



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SANEAMIENTO EN
TIERRA SANTA

Manuel Márquez Lendínez

Director: Dr. Antonio García y de Garmendia

Madrid, enero de 2026

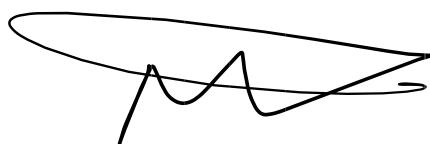
ÍNDICE DE LA MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño de un sistema de saneamiento en tierra santa
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Manuel Márquez Lendínez

Fecha: 19/01/2026

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO


Antonio García y de Garmendia

Fdo.: Dr. Antonio García y de Garmendia

Fecha: 19/01/2026

ÍNDICE DE LA MEMORIA



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO
DISEÑO DE UN SISTEMA DE SANEAMIENTO EN
TIERRA SANTA

Manuel Márquez Lendínez

Director: Dr. Antonio García y Garmendia

Madrid, enero de 2026

ÍNDICE DE LA MEMORIA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SANEAMIENTO EN TIERRA SANTA

Márquez Lendínez, Manuel.

Director: Dr. García Garmendia, Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto se centra en el diseño de una unidad modular de saneamiento descentralizado tipo DEWATS para una población de referencia en Rafah ($N=150$), las características principales son la operación por gravedad, la baja dependencia energética y el mantenimiento simple. El sistema se compone de pretratamiento/decantación, reactor anaerobio compartimentado (ABR), humedal subsuperficial horizontal (HSSF) y depósito final de reutilización. Para $Q_{med}=10,2 \text{ m}^3/\text{d}$ y $HRT_{ABR}=24 \text{ h}$ se dimensionan $V_{ABR,tot}=13,26 \text{ m}^3$ ($n=5$) y $A_{HSSF,tot}=122,4 \text{ m}^2$ ($h=0,60 \text{ m}$). El CAPEX estimado es 8.740 € y el OPEX anual equivalente se sitúa en el orden de 3–4 €/pers·año. Además, el efluente tiene un nivel de calidad compatible con la reutilización no potable.

1. Introducción

El proyecto se plantea en una zona donde el saneamiento convencional es prácticamente imposible debido a varias barreras técnicas (energía, repuestos, operación especializada y obras de gran escala). En esta situación, el saneamiento descentralizado permite diseñar infraestructuras modulares que funcionan por gravedad y soportan variaciones de caudal y carga. El DEWATS diseñado se basa en procesos anaerobios y etapas naturales de pulido, con baja producción de lodos y tareas de mantenimiento de baja complejidad.

2. Definición del proyecto

El objetivo es diseñar un sistema modular de tratamiento pasivo para aguas residuales domésticas, compatible con un entorno como el que hay en Rafah. Se fijan varios requisitos:

- Operación sin energía en las diferentes fases del proceso
- Accesibilidad para inspección y control de sólidos
- Gestión de lodos con plan de mantenimiento preventivo

ÍNDICE DE LA MEMORIA

- Reutilización no potable del efluente

La unidad se diseña para N=150 habitantes, sin embargo, se trata de un diseño que permite la escalabilidad en caso de aumento poblacional.

3. Descripción del sistema/modelo

La línea de tratamiento tiene una disposición en serie: (1) pretratamiento y decantación primaria; (2) reactor ABR (n=5) como parte principal para la reducción de materia orgánica; (3) humedal HSSF como etapa de pulido físico-biológico y (4) depósito final para regulación y reutilización. Para el dimensionamiento hidráulico se hace uso de $Q_{med}=N \cdot q \cdot f$ y un factor de pico K_p para estimar Q_{max} , se verifican también pendientes y capacidad de conducción. En el humedal se incorpora una arqueta de entrada para homogeneización y limpieza del colector, y zanjas de anclaje perimetral para fijación de la geomembrana.



Ilustración 1 Esquema general (Elaboración propia, 2026)

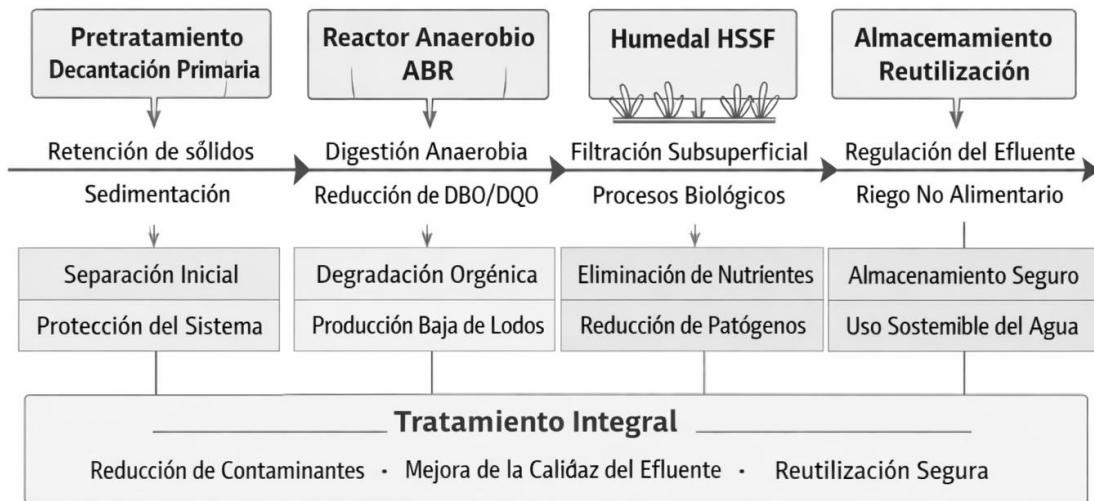


Ilustración 2 Diagrama funcional por unidades DEWATS (elaboración propia, 2026)

4. Resultados

Los resultados principales del proyecto son los siguientes:

- $Q_{med}=10,2 \text{ m}^3/\text{d}$; $Q_{max}=13,3 \text{ m}^3/\text{d}$ ($K_p=1,3$); ABR con $HRT=24 \text{ h}$ y $V_{ABR,tot}=13,26 \text{ m}^3$ ($n=5$); humedal HSSF con $A_{tot}=122,4 \text{ m}^2$ y $h=0,60 \text{ m}$
- Arquitectura robusta: operación por gravedad, bypass y rebores de seguridad, registros accesibles y pretratamiento diseñado para minimizar la colmatación del ABR y del medio poroso.
- CAPEX total estimado 8.740 € por unidad ($N=150$) y OPEX anual del orden de 500–550 €/año ($\approx 3-4 \text{ €/pers}\cdot\text{año}$) con mantenimiento mínimo.
- Se espera una reducción grande de DBO₅ y SST en la parte anaerobia + humedal, lo que haría posible una reutilización no potable del efluente (riego de especies no alimentarias/control de polvo).

5. Conclusiones

El diseño del sistema cumple los objetivos técnicos que hacen que sea modular, pasivo y funcione por gravedad, con parámetros de dimensionamiento realistas y presupuesto razonable. La configuración ABR+HSSF se ha escogido por su estabilidad y baja exigencia

ÍNDICE DE LA MEMORIA

operativa. Las limitaciones principales son la gestión de los residuos y la colmatación del humedal, además, como trabajo futuro se recomienda validar con datos locales (calidad de influente, permeabilidad del sustrato y seguimiento de operación) y hacer al ser posible una implantación por fases.

6. Referencias

- [1] E. Tilley et al., Compendium of Sanitation Systems and Technologies, 2nd ed. Dübendorf: Eawag-Sandec, 2014.
- [2] A. von Muench et al., Technology Review of DEWATS (Decentralised Wastewater Treatment Systems). GIZ, 2011. [Online]. Available: <https://www.susana.org>
- [3] A. Gutterer, L. Sasse, M. Panzerbieter, and T. Reckerzügl, Decentralised Wastewater Treatment Systems (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries. Bremen: BORDA, 2009.
- [4] Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [5] C. Dotro et al., Wastewater Treatment by Constructed Wetlands. London: IWA Publishing, 2017.
- [6] World Health Organization, Guidelines on Sanitation and Health. Geneva: WHO, 2018.

DESIGN OF A SANITATION SYSTEM IN THE HOLY LAND

Márquez Lendínez, Manuel.

Director: Dr. García Garmendia, Antonio.

Collaborating Entity: ICAI – Comillas Pontifical University

PROJECT SUMMARY

The project focuses on the design of a DEWATS-type decentralized modular sanitation unit for a reference population in Rafah ($N=150$). Its main features are gravity-fed operation, low energy dependence, and simple maintenance. The system consists of pretreatment/settling, a compartmentalized anaerobic reactor (ABR), a horizontal subsurface wetland (HSSF), and a final reuse tank. For $Q_{med}=10.2 \text{ m}^3/\text{d}$ and $HRT_{ABR}=24 \text{ h}$, $V_{ABR,tot}=13.26 \text{ m}^3$ ($n=5$) and $A_{HSSF,tot}=122.4 \text{ m}^2$ ($h=0.60 \text{ m}$) are dimensioned. The estimated CAPEX is €8,740 and the equivalent annual OPEX is in the order of €3–4/person/year. In addition, the effluent has a quality level compatible with non-potable reuse.

1. Introduction

The project is proposed in an area where conventional sanitation is practically impossible due to several technical barriers (energy, spare parts, specialized operation, and large-scale works). In this situation, decentralized sanitation allows for the design of modular infrastructures that operate by gravity and withstand variations in flow and load. The DEWATS designed is based on anaerobic processes and natural polishing stages, with low sludge production and low-complexity maintenance tasks.

2. Project definition

The objective is to design a modular passive treatment system for domestic wastewater, compatible with an environment such as that in Rafah. Several requirements are set:

- Energy-free operation in the different stages of the process
- Accessibility for inspection and solids control
- Sludge management with preventive maintenance plan
- Non-potable reuse of effluent

ÍNDICE DE LA MEMORIA

The unit is designed for N=150 inhabitants, however, it is a design that allows for scalability in case of population increase.

3. Description of the system/model

The treatment line has a serial arrangement: (1) pretreatment and primary settling; (2) ABR reactor ($n=5$) as the main part for the reduction of organic matter; (3) HSSF wetland as a physical-biological polishing stage; and (4) final reservoir for regulation and reuse. For hydraulic sizing, $Q_{med}=N \cdot q \cdot f$ and a peak factor K_p are used to estimate Q_{max} , and slopes and conduction capacity are also verified. An inlet chamber is incorporated into the wetland for homogenization and cleaning of the collector, and perimeter anchor trenches are used to secure the geomembrane.



Figure 1 Illustration 1 General diagram (Own work, 2026)

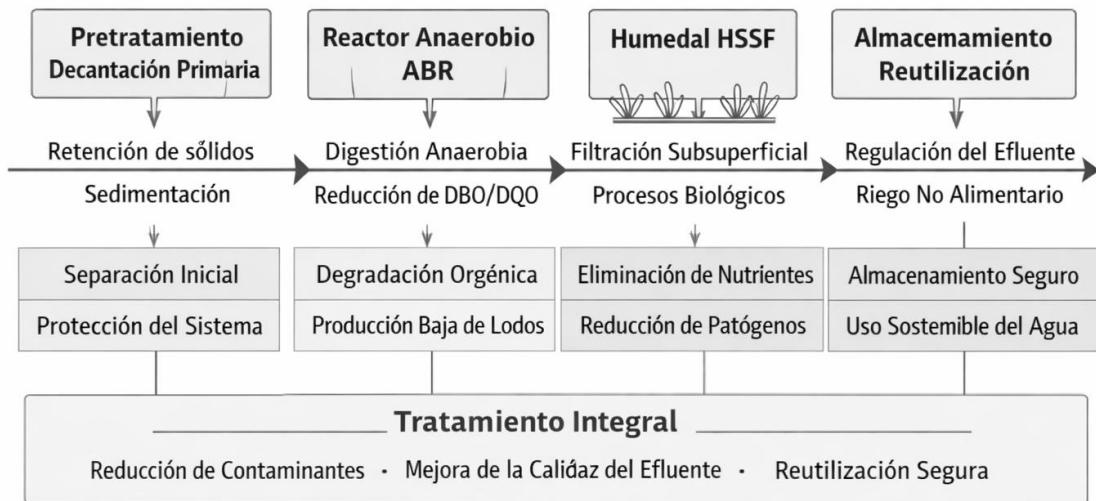


Figure 2 Illustration 2 Functional diagram by DEWATS units (Own work, 2026)

4. Results

The main results of the project are as follows:

- $Q_{med}=10.2 \text{ m}^3/\text{d}$; $Q_{max}=13.3 \text{ m}^3/\text{d}$ ($K_p=1.3$); ABR with $HRT=24 \text{ h}$ and $V_{ABR,tot}=13.26 \text{ m}^3$ ($n=5$); HSSF wetland with $A_{tot}=122.4 \text{ m}^2$ and $h=0.60 \text{ m}$
- Robust architecture: gravity operation, bypass and safety overflows, accessible registers, and pretreatment designed to minimize clogging of the ABR and porous media.
- Total estimated CAPEX €8,740 per unit ($N=150$) and annual OPEX in the range of €500–550/year ($\approx €3–4/\text{person}\cdot\text{year}$) with minimal maintenance.
- A large reduction in BOD₅ and TSS is expected in the anaerobic + wetland section, which would enable non-potable reuse of the effluent (irrigation of non-food crops/dust control).

5. Conclusions

The system design meets the technical objectives of being modular, passive, and gravity-fed, with realistic sizing parameters and a reasonable budget. The ABR+HSSF configuration

has been chosen for its stability and low operational requirements. The main limitations are waste management and wetland silting. In addition, as future work, it is recommended to validate with local data (influent quality, substrate permeability, and operation monitoring) and, if possible, implement in phases.

6. References

- [1] E. Tilley et al., Compendium of Sanitation Systems and Technologies, 2nd ed. Dübendorf: Eawag-Sandec, 2014.
- [2] A. von Muench et al., Technology Review of DEWATS (Decentralized Wastewater Treatment Systems). GIZ, 2011. [Online]. Available: <https://www.susana.org>
- [3] A. Gutterer, L. Sasse, M. Panzerbieter, and T. Reckerzügl, Decentralized Wastewater Treatment Systems (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries. Bremen: BORDA, 2009.
- [4] Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [5] C. Dotro et al., Wastewater Treatment by Constructed Wetlands. London: IWA Publishing, 2017.
- [6] World Health Organization, Guidelines on Sanitation and Health. Geneva: WHO, 2018.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
1.1 Motivación del proyecto	28
1.2 Contexto humanitario en rafah.....	28
1.3 Relevancia del saneamiento descentralizado	30
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	32
2.1 Sistemas DEWATS.....	32
2.1.1 Arquitectura funcional de un sistema DEWATS.....	32
2.1.2 Unidad de pretratamiento	33
2.1.3 Reactor anaerobio compartimentado (ABR).....	33
2.1.4 Filtro anaerobio o lecho biológico ascendente	34
2.1.5 Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal	34
2.2 Tecnologías anaerobias y aeróbicas	35
2.2.1 Tecnologías anaerobias.....	35
2.2.2 Tecnologías aerobias.....	36
2.2.3 Comparación	36
2.3 Humedales artificiales.....	37
2.4 Reutilización de biogás	39
2.5 Reutilización de agua tratada	39
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	41
3.1 Proyecto SARASWATI 2.0 (India)	41
3.2 Proyecto SANIMAS (Indonesia)	43
3.3 Proyecto en Huila (Colombia)	45
3.4 Proyecto BORDA-CEWEPA (Fiyi).....	47
3.5 Humedales Subsuperficiales en Ecuador	48
3.6 Proyecto de Humedales Descentralizados en el Delta del Mekong (Vietnam).....	49
3.7 Proyecto de Sistemas DEWATS en el Hospital de Chengalpattu (India).....	51
3.8 Comparación crítica aplicable al caso de estudio	53
Capítulo 4. Definición del Trabajo	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
4.1 Justificación	55
4.1.1 Problemas de saneamiento en Rafah.....	55

ÍNDICE DE LA MEMORIA

<i>4.1.3 Pontencial impacto social y ambiental.....</i>	<i>59</i>
4.2 Objetivos.....	60
4.3 Metodología	61
Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado..... <i>¡Error! Marcador no definido.</i>	
5.1 Hipótesis de diseño	63
5.2 Análisis de requisitos del Sistema.....	65
<i>5.2.1 Configuración general del sistema.....</i>	<i>66</i>
<i>5.2.3 Análisis hidráulico del sistema.....</i>	<i>66</i>
<i>5.2.4 Pretratamiento y decantación primaria</i>	<i>67</i>
<i>5.2.5 Reactor anaerobio de flujo compartimentado (ABR).....</i>	<i>67</i>
<i>5.2.6 Producción y gestión de lodos.....</i>	<i>67</i>
<i>5.2.7 Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal</i>	<i>68</i>
<i>5.2.8 Reutilización del efluente tratado.....</i>	<i>68</i>
5.3 Diseño técnico del sistema DEWATS	69
<i>5.3.2 Esquema de funcionamiento del sistema</i>	<i>71</i>
<i>5.3.2 Componentes principales</i>	<i>72</i>
<i>5.3.3 Diagramas y planos.....</i>	<i>78</i>
5.4 PLAN DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN	81
<i>5.4.1 Organización operativa y roles</i>	<i>81</i>
<i>5.4.2 Protocolo de puesta en marcha (arranque)</i>	<i>82</i>
<i>5.4.3 Plan de mantenimiento por unidades</i>	<i>82</i>
<i>5.4.4 Control mínimo de calidad del efluente (orientado a reutilización)</i>	<i>85</i>
<i>5.4.5 Gestión de incidencias y modos de fallo</i>	<i>86</i>
<i>5.4.6 Síntesis operativa.....</i>	<i>86</i>
5.5 Planificación y Estimación Económica.....	88
<i>5.5.3 Indicadores económicos</i>	<i>91</i>
Capítulo 6. Análisis de Resultados..... <i>¡Error! Marcador no definido.</i>	
6.1 Evaluación técnica	93
<i>6.1.1 Resultados de dimensionamiento y coherencia hidráulica</i>	<i>93</i>
<i>6.1.2 Resultados de rendimiento esperado por etapas</i>	<i>94</i>
<i>6.1.3 Robustez, resiliencia y puntos críticos</i>	<i>94</i>
6.2 Evaluación económica	95
<i>6.2.1 Resultados de CAPEX y OPEX</i>	<i>95</i>

ÍNDICE DE LA MEMORIA

6.3 Impacto ambiental y social esperado	95
6.3.1 Reducción de carga contaminante y mejora ambiental	95
6.3.2 Reutilización no potable y presión sobre el recurso hídrico.....	96
6.3.3 Impacto social y sanitario	96
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
7.1 Conclusiones generales del proyecto	97
7.2 Limitaciones encontradas.....	98
7.3 Recomendaciones y posibles mejoras (trabajos futuros)	99
Capítulo 8. Bibliografía.....	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
ANEXO A PLANOS DEL SISTEMA.....	114
 ANEXO B CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES..... 120	
B.1 Datos de partida y conversiones	120
B.2 Pretratamiento y decantación primaria.....	121
<i>Parámetro de diseño.....</i>	121
<i>Volumen útil y volumen de proyecto.....</i>	121
<i>Cierre geométrico definitivo.....</i>	121
B.3 Reactor anaerobio de flujo compartimentado (ABR).....	122
<i>Parámetros de diseño.....</i>	122
<i>Volumen útil (HRT)</i>	122
<i>Verificación por carga orgánica volumétrica (OLR)</i>	122
<i>Volumen total de proyecto (holgura + lodos)</i>	122
<i>Cierre geométrico definitivo.....</i>	122
<i>Verificación hidráulica rápida (velocidad ascensional)</i>	123
B.4 Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HSSF).....	123
<i>Parámetros de diseño.....</i>	123
<i>Área requerida</i>	124
<i>Cierre geométrico definitivo.....</i>	124
<i>Verificación por HRT en medio poroso.....</i>	124
<i>Especificación conceptual de capas y colectores.....</i>	124
B.5 Depósito final / punto de reutilización	125
<i>Parámetro de regulación.....</i>	125
<i>Volumen.....</i>	125

