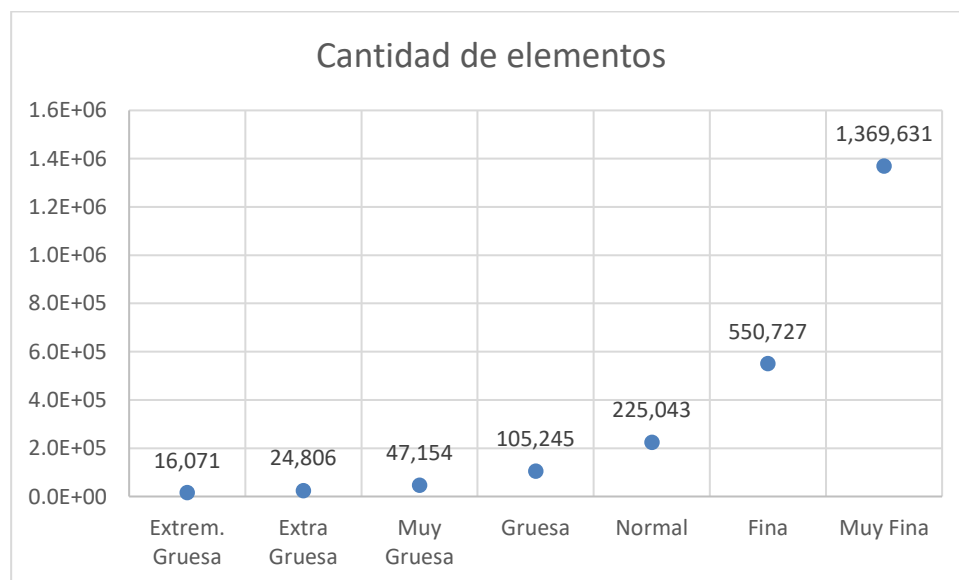


Figura 16. Cantidad de elementos por tipo de malla

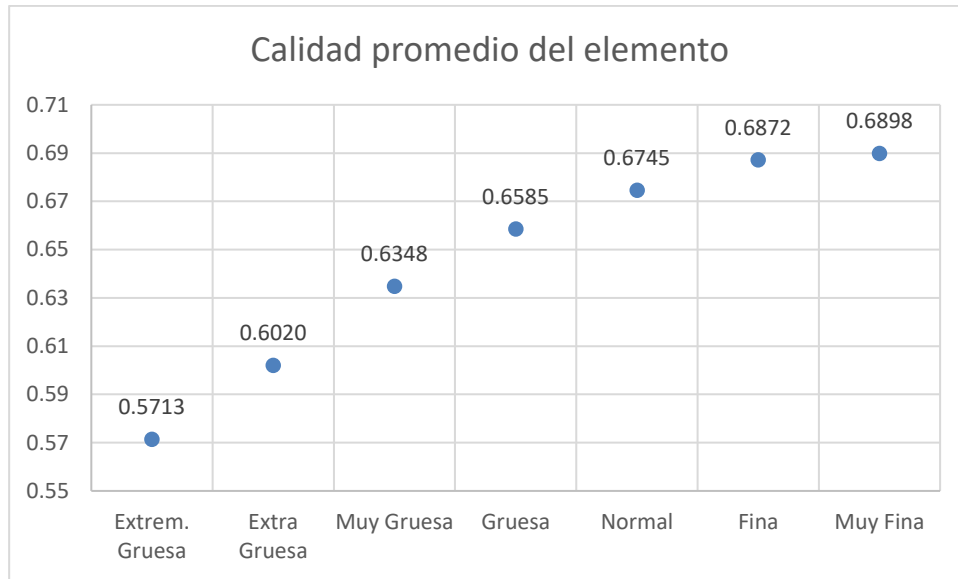


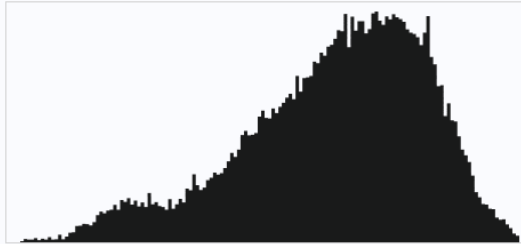
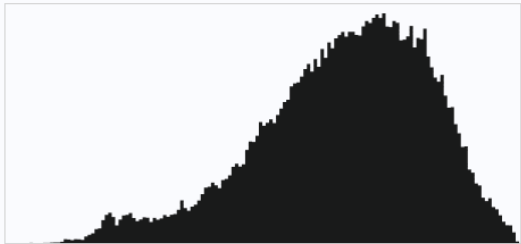
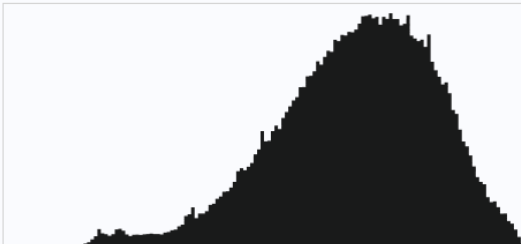
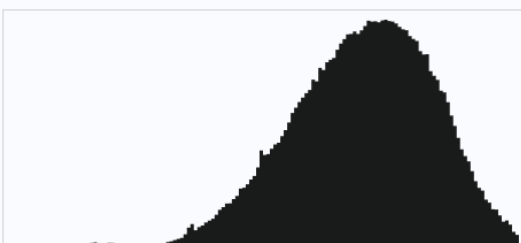
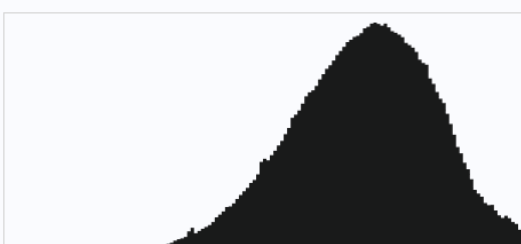
Figura 17. Calidad promedio por tipo de malla medida por oblicuidad

En la Tabla 7 se muestra los gráficos con el histograma de las distintas mallas de la cual se resalta la simetría del histograma sin una población elevada de elementos de baja calidad cuanto más fina es la malla.

La cantidad de elementos muestra una clara diferencia desde la malla Fina, y la calidad promedio del elemento presenta una mejora despreciable desde la malla Normal.

**Tabla 7. Histogramas de calidad por tipo de malla**

Tipo de malla	Histograma de la calidad del elemento
Extremadamente Gruesa	<p>Element Quality Histogram</p>
Extra Gruesa	<p>Element Quality Histogram</p>

<p>Muy Gruesa</p>	<p>Element Quality Histogram</p> 
<p>Gruesa</p>	<p>Element Quality Histogram</p> 
<p>Normal</p>	<p>Element Quality Histogram</p> 
<p>Fina</p>	<p>Element Quality Histogram</p> 
<p>Muy Fina</p>	<p>Element Quality Histogram</p> 



### 6.2.3. Análisis de independencia de malla

La estrategia elegida para seleccionar la malla adecuada fue utilizar la funcionalidad de lograr que los resultados sean independientes de la malla. Esto implica comenzar con una malla *Extremadamente gruesa* y calcular una primera solución (realizando iteraciones hasta lograr la convergencia). Luego, se repite el proceso hasta verificar que la solución sea independiente del mallado, es decir, que la solución obtenida no cambie si el mallado cambia o presente una variación mínima.

En geometrías complejas se puede dar el caso de que al aumentar el detalle de la malla se supere la capacidad computacional disponible. Por ello, se realizó un estudio de convergencia tomando como criterios de calidad las estadísticas de cada malla generadas por COMSOL, el costo computacional, independencia del mallado y el error cuadrático medio de las soluciones respecto a la malla Fina para el estado estacionario y Muy Fina para el estado transitorio. Esto debido a que la simulación para la malla muy fina en estado estacionario no llega a converger.

Es importante precisar que los resultados que se muestran para el estudio en estado estacionario se simularon fijando un caudal de entrada constante igual al caudal medio y para el transitorio se simula una entrada periódica con la variación de caudal en forma de pulsos; es decir, un caudal constante igual al doble del caudal medio durante una hora y una hora posterior sin caudal.

El análisis de independencia de malla se evaluó para un intervalo de tiempo de 180 minutos tal como se muestra en la gráfica de la figura 18 que corresponde a la velocidad del agua en la tubería de salida para la simulación de un pulso de caudal de entrada en estado transitorio.