ÍNDICE DE LA MEMORIA

<i>Cierre geométrico definitivo.....</i>	<i>125</i>
B.6 Interconexiones hidráulicas (tuberías, pendientes y verificación rápida).....	126
<i>Criterio de selección.....</i>	<i>126</i>
<i>Verificación de capacidad (Manning).....</i>	<i>126</i>
<i>Observación operativa (velocidad baja).....</i>	<i>127</i>
<i>ANEXO C COSTES Y MATERIALES.....</i>	<i>128</i>
C.1 Objeto y alcance del anexo.....	128
C.2 Datos de entrada usados para mediciones	128
C.3 Precios unitarios adoptados.....	128
C.4 Cálculo del CAPEX por componentes	129
<i>Prefiltro + decantación primaria + pozo de lodos</i>	<i>129</i>
<i>Reactor anaerobio compartimentado ABR.....</i>	<i>130</i>
<i>Humedal artificial HSSF.....</i>	<i>131</i>
<i>Conexiones, válvulas y obras menores.....</i>	<i>132</i>
<i>Formación y documentación técnica.....</i>	<i>133</i>
<i>Supervisión técnica de puesta en marcha.....</i>	<i>133</i>
C.5 Resumen del CAPEX total	133
<i>Hipótesis económicas adoptadas</i>	<i>134</i>
<i>Cálculo de mano de obra</i>	<i>134</i>
<i>Gestión de lodos</i>	<i>135</i>
<i>Consumibles y correctivo</i>	<i>135</i>
<i>Resultado de OPEX anual</i>	<i>135</i>

SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

Símbolos

Hidráulica y caudales

- N : población de diseño [*pers*]
- q : dotación específica [$L/pers \cdot d\ía$]
- f : fracción convertida en aguas residuales [—]
- Q_{med} : caudal medio de diseño [$m^3/d\ía$]
- Q_{max} : caudal máximo (pico) [$m^3/d\ía$]
- $Q_{max,s}$: caudal máximo en SI [m^3/s]
- K_p : factor de pico [—]

Calidad del afluente y cargas

- C_{DBO} : concentración de DBO₅ influente [mg/L]
- C_{DQO} : concentración de DQO influente [mg/L]
- C_{SST} : concentración de SST influente [mg/L]
- $C_{DBO,kg}$: DBO₅ en [kg/m^3] (conversión)
- $C_{DQO,kg}$: DQO en [kg/m^3] (conversión)
- $C_{SST,kg}$: SST en [kg/m^3] (conversión)
- L_{DBO} : carga diaria de DBO₅ [$kg/d\ía$]
- L_{DQO} : carga diaria de DQO [$kg/d\ía$]
- L_{SST} : carga diaria de SST [$kg/d\ía$]

Tiempos de retención

- HRT : tiempo de retención hidráulica [h] o [días]
- HRT_1 : HRT del pretratamiento/decantación [h]
- $HRT_{1,d}$: HRT del pretratamiento en días [días]
- HRT_{ABR} : HRT del reactor ABR [h]
- $HRT_{ABR,d}$: HRT del ABR en días [días]
- HRT_{HSSF} : HRT en el medio poroso del humedal [días]

Volúmenes

- V_1 : volumen útil del pretratamiento [m^3]
- $V_{1,tot}$: volumen total del pretratamiento (con holgura) [m^3]
- V_{ABR} : volumen útil del ABR [m^3]
- $V_{ABR,tot}$: volumen total del ABR (holgura/lodos) [m^3]
- V_{comp} : volumen por compartimento del ABR [m^3]
- V_{reg} : volumen mínimo de regulación del depósito final [m^3]
- V_{dep} : volumen del depósito final con holgura [m^3]

Parámetros de proceso (ABR y humedal)

- OLR : carga orgánica volumétrica
- n : número de compartimentos (ABR) [−]
- HLR : carga hidráulica superficial del humedal [$m^3/(m^2 \cdot \text{día})$]

SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

- A : área del humedal (base) [m^2]
- A_{tot} : área del humedal con margen [m^2]
- h : profundidad del lecho del humedal [m]
- n_e : porosidad efectiva del medio [−]

Márgenes adoptados

- m_{ABR} : margen/holgura de volumen para ABR (lodos/robustez) [−]
- m_{HSSF} : margen de área del humedal [−]
- m_{dep} : margen de volumen del depósito final [−]

Tuberías y verificación hidráulica

- D : diámetro interior de tubería [m]
- S : pendiente hidráulica [m/m]
- n_M : coeficiente de Manning [−]
- A_{tub} : área de sección de la tubería [m^2]
- R : radio hidráulico [m]
- Q_{cap} : caudal de capacidad (Manning) [m^3/s]
- v : velocidad media en tubería [m/s]

Verificaciones internas ABR (orden de magnitud)

- B_{ABR} : ancho interno del ABR [m]
- L_{cam} : longitud de cámara/compartimento (aprox.) [m]
- A_{cam} : área en planta por cámara [m^2]

- v_{up} : velocidad ascensional [m/s]
- $v_{up,h}$: velocidad ascensional [m/h]

Geometría (planos conceptuales)

- L : longitud [m]
- B : anchura [m]
- h_u : altura útil (profundidad útil) [m]

Presupuesto por mediciones (CAPEX)

- M_i : medición/cantidad de la partida i
- P_i : precio unitario de la partida i
- γ : coeficiente de imprevistos/contingencia
- $CAPEX$: coste de inversión (capital)

Operación y mantenimiento (OPEX)

- p_h : precio horario de mano de obra
- t_{sem} : tiempo semanal dedicado a operación/mantenimiento
- t_{mes} : tiempo mensual dedicado a operación/mantenimiento
- t_{tri} : tiempo trimestral dedicado a operación/mantenimiento
- C_{MO} : coste anual de mano de obra
- C_{cons} : coste anual de consumibles
- C_{corr} : coste anual de mantenimiento correctivo
- C_{lodos} : coste por evento de extracción de lodos

SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

- T_{lodos} : periodo entre extracciones de lodos
- $C_{lodos,eq}$: coste anual equivalente de extracción de lodos
- $OPEX_{anual}$: coste anual de operación y mantenimiento
- $OPEX_{pers}$: coste anual de OPEX por persona

Acrónimos

- ABR: Anaerobic Baffled Reactor
- B500S: Acero corrugado B500S
- BoQ: Bill of Quantities
- CAPEX: Capital Expenditure
- CW: Constructed Wetland
- CYPE: (software/base de precios) CYPE
- DBO [5] : Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)
- DEWATS: Decentralized Wastewater Treatment System(s)
- DQO: Demanda Química de Oxígeno
- E. coli: Escherichia coli
- EPI: Equipos de Protección Individual
- HA-25: Hormigón armado (25 MPa)
- HDPE / PEAD: High-Density Polyethylene / Polietileno de Alta Densidad
- HLR: Hydraulic Loading Rate
- HRT: Hydraulic Retention Time
- HSSF: Horizontal Subsurface Flow (Constructed Wetland)
- MSF: Médicos sin fronteras
- OCHA: United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs
- OLR: Organic Loading Rate
- OPEX: Operational Expenditure
- pH: Potencial de hidrógeno
- PVC-U: Policloruro de vinilo no plastificado
- SIG: Sistema de Información Geográfica
- SROI: Social Return on Investment
- SST: Sólidos Suspensidos Totales
- UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket
- UNHCR / ACNUR: United Nations High Commissioner for Refugees

SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Mi motivación para este TFG es mejorar el acceso al saneamiento en el campo de refugiados de Rafah (Gaza), donde no hay infraestructuras y los recursos son muy limitados. Un sistema descentralizado puede reducir riesgos para la salud y mejorar el impacto ambiental del asentamiento.

El proyecto se diferencia de otros por adaptar tecnologías al contexto local, combinando tratamiento biológico (incluido un sistema anaerobio en serie para soportar variaciones de caudal y carga) con soluciones basadas en la naturaleza y el uso de recursos disponibles.

Además, se plantea reutilizar subproductos como el agua tratada y el biogás usando opciones de bajo coste como humedales con especies y materiales locales. Por último, se incluye la formación de residentes para operación y mantenimiento, buscando una solución sostenible y replicable en otros contextos humanitarios.

1.2 CONTEXTO HUMANITARIO EN RAFAH

Rafah se encuentra en el extremo sur de la Franja de Gaza, casi al borde con Egipto, es una ciudad que se ha convertido en un punto crítico de desplazamiento forzado y emergencia humanitaria. Actualmente, más de 120.000 personas viven hacinadas en un espacio de 1,4 kilómetros cuadrados, lo que convierte a Rafah en uno de los puntos con mayor densidad de población del planeta [1].

Esta concentración extrema de población se da en un contexto marcado por la precariedad estructural, las redes de saneamiento están obsoletas o son inexistentes, el suministro de agua es intermitente y la electricidad está disponible durante unas pocas horas al día [2]. A ello se suman las restricciones de movilidad de bienes y personas, que impiden la entrada de materiales esenciales para la mejora de infraestructuras básicas.

INTRODUCCIÓN

Las consecuencias son visibles y cuantificables. Cada día, miles de litros de aguas residuales se vierten sin tratamiento al subsuelo o al mar, contaminando acuíferos costeros y aumentando el riesgo de brotes epidémicos [3]. Durante los meses de lluvia, la situación se agrava porque las aguas pluviales arrastran consigo desechos fecales que inundan las calles, viviendas y pozos de agua, provocando enfermedades como el cólera, la fiebre tifoidea y la diarrea infantil [4].

Aparte de los datos sanitarios de la zona, lo que sucede en Rafah es la causa de un abandono crónico y una pobreza extrema. Se estima que más del 90 % de los residentes del campamento dependen de ayuda humanitaria para sobrevivir [5], mientras que los servicios municipales no tienen capacidad ni recursos para hacer frente al deterioro progresivo de su entorno.

Frente a esta realidad, la intervención técnica es una urgencia. Diseñando un sistema de saneamiento adaptado a estas condiciones no estaremos únicamente mejorando las infraestructuras, también estaremos dando una respuesta necesaria en un escenario donde la vulnerabilidad ha dejado de ser excepcional para convertirse en permanente.

La Franja de Gaza

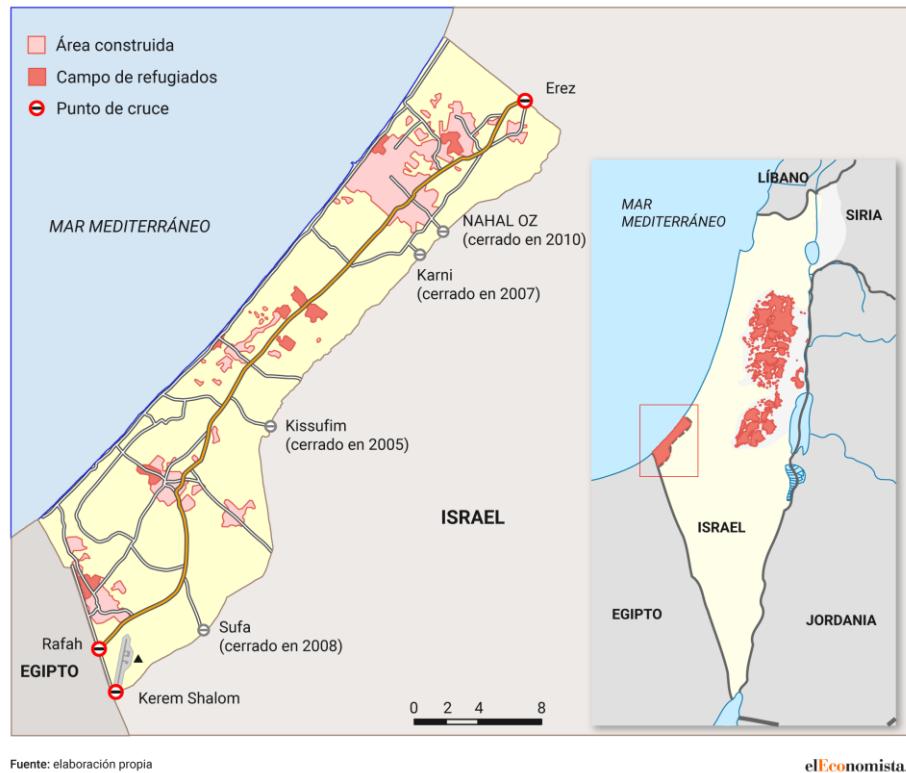


Ilustración 3: Mapa de la franja de Gaza (El Economista, 2023)

1.3 RELEVANCIA DEL SANEAMIENTO DESCENTRALIZADO

En lugares donde la infraestructura convencional no existe o ha colapsado, como ocurre en campos de refugiados u otros asentamientos, el saneamiento descentralizado es la mejor solución. A diferencia de los sistemas centralizados que están basados en redes de alcantarillado y plantas de tratamiento, los sistemas descentralizados operan a nivel local, son modulares, requieren menos inversión inicial y pueden instalarse de forma progresiva [6].

En contextos como el de Rafah, la construcción de una red centralizada es inviable por múltiples razones como son el bloqueo territorial, la escasez de materiales, el terreno densamente ocupado y los riesgos de seguridad. Sin embargo, los sistemas descentralizados como los basados en tecnologías DEWATS (Decentralized Wastewater Treatment Systems),

INTRODUCCIÓN

permiten operar directamente en puntos críticos, mejorando la salud pública sin necesidad de depender de una infraestructura central [7].

Estos sistemas se componen de tecnologías de bajo coste y alta eficiencia, como biodigestores anaerobios, filtros biológicos y humedales artificiales, que permiten tratar aguas residuales de manera eficaz sin requerir grandes recursos energéticos o tecnológicos [8]. Además de reducir la carga contaminante, estas tecnologías permiten la reutilización del agua tratada para riego u otros usos no potables además del biogás, contribuyendo a una economía circular [9].

Pero la importancia del saneamiento descentralizado es también social a parte de técnica. Su implementación puede involucrar directamente a la comunidad en tareas de operación y mantenimiento, fomentando participación local y asegurando su sostenibilidad a largo plazo [10].

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 SISTEMAS DEWATS

El tratamiento descentralizado de aguas residuales juega un papel fundamental en la ingeniería medioambiental aplicada a contextos sin acceso a redes de saneamiento convencionales. En este ámbito, los sistemas DEWATS (*Decentralized Wastewater Treatment Systems*) destacan por su robustez tecnológica, escalabilidad modular y operatividad pasiva, siendo una solución idónea para zonas con recursos limitados y alta densidad poblacional como es el caso de Rafah [11].

Los DEWATS están diseñados para tratar caudales pequeños o medios que van desde 1 m³/día hasta 1.000 m³/día, mediante procesos naturales de depuración biológica. Su diseño permite operar sin componentes electromecánicos complejos, reduciendo al mínimo el mantenimiento técnico especializado, lo que favorece su implantación en entornos rurales o poco desarrollados [11].

2.1.1 ARQUITECTURA FUNCIONAL DE UN SISTEMA DEWATS

Un sistema DEWATS completo se estructura en una serie de módulos hidráulicamente conectados entre si que actúan por gravedad o bombeo pasivo. Estos módulos son los siguientes:

- Unidad de pretratamiento (rejillas, trampas de grasa y sedimentadores)
- Reactor anaerobio compartimentado (ABR)
- Filtro anaerobio de flujo ascendente
- Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal
- (*Opcional*) Unidad de desinfección o reutilización

Esta arquitectura es adaptable, dependiendo de los objetivos de calidad del efluente, disponibilidad de espacio y destino final del agua tratada, es posible modificar la secuencia o suprimir módulos [6], [11], [13].

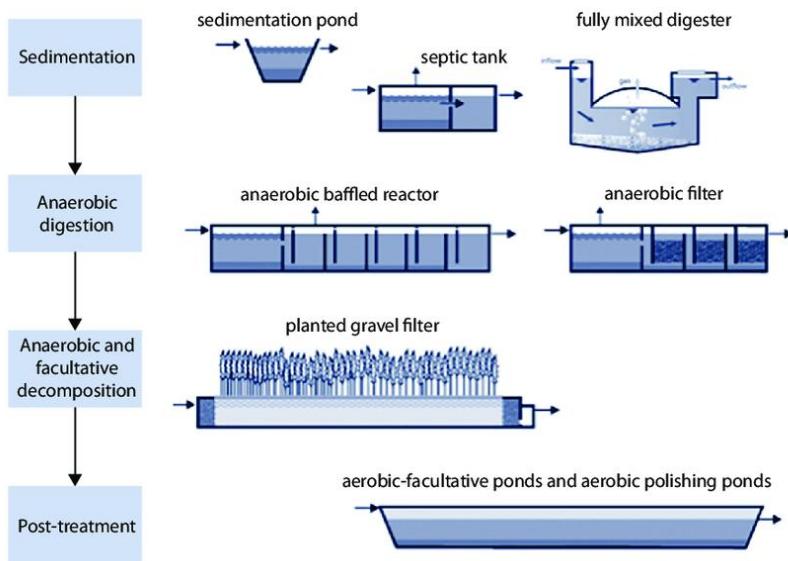


Ilustración 4 Esquema DEWATS (Elaboración propia, 2026)

2.1.2 UNIDAD DE PRETRATAMIENTO

El pretratamiento tiene la función de proteger las etapas posteriores del sistema eliminando sólidos gruesos, arenas y grasas. Se compone de:

- Rejillas de paso de 1–2 cm, inclinadas a 45° para interceptar residuos flotantes
- Cámaras de sedimentación primaria, diseñadas con velocidades de sedimentación de 0,3–0,5 m/h
- Trampas de grasa que separan los aceites ligeros mediante flotación y decantación laminar

Estas unidades requieren limpieza diaria y representan el primer punto de intervención. El diseño debe prever accesibilidad para el mantenimiento sin equipos mecánicos complejos [13].

2.1.3 REACTOR ANAEROBIO COMPARTIMENTADO (ABR)

El reactor anaerobio compartimentado es una tecnología que no tiene las limitaciones de los fosos sépticos tradicionales. Su estructura divide el flujo en varias cámaras (habitualmente entre 4 y 6), lo que permite una depuración en fases con acumulación de lodos activos.

- Tiempo de retención hidráulica (HRT): 24–72 h, según la temperatura y carga
- Remoción esperada de DBO₅: 60–80 %, dependiendo del diseño

DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

- Generación de biogás: entre 20 y 30 litros por habitante y día, con contenido de metano del 55–65 %

El ABR permite la sedimentación y la degradación progresiva de la materia orgánica mediante cuatro procesos encadenados: sedimentación, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Primero las partículas sólidas se separan por gravedad, luego las bacterias descomponen los compuestos complejos en ácidos grasos y alcoholes. Estos son transformados en acetato e hidrógeno, que finalmente son convertidos en metano y CO₂ por arqueas metanogénicas. Todo ocurre en compartimentos diferentes, lo que favorece la especialización microbiana y la estabilidad del sistema frente a caudales variables. Es fundamental que el flujo se distribuya correctamente para evitar cortocircuitos hidráulicos que reduzcan la eficiencia del proceso [12], [13].