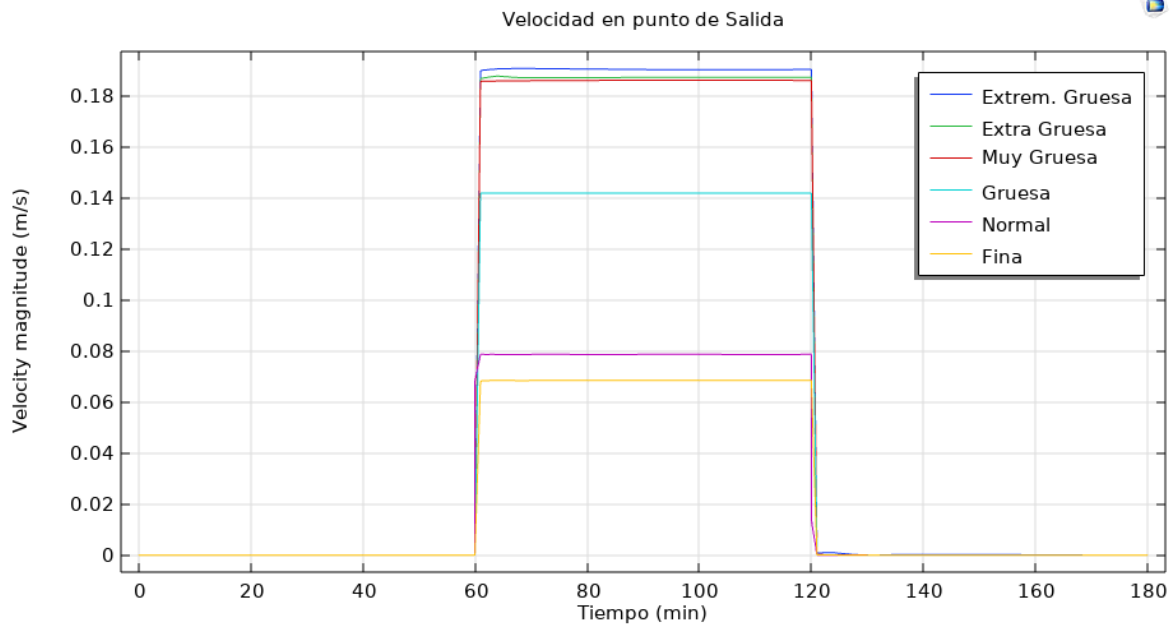


Figura 18. Gráficos de velocidad por tipo de malla en estado transitorio (COMSOL)

Las figuras 19 y 20 muestran los resultados del estudio de independencia de cada malla respecto a la velocidad del fluido.

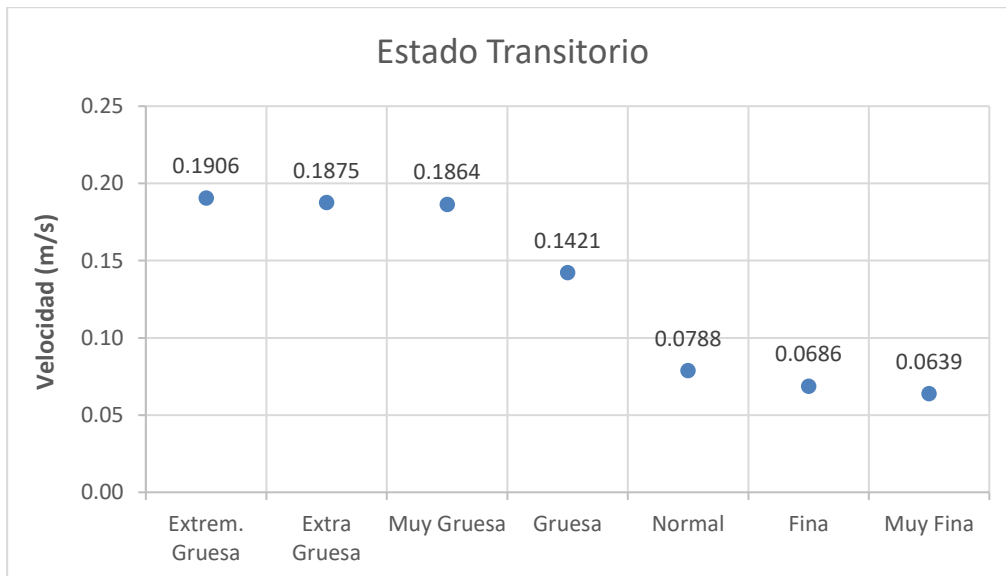


Figura 19. Velocidad en punto de salida en Estado Transitorio (minuto 90)

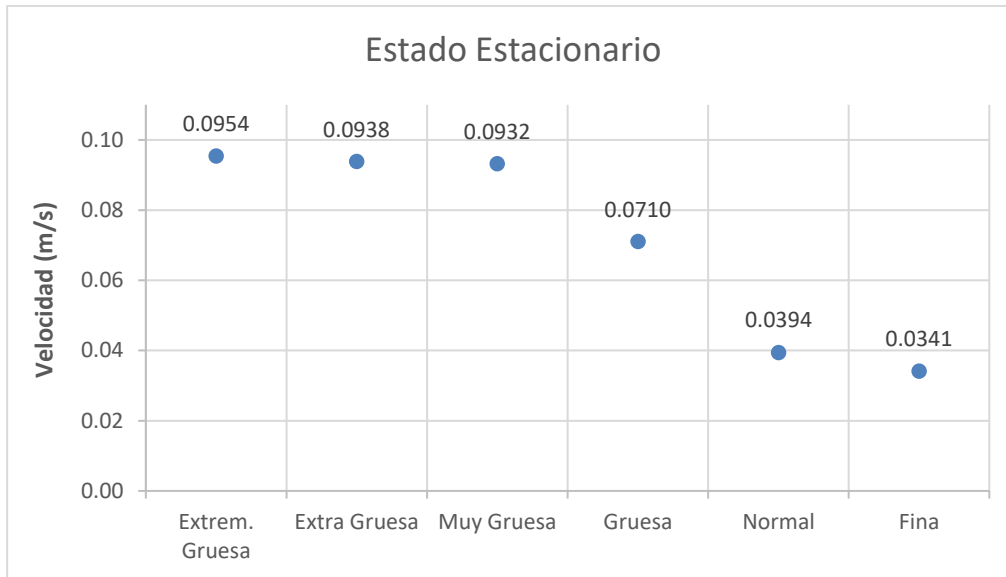


Figura 20. Velocidad en punto de salida en Estado Estacionario

La gráfica de la figura 19 se obtiene a partir de la velocidad de salida obtenida en el centro del pulso (minuto 90). Del mismo modo se obtiene la figura 20 en la simulación estacionaria.

La solución respecto a la velocidad del agua en la salida converge a partir de la malla normal tanto en la simulación de estado transitorio (Figura 19) como en la de estado estacionario (Figura 20), obteniéndose la misma conclusión considerando la velocidad en otros puntos de la laguna.

Las figuras 21 y 22 muestran los resultados del estudio de independencia de cada malla respecto al costo computacional.

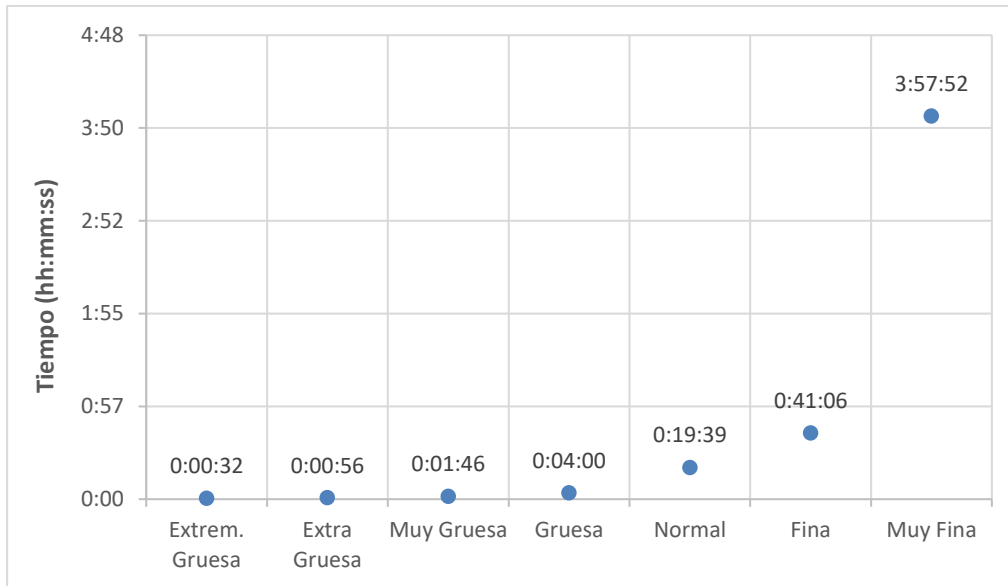


Figura 21. Costo computacional en Estado Transitorio

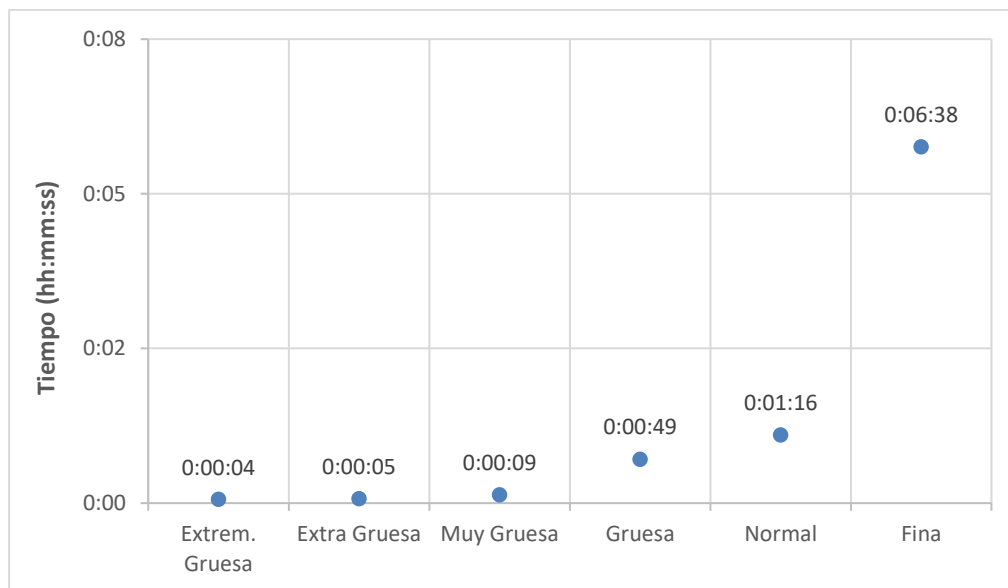


Figura 22. Costo computacional en Estado Estacionario

Respecto al tiempo de simulación para el estado transitorio, este depende de principalmente 4 factores: calidad de malla (más fina, mayor tiempo), complejidad de la geometría (más detalles, mayor tiempo), intervalo de tiempo de evaluación (a más días, mayor tiempo) y características de PC (mayor potencia, menor tiempo). Debemos que tener en cuenta que al simular varios días o meses el tiempo de cálculo aumenta mucho.

Respecto al tiempo de cálculo según las características del ordenador utilizado, en el presente estudio se utilizó una PC con las siguientes características:

- Procesador: Intel Core i9-14900KF
- RAM: 64 Gb (4 módulos de memoria de 16 GB DDR5 5200 MHz)

Las figuras 21 y 22 ilustran que, tanto en estado estacionario como en transitorio, se produce un aumento exponencial en el tiempo de cálculo al incrementar la fineza de la malla, es decir, al aumentar el número de elementos. Además, se observa que el tiempo de cálculo se incrementa en un 115% al pasar de la malla normal a la fina en la simulación del estado transitorio, y en un 424% en la simulación del estado estacionario.

Se analizó también el error cuadrático medio en el estado transitorio de cada tipo de malla respecto a la malla Muy Fina (Figura 23), observándose que, entre la malla normal y fina, prácticamente el error ya es asintótico.

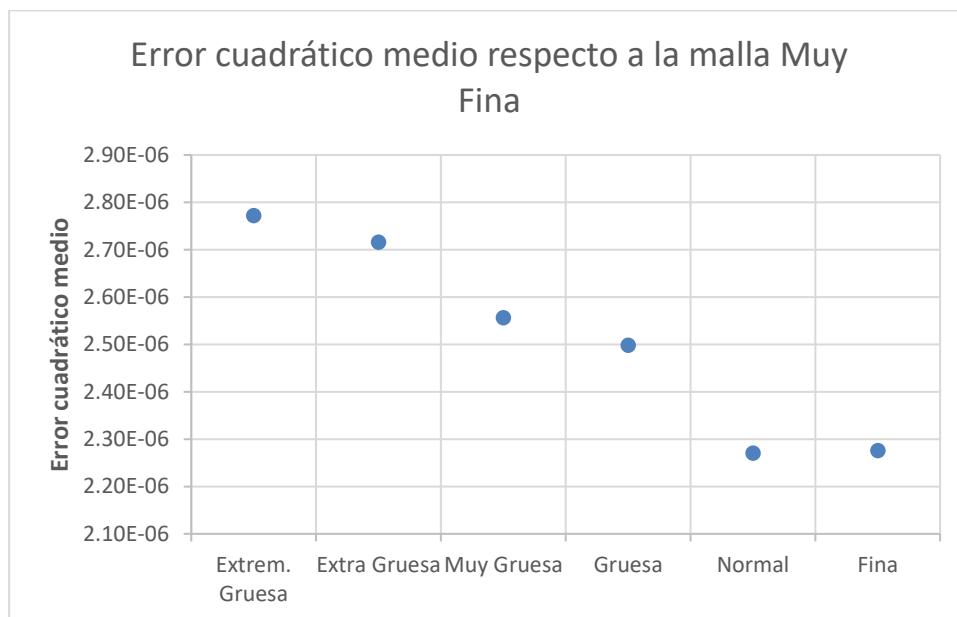


Figura 23. Error cuadrático medio según tipo de malla

En base a todo lo expuesto, se puede concluir que la malla seleccionada es la Normal debido a las siguientes razones:

- La diferencia en la solución de la malla Fina y la Normal es mínima (Figuras 14 y 15), y dado que se trata de velocidades muy pequeñas, se puede deducir que la solución es independiente del mallado.
- El coste computacional que conlleva la malla Fina y Muy Fina es alta en comparación con la malla Normal (Figuras 18 y 19).

La cantidad de elementos muestra una clara diferencia desde la malla Fina, y la calidad promedio del elemento presenta una mejora despreciable desde la malla Normal.

### **6.3. Simulación del modelo de calidad**

Para la elaboración del modelo en 3D, se ha tenido en cuenta las siguientes hipótesis simplificativas:

- Dado que la entrada de agua es libre, para el desarrollo de la geometría consideraremos la entrada de agua como dos superficies de 0.03mx0.5m, transversales a la rampa de entrada.
- El flujo interior del FWS CW se comporta como régimen laminar.
- Dentro de las condiciones de contorno, se fijará la velocidad como condición de contorno de entrada y la presión estática como condición de contorno de salida. Para nuestro caso de estudio se indicará además que se debe suprimir el reflujos.
- Se asigna valores iniciales en el campo de velocidad y presión iguales a cero, indicando que la presión debe ser compensada por la presión hidrostática.
- Se considera flujo incompresible y se especifica tener en cuenta los efectos de la gravedad.

#### **6.3.1. Definición de la herramienta Eventos**

Como se ha mencionado anteriormente, el ingreso de agua al FWS CW (laguna 1) es de manera discontinua; es decir, con bombeos a caudal constante durante una hora, seguidos de una hora de paro. Esta particularidad nos lleva a utilizar la herramienta de COMSOL llamada "Eventos".

El acceso a esta herramienta es a través de la Física "Mathematics" dentro del cual se encuentra la opción "Events" la cual debe ser añadida a nuestra construcción del modelo (Model Builder).

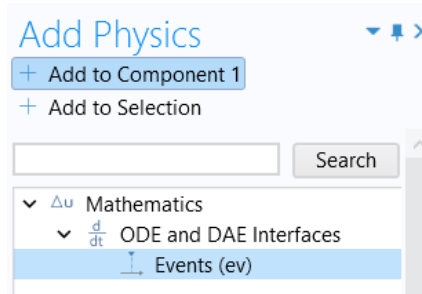


Figura 24. Ubicación de la herramienta "Eventos" en COMSOL

Para configurar el *Evento* en necesario definir dos variables:

- **Estados Discretos (Discrete States):** Son variables que pueden cambiar instantáneamente en respuesta a eventos en el modelo. A diferencia de las variables continuas, que cambian de manera suave a lo largo del tiempo, los estados discretos pueden saltar de un valor a otro de forma abrupta.
- **Eventos Explícitos (Explicit Event):** Son condiciones específicas que desencadenan cambios instantáneos en el modelo. Estos eventos pueden cambiar valores de estados discretos, ajustar parámetros del modelo, o incluso interrumpir y reiniciar la simulación.

En nuestro caso de estudio para definir el *Evento* que refleje la entrada de agua se ha definido una nueva variable de estado discreto (Figura 25) y se especifica la condición que desencadenará el evento (Figura 26).

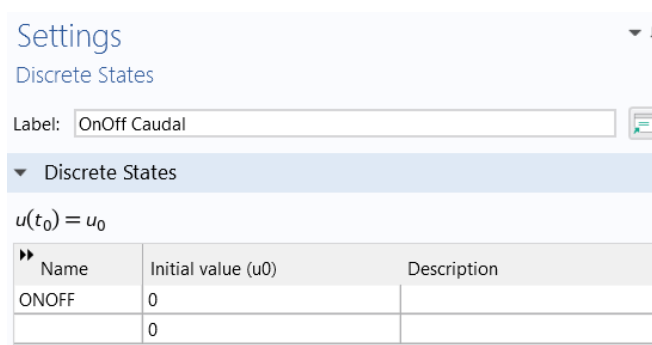


Figura 25. Variable de Estado Discreto

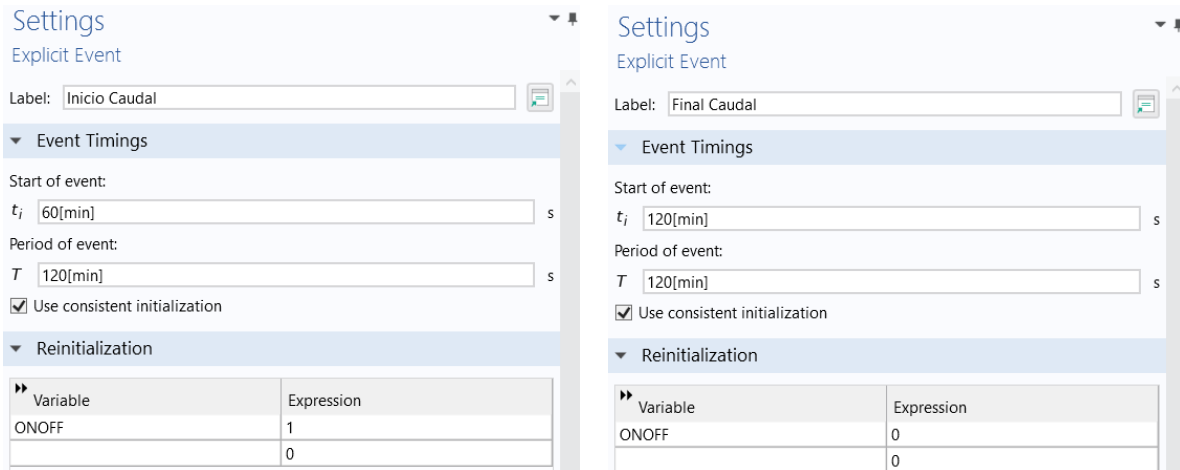


Figura 26. Evento Explícito: Inicio, fin y periodo del evento

### 6.3.2. Estudio de Flujo Laminar

Para calcular la velocidad del sistema, se establece un flujo laminar con un Estudio Dependiente del Tiempo (transitorio). Para este estudio, COMSOL asume las ecuaciones de Navier - Stokes, donde intervienen la conservación del momento Ec. (3) y la ecuación de continuidad Ec. (4).