2.1.4 FILTRO ANAEROBIO O LECHO BIOLÓGICO ASCENDENTE

Después del ABR, el efluente pasa a través de un filtro anaerobio, generalmente construido en tanques verticales llenos de piedra volcánica o grava (25–50 mm), que tiene una elevada superficie específica (>100 m²/m³) para la formación de biopelículas.

- Tasa de carga orgánica: 1–2 kg DBO₅/m³·día.
- Reducción adicional de DBO₅: hasta un 20 %.
- Remoción de sólidos suspendidos totales (SST): 50–70 % adicional.

Este módulo permite estabilizar la carga contaminante, eliminar olores residuales y preparar el efluente para el tratamiento final [11], [13].

2.1.5 HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

En la fase final, se suele incorporar un humedal artificial que actúa como una “biofábrica” natural de depuración. El agua fluye horizontalmente a través de un medio poroso (grava y arena) plantado con especies vegetales (ej. *Phragmites australis*).

- Carga hidráulica superficial: 2–6 m³/m²·día
- Profundidad del lecho: 0,5–0,8 m
- Tiempo de retención: 4–7 días
- Eficiencia esperada:
 - DBO₅: 85–95 %

DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

- SST: 80–90 %
- Nitrógeno: 30–50 %
- Patógenos: >95 % de remoción

Los mecanismos de depuración incluyen filtración física, adsorción, degradación biológica aerobia y anaerobia, y absorción vegetal. El humedal requiere una poda anual de la vegetación y control de obstrucciones, especialmente en su entrada [18], [19], [21].

2.2 TECNOLOGÍAS ANAEROBIAS Y AERÓBICAS

El tratamiento biológico de aguas residuales se basa fundamentalmente en la actividad de microorganismos que degradan la materia orgánica contenida en el efluente. Estos procesos pueden clasificarse en dos categorías, las tecnologías anaerobias y las tecnologías aerobias. Básicamente la diferencia entre ambas es la disponibilidad de oxígeno durante la reacción, las dos tienen ventajas, limitaciones y aplicaciones específicas [13], [15], [16].

2.2.1 TECNOLOGÍAS ANAEROBIAS

Las tecnologías anaerobias no necesitan oxígeno para funcionar, funcionan mediante una cadena de procesos microbiológicos que transforman la materia orgánica en compuestos intermedios y finalmente en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Su ventaja principal es el bajo consumo energético y la generación de biogás, lo que las hace adecuadas para zonas con recursos energéticos limitados.

Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran:

- Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB): muy eficiente para caudales constantes, aunque más complejo en operación que el ABR
- Reactor Anaerobio Compartimentado (ABR): robusto, de operación pasiva, pensado para entornos sin personal técnico
- Biodigestores domésticos y comunitarios: aplicables a pequeña escala para tratamiento de aguas negras combinadas con residuos orgánicos sólidos [19]

En estos sistemas, el rendimiento típico de remoción de DBO₅ oscila entre el 60 % y el 85 %, con tasas de producción de biogás que pueden ser aprovechadas si se gestiona

DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

adecuadamente. El principal subproducto es el lodo digerido, con menor carga patógena que en sistemas aerobios, y menor volumen a tratar [13], [15].

2.2.2 TECNOLOGÍAS AEROBIAS

Las tecnologías aerobias requieren oxígeno disuelto para funcionar, ya que utilizan bacterias heterótrofas que oxidan la materia orgánica y convierten los compuestos nitrogenados en otros más estables como nitratos. Estas tecnologías suelen tener una mayor eficiencia en la remoción de carga orgánica y nutrientes, pero tienen un consumo energético más elevado.

Los sistemas más representativos son:

- Lodos activados (AS): muy usados en plantas urbanas, pero poco viables en contextos como Rafah debido a su complejidad.
- Filtros percoladores (TF): sistemas pasivos que permiten la formación de biopelículas sobre medios inertes
- Humedales artificiales: integran procesos aeróbicos y anaeróbicos, con bajo requerimiento energético y gran capacidad de integración ambiental [20]

Los procesos aerobios presentan una remoción de DBO₅ superior al 90 %, pero requieren aireación activa (natural o forzada), lo que implica consumo eléctrico o mecanismos pasivos que no siempre son viables en lugares con infraestructuras limitadas [13].

2.2.3 COMPARACIÓN

A nivel de diseño, la elección entre tecnologías anaerobias y aerobias depende de factores como el espacio disponible, la capacidad operativa local, los objetivos de calidad del efluente y los recursos energéticos. En el caso de Rafah, la combinación de sistemas anaerobios para tratamiento primario (ABR o biodigestores) y sistemas aerobios naturales para tratamiento secundario o terciario (como humedales) resulta técnica y socialmente adecuada [13], [15], [18].

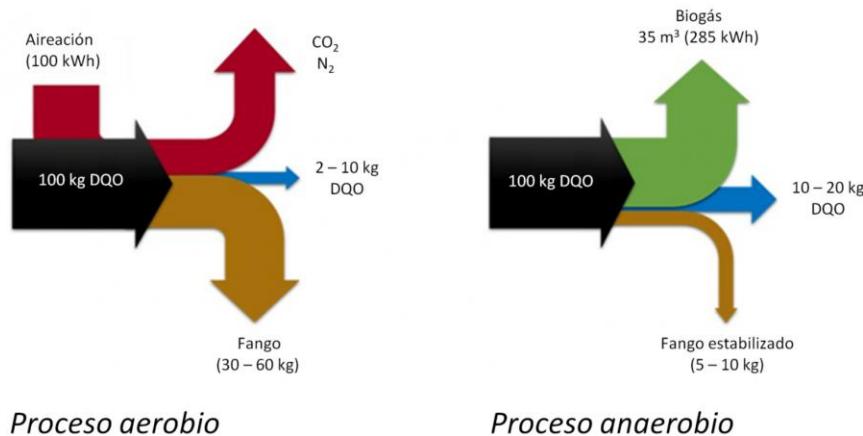


Ilustración 5 Procesos anaerobios y aerobios (Elaboración propia, 2026)

Criterio	Tecnologías Anaerobias	Tecnologías Aeróbicas
Remoción típica de DBO5	60–85 %	>90 %
Requerimiento energético	Muy bajo	Moderado-alto
Producción de biogás	Sí (metano)	No
Necesidad de personal técnico	Baja	Alta
Producción de lodos	Moderada	Alta
Velocidad del proceso	Media	Alta
Adecuación a contextos sin red eléctrica	Alta	Baja
Eficiencia en remoción de nutrientes	Baja	Alta

Tabla 1 Comparativa tecnologías anaerobias y aeróbicas (Elaboración propia, 2026)

2.3 HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales (o construidos) son una tecnología natural de depuración que combina procesos físicos, químicos y biológicos gracias al sustrato, la vegetación y los microorganismos. Consumen poca energía y son robustos lo que los hace ideales para lugares con pocos recursos como Rafah [19], [21].

A diferencia de los humedales naturales, estos sistemas se diseñan para trabajar con un caudal y una carga concretos. En entornos humanitarios se usan con buenos resultados, sobre todo después de reactores anaerobios (p. ej., ABR) para mejorar el efluente antes de reutilizarlo o verterlo de forma segura [21].

Tipos principales

DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

- Flujo superficial (SF): agua sobre el sustrato, eficaz, pero puede generar olores y requiere más espacio [22].
- Subsuperficial horizontal (HF): agua bajo el sustrato, sin exposición ni olores, adecuada en zonas habitadas [22].
- Subsuperficial vertical (VF): percolación vertical, mejora la oxigenación y favorece la nitrificación [22].

En sistemas descentralizados suele recomendarse HF por su equilibrio entre eficiencia, mantenimiento y aceptación social [21], [22].

Su modo de funcionamiento es que el agua avanza por el medio poroso y se producen al mismo tiempo la filtración, adsorción, biodegradación aerobia/anaerobia, captación de nutrientes por plantas e inactivación de patógenos. Con un diseño adecuado pueden lograrse altas remociones de DBO5, sólidos y coliformes, según el tiempo de retención y el diseño [21], [23].

Parámetro	Valor típico
Carga hidráulica superficial	2–6 m ³ /m ² ·día
Tiempo de retención hidráulica	4–7 días
Profundidad del lecho	0.6–0.8 m
Vegetación recomendada	Phragmites australis, Typha latifolia
Remoción de DBO5	>85 %
Remoción de SST	>80 %
Remoción de Nitrógeno	30–60 %
Remoción de coliformes fecales	>95 %

Tabla 2 Parámetros humedal flujo horizontal (*Elaboración propia, 2026*)

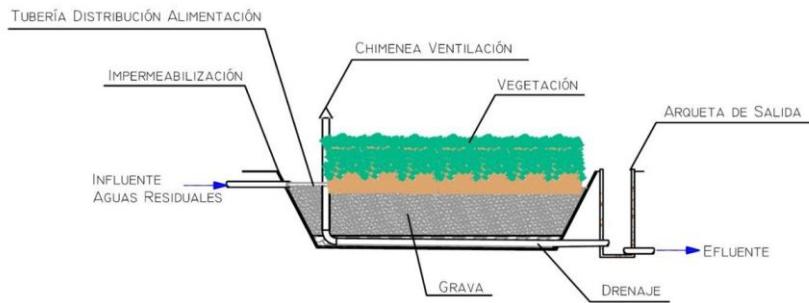


Ilustración 6 Sección longitudinal de un humedal artificial de flujo horizontal (Elaboración propia, 2026)

2.4 REUTILIZACIÓN DE BIOGÁS

En la fase de metanogénesis de reactores anaerobios como el ABR se produce biogás, formado sobre todo por metano (60–70%) y CO₂ (30–40%). Este gas puede almacenarse y usarse como energía térmica [25].

Se estima que 1 m³ de aguas residuales puede generar 15–25 L de metano, según la carga orgánica y el rendimiento del sistema [26]. Para captarlo y almacenarlo hacen falta depósitos cerrados, válvulas antirretorno y al ser posible, una antorcha de seguridad. El biogás aporta energía renovable, reduce la dependencia del butano importado y mejora la salubridad al evitar emisiones sin tratar [25], [26].

2.5 REUTILIZACIÓN DE AGUA TRATADA

El agua que atraviesa las distintas etapas del sistema puede alcanzar niveles de calidad suficientes para su reutilización no potable. Algunos de los posibles usos son:

- Riego de cultivos no comestibles o áreas verdes [27]
- Descarga en letrinas o inodoros (si están disponibles) [27]
- Limpieza de espacios comunes o caminos de tierra [27]
- Recarga controlada de acuíferos poco profundos en zonas seguras [27]

DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Para estos usos el sistema debe alcanzar los siguientes valores mostrados en la tabla:

Parámetro	Valor límite
DBO5	<30 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	<50 mg/L
Coliformes Fecales	< 10^4 UFC/100 ml
Turbidez	<10 NTU
Uso recomendado	Riego no alimentario, limpieza, recarga controlada

Tabla 3 Criterios de calidad del agua tratada para reutilización (Elaboración propia, 2026)

La reutilización del agua en climas áridos también reduce la demanda sobre pozos y cisternas móviles, disminuyendo la presión sobre los acuíferos y abaratando los costes logísticos del transporte de agua [27].

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El acceso universal al saneamiento sigue siendo uno de los grandes desafíos del siglo XXI, en particular en zonas rurales y de emergencia humanitaria. Los sistemas centralizados tienen varias limitaciones como requerimientos elevados de inversión, mantenimiento complejo y dependencia de redes eléctricas y de abastecimiento. Mientras que los sistemas de saneamiento descentralizado son una alternativa técnica y económicamente más viable [6], [11], [46].

3.1 PROYECTO SARASWATI 2.0 (INDIA)

El Proyecto SARASWATI 2.0 es la segunda fase de un programa de cooperación científica financiado por la Unión Europea y el Gobierno de India. Su objetivo es desarrollar, implementar y evaluar tecnologías de tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas, especialmente en contextos rurales y periurbanos de difícil acceso a infraestructura convencional [26], [28].

Antecedentes y motivación:

En India más de 700 millones de personas no tienen acceso a sistemas de alcantarillado seguros, lo que ha causado la contaminación de ríos y acuíferos además de un impacto negativo en la salud de la población [26], [28]. El proyecto SARASWATI 2.0 propone adaptar tecnologías descentralizadas para responder a:

- Alta variabilidad de caudales por consumo doméstico irregular
- Altas temperaturas medias, lo que facilita procesos anaerobios
- Restricciones energéticas, que limitan la viabilidad de sistemas activos mecanizados
- Entornos con alta densidad poblacional y espacio reducido

Componentes técnicos:

Se han desplegado más de 14 prototipos a escala real que combinan tecnologías diferentes:

- Reactores UASB: Diseñados con HRT entre 6 y 12 horas para zonas de alta carga orgánica. Integran zonas de digestión anaerobia y un manto de lodos flotante que permite sedimentación continua de sólidos [26], [28].

- Tanques sépticos mejorados: Incorporan compartimentos de separación de fases (sólidos/líquidos) y deflectores internos que reducen la turbulencia y mejoran la eficiencia de sedimentación [26].
- Humedales construidos subsuperficiales: Tanto de flujo vertical (VFC) como horizontal (HFC). Diseñados con lechos de grava y arena además de plantas macrófitas como *Phragmites karka* y *Typha latifolia* adaptadas a condiciones tropicales [18], [19].
- Sistemas de pulido por membranas: En sitios de alta sensibilidad ambiental o proximidad a cauces, se ha incorporado tratamiento terciario con módulos de filtración de membrana (MBR) para garantizar remoción de patógenos y sólidos finos [26].

Parámetros de operación y resultados:

- Remoción de DBO5: Entre 85–95 %, en función de la configuración y del caudal medio diario [26], [28].
- Remoción de SST: 90–98 %, gracias a la combinación de procesos anaerobios y filtración en humedales [26].
- Reducción de coliformes totales: Hasta 3–4 log, lo que permite la reutilización en riego controlado de áreas verdes y cultivos no alimentarios [26].
- Generación de biogás: 15–30 litros CH₄ por m³ de aguas residuales tratadas, equivalente a 0.4–0.6 m³ de biogás diario en comunidades de 50–100 habitantes [26].

Innovaciones destacadas:

- Instrumentación de bajo coste: Uso de sensores de presión diferencial y sondas de pH resistentes a condiciones extremas para monitorizar en tiempo real procesos de digestión y detección de fallos [26].
- Modelización CFD: Aplicación de simulaciones de dinámica de fluidos para optimizar la geometría interna de reactores UASB y minimizar cortocircuitos hidráulicos [26].
- Protocolo de mantenimiento comunitario: Desarrollo de manuales que instruyen en tareas de inspección, purga de lodos y poda de vegetación en humedales [26].

Desafíos técnicos:

Aunque los resultados han sido positivos, se identificaron varias limitaciones.

- Colmatación progresiva de lechos filtrantes por acumulación de sólidos finos, requiriendo procedimientos periódicos de rehabilitación [26].
- Necesidad de ventilación controlada en humedales VFC para mantener la nitrificación estable, especialmente en periodos de alta carga hidráulica [26].
- Variabilidad en la calidad del efluente debido a descargas industriales clandestinas en algunas comunidades [26].

Parámetro	Valor
Remoción de DBO5	85–95 %
Remoción de SST	90–98 %
Reducción de patógenos	3–4 log
Tiempo de retención hidráulica (HRT)	6–12 h (UASB) + 4–7 d (humedal)
Volumen del reactor UASB	variable según sitio (10–50 m ³)
Superficie de humedal	variable (50–300 m ²)
Producción de biogás	15–30 L CH ₄ /m ³ tratado
Uso del efluente tratado	Riego de áreas verdes y cultivos no alimentarios

Tabla 4 Parámetros operativos clave SARASWATI 2.0 (Elaboración propia, 2026)

3.2 PROYECTO SANIMAS (INDONESIA)

El programa SANIMAS (Sanitation by Communities) nació a principios de la década de 2000, como respuesta al colapso sanitario de barrios marginales y zonas periurbanas densamente pobladas en ciudades indonesias como Yakarta, Surabaya y Bandung. Apoyado por la Cooperación Alemana (GIZ), el Banco Asiático de Desarrollo y autoridades locales, SANIMAS se enfocó en crear soluciones para tratar las aguas residuales domésticas [29], [37]

Antecedentes y motivación:

En áreas urbanas de Indonesia:

- Más del 70 % de la población dependía de letrinas a pozo negro con desbordes frecuentes [29].
- La infiltración de aguas negras contaminaba pozos superficiales utilizados para consumo humano [29].

- El riesgo de enfermedades gastrointestinales y brotes de cólera aumentaba en períodos de lluvias monzónicas [29].

Con esta situación, SANIMAS construyó más de 1,200 sistemas descentralizados comunitarios [29].

Componentes técnicos:

- Tanques sépticos comunitarios: Capacidad entre 5–20 m³/día, con compartimentos de sedimentación primaria y zonas de digestión anaerobia prolongada (HRT >48 h) [29].
- Filtros anaerobios de flujo ascendente: Diseñados con materiales locales como piedra volcánica, que ofrecen área superficial >100 m²/m³ para formación de biopelículas [37].
- Humedales horizontales: Con dimensiones típicas de 30–50 m², profundidades de 0.6–0.8 m y flujo subsuperficial controlado para evitar olores y proliferación de insectos [37].

Parámetros de operación y resultados:

- Reducción de DBO5: 70–85 %, con HRT combinados (reactor + humedal) de 4–7 días [29].
- Reducción de coliformes fecales: Hasta 99 %, asegurando un nivel de salubridad suficiente para la descarga del agua en la naturaleza [29].
- Energía requerida: Prácticamente nula, el sistema opera por gravedad, con mantenimiento de limpieza de trampas de grasa y revisión de vegetación [29].

Gestión comunitaria y sostenibilidad:

Se establecieron:

- Comités responsables del cobro de pequeñas cuotas mensuales para financiar operación y mantenimiento [37].
- Campañas de sensibilización para evitar vertidos de basura y residuos industriales en la red [37].
- Protocolos de registro de mantenimiento, incluyendo purgas de lodos cada 3–5 años, con apoyo de camiones cisterna [37].

Desafíos y mejoras futuras:

Los principales problemas encontrados fueron:

ESTADO DE LA CUESTIÓN

- Colmatación acelerada de humedales por vertidos ilegales de sólidos [29]
- Falta de formación técnica en renovación de lechos filtrantes [29]
- Necesidad de renovación de componentes como tuberías y válvulas después de 5–10 años de operación [29]

Parámetro	Valor
Remoción de DBO5	70–85 %
Remoción de SST	80–90 %
Reducción de coliformes	Hasta 99 %
Tiempo de retención hidráulica (HRT)	4–7 días (total)
Volumen de tanque séptico	5–20 m ³ (según comunidad)
Superficie de humedal	30–50 m ²
Producción de biogás	15–20 L CH ₄ /m ³ tratado
Uso del efluente tratado	Descarga en cauces locales o riego de áreas verdes

Tabla 5 Parámetros operativos clave SANIMAS (*Elaboración propia, 2026*)

3.3 PROYECTO EN HUILA (COLOMBIA)

El programa de saneamiento descentralizado en Huila, Colombia, surge por la falta de sistemas de alcantarillado convencional en comunidades rurales. Impulsado por el Ministerio de Vivienda de Colombia, en colaboración con el Banco Interamericano de Desarrollo y organizaciones locales, este proyecto es uno de los proyectos más importantes de Latinoamérica en la implementación de tecnologías anaerobias combinadas con procesos naturales de tratamiento terciario [15], [25].

Antecedentes y motivación:

En la región de Huila, la topografía montañosa y la dispersión de los núcleos poblacionales complicaban la implementación de redes de alcantarillado. Más del 40 % de las viviendas rurales vertían sus aguas negras a cauces superficiales sin tratamiento, contribuyendo a la contaminación de ríos y causando brotes frecuentes de enfermedades gastrointestinales [15].

Componentes técnicos:

El proyecto consistió en el diseño y construcción de unidades modulares compuestas por:

- Biodigestores de flujo ascendente: de 3 a 5 m³ de capacidad con válvulas de purga y colector de biogás. Estos digestores operan con tiempos de retención de 20–30 días,

ESTADO DE LA CUESTIÓN

lo que permite estabilizar la carga orgánica y reducir en una gran parte los sólidos sedimentables [15].

- Humedales subsuperficiales horizontales: con superficies de 15–30 m², llenos de grava con granulometría de 20–40 mm, plantados con especies locales como *Phragmites australis* y *Eichhornia crassipes* [18], [38].
- Sistema de distribución hidráulica: canaletas de entrada y tuberías de reparto perforadas para tener un flujo uniforme y evitar cortocircuitos hidráulicos [15].

Parámetros de operación y resultados:

- Remoción de DBO5: 80–90 %, en función del HRT combinado (30–45 días) [15].
- Reducción de SST: 85–95 % [15].
- Reducción de coliformes fecales: entre 2–3 log, suficiente para descarga controlada o riego de cultivos no alimentarios [15].
- Biogás generado: 20–30 L CH₄ por m³ tratado [15].
- Uso del biogás: principalmente cocción doméstica en cocinas comunitarias [15].
- Agua tratada: utilizada en riego de zonas de pastoreo, reduciendo presión sobre fuentes de agua subterránea [15].

Gestión y mantenimiento:

El proyecto incluyó una parte de capacitación comunitaria. Las tareas de mantenimiento consistieron en:

- Purga de lodos cada 3–5 años [15].
- Deshierbe y poda bianual de plantas en humedales [15].
- Limpieza mensual de canaletas y entradas [15].

Desafíos y mejoras futuras:

Se identificaron problemas relacionados con la colmatación de lechos en humedales por descargas ocasionales de sólidos gruesos y grasas, lo que ha impulsado el desarrollo de trampas de grasa aguas arriba [15].

Parámetro	Valor
Remoción de DBO5	80–90 %
Remoción de SST	85–95 %
Reducción de coliformes	2–3 log

Tiempo de retención hidráulica (HRT)	30–45 días (total)
Volumen del biodigestor	3–5 m ³
Superficie del humedal	15–30 m ²
Producción de biogás	20–30 L CH ₄ /m ³ tratado
Uso del efluente tratado	Riego de pastizales y zonas agrícolas no comestibles

Tabla 6 Parámetros operativos clave Huila (Elaboración propia, 2026)

3.4 PROYECTO BORDA-CEWEPA (FIYI)

El proyecto BORDA-CEWEPA, realizado por la ONG alemana BORDA junto con la agencia CEWEPA en Fiyi, se centra en la aplicación de sistemas descentralizados de saneamiento adaptados a comunidades costeras vulnerables al cambio climático. Estas áreas se encuentran sometidas a fenómenos de inundación, por lo que necesitaban soluciones de bajo coste energético y con mínima huella ambiental [7], [27].

Antecedentes y motivación:

Las comunidades de zonas costeras de Fiyi, sufrían contaminación de pozos por infiltración de aguas negras y salinas. Además, la erosión costera amenazaba los sistemas de saneamiento tradicionales [31].

Componentes técnicos:

- Biodigestores anaerobios reforzados: tanques de 2–4 m³ con recubrimiento interno de resinas epoxi para resistencia a salinidad. Incluyen colectores de biogás con válvulas de seguridad [7].
- Humedales verticales: construidos en lechos elevados (para evitar inundación directa) con relleno de grava y arena. Plantados con especies tolerantes a la salinidad, como *Schoenoplectus californicus* [7].
- Protección costera integrada: el agua tratada se utiliza para regar franjas de vegetación barrera, ayudando a estabilizar dunas y reducir erosión [27].

Parámetros de operación:

- Remoción de DBO5: 85–95 % [7].
- Reducción de SST: 90–98 % [7].
- Reducción de patógenos: >95 % [7].

- Producción de biogás: suficiente para cocción comunitaria (15–20 L CH₄ por m³) [7].

Innovaciones y resultados:

- Diseño modular resistente a inundaciones: lechos de humedales elevados 50 cm sobre nivel del suelo [7].
- Instrumentación local: uso de materiales autóctonos para facilitar reparaciones [7].

Parámetro	Valor
Remoción de DBO5	85–95 %
Remoción de SST	90–98 %
Reducción de patógenos	>95 %
Tiempo de retención hidráulica (HRT)	3–5 días (total)
Volumen del biodigestor	2–4 m ³
Superficie de humedal	20–40 m ²
Producción de biogás	15–20 L CH ₄ /m ³ tratado
Uso del efluente tratado	Riego de zonas verdes y reforestación costera

Tabla 7 Parámetros operativos clave BORDA-CEWEPA (Elaboración propia, 2026)

3.5 HUMEDALES SUBSUPERFICIALES EN ECUADOR

En Ecuador, varias iniciativas de universidades locales, ONGs ambientales y autoridades provinciales han desarrollado humedales subsuperficiales horizontales como solución al vertido directo de aguas negras en ríos [38].

Antecedentes y motivación:

En zonas rurales andinas y amazónicas, los vertidos de aguas residuales producían contaminación y brotes de enfermedades hídricas. La falta de redes centralizadas impulsó la búsqueda de sistemas naturales de bajo mantenimiento [38].

Componentes técnicos:

- Humedales de 20–50 m², construidos con lechos de grava (20–40 mm), profundidad de 0.6–0.8 m [38].
- Flujo subsuperficial horizontal: alimentado por sistemas de tuberías de PVC perforado [38].
- Vegetación: *Phragmites australis* y *Typha latifolia*, seleccionadas por resistencia a climas templados-húmedos [38].

Parámetros de operación

- Reducción de DBO5: 75–90 % [38].
- Reducción de SST: >80 % [38].
- Reducción de coliformes: >95 % [38].
- Uso del efluente tratado: riego localizado de cacao, pastizales y cultivos de bambú [38].

Sostenibilidad operativa:

Los miembros de la comunidad son los responsables del deshierbe y monitoreo visual del caudal. Las tareas técnicas de mayor complejidad (retirada y recambio parcial del medio filtrante) se efectúan cada 7–10 años por las autoridades locales [38].

Limitaciones:

Se ha identificado la formación de biofilm excesivo en zonas de baja velocidad de flujo, lo que reduce la permeabilidad hidráulica, haciendo necesaria la redistribución del flujo [38].

Parámetro	Valor
Remoción de DBO5	75–90 %
Remoción de SST	>80 %
Reducción de coliformes	>95 %
Tiempo de retención hidráulica (HRT)	4–7 días
Superficie del humedal	20–50 m ²
Profundidad del lecho	0.6–0.8 m
Producción de biogás	No se estima en este sistema
Uso del efluente tratado	Riego de cacao, pastizales, cultivos de bambú

Tabla 8 Parámetros operativos clave Ecuador (Elaboración propia, 2026)

3.6 PROYECTO DE HUMEDALES DESCENTRALIZADOS EN EL DELTA DEL MEKONG (VIETNAM)

El Delta del Mekong es una región vulnerable a inundaciones y con alta densidad poblacional. El Gobierno de Vietnam, en colaboración con la Agencia de Cooperación Japonesa (JICA) y organizaciones locales, han implementado un programa de saneamiento descentralizado en comunidades rurales y periurbanas. El objetivo era reducir la contaminación de canales y

ESTADO DE LA CUESTIÓN

campos de arroz mediante la instalación de sistemas de tratamiento basados en tecnologías naturales, con bajo consumo energético y adaptados a suelos inundables [33], [34], [43].

Antecedentes y motivación:

El Delta del Mekong presenta una combinación de factores que complican el saneamiento convencional:

- Lluvias intensas estacionales y suelos saturados gran parte del año.
- Viviendas elevadas sobre pilotes con vertido directo al agua
- Limitada capacidad de gestión local de infraestructuras complejas

Componentes técnicos:

- Tanques sépticos mejorados multicompartmentados: diseñados para adaptarse a fluctuaciones hídricas, con cámara de decantación y compartimentos de digestión [33].
- Humedales flotantes: plataformas construidas con materiales locales (bambú, poliestireno expandido) ancladas en canales, cubiertas con vegetación acuática (*Phragmites*, *Eichhornia*), que filtran el efluente tras la decantación primaria [44].
- Humedales subsuperficiales elevados: construidos sobre taludes reforzados, para zonas con inundaciones prolongadas, evitando daño estructural del lecho filtrante [44].

Parámetros de operación:

- Remoción de DBO5: 75–90 %, en función del caudal y nivel de inundación [33].
- Reducción de coliformes fecales: hasta 99 % gracias a contacto prolongado con biofilm de raíces [33].
- Tasa de carga hidráulica: 3–5 m³/m²·día en humedales flotantes, 1–2 m³/m²·día en subsuperficiales [33].

Recuperación de recursos:

El agua depurada se reutiliza en riego de arroz y cultivos de hortalizas no destinadas al consumo directo. Se establecieron protocolos comunitarios para la poda y cosecha de biomasa vegetal, utilizada como biofertilizante [33].

Resultados y desafíos:

- Alta aceptación social debido a la integración paisajística y reducción de olores [33].

- Necesidad de formación continua para evitar vertidos de aceites y basura al sistema [33].
- Degradación estructural de flotadores en humedales flotantes cada 4–6 años, requiriendo reposición [33].

Parámetro	Valor
Remoción de DBO5	75–90 %
Remoción de SST	80–90 %
Reducción de coliformes	Hasta 99 %
Tiempo de retención hidráulica (HRT)	3–7 días
Superficie de humedal flotante	30–50 m ² (flotante)
Tasa de carga hidráulica	3–5 m ³ /m ² ·día
Producción de biogás	No se estima en este sistema
Uso del efluente tratado	Riego de arroz y hortalizas no alimentarias

Tabla 9 Parámetros operativos clave Delta del Mekong (Elaboración propia, 2026)

3.7 PROYECTO DE SISTEMAS DEWATS EN EL HOSPITAL DE CHENGALPATTU (INDIA)

El Hospital de Chengalpattu, en Tamil Nadu, India, es un caso de saneamiento descentralizado en instalaciones hospitalarias. Con financiación del Gobierno de la India y BORDA, se construyó un sistema DEWATS para tratar aguas residuales de quirófanos, cocinas, lavanderías y áreas de hospitalización, reduciendo la contaminación en cursos de agua locales [36], [42].

Antecedentes y motivación:

El hospital que tiene una capacidad de 600 camas, no tenía conexión a red de alcantarillado. Los vertidos generaban:

- Contaminación bacteriana en arroyos adyacentes.
- Olores y proliferación de enfermedades infecciosas
- Riesgos para la salud pública [36].

Componentes técnicos:

- Unidad de pretratamiento: trampas de grasa y tamices para remover sólidos gruesos [36].
- Reactor ABR (4 compartimentos): 180 m³ de volumen total, con HRT de 24–36 horas, diseñado para caudales pico de hasta 40 m³/día [36].
- Filtro anaerobio de flujo ascendente: relleno con material plástico de alta superficie específica (>120 m²/m³) [36].
- Humedal subsuperficial horizontal: 300 m² de superficie, profundidad de 0.7 m, plantado con *Phragmites karka* [36].

Parámetros de operación:

- Reducción de DBO5: >90 % [36].
- Reducción de SST: >95 % [36].
- Reducción de patógenos: >99 % [36].
- Biogás producido: recuperado y canalizado a un generador de vapor para la lavandería del hospital [36].

Operación y mantenimiento:

El sistema fue diseñado para operar sin energía eléctrica en las etapas de tratamiento primario y secundario. El humedal requiere poda semestral y revisión de flujo. Se estableció un contrato de mantenimiento con una empresa local para la extracción de lodos cada 2–3 años [36].

Impacto:

- Mejora de calidad de agua descargada en canales cercanos [36].
- Reducción de olores y vectores de enfermedad [36].
- Ahorro económico estimado en costos de energía para calentamiento de agua (por uso de biogás) [36].

Parámetro	Valor
Remoción de DBO5	>90 %
Remoción de SST	>95 %
Reducción de patógenos	>99 %
Tiempo de retención hidráulica (HRT)	24–36 h (ABR) + 4–7 d (humedal)
Volumen del reactor ABR	180 m ³
Superficie de humedal	300 m ²

Producción de biogás	Aproximadamente 20–30 L CH ₄ /m ³ tratado
Uso del efluente tratado	Lavandería hospitalaria (uso de biogás) y descarga segura a canales

Tabla 10 Parámetros operativos clave Hospital de Chengalpattu (Elaboración propia, 2026)

3.8 COMPARACIÓN CRÍTICA APLICABLE AL CASO DE ESTUDIO

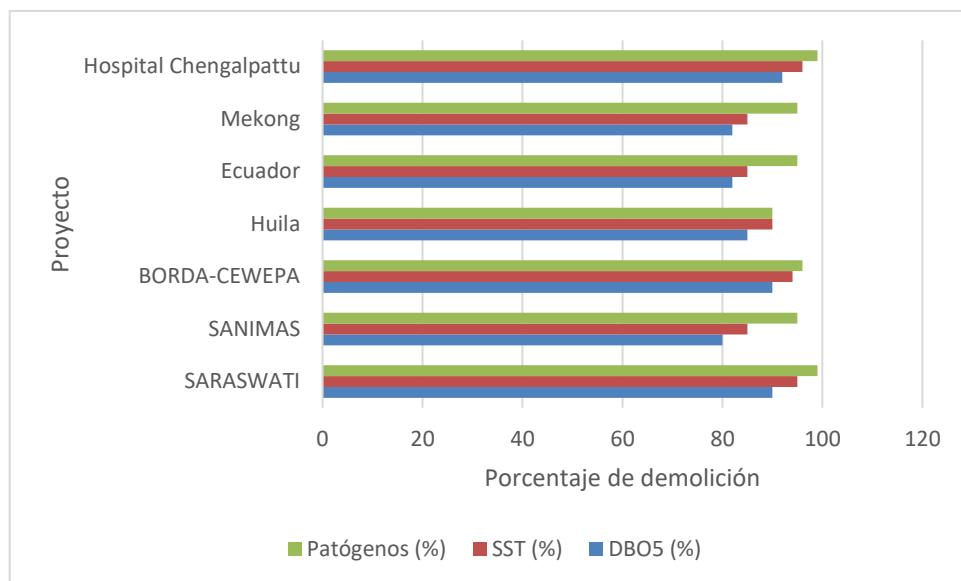


Ilustración 7 Comparativa de eficiencia de demolición de contaminantes (Elaboración propia, 2026)

La modularidad es el elemento más evidente que se puede incorporar al sistema en Rafah. Los proyectos que se han analizado coinciden en que el diseño por unidades replicables permite ampliar capacidad, repararlas por partes y mantener el funcionamiento, aunque uno de los módulos falle. Esto es una buena opción para Rafah, ya que la población y la carga pueden variar por lo que no es seguro diseñar una única infraestructura central [29], [31], [36].

En cuanto a las tecnologías concretas, hay una configuración base que se repite porque es la más estable, primero el pretratamiento/decantación, luego el tratamiento anaerobio, después el humedal subsuperficial y por último el depósito final. Esta es la mejor configuración por varios motivos: el tratamiento anaerobio tiene buena estabilidad y poca generación de lodos, y el humedal aporta un pulido adicional sin consumo energético, además de amortiguar

ESTADO DE LA CUESTIÓN

variaciones del efluente [15], [20]–[24], [39], [48], [56]. Por eso, para el sistema que queremos diseñar en Rafah nos quedamos con la configuración pasiva típica de DEWATS [28], [39], [48], [56].

Sin embargo, hay otras tecnologías que no conviene implementar en Rafah aunque funcionen en otros sitios. Algunos proyectos analizados incorporan etapas avanzadas que mejoran mucho la calidad del agua, pero requieren energía, consumibles o mantenimiento especializado; en Rafah eso aumenta el riesgo de parada y el coste de operación. Por tanto, esas tecnologías solo tendrían sentido como una opción en el futuro, no como base del diseño [15], [58]. Con las configuraciones pensadas para inundaciones extremas (como sistemas flotantes) ocurre algo similar, estos añaden elementos que se degradan y hay que reponer, lo que complica el mantenimiento [44], [45], [58].

Algo común a todos los proyectos es que los problemas suelen aparecer al principio del sistema, por sólidos, grasas y colmataciones. Si el pretratamiento no está bien diseñado, se atascan tuberías, se reduce el volumen útil del reactor y el humedal pierde permeabilidad. Por eso, en Rafah implementará un pretratamiento sencillo pero accesible (desbaste/decantación y registros), aunque suponga algo más de obra civil, porque reduce fallos y alarga la vida útil del sistema [28], [42], [56].

Por último, también se puede sacar de conclusión que los sistemas que más duran son los que tienen un mínimo de organización de operación y mantenimiento (quién limpia, cuándo se revisa, cómo se planifica la extracción de lodos). En Rafah, esto se consigue mediante inspecciones visuales, mantenimiento programado y una buena planificación de extracción de lodos, diseñada para funcionar incluso si los servicios externos son irregulares [31], [58].

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

Aunque ya existen diferentes proyectos de saneamiento descentralizado en otras partes del mundo, este trabajo se centra en diseñar un sistema para el campo de refugiados de Rafah en específico con todo lo que ello conlleva. Proyectos como SARASWATI 2.0 y SANIMAS muestran que los sistemas anaerobios, los humedales construidos y la recuperación de recursos funcionan bien sin red centralizada, con poca energía y gestión comunitaria.

Sin embargo, la mayoría de los proyectos suelen aplicarse en contextos más estables. Rafah requiere un sistema modular y escalable adaptado a alta densidad, poco espacio, clima árido, escasez energética y alta vulnerabilidad. El sistema ha de combinar tratamiento anaerobio, humedales optimizados, reutilización no potable del agua y protocolos simples de operación y formación. Este proyecto cubre ese vacío, mejora la salud pública y permite reutilizar agua tratada para usos no potables.

4.1.1 PROBLEMAS DE SANEAMIENTO EN RAFAH

La situación actual en Rafah presenta una situación crítica en materia de saneamiento. La elevada densidad poblacional y la falta de infraestructura básica han derivado en vertidos de aguas negras a zonas abiertas, contribuyendo a la contaminación de acuíferos superficiales y subterráneos. Esto agrava la propagación de enfermedades hídricas como diarreas, cólera o hepatitis A [1], [2], [3], [4].