Previamente se ha establecido como fluido el material "Agua (Water, liquid)", por lo tanto, para realizar el Estudio de *Flujo Laminar* se define las *Propiedades del fluido* (Tabla 8), los *Valores iniciales* indicando que se debe aplicar la *compensación por presión hidrostática* (Tabla 9) e indicar las *Condiciones de contorno* (Tabla 10).

Tabla 8. Propiedades del fluido para flujo laminar

Propiedades del fluido	
<b>Temperatura</b>	293.15 K
<b>Densidad</b>	From material (Water)
<b>Viscosidad dinámica</b>	From material (Water)

Tabla 9. Valores iniciales para flujo laminar

Valores iniciales	
<b>Campo de velocidad</b>	(0,0,0) m/s
<b>Presión</b>	0 Pa

Con las condiciones de contorno se define en que paredes la velocidad es nula (condición Nº 1). Mientras que el afluente de agua se define con dos entradas, definiendo la velocidad como su condición de contorno e incluyendo la variable del



*Estado discreto* del *Evento* en el valor de  $U_0$  (Nº 2 y 3). Para la salida de agua se define la presión como condición de contorno (Nº 4). Además, se establece la condición de simetría al contorno que tiene contacto con el exterior (Nº 5).

**Tabla 10. Condiciones de contorno para flujo laminar**

Nº	Condiciones de contorno	Modelo 3D
1	Pared	Sin deslizamiento ( $u=0$ )
2	Entrada derecha	Velocidad: $U_0=0.353*2*Q_m/(hEntrada*IEntrada)*ONOFF$
3	Entrada izquierda	Velocidad: $U_0=0.647*2*Q_m/(hEntrada*IEntrada)*ONOFF$
4	Salida	Presión ( $P_0=0$ )(*)
5	Simetría	Selección manual del contorno en contacto con el exterior

(\*): COMSOL suma a esta condición la presión hidrostática de la columna de agua

### 6.3.3. Estudio de Especies Diluidas

El estudio de *Transporte de Especies Diluidas* permite simular el transporte y los procesos de desaparición de las bacterias E. Coli y obtener la curva concentración-tiempo. Se realiza una configuración de Estudio Dependiente del Tiempo, asumiendo las ecuaciones Ec. (5) y Ec. (6). En la Tabla 11 se definen las propiedades del fluido y los valores iniciales en la Tabla 12.

**Tabla 11. Propiedades del fluido para especies diluidas**

Propiedades de transporte	
Temperatura	293.15 K
Coefficiente de difusión	$1.10^8 \text{ m}^2/\text{s}$ (isotrópico)

Las condiciones de contorno descritas serán la de entrada de flujo y las zonas donde no se produce el flujo Tabla 13. El valor de la concentración de E. Coli experimental en el instante inicial de simulación ( $C = 20000 \text{ mol/m}^3$ ).

**Tabla 12. Valor inicial de concentración**

Valores iniciales	
Concentración	$20000 \text{ mol/m}^3$

La condición de contorno del flujo de entrada se define como una función de interpolación en función del tiempo definida como  $int1(t)$ . Esta función interpola los valores experimentales de entrada de E. Coli al humedal.

**Tabla 13. Condiciones de contorno para estudio de especies diluidas**

<b>Condiciones de contorno</b>	<b>Modelo 3D</b>
Sin flujo	$-n \cdot J_i = 0$
Flujo de entrada derecha	int1(t)
Flujo de entrada izquierda	int1(t)

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Implementación del modelo

Siendo la reutilización de aguas residuales tratadas una excelente alternativa para garantizar un recurso hídrico de calidad para usos agrícolas y ambientales, es importante analizar la capacidad de los humedales para desinfectar las aguas residuales, por lo que es común seleccionar organismos indicadores como *Escherichia coli* para estos análisis debido a su presencia universal en materia fecal, la facilidad con que puede ser detectada, su persistencia en el ambiente de manera similar a otros patógenos y su aceptación generalizada en las normativas internacionales para el monitoreo de la calidad del agua.

El objetivo de simular la calidad del agua es contribuir con datos de la EDAR basada en humedales artificiales y profundizar la comprensión de los procesos de descomposición de E. Coli.

Para simular a la depuración de coliformes fecales en un humedal artificial, es crucial entender y modelar los mecanismos de desintegración de los contaminantes. El modelado matemático de diferentes mecanismos de eliminación de E. Coli es una herramienta eficaz para mejorar la comprensión del sistema de tratamiento. Esto, a su vez, facilita la mejora del diseño y el rendimiento.

La eliminación de bacterias en los humedales artificiales es un proceso complejo influenciado por factores físicos, químicos y biológicos. Los mecanismos clave incluyen sedimentación, desinfección solar y depredación por microorganismos (Song et al., 2006).

A continuación, se describe los principales procesos de eliminación y sus velocidades cinéticas ( $R_i$ ) que fueron consideradas para la simulación del modelo:

**Decadencia natural o extinción.** Se refiere a la disminución de la población bacteriana debido a factores inherentes del ambiente que no involucran la intervención directa de otros organismos, es la muerte o inactivación de bacterias debido a varios procesos físicos. El hambre y la exposición a estresantes físicos y químicos son procesos comunes relacionados con la muerte natural de bacterias (Wu, Carvalho, et al., 2016). Estos procesos pueden incluir falta de nutrientes, cambios de pH, competencia por recursos, y la acumulación de productos metabólicos tóxicos (Kadlec & Wallace, 2009).

La depredación probablemente esté incluida dentro de este mecanismo de decadencia debido a la dificultad de aislar ambos procesos en ambientes acuáticos (Craggs et al., 2004; Davies-Colley et al., 2003; Wu, Carvalho, et al., 2016), pero puede considerarse un proceso independiente (Kadlec & Wallace, 2009). En general, se aplica una cinética de primer orden para simular este proceso de descomposición Ec.11.

$$R_{nd} = -k_{nd} \cdot C \quad (11)$$

Donde  $k_{nd}$  es la constante de velocidad de primer orden ( $d^{-1}$ ) que puede variar dependiendo de las condiciones ambientales específicas del humedal, como temperatura, pH, y la presencia de sustancias químicas, y  $C$  es la concentración de E. Coli (NMP o UFC/100 ml).

**Desinfección solar.** La desinfección solar es un mecanismo importante en los humedales de flujo superficial, donde la radiación ultravioleta de la luz solar penetra la columna de agua y daña el ADN de E. Coli, provocando la muerte celular (Kadlec & Wallace, 2009). Es decir, es el proceso mediante el cual la radiación ultravioleta (UV) del sol inactiva a las bacterias E. Coli. La radiación UV puede dañar el ADN de las bacterias, lo que impide su replicación y eventualmente las mata. Puede ser endógeno (directo o indirecto) o exógeno (indirecto), que probablemente ocurren simultáneamente e interactúan, especialmente en bacterias (Nelson et al., 2018). Sólo una pequeña fracción, típicamente menos del 1%, de la radiación solar total causa desinfección, concretamente longitudes de onda UV en el rango de 290 a 400 (Craggs et al., 2004; Kadlec & Wallace, 2009). Sin embargo, por razones prácticas para modelos, se suele utilizar la radiación solar total para obtener la constante de

velocidad, ya que así se pueden tomar registros disponibles en las estaciones climáticas (Craggs et al., 2004; Davies-Colley et al., 2003; Mayo, 2004). En consecuencia, las tasas de inactivación solar basadas en la radiación solar total son mucho más bajas que las basadas en fuentes de lámparas UV (Kadlec & Wallace, 2009). La extinción de la luz con la profundidad se puede modelar mediante la ley de Beer-Lambert, que indica una decadencia exponencial de la luz con la profundidad. Se puede integrar para la profundidad del agua (Ec. 12).

$$S_H = \frac{S_0}{K_e \cdot H} \cdot (1 - e^{-K_e \cdot H}) \quad (12)$$

Donde  $K_e$  ( $m^{-1}$ ) es el coeficiente de extinción que puede relacionarse con los sólidos suspendidos mediante la ecuación (13) (Chapra, 1997),  $S_0$  es la intensidad de radiación solar total UV disponible ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ) que puede variar dependiendo de factores como la hora del día, la estación del año, la latitud, y la presencia de nubes o sombra.  $H$  es la profundidad del agua (m).

Además, se puede aplicar un factor de corrección para considerar la relación de la superficie expuesta a la intensidad solar (no cubierta por plantas o algas flotantes) (Kalibbala et al., 2008). Por lo tanto, el término de velocidad cinética podría leerse como la ecuación. (14).

$$K_e = 0.55 * TSS \quad (13)$$

$$R_S = - \frac{k_s \cdot S_0 \cdot \lambda_t}{K_e \cdot H} \cdot (1 - e^{-K_e \cdot H}) \cdot C \quad (14)$$

Donde TSS son los sólidos suspendidos totales (mg/L),  $k_s$  es la constante de tasa de desinfección solar ( $m^2/MJ$ ),  $\lambda_t$  es la relación del área de superficie expuesta a la irradiación solar (sin unidades) y  $C$  es concentración de E. Coli (MPN/100 mL).