A nivel técnico, los principales problemas son:

- Ausencia de sistemas de pretratamiento que permitan separar sólidos gruesos y grasas, provocando obturaciones en canalizaciones [6].
- Variabilidad grande de caudal según franjas horarias y densidad poblacional, lo que genera sobrecargas puntuales en puntos de descarga [26].

DEFINICIÓN DEL TRABAJO

- Falta de control de sólidos y lodos, que ocasiona acumulación y sedimentación en canales abiertos, reduciendo la capacidad hidráulica y generando focos de malos olores [6], [47].
- Inexistencia de planes de mantenimiento técnico o protocolos de gestión comunitaria de residuos líquidos [10].

Estos problemas, combinados con un acceso limitado a energía y materiales de construcción, dificultan la implantación de soluciones centralizadas de alto coste, por lo que la apuesta por tecnologías descentralizadas, modulares y de bajo mantenimiento es actualmente la única vía viable para garantizar un saneamiento seguro en el corto y medio plazo [6], [7].

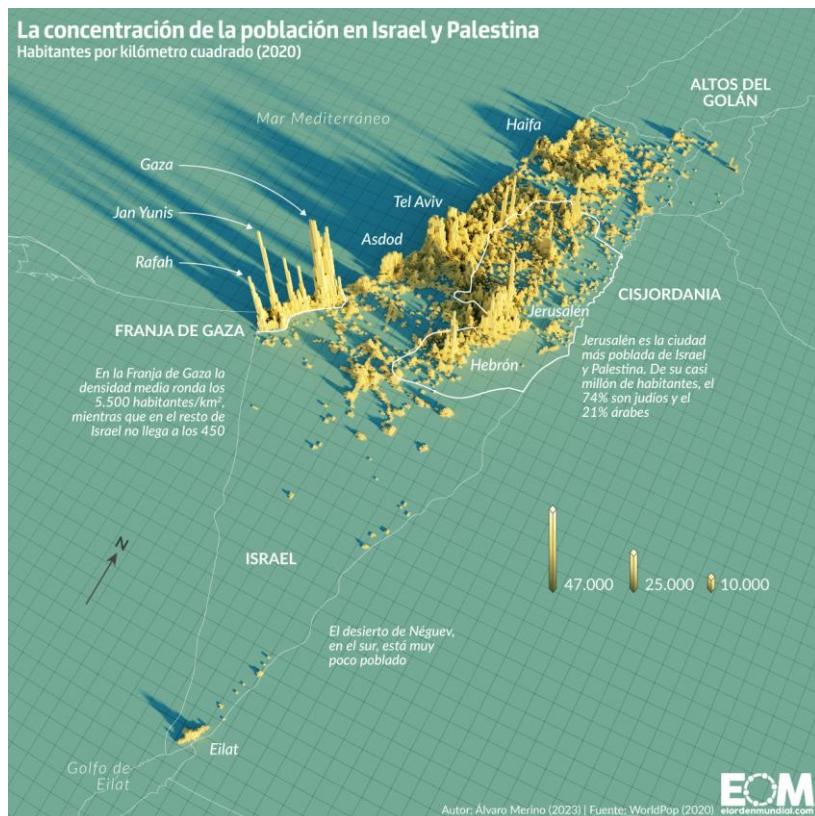


Ilustración 8 Concentración poblacional (WorldPop, 2020)

Enfermedad	Incidencia estimada (%)
Diarreas agudas	35
Cólera	5
Hepatitis A	12
Fiebre tifoidea	8

Tabla 11 Incidencia local de enfermedades hídricas (Elaboración propia, 2026)

4.1.1.1 Impacto del colapso del saneamiento en la salud pública

El sistema de saneamiento deficiente de Rafah es un riesgo grave para la salud, sin recogida y tratamiento de aguas residuales aumentan los brotes y contagios de enfermedades por transmisión fecal-oral (diarreas, hepatitis A, tifus, cólera) en condiciones de hacinamiento. Por esta razón es necesario implantar un sistema descentralizado que reduzca >90% la carga contaminante, esto ayudará a disminuir enfermedades y reducirá la presión sobre los servicios médicos [52], [53].

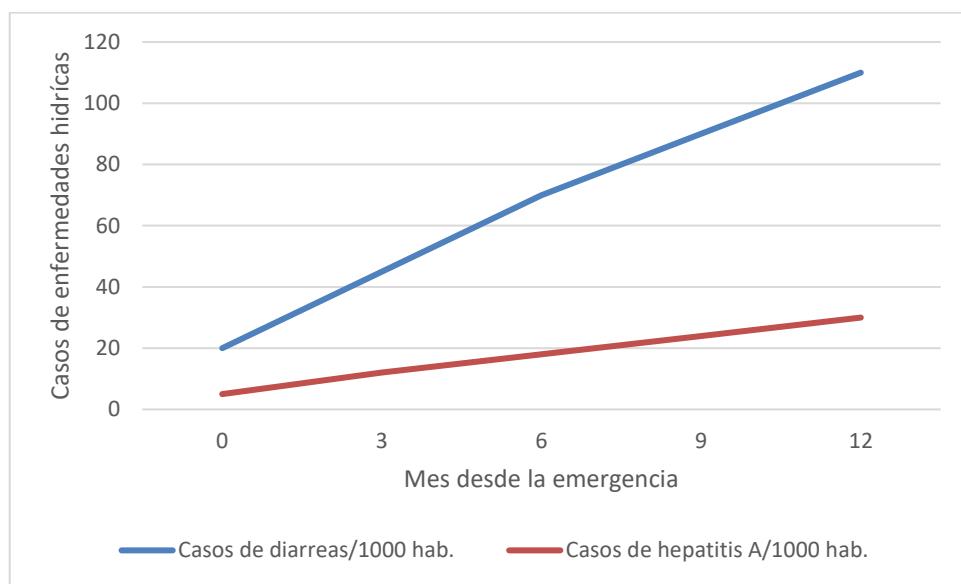


Ilustración 9 Tabla de evolución temporal de enfermedades hidráticas (Elaboración propia, 2026)

4.1.1.2 Limitaciones de los sistemas convencionales

En Rafah no es viable tener un sistema de saneamiento convencional porque no se puede asegurar electricidad continua. Las plantas urbanas (lodos activados, aireación, terciarios) necesitan energía constante, personal cualificado y repuestos. Además, no existe red de alcantarillado y el terreno hacinado y sin planificación impide abrir zanjas profundas o instalar bombeos y colectores hacia una planta central, por lo que se descartan soluciones que dependan de presión o equipos electromecánicos. Las restricciones logísticas también hacen muy complicado cualquier sistema basado en piezas importadas. A esto se suma el

DEFINICIÓN DEL TRABAJO

bajo presupuesto (dependiente de ayuda), que obliga a soluciones rápidas, económicas y fáciles de mantener [6], [7].

Requisito Técnico	Sistema Convencional	Sistema Pasivo Descentralizado
Consumo energético	Alto (hasta 1.5 kWh/m ³)	Muy bajo o nulo
Necesidad de componentes electromecánicos	Sí (bombas, aireadores, sensores)	No
Requiere personal técnico cualificado	Sí	No (capacitación básica suficiente)
Tolerancia a caudal variable	Baja	Alta
Frecuencia de mantenimiento	Media-Alta (mensual o quincenal)	Baja (trimestral o semestral)
Necesidad de red de alcantarillado	Sí (infraestructura extensa)	No (sistemas distribuidos)
Adaptabilidad espacial	Limitada (requiere diseño previo)	Alta (modular y flexible)
Coste de instalación (€/m ³ tratado)	600–1500	150–500
Disponibilidad de repuestos críticos	Limitada (alta dependencia de importación)	Alta (uso de materiales locales)
Dependencia de energía externa	Alta	Muy baja o nula
Idoneidad en contextos de emergencia	No recomendable	Altamente recomendable

Tabla 12 Comparativa de sistemas de saneamiento (Elaboración propia, 2026)

Tecnología	Inversión (€ / m ³ tratado)	Consumo energético (kWh/m ³)
Lodos activados	1200	1,4
Filtro percolador	800	0,8
Reactor UASB	600	0,2
Humedal artificial	400	0,05
Tanque séptico mejorado	300	0,01
Sistema DEWATS	450	0,03

Tabla 13 Tabla comparativa tecnologías (Elaboración propia, 2026)

DEFINICIÓN DEL TRABAJO

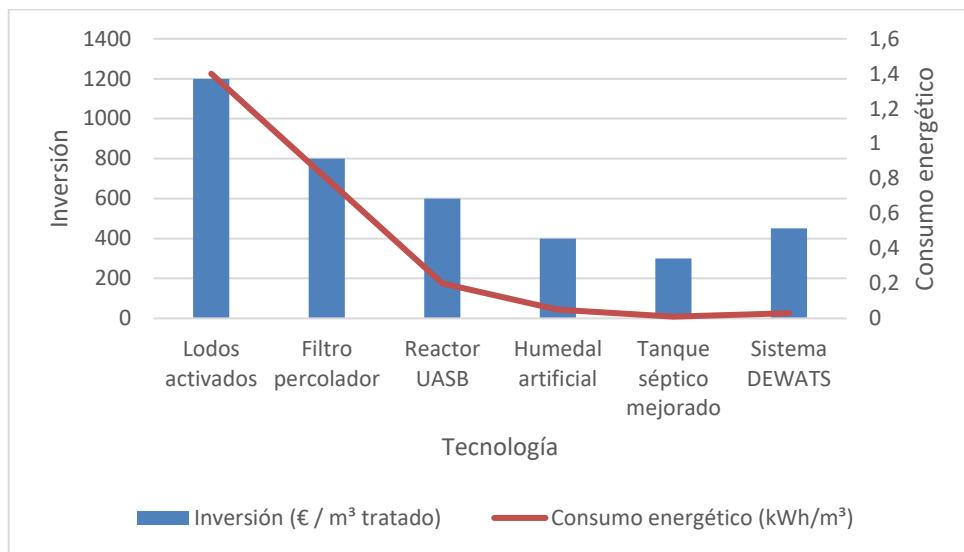


Ilustración 10 Gráfico comparativo tecnologías (Elaboración propia, 2026)

4.1.3 PONTENCIAL IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL

La implementación de un sistema de saneamiento descentralizado con tecnologías pasivas puede generar mejoras sociales y ambientales importantes en un contexto donde la infraestructura pública ha colapsado.

En lo social, estos sistemas reducen el contacto con aguas negras, malos olores y focos de infección, disminuyendo enfermedades como cólera, hepatitis A o infecciones gastrointestinales. WaterAid y MSF señalan que mejorar el saneamiento básico impacta directamente en la salud pública y reduce costes sanitarios por familia [52], [53]. Además, al ser modular y construible con materiales locales, puede crear empleo comunitario y reforzar capacidades técnicas mediante formación, mejorando la sostenibilidad del sistema [54].

En lo ambiental, reduce la contaminación que hoy infiltra y daña los acuíferos costeros del sur de Gaza. Con reactores anaerobios y humedales de flujo subsuperficial se puede reducir hasta un 90% la DBO5 y los sólidos suspendidos, facilitando la reutilización del agua para riego o limpieza [47], [50].

4.2 OBJETIVOS

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como finalidad el desarrollo de un sistema de saneamiento descentralizado, de tipo pasivo y modular, que responda a las necesidades de la población desplazada en el campo de refugiados de Rafah, en el sur de Gaza. El diseño del sistema no se concibe únicamente desde la eficiencia hidráulica o la remoción de contaminantes, sino también desde su adaptabilidad social, su simplicidad operativa y su viabilidad económica.

Este objetivo global se divide en varios objetivos específicos, que permiten cubrir las distintas dimensiones técnicas, operativas, sociales y económicas del problema:

1. **Diagnóstico técnico-contextual:** Analizar las condiciones actuales del saneamiento en Rafah, evaluando caudales generados, tipos de aguas residuales, grado de contaminación, disponibilidad de espacio, fuentes de energía, acceso a materiales y factores climáticos relevantes para el diseño hidráulico y biológico [6], [26].
2. **Revisión comparativa de tecnologías descentralizadas:** Sistematizar los resultados de proyectos internacionales previos (SARASWATI, DEWATS, CIATEJ, SANIMAS), con especial énfasis en las tecnologías que han demostrado robustez en escenarios de crisis: reactores anaerobios de flujo ascendente, humedales artificiales de flujo subsuperficial, tanques sépticos mejorados, sistemas de reutilización de agua y producción de biogás [7], [8], [9], [27].
3. **Diseño y dimensionamiento del sistema:** Definir la arquitectura del sistema propuesto, seleccionando componentes adecuados en función de la carga orgánica (DBO₅, SST), las condiciones de operación y la superficie disponible. El diseño incluirá balances de masa, tiempos de retención hidráulica y cálculos de eficiencia [6], [13].
4. **Evaluación del impacto sanitario y ambiental:** Estimar la reducción de enfermedades hídricas, la mejora en calidad del agua tratada, la reducción de vertidos contaminantes, el potencial de recuperación de recursos y el grado de resiliencia frente a fallos del sistema [52], [53].

5. **Viabilidad económica y coste de ciclo de vida:** Calcular la inversión inicial, los costes de operación y mantenimiento, el coste por m³ tratado y el valor económico de los recursos recuperados (ahorro en agua y energía) [6], [11].

4.3 METODOLOGÍA

El desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se ha estructurado a través de una metodología que combina el análisis técnico–documental, el modelado hidráulico y la extrapolación de datos de proyectos reales aplicados en contextos similares. La metodología tiene en cuenta que en entornos humanitarios como Rafah, la ingeniería a parte de resolver el problema técnico debe adaptarse a restricciones institucionales, sociales y materiales.

A continuación se describen las fases metodológicas seguidas:

1. Análisis contextual

Se realiza una recopilación de datos sobre el campo de refugiados de Rafah, población, densidad, acceso a infraestructuras, caudales generados, hábitos de uso del agua y estado del sistema actual. Esta información se complementa con informes de organismos internacionales (UNICEF, OCHA, WHO). Se identifican las principales restricciones de espacio, energía y mantenimiento.

2. Revisión técnica comparativa

Se seleccionan tecnologías anaerobias, humedales artificiales y sistemas modulares pasivos basados en experiencias exitosas documentadas (SARASWATI, DEWATS, SANIMAS, CIATEJ). Se extraen parámetros operativos clave (TRH, rendimientos de remoción, superficie requerida, consumo energético, costes) y se comparan según su conveniencia técnica y adaptabilidad al caso de estudio.

3. Selección de tecnologías y diseño conceptual

Se configura un sistema descentralizado modular que integre biodigestores anaerobios, humedales horizontales y unidades de almacenamiento de lodos. Se realiza un dimensionamiento preliminar usando modelos simplificados, tiempos de retención y eficiencia de tratamiento, adaptados a las condiciones climáticas de Gaza. El diseño se optimiza para minimizar costes y superficie ocupada, y se contemplan mecanismos de bypass y desbordamiento.

DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4. Estimación del impacto y modelado de escenarios

Se construyen escenarios de intervención (sin sistema / sistema implantado) para estimar el impacto sobre salud pública, entorno y recursos. Se utilizan ratios de reducción de DBO5, SST y coliformes, así como tasas de reutilización de efluente. Se estiman indicadores sociales (enfermedades evitadas, empleo generado) y ambientales (volumen de efluente reutilizado, reducción de vertidos).

5. Evaluación económico-financiera

Se calculan los costes de inversión y operación del sistema por componente, y se comparan con soluciones convencionales. Se estima el coste por m³ tratado, el valor económico de los recursos recuperados (agua, energía), resiliencia comunitaria y valor ambiental.

6. Redacción técnica y generación de entregables

Se integran todos los resultados técnicos en un documento, incluyendo esquemas, gráficos, tablas comparativas y anexos de cálculo.

Fase	Herramientas y fuentes
Análisis contextual y diagnóstico	OCHA, UNHCR, informes MSF y otras fuentes
Revisión técnica comparativa	Literatura técnica, bases de datos DEWATS y SARASWATI
Selección y diseño conceptual	Modelos hidráulicos simplificados, ecuaciones TRH
Modelado de impacto	Parámetros empíricos de remoción y reutilización
Evaluación económico-financiera	Cálculo LCC, comparativas €/m ³ tratado, ratios SROI
Redacción técnica y síntesis	Word, Excel, esquemas

Tabla 14 Herramientas utilizadas por fase (Elaboración propia, 2026)

Capítulo 5. ESTADO DE LA CUESTIÓN

5.1 HIPÓTESIS DE DISEÑO

El diseño del sistema de saneamiento descentralizado propuesto para el campo de refugiados de Rafah se ha hecho a partir de hipótesis técnicas, operativas y contextuales. Estas hipótesis se fundamentan en estándares internacionales de saneamiento humanitario, literatura técnica especializada y experiencias previas en contextos similares. A continuación se explican las principales hipótesis establecidas.

Hipótesis demográficas y de caudal:

Se considera una población para el diseño del sistema de 150 personas, correspondiente a una unidad tipo dentro del campo de refugiados. Esta elección se ha hecho por motivos de escalabilidad, facilidad constructiva y control operativo.

El consumo de agua se ha estimado en 80 L/persona·día, que es un valor habitual en contextos humanitarios con acceso limitado al agua. De este consumo, aproximadamente el 85 % se convierte en agua residual, siendo el caudal medio de diseño de 10,2 m³/día.

Para contemplar situaciones de uso irregular y picos de carga se ha aplicado un factor de seguridad hidráulico del 1,3, lo que significa que el caudal máximo de diseño de aproximadamente 13,3 m³/día.

Hipótesis de carga contaminante:

La carga orgánica de entrada se ha definido a partir de valores típicos de aguas residuales domésticas:

- DBO₅: 300 mg/L
- DQO: 600 mg/L
- Sólidos en suspensión (SST): 250 mg/L

Estos valores son comunes en aguas residuales no industriales, además tienen un componente biodegradable alto, como es típico en zonas residenciales.

A partir de estos datos, se estima una carga orgánica diaria de aproximadamente 3,1 kg DBO₅/día, utilizada como base para el dimensionamiento del reactor anaerobio.

Hipótesis tecnológicas:

Se elige un sistema de tratamiento completamente pasivo, sin dependencia de suministro eléctrico que incluye las siguientes tecnologías:

- Reactor anaerobio de flujo compartimentado (ABR).
- Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.
- Unidades auxiliares de pretratamiento y almacenamiento de lodos.

La selección de estas tecnologías se fundamenta en su robustez, bajo OPEX, tolerancia a variaciones de carga y facilidad de operación por personal no especializado.

Hipótesis hidráulicas y operativas:

Se asume un régimen de funcionamiento continuo y por gravedad, con un flujo predominantemente laminar en todas las unidades del sistema, con velocidades compatibles con la sedimentación de sólidos y la actividad biológica anaerobia.

Se ha considerado una producción de lodos estabilizados baja común en sistemas anaerobios, con una frecuencia de extracción mayor a 3 años. Esto minimiza las necesidades de operación y mantenimiento.

También se contempla la utilización de válvulas de bypass y aliviaderos de seguridad, lo que permitiría que el sistema funcione en condiciones de emergencia o mantenimiento.

Hipótesis climáticas y ambientales:

El diseño tiene en cuenta las condiciones climáticas semiáridas de Rafah, con temperaturas medias altas durante la mayor parte del año. Se asume una disponibilidad limitada de agua dulce, por lo que el sistema se ha enfocado para maximizar la reutilización del efluente tratado para usos no potables como por ejemplo para el riego de vegetación no alimentaria o el control de polvo.

Hipótesis constructivas y sociales:

Se presupone la disponibilidad de materiales de construcción básicos (hormigón, áridos, tuberías plásticas) y mano de obra local con capacitación básica para poder llevar a cabo la ejecución del proyecto sin necesidad de equipamiento especializado.

Finalmente, se asume la participación de la comunidad en las tareas de operación y mantenimiento básico, algo necesario para la sostenibilidad del sistema a medio y largo plazo.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

A modo de síntesis, la Tabla 16 recoge los valores numéricos que constituyen los valores de partida para el diseño técnico del sistema.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Observación / uso
Población de diseño	N	150	pers	Unidad modular del sistema
Dotación específica	q	80	L/pers·día	Hipótesis de partida
Fracción convertida en AR	f	0,85	-	Conversión a aguas residuales
Caudal medio	Qmed	10,2	m ³ /día	Qmed = N·q·f / 1000
Factor de punta	Kp	1,3	-	Amortiguación de picos
Caudal máximo	Qmax	13,3	m ³ /día	Qmax = Kp·Qmed
DBO ₅ influente	C_DBO	300	mg/L	Equivale a 0,300 kg/m ³
DQO influente	C_DQO	600	mg/L	Equivale a 0,600 kg/m ³
SST influente	C_SST	250	mg/L	Equivale a 0,250 kg/m ³
Carga DBO ₅	L_DBO	3,06	kg/día	$L_{DBO} = Q_{med} \cdot C_{DBO}$ (kg/m ³)
Carga DQO	L_DQO	6,12	kg/día	$L_{DQO} = Q_{med} \cdot C_{DQO}$ (kg/m ³)
Carga SST	L_SST	2,55	kg/día	$L_{SST} = Q_{med} \cdot C_{SST}$ (kg/m ³)
Tiempo de retención	HRT_ABR	24	h	Hipótesis de diseño (1 día)
Volumen útil preliminar	V_ABR	10,2	m ³	$V_{ABR} = Q_{med} \cdot HRT$ (días)

Tabla 15 Hipótesis numéricas y magnitudes de partida (Elaboración propia, 2026)

5.2 ANÁLISIS DE REQUISITOS DEL SISTEMA

El análisis del sistema es una fase clave del TFG porque antes de dimensionar permite comprobar si la solución de saneamiento propuesta funciona y se adapta al campo de refugiados de Rafah. Se evalúa el sistema como un conjunto (función, hidráulica, operación y contexto), ya que en entornos humanitarios cada unidad afecta a las demás y hay poco margen para corregir fallos.

El diseño sigue el enfoque DEWATS, con tecnologías pasivas, robustas y de bajo consumo, adecuadas por la falta de red centralizada, la inestabilidad eléctrica y las limitaciones de recursos en Rafah. El análisis verifica que el sistema soporta los caudales y cargas previstos, que las unidades se complementan sin redundancias y que es resistente ante condiciones adversas. También justifica la elección de cada etapa (pretratamiento, reactor anaerobio

ESTADO DE LA CUESTIÓN

compartimentado, humedal y almacenamiento final) y se consideran criterios como la construcción local el mantenimiento simple o la implicación comunitaria.

5.2.1 CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El sistema se estructura como una línea de tratamiento en serie, compuesta por unidades diferentes con funciones específicas dentro del proceso global. Esta disposición hace posible la reducción de la carga contaminante, optimizando el rendimiento global y minimizando riesgos de fallo.

Las unidades que conforman el sistema son:

- Pretratamiento y decantación primaria.
- Reactor anaerobio de flujo compartimentado (ABR).
- Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.
- Almacenamiento final y reutilización del efluente tratado.

5.2.3 ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA

Desde el punto de vista hidráulico, el sistema ha sido diseñado para operar bajo un régimen continuo y estable, evitando fluctuaciones bruscas de velocidad que puedan comprometer la sedimentación de sólidos o la actividad biológica.

El caudal medio de diseño de 10,2 m³/día se distribuye a lo largo del sistema considerando:

- Velocidades bajas en las unidades de tratamiento, compatibles con flujo laminar ($Re < 2.000$).
- Tiempos de retención hidráulica (HRT) suficientes en cada etapa para garantizar la eficacia de los procesos físicos y biológicos.
- Pérdidas de carga mínimas, asegurando el funcionamiento por gravedad incluso ante pequeñas irregularidades constructivas.

Se añaden además elementos de seguridad hidráulica como aliviaderos y bypass que permiten desviar el caudal en situaciones excepcionales (lluvias intensas, obstrucciones parciales o mantenimiento).

5.2.4 PRETRATAMIENTO Y DECANTACIÓN PRIMARIA

El objetivo principal de la unidad de pretratamiento es la protección de las etapas posteriores, eliminando sólidos gruesos, arenas y materiales flotantes que podrían provocar colmataciones o pérdida de volumen útil.

Esta etapa permite:

- Reducir la carga de sólidos en suspensión que entra al ABR.
- Homogeneizar el caudal de entrada.
- Disminuir la frecuencia de mantenimiento del reactor anaerobio.

Aunque no contribuye en exceso a la eliminación de DBO, su papel es muy importante para la estabilidad a largo plazo del sistema.

5.2.5 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO COMPARTIMENTADO (ABR)

El ABR es el núcleo del sistema de tratamiento, es el principal responsable de la eliminación de materia orgánica. Su diseño compartimentado permite la creación de gradientes de carga y actividad biológica a lo largo del reactor, lo que crea estabilidad frente a variaciones hidráulicas y orgánicas.

En el ABR se desarrollan de forma simultánea los principales procesos de la digestión anaerobia:

- Sedimentación de sólidos en los compartimentos iniciales.
- Hidrólisis y acidogénesis, donde los compuestos complejos se transforman en ácidos grasos volátiles.
- Acetogénesis y metanogénesis en compartimentos posteriores, responsables de la estabilización final de la materia orgánica.

5.2.6 PRODUCCIÓN Y GESTIÓN DE LODOS

Una característica de los sistemas anaerobios es su baja producción de lodos, lo que reduce los costes y necesidades operativas. El análisis del sistema considera una acumulación

ESTADO DE LA CUESTIÓN

progresiva de lodos estabilizados en el fondo del ABR, con una frecuencia de extracción no inferior a tres años.

Esta baja tasa de generación:

- Reduce la dependencia de servicios externos.
- Minimiza la interrupción del funcionamiento.
- Permite planificar la gestión de lodos como una operación puntual y controlada.

5.2.7 HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

El humedal artificial actúa como etapa de tratamiento secundario y de pulido, complementando la acción del ABR mediante procesos naturales. El flujo subsuperficial evita la exposición del agua, reduciendo riesgos sanitarios y problemas de olores o proliferación de insectos.

En el humedal se producen:

- Filtración física de sólidos finos.
- Adsorción de contaminantes en el sustrato.
- Degradación biológica aerobia y anóxica asociada a la rizosfera.
- Reducción adicional de patógenos.

Esta etapa es esencial para alcanzar una calidad de efluente adecuada para reutilización no potable.

5.2.8 REUTILIZACIÓN DEL EFLUENTE TRATADO

El sistema se ha analizado no solo como una infraestructura de saneamiento, sino como un sistema de recuperación de recursos. La reutilización del agua tratada permite reducir la presión sobre los recursos hídricos y aporta un valor añadido al proyecto.

El efluente tratado se destina a:

- Riego de vegetación no alimentaria.
- Control de polvo en zonas comunes.

- Mejora del microclima local.

5.3 DISEÑO TÉCNICO DEL SISTEMA DEWATS

En este apartado se presenta el diseño técnico del sistema DEWATS de saneamiento descentralizado propuesto para el campo de refugiados de Rafah. A partir de las hipótesis y requisitos definidos en apartados anteriores se fija la configuración del sistema. Se va a diseñar un sistema pasivo, modular y resistente, que pueda funcionar de forma continua con pocos recursos, sin red centralizada y con costes bajos de construcción, operación y mantenimiento.

El trabajo se desarrolla por fases: primero se define el esquema general y el recorrido del agua indicando la función de cada unidad. Despues se analizan las unidades principales, justificando su elección y explicando los procesos físicos y biológicos; y por último se incluyen diagramas y planos conceptuales que resumen el sistema y sirven de base para los cálculos y anexos.

5.3.1 Localización del emplazamiento y superficie requerida

Para el caso de estudio se elige como emplazamiento la zona de Al-Mawasi, ya que esta zona tiene una elevada densidad de población desplazada y los problemas de saneamiento son críticos. Para la implantación real sobre el terreno se fija un punto representativo de referencia dentro del área de Al-Mawasi con las siguientes coordenadas geográficas:

- Coordenadas aproximadas: 31°19'44"N, 34°13'48"E

ESTADO DE LA CUESTIÓN



Ilustración 11 Foto satelital 1 (Google Earth, 2026)

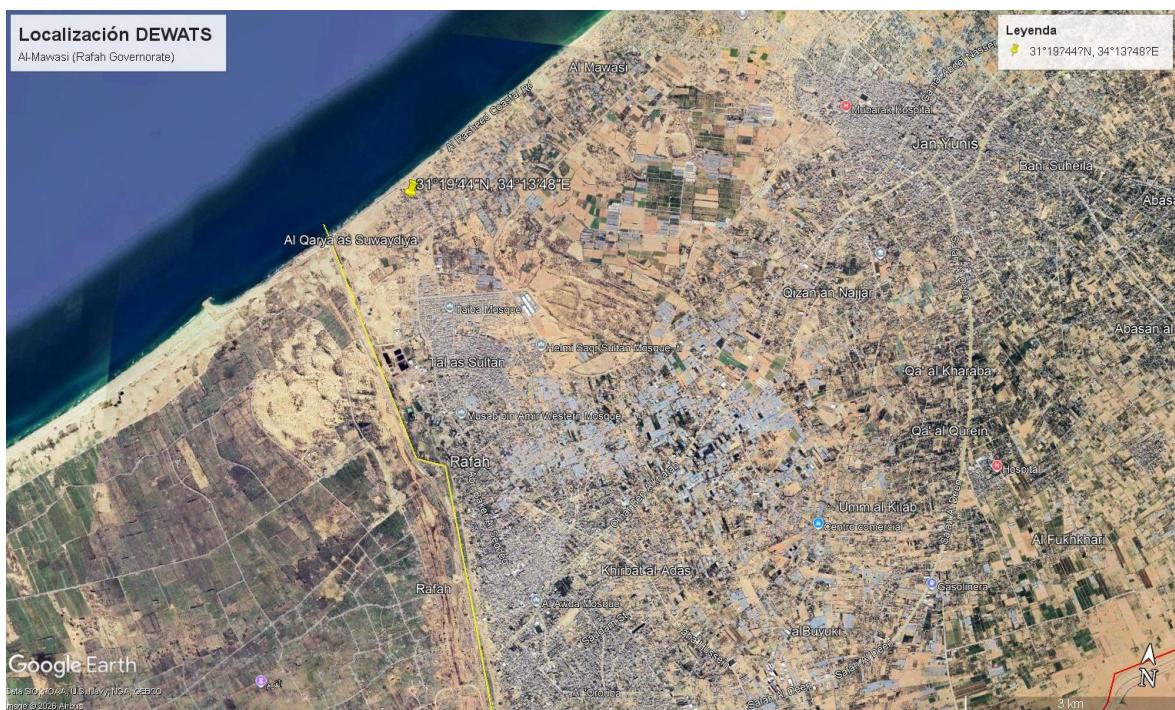


Ilustración 12 Foto satelital 2 (Google Earth, 2026)

ESTADO DE LA CUESTIÓN

Estas coordenadas se consideran una referencia de proyecto para el TFG, ya que la ubicación exacta está condicionada a la disponibilidad real de terreno, seguridad y accesos en el momento de ejecución.

El sistema diseñado para $N = 150$ personas incorpora un humedal HSSF como elemento principal en superficie. A partir de las hipótesis ya adoptadas (A_{tot} del humedal = 122,4 m²), se estima el área total sumando las unidades hidráulicas, pasillos de operación/mantenimiento, taludes de protección y una franja perimetral para seguridad y accesibilidad [28], [56].

Estimación de ocupación en planta (orden de magnitud):

- Humedal HSSF: 122,4 m² (área efectiva de tratamiento)
- ABR + pretratamiento + depósito final: ~25–35 m² (obra civil)
- Pasillos, arquetas, registros y maniobrabilidad: ~40–60 m²
- Margen perimetral de seguridad/implantación (cota, vallado, drenajes): ~40–60 m²

Teniendo en cuenta todo lo anterior, la superficie total recomendada para la implantación de una unidad (150 pers) se sitúa en el rango:

- $A_{impl} \approx 230\text{--}280\text{ m}^2$ (valor de diseño recomendado: $\approx 250\text{ m}^2$)

5.3.2 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA



Ilustración 13 Esquema general (Elaboración propia, 2026)

ESTADO DE LA CUESTIÓN

El sistema DEWATS diseñado se estructura como una línea de tratamiento en serie, en la que las aguas residuales domésticas son conducidas a través de distintas unidades con diferentes funciones cada una. El funcionamiento del sistema se basa en el flujo continuo por gravedad, esto no hace necesario los bombeos y reduce la complejidad operativa.

El esquema de funcionamiento empieza con la captación de las aguas residuales procedentes de los módulos habitacionales, estas son conducidas a una unidad de pretratamiento y decantación primaria. La primera etapa tiene el objetivo de eliminar de sólidos gruesos, arenas y materiales flotantes, protegiendo así las unidades posteriores frente a obstrucciones y pérdidas de eficiencia.

A continuación, el efluente pretratado se introduce en el reactor anaerobio de flujo compartimentado (ABR), que es el elemento central del sistema. En este reactor se produce la mayor parte de la eliminación de la carga orgánica mediante procesos de digestión anaerobia, aprovechando tiempos de retención elevados y una compartimentación interna que favorece la estabilidad del proceso.

El efluente del ABR es conducido después a un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal donde se completa el tratamiento mediante procesos naturales de filtración, adsorción y degradación biológica. Esta etapa actúa como tratamiento secundario y de pulido, mejorando la calidad del efluente y reduciendo la concentración de sólidos finos y patógenos.

Al final del proceso el agua tratada se recoge en una unidad de almacenamiento final. Esta agua puede destinarse a usos no potables, como por ejemplo riego de vegetación no alimentaria o control de polvo. De esta forma se cierra el ciclo de tratamiento y se contribuye a la optimización del agua, un recurso escaso en la zona de Rafah.

5.3.2 COMPONENTES PRINCIPALES

Cada componente del sistema ha sido seleccionado y configurado de forma que contribuya de manera específica al rendimiento global del sistema, manteniendo a la vez la simplicidad

constructiva y la robustez operativa requeridas en el contexto del campo de refugiados de Rafah.

A continuación, se analizan los principales componentes del sistema, describiendo su función, los criterios técnicos de diseño adoptados y los parámetros fundamentales que condicionan su dimensionamiento.

- **Pretratamiento y decantación primaria**

Esta unidad recibe el agua residual bruta procedente de los módulos habitacionales y realiza una separación inicial antes del tratamiento biológico. En esta etapa el objetivo es reducir los sólidos sedimentables, arenas y materiales flotantes.

Se adopta un tiempo de retención hidráulica representativo de decantación primaria en sistemas pasivos:

$$HRT_1 = 8 \text{ h} = \frac{8}{24} = 0,333 \text{ días}$$

$$V_1 = Q_{med} \cdot HRT_1 \quad \text{Ec. 1}$$

$$V_1 = 10,2 \cdot 0,333 = 3,40$$

Se añade holgura por acumulación de sólidos y conservación de volumen útil:

$$V_{1,tot} = 1,25 \cdot V_1 = 4,25 \text{ m}^3$$

Resultado preliminar: $V_{1,tot} \approx 4,3 \text{ m}^3$

- **Reactor anaerobio de flujo compartimentado (ABR)**

El ABR es el núcleo del tratamiento. Su diseño compartimentado fuerza el paso del efluente a través de cámaras sucesivas, haciendo posible la retención de sólidos y el contacto prolongado con biomasa anaerobia. Esta configuración permite que la degradación de materia orgánica se distribuya longitudinalmente. Los primeros compartimentos tienen mayor carga particulada y es donde se producen la sedimentación e hidrólisis, mientras que los últimos estabilizan compuestos solubles a través de acetogénesis y metanogénesis. La

ESTADO DE LA CUESTIÓN

compartimentación reduce el riesgo de fallo por sobrecarga puntual, ya que amortigua variaciones hidráulicas y orgánicas.

Parámetro de diseño adoptado:

$$HRT_{ABR} = 24 \text{ h} = 1 \text{ día}$$

Volumen útil (por tiempo de retención):

$$V_{ABR} = Q_{med} \cdot HRT_{ABR} = 10,2 \cdot 1 = 10,2 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. 2}$$

Verificación por carga orgánica volumétrica (OLR):

$$L_{DBO} = 3,06 \text{ kg/día}$$

$$OLR = \frac{L_{DBO}}{V_{ABR}} = \frac{3,06}{10,2} = 0,30 \text{ kg DB05}/(\text{m}^3 \cdot \text{día}) \quad \text{Ec. 3}$$

Comprobación técnica: el valor resultante es conservador, favorece estabilidad y baja probabilidad de acidificación.

Compartimentación y volumen total con holgura:

$$n = 5 \text{ compartimentos}$$

$$V_{ABR,tot} = 1,30 \cdot V_{ABR} = 13,26 \text{ m}^3$$

$$V_{comp} \approx \frac{13,26}{5} = 2,65 \text{ m}^3$$

Resultado preliminar: $V_{ABR} = 10,2 \text{ m}^3$; $V_{ABR,tot} \approx 13,3 \text{ m}^3$; 5 compartimentos.

- **Gestión y acumulación de lodos**

ESTADO DE LA CUESTIÓN

La digestión anaerobia genera lodos estabilizados a un ritmo menor que el de sistemas aerobios, lo que permite periodos largos entre extracciones. Sin embargo, en el ABR se acumulan lodos primarios (procedentes de sólidos sedimentados) y lodos biológicos anaerobios. El diseño debe prever capacidad suficiente para almacenar estos sólidos sin pérdida de volumen útil, manteniendo accesos para inspección y retirada.

Criterio adoptado:

Se establece un almacenamiento mínimo equivalente a: ≥ 3 años mediante reserva volumétrica en el reactor y/o cámara específica accesible.

La cuantificación detallada de volumen de lodos y planificación de extracción se desarrolla en el plan de operación (Cap. 5.4) y en los anexos.

• **Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HSSF)**

El humedal HSSF actúa como etapa de pulido y estabilización del efluente procedente del ABR. El flujo discurre bajo la superficie a través de un medio granular (grava), evitando contacto directo con el exterior y reduciendo riesgos sanitarios, olores y proliferación de vectores. En el lecho se producen varios fenómenos al mismo tiempo: filtración física de sólidos finos, adsorción en el sustrato y degradación biológica asociada a biofilm y rizosfera.

Como elementos adicionales se incorpora una arqueta de entrada cuyo objetivo es homogeneizar el caudal, disipar energía y permitir la inspección y limpieza de la tubería, evitando obturaciones y cortocircuitos hidráulicos. Además, la geomembrana impermeabilizante se fija en coronación mediante un par de zanjas de anclaje perimetral, con el fin de asegurar la estabilidad, mantener la estanquidad en bordes y proteger frente a tracciones durante operación y mantenimiento.