**Depredación.** La depredación es un mecanismo de control biológico natural en los humedales, donde los organismos de nivel trófico superior, como los protozoos, consumen bacterias, incluida E. Coli. Esos organismos contribuyen a la eliminación de bacterias en estanques y sistemas acuáticos naturales (Jasper et al., 2013; Kadlec & Wallace, 2009). En particular, se ha demostrado que los cladóceros aumentan la tasa de pérdida de E. Coli, lo que destaca que la presión de depredación podría ser

importante, especialmente durante los picos estacionales de Daphnia (Burnet et al., 2017). Estos autores realizaron experimentos para evaluar tanto la cultivabilidad como la viabilidad de E. Coli a lo largo del tiempo y encontraron ausencia de células viables, pero no cultivadas (VBNC) después de la exposición a Daphnia.

La depredación por protozoos y otros microorganismos en los humedales es un mecanismo biológico clave para la eliminación de E. Coli. Estos depredadores consumen las bacterias, reduciendo su número (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2007b).

El modelado matemático generalmente se aborda como una cinética de primer orden, pero por analogía con el modelado del proceso de pastoreo de fitoplancton (Chapra, 1997), puede ser conveniente introducir la concentración de organismos Ec. (15).

$$R_p = -k_p \cdot P \cdot C \quad (15)$$

Donde  $k_p$  es la tasa de eficiencia de los depredadores en eliminar E. Coli. Depende de la densidad de depredadores y de factores ambientales que pueden afectar su actividad (L/individual.d). P es la concentración del depredador presentes que influye directamente en la tasa de eliminación de E. Coli (ind/L). Se podría considerar que un término de Michaelis-Menten para la concentración de E. Coli (C) (Ec. (16)) explica el hecho de que a niveles altos de sustrato (C) la tasa de eficiencia de depredación se estabiliza y, para niveles bajos de sustrato, limita el crecimiento de los predadore (Chapra, 1997).

$$\frac{C}{k_{SC} + C} \quad (16)$$

Donde  $k_{SC}$  (MPN/100 mL) es la constante de media saturación para el zooplancton que se alimenta de E. Coli.

**Corrección por temperatura.** La corrección por temperatura implica ajustar las tasas de reacción para distintas temperaturas utilizando la ecuación de Arrhenius Ec. (17). Si se conoce la tasa de degradación bacteriana a una temperatura específica, la ecuación puede usarse para estimar la tasa a otra temperatura.

$$k(T) = K(20) \cdot \theta^{(T-20)} \quad (17)$$

En el contexto de la depuración de contaminantes como *E. coli* en humedales artificiales, la corrección por temperatura se utiliza para predecir cómo varía la eficiencia de degradación en función de la temperatura ambiental.

La corrección por temperatura de Arrhenius es una herramienta esencial para ajustar y predecir la velocidad de reacciones químicas y bioquímicas bajo distintas temperaturas. Su aplicación en la cinética de degradación de bacterias es crítica para optimizar y modelar procesos de tratamiento de aguas y otros sistemas biológicos. La alta sensibilidad de las tasas de reacción a la temperatura subraya la importancia de utilizar esta corrección en cualquier análisis predictivo o de diseño.

### 7.2. Calibración del modelo de calidad de agua

Para el proceso de calibración, se utilizaron valores bibliográficos de las constantes de velocidad de degradación, que se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14. Valores bibliográficos de las constantes de velocidad de degradación**

Simbolo	Parámetro	Rango bibliográfico	Utilizado en este estudio
$k_{nd}$	Constante de velocidad de muerte natural	0.12-1.0 d <sup>-1</sup> (Burnet et al., 2017) 0.12-0.14 d <sup>-1</sup> (Mayo, 2004) 0.48-0.55 d <sup>-1</sup> (Craggs et al., 2004) 0.62 d <sup>-1</sup> (Davies-Colley et al., 2003) 0.72-2.88 d <sup>-1</sup> (Dias & von Sperling, 2018)	1.5 d <sup>-1</sup>
$k_s$	Constante de velocidad de desinfección solar	0.0086-0.245 m <sup>2</sup> .MJ <sup>-1</sup> (Mayo, 2004) 0.0675 m <sup>2</sup> .MJ <sup>-1</sup> (Davies-Colley et al., 2003) 0.033-0.142 m <sup>2</sup> .MJ <sup>-1</sup> (Craggs et al., 2004) 0.252 m <sup>2</sup> .MJ <sup>-1</sup> (Kalibbala et al., 2008) 0.25-1.07 m <sup>2</sup> .MJ <sup>-1</sup> (Maïga et al., 2009) 1.5 m <sup>2</sup> .MJ <sup>-1</sup> (Salih, 2003)	1.4 m <sup>2</sup> .MJ <sup>-1</sup>
$k_p$	Constante de velocidad de depredación	0.017+/-0.002 L.ind <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> (Burnet et al., 2017) 0.005-0.011 L.ind <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> (Abtahi et al., 2021) 0.002-0.056 L.ind <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> (Ismail et al., 2019) 0.029-0.096 L.ind <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> (Serra et al., 2019)	0.002 L.ind <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>
$\theta$	Coefficiente de corrección por temperatura	0.095-1.030 (Kadlec & Wallace, 2009)	$\theta_{nd}=\theta_s=\theta_p=1$

Se tomaron datos medidos en campo en las fechas indicadas, considerando el primer dato como el día uno. Los datos se recopilaban aproximadamente cada 15 días, sumando un total de 38 mediciones que abarcan un intervalo de 547 días (Tabla 15).

**Tabla 15. Valores de concentración de E. Coli medidos experimentalmente**

Día	Fecha	E. Coli (NMP/100 ml)	
		Entrada	Salida
1	17/10/2022	270	20
17	02/11/2022	313	52
29	14/11/2022	920.8	214.3
43	28/11/2022	579.4	166.4
72	27/12/2022	290.9	98.7
85	09/01/2023	579.4	387.3
99	23/01/2023	1553.1	488.1
113	06/02/2023	275.5	77.1
127	20/02/2023	307.6	10.9
141	06/03/2023	2419.6	60.9
155	20/03/2023	2481	45.7
169	03/04/2023	3255	12.1
184	18/04/2023	1081	36.6
198	02/05/2023	169	42
211	15/05/2023	496	119.8
225	29/05/2023	4884	201.4
239	12/06/2023	24196	461.1
267	10/07/2023	1866	110
281	24/07/2023	16328	3076
288	31/07/2023	48392	1670
309	21/08/2023	970	456
324	05/09/2023	155	84
337	18/09/2023	268	122
351	02/10/2023	738	369
368	19/10/2023	260	10
379	30/10/2023	1015	148
400	20/11/2023	1080	85
407	27/11/2023	315	96
421	11/12/2023	378	20
436	26/12/2023	1976	315
449	08/01/2024	820	175
464	23/01/2024	602	259
477	05/02/2024	524	1043
491	19/02/2024	576	201
505	04/03/2024	374	132
522	21/03/2024	170	63
541	09/04/2024	82	110
547	15/04/2024	82	175



El gráfico resultante de la Tabla 15 se muestra en la Figura 27.

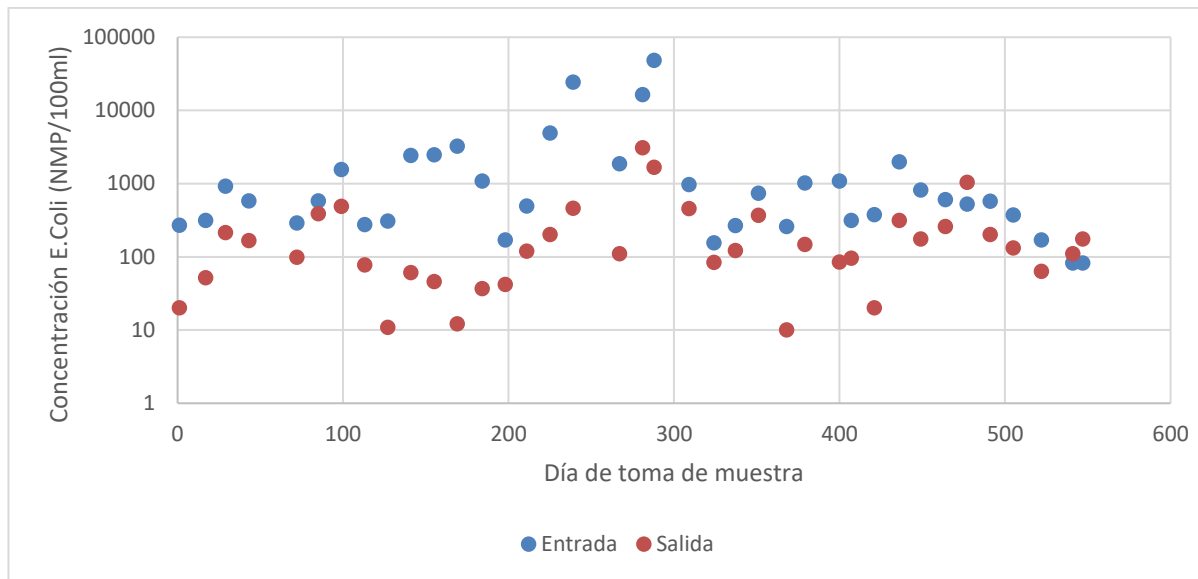


Figura 27. Concentración de E. Coli Entrada y Salida

De los datos mostrados se observa que las concentraciones de E. Coli en la entrada varían significativamente a lo largo del tiempo, oscilando entre valores bajos como 82 NMP/100 ml hasta concentraciones extremadamente altas como 48392 NMP/100 ml. Las concentraciones en la salida también muestran variabilidad, pero en general son menores que las de entrada, lo que indica que el sistema de tratamiento tiene una capacidad efectiva de reducir carga bacteriana.