Parámetro adoptado (HLR):

$$HLR = 0,10 \frac{m^3}{m^2 \cdot \text{día}}$$

Superficie requerida:

$$A = \frac{Q_{med}}{HLR} = \frac{10,2}{0,10} = 102 \text{ m}^2 \quad \text{Ec. 4}$$

Aplicando margen del 20%:

$$A_{tot} = 1,20 \cdot 102 = 122,4 \text{ m}^2$$

Propuesta geométrica conceptual:

Se propone una geometría próxima a A_{tot} , por ejemplo $20 \times 6 \text{ m}$ ($A = 120 \text{ m}^2$) y:

$$h = 0,60 \text{ m}$$

Verificación por HRT en medio poroso:

Con porosidad efectiva $n = 0,35$:

$$HRT_{HSSF} = \frac{A \cdot h \cdot n}{Q_{med}} = \frac{120 \cdot 0,60 \cdot 0,35}{10,2} = 2,47 \text{ días} \quad \text{Ec. 5}$$

Resultado preliminar: $A \approx 120\text{--}122 \text{ m}^2$; $h = 0,60 \text{ m}$; $HRT \approx 2,5 \text{ días}$.

- **Depósito final / punto de reutilización**

Esta unidad sirve para regular y controlar el efluente tratado. Permite acumular agua tratada para usos no potables y además es un punto que se puede utilizar para muestreo y control básico de calidad. La unidad debe incluir elementos de seguridad (rebose controlado) para evitar vertidos no controlados en caso de acumulación.

Criterio adoptado:

Se adopta un tiempo de regulación:

$$t_{reg} = 12 \text{ h} = 0,5 \text{ días}$$

Volumen mínimo y holgura:

$$V_{reg} = Q_{med} \cdot t_{reg} = 10,2 \cdot 0,5 = 5,1 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. 6}$$

$$V_{dep} = 1,20 \cdot 5,1 = 6,12 \text{ m}^3$$

Resultado preliminar: $V_{dep} \approx 6,1 \text{ m}^3$

- **Interconexiones, seguridad hidráulica y bypass**

La red de interconexión entre unidades se diseña para asegurar continuidad de flujo por gravedad y facilitar la operación en condiciones reales. Se incluyen puntos de inspección, registros y derivaciones de bypass que permiten aislar unidades para mantenimiento sin detener completamente el sistema. También se contemplan aliviaderos o reboses de seguridad en puntos críticos para evitar inundaciones o daño estructural ante caudales punta o bloqueos.

Parámetro (símbolo)	Valor (unidades)
Población de diseño, N	150 pers
Dotación específica, q	80 L/pers·día
Fracción convertida en AR, f	0,85
Caudal medio de diseño, Q _{med}	10,2 m ³ /día
Factor de punta, K _p	1,3
Caudal máximo de diseño, Q _{max}	13,3 m ³ /día
DBO ₅ influente, C_DBO	300 mg/L
DQO influente, C_DQO	600 mg/L
SST influente, C_SST	250 mg/L
Carga DBO ₅ diaria, L_DBO	3,06 kg/día
HRT pretratamiento, HRT ₁	8 h
Volumen pretratamiento útil, V ₁	3,40 m ³
Volumen pretratamiento total, V _{1,tot}	4,25 m ³
HRT ABR, HRT_ABR	24 h
Volumen ABR útil, V_ABR	10,2 m ³
Carga volumétrica ABR, OLR	0,30 kg DBO ₅ /(m ³ ·día)

ESTADO DE LA CUESTIÓN

Número de compartimentos ABR, n	5
Volumen ABR total, V_ABR,tot	13,26 m ³
Volumen por compartimento, V_comp	2,65 m ³
Carga hidráulica humedal, HLR	0,10 m ³ /(m ² ·día)
Área humedal base, A	102 m ²
Área humedal con margen, A_tot	122,4 m ²
Profundidad lecho humedal, h	0,60 m
Porosidad efectiva humedal, n_e	0,35
HRT humedal (poroso), HRT_HSSF	2,47 días
Tiempo regulación depósito, t_reg	12 h
Volumen depósito mínimo, V_reg	5,1 m ³
Volumen depósito con holgura, V_dep	6,12 m ³

Tabla 16 Resultados preliminares de dimensionamiento (Elaboración propia, 2026)

En la Tabla 17 se encuentran los principales parámetros adoptados para el diseño del sistema. Estos valores han sido seleccionados a partir de rangos recomendados en la bibliografía y adaptados al contexto específico del campo de refugiados de Rafah. El desarrollo completo de los cálculos asociados a estos parámetros se presenta en el Anexo B del proyecto.

5.3.3 DIAGRAMAS Y PLANOS

El diseño técnico del sistema DEWATS propuesto se apoya en una serie de diagramas y esquemas que permiten ver la configuración general del sistema, la disposición de las unidades de tratamiento y la integración hidráulica y funcional entre ellas.

En primer lugar, se ha elaborado un esquema general del sistema como se puede ver en la ilustración 9, en el que se representa el recorrido del agua residual desde su captación hasta la reutilización final del efluente tratado. También se ha desarrollado un diagrama funcional por unidades que se puede ver la ilustración 10, en el que se muestran las funciones específicas de cada componente del sistema y los principales procesos físicos y biológicos que suceden en cada parte.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

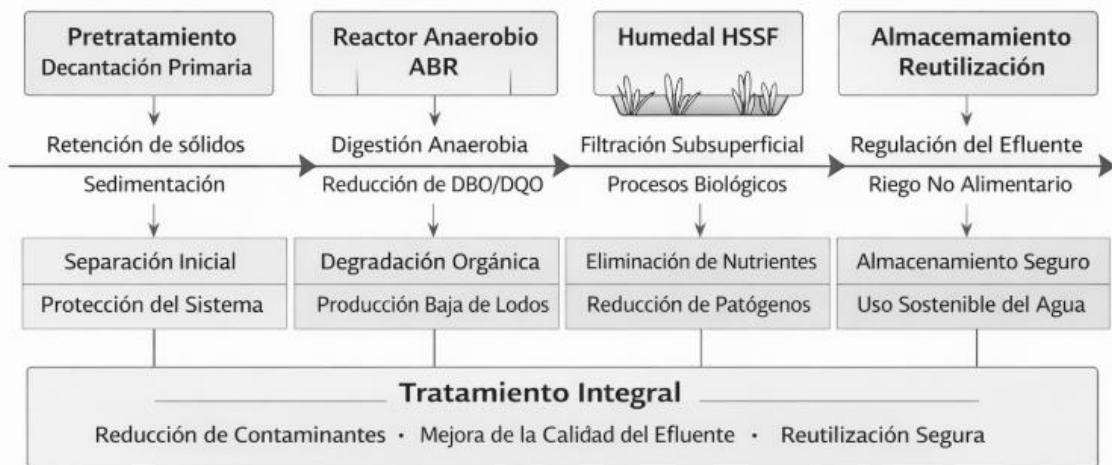


Ilustración 14 Diagrama funcional (Elaboración propia, 2026)

De manera complementaria, se incluyen planos conceptuales de las principales unidades del sistema. Estos planos no tienen un carácter constructivo definitivo, su papel es definir las dimensiones generales, la disposición interna y los elementos clave necesarios para el funcionamiento del sistema.

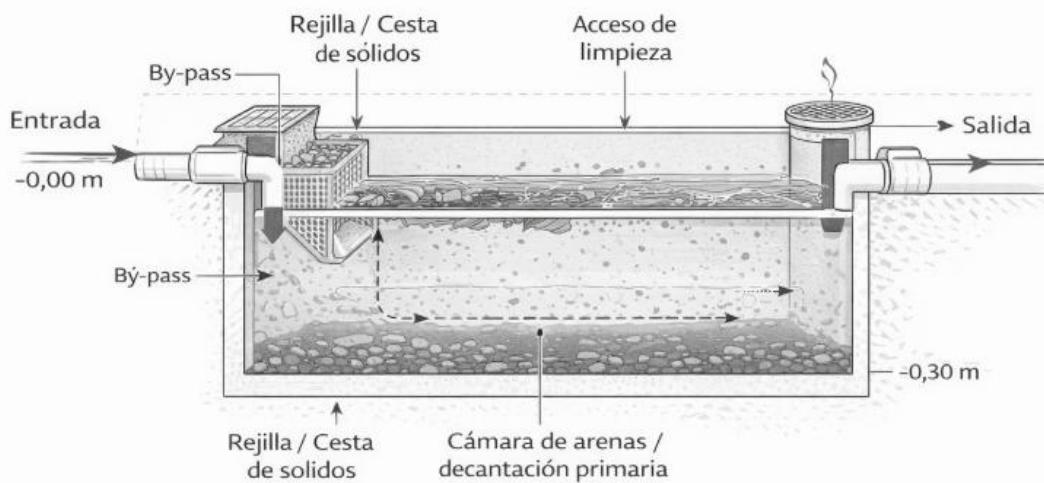


Ilustración 15 Pretratamiento (Elaboración propia, 2026)

ESTADO DE LA CUESTIÓN

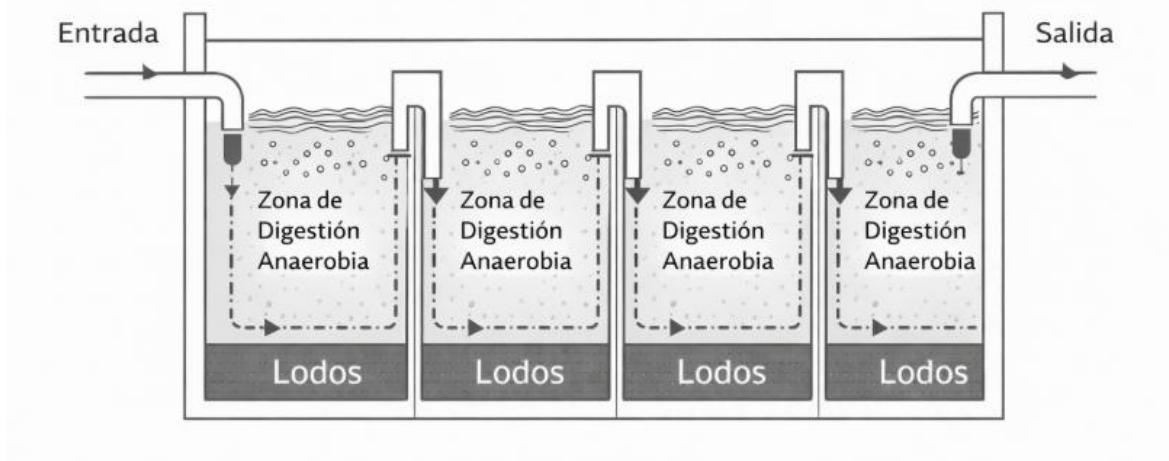


Ilustración 16 Reactor anaerobio de flujo compartimentado (Elaboración propia, 2026)

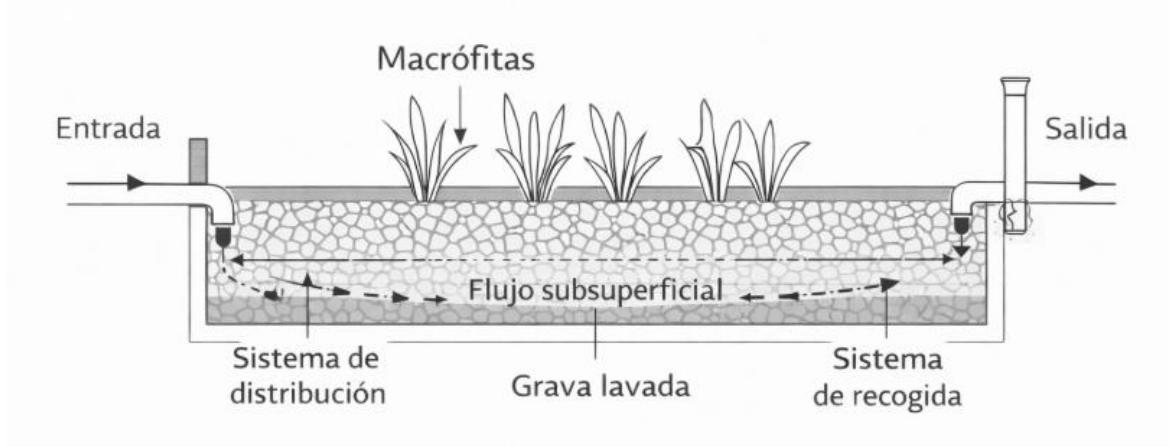


Ilustración 17 Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (Elaboración propia, 2026)

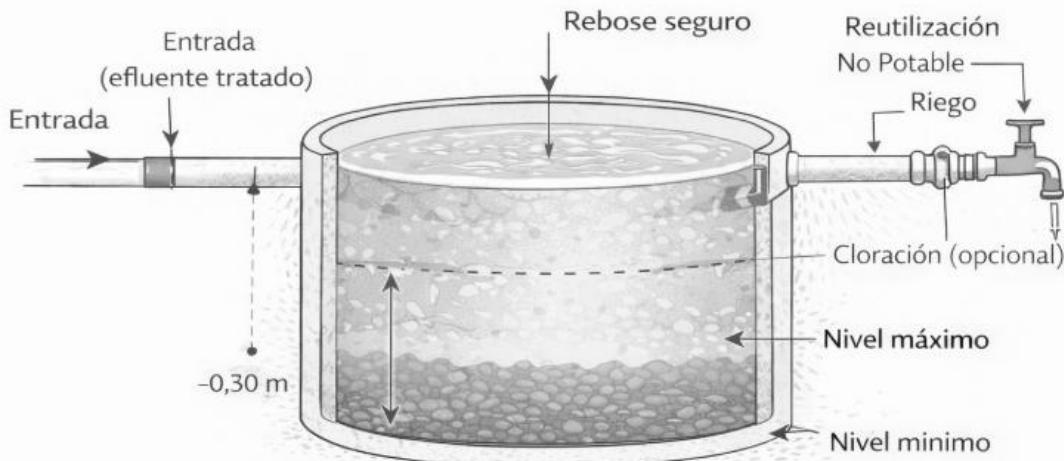


Ilustración 18 Tanque de almacenamiento y reutilización (Elaboración propia, 2026)

Los planos detallados reales del proyecto se encuentran en el Anexo A del documento.

5.4 PLAN DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

Un sistema DEWATS no funciona bien solo por estar bien dimensionado, también necesita mantener un caudal estable y una biomasa activa cada día con poca intervención. Por eso en Rafah, donde faltan repuestos, energía y personal especializado, el plan de operación tiene que ser simple y fácil de mantener.

Se propone un plan de mantenimiento basado en inspecciones periódicas y limpieza preventiva sin que haya tareas complejas o tecnologías avanzadas. El plan se organiza por unidades, además también se añade un protocolo de puesta en marcha y un control de la calidad del efluente para su reutilización no potable.

5.4.1 ORGANIZACIÓN OPERATIVA Y ROLES

Para una unidad modular de 150 personas se recomienda un equipo mínimo de operación compuesto por:

- Operador local (1 persona): inspecciones visuales, limpieza básica, registros diarios/semanales
- Responsable técnico (apoyo periódico): supervisión mensual, resolución de incidencias, verificación de parámetros y formación

5.4.2 PROTOCOLO DE PUESTA EN MARCHA (ARRANQUE)

Los sistemas anaerobios requieren una fase de estabilización. El objetivo del arranque es evitar choques orgánicos e hidráulicos que desestabilicen el ABR (acidificación) y asegurar un reparto homogéneo de caudales.

Fases de arranque recomendadas:

1. Inspección previa: estanqueidad, limpieza de obra, retirada de escombros, comprobación de pendientes y bypass
2. Llenado inicial: llenado con agua limpia o efluente diluido para evitar flotación de elementos y comprobar fugas
3. Alimentación progresiva: incremento gradual del caudal durante 2–4 semanas evitando picos
4. Observación de estabilidad: control de olores, color, formación de espuma, niveles y acumulación de sólidos

5.4.3 PLAN DE MANTENIMIENTO POR UNIDADES

- **Pretratamiento y decantación primaria**

Esta unidad es el punto con mayor probabilidad de fallos por uso inadecuado (vertido de sólidos, grasas, plásticos). Su mantenimiento evita el colapso aguas abajo.

Tareas principales:

- Retirada de sólidos gruesos (rejilla/cesta)
- Eliminación de arenas y flotantes
- Verificación de niveles y olores anómalos

ESTADO DE LA CUESTIÓN

Frecuencia típica:

- Diaria-semanal: retirada de sólidos visibles (según carga real)
- Mensual: limpieza parcial de cámara si se observa acumulación
- Semestral: vaciado/limpieza completa si hay pérdida de volumen útil

Indicadores de alerta:

- Entrada obstruida, nivel alto, olores intensos, sólidos flotantes persistentes
- ***Reactor ABR***

El ABR es robusto, pero su rendimiento se reduce si se producen cortocircuitos hidráulicos, acumulación excesiva de lodos o entrada de sólidos no deseados. El mantenimiento se centra en conservar volumen útil y evitar sobrecargas.

Tareas principales:

- Inspección de niveles entre compartimentos
- Revisión de registros/tapas y ventilación de gases
- Control de espumas, olores y presencia de sólidos en salida

Frecuencia típica:

- Semanal: inspección visual (olor, espuma, nivel)
- Mensual: revisión de registros, estado de tabiques accesibles y trazas de bypass
- Cada 2–3 años: extracción de lodos estabilizados (según inspección)

Indicadores de alerta:

- Olor ácido (posible acidificación), espumas persistentes, sólidos en efluente del ABR, subida de nivel por obstrucción.

Medida correctiva estándar:

- Reducir caudal temporalmente mediante bypass parcial, retirar sólidos en pretratamiento, y si procede, extracción parcial de lodos del primer compartimento.

- ***Humedal HSSF***

El humedal requiere poca intervención, pero su riesgo principal es la colmatación (por exceso de SST o mala distribución de caudal). La operación debe asegurar reparto uniforme y evitar acumulaciones.

Tareas principales:

- Inspección del punto de entrada y salida (distribución homogénea)
- Revisión del nivel hidráulico (no debe aflorar agua a superficie)
- Mantenimiento de vegetación (retirada de biomasa seca y control de malas hierbas)
- Limpieza de colectores de entrada/salida

Frecuencia típica:

- Semanal: revisión visual de entrada/salida y nivel
- Mensual: Limpieza de extremos de colectores
- Trimestral–semestral: poda/retirada parcial de biomasa, según estación
- Cada 3–5 años: rehabilitación parcial del lecho si aparece colmatación

Indicadores de alerta:

- Afloramiento de agua, malos olores, zonas encharcadas, caída de caudal de salida, vegetación degradada.
- ***Depósito final y punto de reutilización***

Esta unidad actúa como control final. Su mantenimiento es importante para evitar contaminación secundaria y garantizar seguridad en la reutilización.