En varios días, el rendimiento de eliminación es notablemente alto. Por ejemplo, el día 127 (20/02/2023), el sistema logra una reducción del 96.46%, pasando de 307.6 a 10.9 NMP/100 ml. Este alto rendimiento indica que, bajo ciertas condiciones, el sistema es muy efectivo. Hay días donde el rendimiento es moderado. Por ejemplo, el día 211 (15/05/2023), la entrada es de 496 NMP/100 ml y la salida es de 119.8 NMP/100 ml, lo que equivale a un rendimiento del 75.84%. Si consideramos todos los días, el rendimiento promedio general del sistema es de 77.79%.

Se midieron también experimentalmente los parámetros que intervienen en las cinéticas de degradación de E. Coli (ver Anexos), necesarios para la simulación en COMSOL. Estos parámetros son: caudal, cobertura de lenteja, radiación solar, temperatura, zooplancton, SST y el coeficiente de extinción  $k_e$ , relacionado con SST en el proceso de desinfección solar.

### Primera fase de calibración

El primer paso en el proceso de calibración consistió en considerar una única cinética de primer orden con el objetivo de aproximarnos a un valor de la constante de velocidad de degradación.

Se decidió tomar como referencia los valores  $k=2.9$  y  $\theta=1.03$  ya que minimiza error relativo logarítmico. La gráfica correspondiente se presenta en la Figura 28.

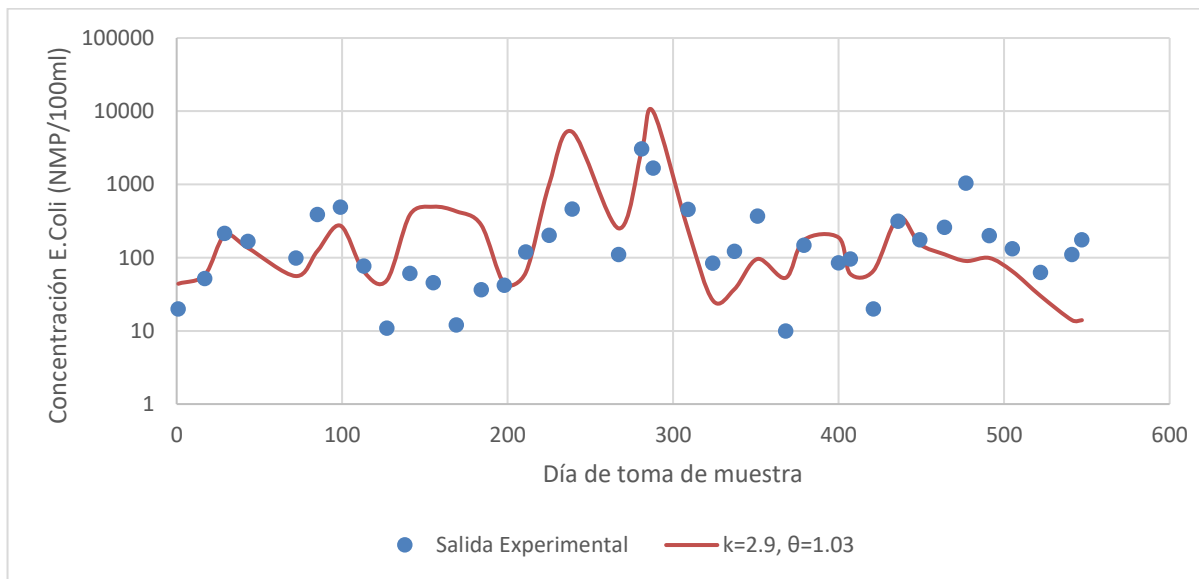


Figura 28. Gráficas de salida experimental y calibrada con Cinética única de E. Coli

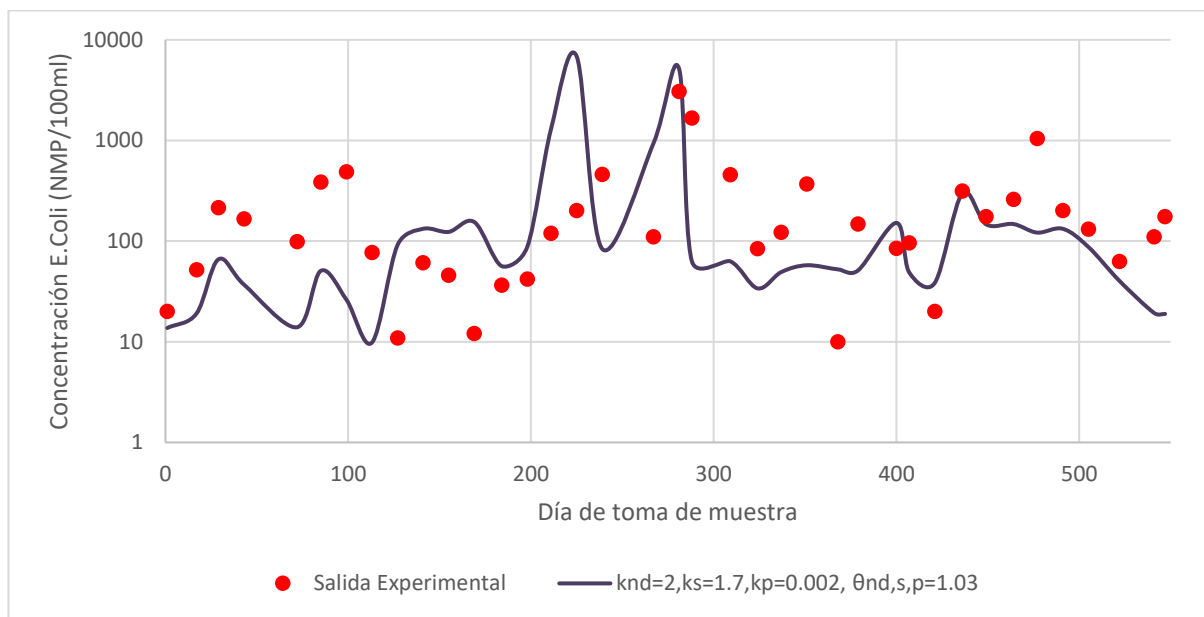
### Segunda fase de calibración

Con estos valores aproximados de la constante  $k$  de velocidad de degradación y el coeficiente  $\theta$  para corrección por temperatura, ahora se procede a considerar las cinéticas descritas en el apartado anterior 8.1. La Tabla 16 muestra el proceso de calibrado con la constante de velocidad descomposición o muerte natural ( $k_{nd}$ ), constante de velocidad de desinfección solar ( $K_s$ ), constante de depredación ( $K_p$ ) y el coeficiente de corrección por temperatura ( $\theta$ ).

**Tabla 16. Calibración con cinéticas de muerte natural, fotooxidación y depredación**

$k_{nd}$	$k_s$	$k_p$	$\theta_{nd}$	$\theta_s$	$\theta_p$	Prom. error relativo log
2	1.7	0.002	1.03	1.03	1.03	0.307
2	1.7	0.002	1.03	1.03	0.95	0.247
1	1.7	0.002	1.03	1.03	0.95	0.235
1.5	1.7	0.002	1.03	1.03	0.95	0.239
1.5	1.4	0.002	1.03	1.03	0.95	0.2355
1.5	1.4	0.002	1.03	1.03	1.03	0.2356
1.5	1.4	0.029	1.00	1.00	1.00	0.2324
1.5	1.4	0.002	1.00	1.00	1.00	0.2322

En la Figura 27 se muestra la gráfica del inicio del proceso de calibrado y luego se muestra la gráfica con los valores que finalmente dan un menor error logarítmico (Figura 28).



*Figura 29. Gráfica al inicio del calibrado*

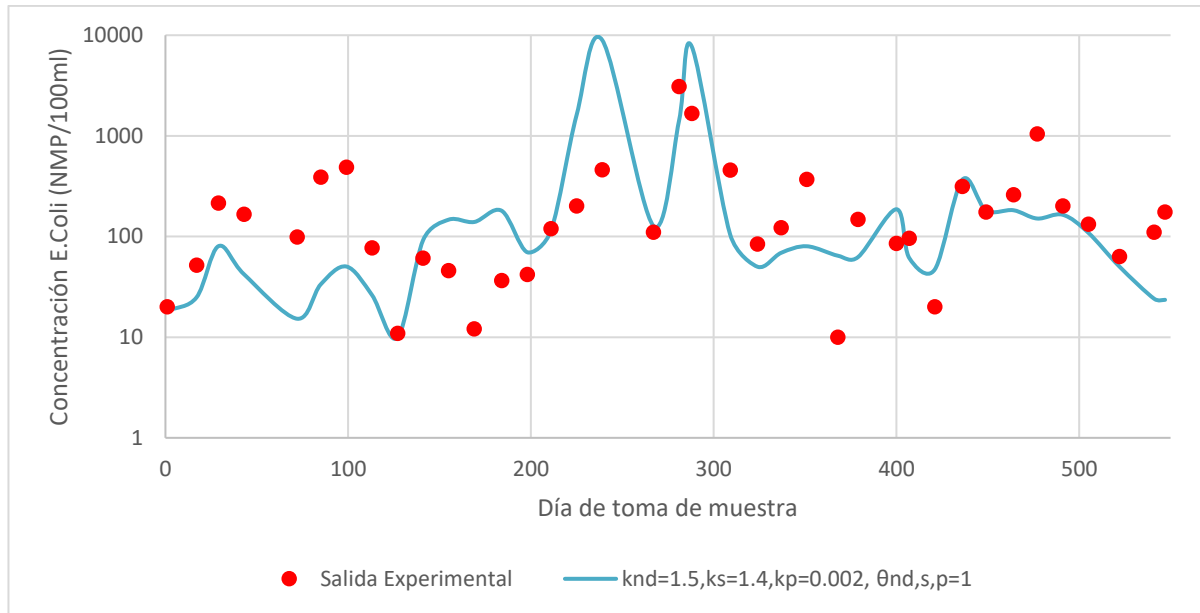


Figura 30. Gráfica con mejor error relativo

El modelo que incorpora los diferentes procesos de eliminación de E. Coli describe de manera más precisa los resultados experimentales en comparación con el modelo simplificado que utiliza una cinética de primer orden. Además, el error relativo medio obtenido en la escala logarítmica es menor para el modelo detallado (0.23) frente al modelo simplificado (0.26), lo que demuestra una mayor precisión y fiabilidad.

La constante de velocidad descomposición o muerte natural ( $k_{nd}$ ) utilizada se encuentra dentro del rango propuesto por (Días and von Sperling, 2018), la constante de velocidad de desinfección solar ( $K_s$ ) se encuentra por debajo del máximo propuesto por (Salih, 2003), la constante de depredación ( $K_p$ ) es el límite inferior del rango propuesto por (Ismail et al.,2019) y el valor del coeficiente de corrección por temperatura ( $\theta$ ) para las tres cinéticas es 1.

Este modelo es una herramienta valiosa para evaluar la eficiencia de humedales artificiales en la eliminación de E. Coli. Al simular diferentes escenarios, se pueden identificar los factores clave que afectan la eficacia del sistema, como la variación en la radiación solar, la temperatura y la presencia de zooplancton, lo que permite optimizar el diseño y la operación de humedales artificiales, ajustando parámetros como el caudal o la cobertura de lenteja, para maximizar la remoción de patógenos.

Al estar basado en principios físicos y cinéticos bien definidos, el modelo puede ser utilizado para predecir el comportamiento de E. Coli bajo diferentes condiciones de operación y escalas, facilitando la planificación y diseño de sistemas de tratamiento en diversas ubicaciones geográficas.

Este modelo puede ser extendido y mejorado para incluir otros patógenos o contaminantes, así como para explorar la interacción de diferentes procesos físicos y biológicos en la remoción de contaminantes, proporcionando una plataforma robusta para futuras investigaciones.

## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El modelo implementado ha demostrado ser eficaz en la simulación del comportamiento hidrodinámico y en la predicción de la distribución de las concentraciones de E. Coli en el humedal de flujo superficial. Esto sugiere que el modelo es una herramienta válida para el diseño y la optimización de sistemas de tratamiento de aguas mediante humedales artificiales.

El proceso de calibración mostró una mejora progresiva en la precisión de los resultados conforme se ajustaron los valores de las constantes cinéticas. La constante de velocidad de degradación  $k$  y el coeficiente de corrección por temperatura  $\theta$  fueron seleccionados cuidadosamente para minimizar los errores relativos logarítmicos, lo que sugiere que el modelo puede replicar de manera efectiva el comportamiento observado experimentalmente.

La eficiencia del sistema varía considerablemente a lo largo del tiempo. Por ejemplo, el día 127 (20/02/2023), la concentración de E. coli en la entrada es de 307.6 NMP/100 ml, y la salida es solo de 10.9 NMP/100 ml, lo que representa una reducción significativa. Sin embargo, en otros días, como el 547 (15/04/2024), la salida es incluso mayor que la entrada, lo que podría sugerir un problema en el tratamiento o un error de medición.

Es importante investigar las posibles causas de las fluctuaciones extremas en la entrada y en la salida. Esto podría incluir factores como cambios en la fuente de agua, en las condiciones ambientales o en la operación del sistema.

Dado que las concentraciones de E. coli pueden variar considerablemente en períodos cortos de tiempo, es recomendable realizar un monitoreo más frecuente para detectar problemas o fallos en el sistema de tratamiento lo antes posible.

Dado que hay días en los que el sistema no reduce de manera adecuada las concentraciones de E. coli (e incluso las incrementa en la salida), sería recomendable revisar y posiblemente optimizar los procesos de tratamiento para asegurar una reducción constante y eficiente de la carga bacteriana.

La variabilidad en el rendimiento sugiere que el sistema es sensible a cambios en las condiciones de entrada o en las condiciones operativas. Factores como la temperatura, el pH, la carga orgánica, y el caudal pueden estar influyendo en la eficiencia del sistema.

Si es posible, controlar las condiciones ambientales dentro del sistema, como la temperatura y la iluminación, podría ayudar a mejorar la eficiencia de eliminación. Los días con bajo rendimiento o incremento en la salida deben ser investigados a fondo para identificar y corregir los factores que están causando la baja eficiencia.

Se ha demostrado que los humedales artificiales con macrófitos emergentes eliminan eficazmente las bacterias entéricas, incluida E. Coli, mediante una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos (Vymazal, 2007).

La implementación de humedales artificiales de flujo superficial de agua libre pueden ser una estrategia efectiva y sostenible para alcanzar varios ODS, abordando problemas relacionados con el agua, el clima, los ecosistemas y las comunidades urbanas. Estos sistemas no solo mejoran la calidad del agua y protegen la biodiversidad, sino que también contribuyen a la mitigación del cambio climático y al desarrollo de ciudades más sostenibles y resilientes.

El coste de no reutilizar el agua residual regenerada implica varios ítems como son el coste derivado de la falta de garantía en el abastecimiento de agua; las dificultades para el riego; la sobreexplotación de acuíferos; la falta de caudal y calidad en los ríos. Únicamente a través de la valoración monetaria de la totalidad de estos efectos

mediante métodos fiables podremos disponer de una percepción realista del elevado coste de no actuar en materia de reutilización.

Se recomienda llevar a cabo un análisis más detallado de la influencia de la geometría en el comportamiento del humedal. Esto puede incluir la simulación de diferentes configuraciones geométricas para identificar el diseño más eficiente en términos de depuración de E. Coli.

Para asegurar el buen funcionamiento del sistema, es crucial implementar un monitoreo continuo de las condiciones ambientales y de las concentraciones de E. Coli. Esto permitirá ajustar el modelo y las operaciones del humedal en tiempo real para mantener una alta eficiencia de tratamiento.

Se sugiere realizar estudios a largo plazo para evaluar el comportamiento del humedal bajo diferentes condiciones climáticas y operacionales. Esto ayudará a mejorar la robustez del modelo y a adaptar el sistema a diferentes escenarios.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abtahi, S. M. H., Aryal, O., & Ismail, N. S. (2021). Emerging investigator series: interacting effects of environmental factors on *Daphnia magna* removal of *Escherichia coli* from wastewater. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 7(4), 726–738. <https://doi.org/10.1039/D1EW00008J>

Andrade Rosero, V. A. (2021). *Estudio de la Hidrodinámica y eliminación de Coliformes fecales en la laguna de maduración de la depuradora de aguas residuales de la ciudad de Portoviejo, Ecuador, mediante modelos CFD con Openfoam*. Universitat Politècnica de Valencia.

Arroyo, P., Blanco, I., Cortijo, R., De Luis Calabuig, E., & Ansola, G. (2013). Twelve-year performance of a constructed wetland for municipal wastewater treatment: Water quality improvement, metal distribution in wastewater, sediments, and vegetation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(11). <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1762-3>

Burnet, J. B., Faraj, T., Cauchie, H. M., Joaquim-Justo, C., Servais, P., Prévost, M., & Dorner, S. M. (2017). How does the cladoceran *Daphnia pulex* affect the fate of



Escherichia coli in water? *PLoS ONE*, 12(2).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171705>

Celeita, D. (2016). *Creación Modelo CFD del Proyecto de Drenaje Urbano y Cambio Climático para Validar las Suposiciones Hidráulicas*. Universidad de Los Andes. Bogota 2016. Universidad de los Andes.

Chapra, S. C. (1997). *Surface Water-quality Modelling* (Waveland Press Inc.).

Craggs, R. J., Zwart, A., Nagels, J. W., & Davies-Colley, R. J. (2004). Modelling sunlight disinfection in a high rate pond. *Ecological Engineering*, 22(2), 113–122.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.03.001>

Dahl, N. W., Woodfield, P. L., Simpson, B. A. F., Stratton, H. M., & Lemckert, C. J. (2021). Effect of turbulence, dispersion, and stratification on Escherichia coli disinfection in a subtropical maturation pond. *Journal of Environmental Management*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112470>

Davies-Colley, R. J., Craggs, R. J., & Nagels, J. W. (2003). Disinfection in a pilot-scale “advanced” pond system (APS) for domestic sewage treatment in New Zealand. *Water Sci. Technol.*, 81–87.

Dias, D. F. C., & von Sperling, M. (2018). Vertical profiling and modelling of Escherichia coli decay in a shallow maturation pond operating in a tropical climate. *Environmental Technology*, 39(6), 759–769.  
<https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1310936>

Directiva 2000/60/CE. (2000). *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo*.

Dotro, Gabriela., Langergraber, Guenter., & Molle, Pascal. (2021). *Humedales para Tratamiento*. IWA Publishing.

Fewtrell, Lorna. (2002). *Water quality: guidelines, standards and health: assessment of risk and risk management for water-related infectious disease*. IWA Publishing.

Galeano, B., & Aguirre, A. (2020). *Análisis Aerodinámico del Cuerpo de Ahmed mediante CFD*.

- Garcia, J. A. (2010). *Efecto del uso de plantas y configuración de los sistemas en la remoción de organismos patógenos mediante el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales.*
- Hernández-Crespo, C., Fernández-Gonzalvo, M. I., Miglio, R. M., & Martín, M. (2022a). Escherichia coli removal in a treatment wetland - pond system: A mathematical modelling experience. *Science of the Total Environment*, 839. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156237>
- Hu, S., Zhu, H., Bañuelos, G., Shutes, B., Wang, X., Hou, S., & Yan, B. (2023). Factors Influencing Gaseous Emissions in Constructed Wetlands: A Meta-Analysis and Systematic Review. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 20, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053876>
- Ismail, N. S., Blokker, B. M., Feeney, T. R., Kohn, R. H., Liu, J., Nelson, V. E., Ollive, M. C., Price, S. B. L., & Underdah, E. J. (2019). Impact of Metazooplankton Filter Feeding on Escherichia coli under Variable Environmental Conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(23), e02006-19. <https://doi.org/10.1128/AEM.02006-19>
- Jasper, J. T., Nguyen, M. T., Jones, Z. L., Ismail, N. S., Sedlak, D. L., Sharp, J. O., Luthy, R. G., Horne, A. J., & Nelson, K. L. (2013). Unit Process Wetlands for Removal of Trace Organic Contaminants and Pathogens from Municipal Wastewater Effluents. *Environmental Engineering Science*, 30(8), 421–436. <https://doi.org/10.1089/ees.2012.0239>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands.*
- Kalibbala, M., Mayo, A. W., Asaeda, T., & Shilla, D. A. (2008). Modelling faecal streptococci mortality in constructed wetlands implanted with Eichhornia crassipes. *Wetlands Ecology and Management*, 16(6), 499–510. <https://doi.org/10.1007/s11273-008-9084-8>
- Langergraber, G., Rousseau, D. P. L., García, J., & Mena, J. (2009). A General Model to Describe Biokinetic Processes in Subsurface Flow Constructed Wetlands. *Water Science and Technology*, 1687–1697.

- Maïga, Y., Denyigba, K., Wethe, J., & Ouattara, A. S. (2009). Sunlight inactivation of *Escherichia coli* in waste stabilization microcosms in a sahelian region (Ouagadougou, Burkina Faso). *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *94*(2), 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2008.10.008>
- Mayo, A. W. (2004). Kinetics of bacterial mortality in granular bed wetlands. *Physics and Chemistry of the Earth*, *29*(15-18 SPEC.ISS.), 1259–1264. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.09.030>
- Montero, M. (2021). *Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial en la remoción de bacterias patógenas*. Instituto Tecnológico de Boca del Río.
- Nelson, K. L., Boehm, A. B., Davies-Colley, R. J., Dodd, M. C., Kohn, T., Linden, K. G., Liu, Y., Maraccini, P. A., McNeill, K., Mitch, W. A., Nguyen, T. H., Parker, K. M., Rodriguez, R. A., Sassoubre, L. M., Silverman, A. I., Wigginton, K. R., & Zepp, R. G. (2018). Sunlight-mediated inactivation of health-relevant microorganisms in water: a review of mechanisms and modeling approaches. *Environmental Science: Processes and Impacts*, *20*(8), 1089–1122. <https://doi.org/10.1039/c8em00047f>
- RD 1620/2007. (2007). *Real Decreto 1620/2007 Regimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas*.
- Reglamento UE 2020/741. (2020). *Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo*.
- Rousseau, D. P. L., Vanrolleghem, P. A., & Pauw, N. De. (2004). Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: A review. *Water Research*, *38*(6), 1484–1493. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.12.013>
- Sah, L., Rousseau, D. P. L., Hooijmans, C. M., & Lens, P. N. L. (2011). 3D model for a secondary facultative pond. *Ecological Modelling*, *222*(9), 1592–1603. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.021>
- Salcedo, R., Bayón, A., & Chueca, P. (2017). Introduciendo la dinámica de fluidos computacional en el análisis de flujos en medio poroso. *Modelling in Science Education and Learning*, *10*(1), 261. <https://doi.org/10.4995/msel.2017.6700>

- Salih, F. M. (2003). Formulation of a mathematical model to predict solar water disinfection. *Water Research*, 37(16), 3921–3927. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00307-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00307-5)
- Serra, T., Müller, M. F., Barcelona, A., Salvadó, V., Pous, N., & Colomer, J. (2019). Optimal light conditions for Daphnia filtration. *Science of the Total Environment*, 686, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.482>
- Song, H. L., Yang, Z. Y., Zhou, B., & Zhang, M. (2006). Mechanism and influencing factors of bacteria removal in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 74–82.
- Verhoeven, J. T. A., & Meuleman, A. F. M. (1999). Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. In *Ecological Engineering* (Vol. 12).
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. In *Water (Switzerland)* (Vol. 2, Issue 3, pp. 530–549). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- World Health Organization (WHO). (2022). *Guidelines for drinking-water quality*.
- Wu, S., Carvalho, P. N., Müller, J. A., Manoj, V. R., & Dong, R. (2016). Sanitation in constructed wetlands: A review on the removal of human pathogens and fecal indicators. In *Science of the Total Environment* (Vol. 541, pp. 8–22). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.047>
- Wu, S., Kuschik, P., Brix, H., Vymazal, J., & Dong, R. (2014). Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. In *Water Research* (Vol. 57, pp. 40–55). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.020>

- 
- Wu, S., Kuschk, P., Brix, H., Vymazal, J., & Dong, R. (2016). Development of Constructed Wetlands in Performance Intensifications for Wastewater Treatment: A Nitrogen and Organic Matter Targeted Review. *Water Research*, 104–116.
- Yang, L., Jin, X., Hu, Y., Zhang, M., Wang, H., Jia, Q., & Yang, Y. (2024). Technical structure and influencing factors of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 89(2), 271–289. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.414>

## 10. ANEXOS

Datos experimentales utilizados como datos de entrada al modelo y que son ingresados con la función interpolación en COMSOL. Todos los datos fueron proporcionados por el equipo de investigación del proyecto LIFE. Solo los datos de radiación solar fueron extraídos del IDAE.

Día	Caudal ingreso (m3/d)
8	15.14
10	15.61
29	19.92
38	18.43
43	19.67
44	28.09
57	12.64
58	11.37
72	14.84
85	17.04
94	17.11
99	11.98
102	9.68
109	7.95
113	15.87
122	15.19
127	10.62
141	11.19
142	7.49
143	44.35
148	21.96
149	21.6
155	15.43
165	19.96
169	8.83
170	17.7
177	18.78
184	22.28
186	23.46
191	21.15
198	21.68
205	22.2
211	10.28
221	14.61
225	19.04
233	21.6
239	22
247	10.24
253	28.67
260	26.65
267	11.23
277	15.01
281	19.83
288	23.26
302	20.75
309	16.76
317	18.85
324	14.88
331	13.1

337	13.51
345	10.53
359	14.43
368	17.22
372	14.83
379	14.79
387	14.79
407	14.62
415	13.32
428	16.58
436	15.48
452	15.60
464	15.72
471	14.46

Día	Cobertura lenteja agua (%)
10	0.5
109	0.1
141	0.6
155	0.7
198	1
211	1
221	1
233	1
247	1
260	0.9
267	0.85
277	0.7
288	0.9
302	0.75
324	1
331	0.95
337	1
345	0.9
351	0.9
359	0.95
372	0.95
379	0.5
387	0.9
407	0.9
415	0.6
428	1
436	0.9
452	0.95
464	1
471	1



Día	T (°C)
1	23.1
10	23.1
17	22.6
29	20.1
43	17.7
72	16.2
85	16
99	13
113	12.8
127	13.4
141	13.3
155	16.7
169	17
184	18.5
198	20.4
211	21.5
225	21.2
239	24.1
253	26
267	26.9
281	28
288	28.3
309	28.3
324	26.3
337	25.7
351	24.7
368	20.1

Día	Zooplancton (indiv/m3)
5	0.853527
38	2.059751
72	9.73444
99	2.179668
127	0.239834
184	0.082295
212	0.258644
274	0.011756

Día	TSS (mg/l)
1	1
10	1
17	1
29	2
43	0
57	1
72	1
85	2
99	1
113	2
127	2
141	2
155	4
169	3
184	1
198	2
211	1
225	9
239	1
253	4
267	2
281	1
288	2
309	1
324	1
337	4
351	2
368	3
379	2
400	1
407	2
421	3
436	2
449	4
464	5
477	1
491	3
505	7
522	3
541	4
547	3