Tareas principales:

- Limpieza de fondo (sedimentos)
- Revisión de rebose y toma de reutilización
- Control básico de turbidez/olor/color

Frecuencia típica:

- Semanal: inspección visual y limpieza ligera
- Mensual: limpieza parcial de sedimentos
- Semestral: vaciado y limpieza completa (si se detecta acumulación)

Indicadores de alerta:

- Sedimentación rápida, olores fuertes, turbidez elevada, presencia de algas

5.4.4 CONTROL MÍNIMO DE CALIDAD DEL EFLUENTE (ORIENTADO A REUTILIZACIÓN)

Dado el contexto, se plantea un control basado en niveles:

Nivel 1 (operativo, sin laboratorio):

- Olor (normal/anómalo)
- Color (estable/oscuro)
- Turbidez visual (baja/media/alta)
- Presencia de sólidos

Nivel 2 (kit simple, recomendado si es posible):

- pH (tiras reactivas)
- Conductividad (medidor barato)
- Cloro residual si se aplica desinfección en punto final

Nivel 3 (apoyo externo periódico):

- DBO/DQO, SST
- Indicadores microbiológicos (E. coli) si se planifica reutilización más sensible

5.4.5 GESTIÓN DE INCIDENCIAS Y MODOS DE FALLO

Para garantizar resiliencia, se estandarizan respuestas rápidas a fallos típicos:

- Obstrucción en entrada / pretratamiento: retirar sólidos e incorporar bypass temporal
- Arrastre de sólidos al humedal: revisar pretratamiento, extracción de lodos en primer compartimento del ABR
- Colmatación en humedal: limpiar colectores, redistribuir caudal, rehabilitar zona de entrada
- Rebose en depósito final: revisar toma de reutilización y rebose, comprobar salida del humedal

5.4.6 SÍNTESIS OPERATIVA

El plan propuesto permite operar el sistema con recursos mínimos, basándose en inspecciones rutinarias, mantenimiento preventivo y actuaciones correctivas simples. La combinación de pretratamiento robusto, ABR tolerante a variaciones y humedal pasivo hacen que el proyecto tenga bajo OPEX y alta resiliencia, algo que encaja con el contexto de Rafah.

Unidad	Tarea de mantenimiento/operación	Frecuencia	Indicador/criterio de actuación
Pretratamiento	Retirar sólidos de rejilla/cesta y flotantes visibles	Diaría-semanal	Acumulación de sólidos, malos olores, subida de nivel
	Retirar arenas y sedimentos de fondo (limpieza parcial)	Mensual	Sedimento >5-10 cm o pérdida de volumen útil
	Inspección de bypass y rebose de seguridad	Mensual	Válvula/compuerta atascada, fugas, rebose obstruido
	Vaciado y limpieza completa de la cámara	Semestral (según carga)	Colmatación recurrente o sólidos persistentes
Reactor ABR	Inspección visual de niveles/olores/espumas en registros	Semanal	Olor ácido, espuma persistente, niveles desiguales
	Revisión de tapas, ventilación y seguridad de gases	Mensual	Tapas dañadas, olores excesivos, ausencia de viento
	Comprobación de arrastre de sólidos en efluente de ABR	Mensual	Turbidez alta/sólidos visibles a la salida
	Extracción de todos estabilizados (principalmente 1er compartimento)	Cada 2-3 años (mín.)	Reducción de volumen útil, sólidos acumulados, pérdida de rendimiento
Humedal HSSF	Inspección de entrada/salida y distribución de flujo	Semanal	Zonas secas/encharcadas, caudal irregular, afloramiento
	Verificar nivel hidráulico (no debe aflorar en superficie)	Semanal	Afloramiento, olores, mosquitos
	Limpieza de colectores extremos y registro de salida	Mensual	Obstrucción parcial, descenso de caudal
	Gestión de vegetación (podada/retirada de biomasa seca)	Trimestral-semestral	Vegetación muerta excesiva, sombra, obstrucción
Depósito final	Rehabilitación localizada del lecho (zona de entrada)	Cada 3-5 años (según colmatación)	Afloramiento recurrente o pérdida de permeabilidad
	Inspección visual (olor, color, turbidez) y retirada de flotantes	Semanal	Olor fuerte, turbidez alta, algas
	Limpieza de sedimentos del fondo (parcial)	Mensual	Sedimento visible o reducción de volumen útil
	Revisión de rebose, toma de reutilización y válvulas	Mensual	Rebose obstruido, fugas, toma bloqueada
Sistema general	Vaciado y limpieza completa	Semestral	Acumulación significativa o proliferación de algas
	Revisión de arquetas/registros y limpieza preventiva de tuberías	Mensual	Atascos incipientes, olores en arquetas, retorno
	Registro de operación (checklist) y reporte de incidencias	Semanal	Falta de trazabilidad, repetición de fallos
	Revisión de señalización y formación básica de usuarios	Trimestral	Uso inadecuado (sólidos, aceites)

Tabla 17 Mantenimiento del sistema

(Elaboración propia, 2026)

5.5 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

En este apartado se describen la planificación temporal de las actividades y una estimación de costes realista.

5.5.1 Planificación temporal del proyecto

El cronograma del proyecto se estructura en cuatro fases, el desarrollo escalonado de las fases hace que la implementación sea ordenada, adaptable a limitaciones logísticas y se alinee con la disponibilidad de recursos.

Fase	Duración estimada	Actividades clave
Fase 1. Diagnóstico y análisis contextual	2 semanas	Recolección de datos demográficos y sanitarios; estimación de caudales; evaluación topográfica
Fase 2. Diseño técnico y dimensionamiento	4 semanas	Selección de tecnologías; cálculos hidráulicos y biológicos; desarrollo de planos y diagramas
Fase 3. Ejecución e instalación	8 semanas	Excavación, obra civil, instalación de tuberías, válvulas y vegetación; drenajes y protección
Fase 4. Puesta en marcha y capacitación	4 semanas	Verificación hidráulica, pruebas de carga, formación de operarios locales en operación y mantenimiento

Tabla 18 Planificación temporal (Elaboración propia, 2026)

La planificación considera un calendario de 18 semanas, pero se prevé flexibilidad mediante una ejecución modular y por etapas, permitiendo priorizar áreas más críticas o disponer de sistemas que funcionen parcialmente ante imprevistos.

5.5.2 Estimación económica: CAPEX y OPEX

Se ha llevado a cabo una estimación de costes detallada basada en proyectos similares anteriormente estudiados (India, Colombia, Ecuador), ajustando parámetros a precios en Gaza e incluyendo un margen de incertidumbre.

El coste de inversión (CAPEX) se calcula mediante presupuesto por mediciones:

$$CAPEX = \sum_i (M_i \cdot P_i) \cdot (1 + \gamma) \quad \text{Ec. 7}$$

donde M_i es la medición, P_i es el precio unitario y γ es un factor de contingencia (incertidumbre logística y de suministro). Los valores de mediciones se obtienen directamente del dimensionamiento del Capítulo 5.

Los precios unitarios se han referenciado mediante bases de precios de construcción para las diferentes partidas.

En un contexto como Rafah, el precio final puede diferir por transporte, disponibilidad y restricciones, por eso se utiliza el factor γ , en el Anexo C se puede ver en detalle los cálculos realizados.

Costes de inversión (CAPEX):

El CAPEX se resume en varias partidas principales. En este documento se presenta el resumen de los costes de inversión en la tabla 20, y el detalle por mediciones y precios unitarios se encuentra en el Anexo C.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

Componente técnico	Coste estimado (€)	Descripción
Reactor Anaerobio (ABR)	3220	Construcción en hormigón armado, particiones internas, sistema de entrada y salida
Humedal de flujo subsuperficial	2576	Geomembrana, sustrato granular, plantación de especies macrófitas autóctonas
Pozo de lodos y prefiltro	874	Cámaras de decantación primaria y almacenamiento de sólidos fermentables
Conexiones, válvulas, obras menores	1104	Tuberías PVC, válvulas de control, drenajes, registro, protección ante rebose
Formación y documentación técnica	414	Elaboración de manuales, sesiones de capacitación a operadores locales
Supervisión técnica de puesta en marcha	552	Ajuste de parámetros, arranque inicial, verificación de carga hidráulica y distribución
Total estimado (unidad para 150 personas)	8740	Incluye materiales, mano de obra y transporte, pero excluye compra de suelo o edificación

Tabla 19 Costes de inversión (CAPEX) (Elaboración propia, 2026)

Costes de operación (OPEX):

Aunque el sistema es pasivo, existe un OPEX mínimo asociado a inspecciones, limpieza preventiva, reposiciones y gestión de lodos. La fórmula empleada es:

$$OPEX_{anual} = C_{MO} + C_{cons} + \frac{C_{lodos}}{T_{lodos}} + C_{corr} \quad \text{Ec. 8}$$

ESTADO DE LA CUESTIÓN

donde C_{MO} es mano de obra, C_{cons} consumibles, C_{lodos} el coste por extracción de lodos y T_{lodos} la periodicidad (años). En sistemas DEWATS, la extracción de lodos es espaciada y el mantenimiento se basa en tareas sencillas y recurrentes.

En este TFG se adopta un OPEX anual orientativo de referencia (para una unidad de 150 personas) de:

- Vaciado de lodos prorrteado (cada 2–3 años): $\approx 70 \text{ €/año}$
- Mantenimiento correctivo eventual: $\approx 90 \text{ €/año}$
- Sustitución menor de elementos hidráulicos: $\approx 30 \text{ €/año}$
- Total OPEX (mínimo) estimado anual: $\approx 190 \text{ €/año} (\approx 1,27 \text{ €/persona} \cdot \text{año})$

Este valor debe interpretarse como estimación de OPEX total mínimo, en el Anexo C se encuentran los cálculos en detalle de la variante más conservadora con las hipótesis tomadas y la sensibilidad.

5.5.3 INDICADORES ECONÓMICOS

Para evaluar competitividad se emplean indicadores normalizados, calculados con los valores de diseño del proyecto (Capítulo 5).

Coste por persona beneficiaria:

$$C_{pers} = \frac{CAPEX}{N} = \frac{8740}{150} = 58,3 \text{ €/persona} \quad \text{Ec. 9}$$

Coste por m³ tratado (anualizado):

Se anualiza el CAPEX en una vida útil L (años) y se divide por el volumen anual tratado:

$$C_{m^3} = \frac{CAPEX}{L} + OPEX_{anual} \quad \text{Ec. 10}$$

$$C_{m^3} = \frac{Q_{med} \cdot 365}{Q_{med} \cdot 365}$$

Con $Q_{med} = 10,2 \text{ m}^3/\text{día}$ (dimensionamiento adoptado) y $OPEX_{anual} = 190 \text{ €/año}$, se obtiene un rango en función de L (análisis de sensibilidad):

- Para $L = 8\text{años}$: $C_{m^3} \approx 0,36 \text{ €/m}^3$
- Para $L = 10\text{años}$: $C_{m^3} \approx 0,29 \text{ €/m}^3$
- Para $L = 15\text{años}$: $C_{m^3} \approx 0,21 \text{ €/m}^3$

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El diseño del sistema DEWATS para una unidad modular de 150 personas permite obtener un conjunto de resultados cuantificables en términos de capacidad hidráulica, rendimiento de depuración, viabilidad económica y efectos ambientales y sociales esperados. Este capítulo sintetiza los resultados más importantes del proyecto, evalúa su coherencia técnica y realiza un análisis de las limitaciones existentes.

6.1 EVALUACIÓN TÉCNICA

6.1.1 RESULTADOS DE DIMENSIONAMIENTO Y COHERENCIA HIDRÁULICA

El sistema queda dimensionado para un caudal medio $Q_{med} = 10,2 \text{ m}^3/\text{día}$ y un caudal pico $Q_{max} = 13,3 \text{ m}^3/\text{día}$. La red de tuberías funciona por gravedad, con los diámetros y pendientes que se han elegido se puede transportar fácilmente el caudal previsto. Por eso, el problema principal no es la capacidad de conducción, sino evitar atascos y asegurar que el sistema sea fácil de operar en condiciones reales.

La coherencia del dimensionamiento se apoya en dos puntos principales:

- ABR con HRT = 24 h y carga volumétrica resultante moderada, lo que proporciona margen ante variaciones de carga y favorece estabilidad anaerobia
- Humedal HSSF dimensionado con HLR conservadora y HRT poroso superior a 2 días, lo que refuerza la etapa de pulido y reduce la necesidad de tratamientos posteriores

La robustez hidráulica es alta, pero la fiabilidad real está condicionada por el pretratamiento, ya que la presencia de sólidos y arenas es el principal factor que puede degradar el sistema (colmatación del humedal y acumulación acelerada de lodos en el ABR).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1.2 RESULTADOS DE RENDIMIENTO ESPERADO POR ETAPAS

Aunque el trabajo no incluye ensayos experimentales, el rendimiento puede estimarse a partir de las tecnologías y parámetros de diseño adoptados (HRT, HLR, porosidad, operación pasiva). Bajo condiciones normales de operación, el comportamiento esperado es:

- Pretratamiento: reducción parcial de SST sedimentables y flotantes, con impacto limitado sobre DBO pero relevante para la protección del ABR
- ABR: eliminación principal de materia orgánica biodegradable (DBO/DQO) y reducción significativa de SST por sedimentación y digestión
- Humedal HSSF: reducción adicional de SST finos y materia orgánica residual, estabilización del efluente y mejora sanitaria (reducción parcial de patógenos)

El rendimiento real puede verse afectado por factores que no son hidráulicos como la temperatura, variabilidad del influente o presencia de detergentes y desinfectantes. Por ello, el diseño incorpora márgenes (20–30%) y dispositivos de control (bypass, rebose, registros).

6.1.3 ROBUSTEZ, RESILIENCIA Y PUNTOS CRÍTICOS

El resultado principal del proyecto desde la perspectiva de la ingeniería en una situación de emergencia como la de Rafah es la capacidad de seguir funcionando en condiciones adversas más aún que el rendimiento.

- No depende de energía eléctrica para la operación principal
- Admite sobrecargas puntuales por su compartimentación (ABR) y su etapa de pulido (HSSF)
- Permite mantenimiento modular sin detener la línea completa gracias a bypass y accesos.

Puntos críticos identificados:

1. Sólidos no degradables en entrada → riesgo alto de obstrucción y colmatación.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

2. Colmatación progresiva del humedal → degradación lenta, pero segura si no se mantiene.
3. Gestión de lodos → baja frecuencia, pero operación delicada si no existe logística de retirada.

6.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA

6.2.1 RESULTADOS DE CAPEX Y OPEX

La mayor parte de los costes del proyecto son de obra civil (hormigón, excavación, impermeabilización, sustrato), la parte de equipos electromecánicos no representa un coste importante.

- CAPEX moderado por modularidad y materiales estándar.
- OPEX bajo al no requerir consumo energético continuo ni reactivos, y al tener baja producción de lodos.

El coste por persona beneficiaria y el coste por volumen tratado se sitúan en rangos competitivos frente a alternativas centralizadas o mecanizadas en contextos sin suministro estable de energía y repuestos.

El coste real puede aumentar por factores logísticos como transporte de materiales, restricciones de acceso, y variabilidad del precio de recursos. En Rafah la cadena de suministro es un factor muy importante, por lo tanto, el resultado económico es una estimación condicionada por el entorno.

6.3 IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL ESPERADO

6.3.1 REDUCCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE Y MEJORA AMBIENTAL

La principal contribución ambiental es la reducción de vertidos sin tratar y en consecuencia la disminución del impacto sobre suelos y aguas subterráneas. El impacto ambiental se maximiza solo si existe continuidad de operación. Un DEWATS abandonado por falta de

ANÁLISIS DE RESULTADOS

mantenimiento pierde eficacia y puede convertirse en foco de infecciones, aunque el riesgo es menor que en sistemas mecanizados por ausencia de fallos eléctricos o mecánicos.

6.3.2 REUTILIZACIÓN NO POTABLE Y PRESIÓN SOBRE EL RECURSO HÍDRICO

Reutilizar el agua ya tratada para regar zonas verdes (no destinadas a alimentos) o para controlar el polvo es una medida muy importante cuando hay escasez de agua. Además ayuda a que la gente vea el sistema como algo útil, porque convierte el agua que salía como residuo en un recurso aprovechable. La reutilización debe hacerse con criterios de seguridad como evitar contacto humano directo, priorizar usos no alimentarios y establecer puntos de control básico (olor, turbidez, pH si es posible).

6.3.3 IMPACTO SOCIAL Y SANITARIO

El sistema de saneamiento diseñado reduce riesgos epidemiológicos y mejora la habitabilidad. El impacto social depende de la integración comunitaria, ya que sin un uso correcto el sistema se acabará degradando. Por ello, el plan de operación incorpora formación mínima y señalización básica.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este Trabajo Fin de Grado se ha desarrollado el diseño técnico de un sistema DEWATS modular para un entorno humanitario, orientado a cubrir necesidades de saneamiento básico en Rafah bajo restricciones de energía, mantenimiento y cadena de suministro. A lo largo del proyecto se ha definido un marco de hipótesis de diseño, se ha seleccionado una configuración tecnológica coherente con el contexto y se ha hecho un dimensionamiento técnico sustentado en ecuaciones, verificaciones y criterios de operación y mantenimiento. El resultado es una sistema sencillo, resistente y fácil de utilizar, que funciona por gravedad y requiere poca operación. Además, permite reutilizar el agua tratada para usos no potables.

7.1 CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO

Se ha podido diseñar una propuesta de sistema técnicamente viable para una unidad modular de 150 personas, compuesta por pretratamiento/decantación primaria, reactor anaerobio de flujo compartimentado (ABR), humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) y depósito final de regulación y reutilización. Los resultados principales pueden sintetizarse en cuatro conclusiones técnicas

1. El sistema se ha dimensionado para un caudal medio $Q_{med} = 10,2 \text{ m}^3/\text{día}$ y caudal punta $Q_{max} = 13,3 \text{ m}^3/\text{día}$, incorporando márgenes de robustez y elementos de seguridad hidráulica (bypass, reboses y registros).
2. El sistema en serie separa adecuadamente etapas de protección (pretratamiento), degradación anaerobia principal (ABR) y pulido natural (HSSF). Con $HRT_{ABR} = 24 \text{ h}$ se obtiene una carga volumétrica $OLR \approx 0,30 \text{ kg DBO}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{día})$, conservadora para estabilidad anaerobia. En el humedal, el diseño por $HLR = 0,10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$ y un HRT poroso superior a 2 días hace que se obtenga un pulido compatible con reutilización no potable.
3. La ausencia de componentes electromecánicos y la baja producción de lodos convierten al sistema en una solución operable con recursos limitados. El diseño

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

incorpora accesibilidad a unidades, mantenimiento preventivo sencillo y procedimientos de corrección estandarizados, lo que reduce el riesgo de abandono por falta de repuestos o energía.

4. El diseño modular permite replicación por unidades de 150 personas, permitiendo despliegues por fases en función del espacio disponible y de la evolución poblacional. Esta característica es muy importante en Rafah, donde la incertidumbre operacional y logística requiere de soluciones flexibles y no dependientes de una única infraestructura central

7.2 LIMITACIONES ENCONTRADAS

Aun siendo una propuesta técnicamente sólida, existen limitaciones que se deben tener en cuenta:

- Las concentraciones adoptadas (DBO, DQO, SST) se han obtenido a partir de valores típicos y con un enfoque conservador, pero la calidad real del influente podría cambiar (por ejemplo, variaciones por racionamiento de agua, aportes de detergentes o cambios en hábitos). Esto afecta a rendimientos reales y tasas de colmatación.
- El punto más vulnerable del sistema es la entrada de sólidos no biodegradables y arenas. Un uso inadecuado incrementa mantenimiento y acelera colmatación del humedal. Aunque en el plan de operación se incluyen soluciones para ello, el factor humano es muy importante.
- Restricciones de acceso, disponibilidad irregular de materiales o alteraciones del emplazamiento pueden condicionar la construcción y la logística de mantenimiento (especialmente extracción de lodos). En un entorno inestable, la ingeniería debe asumir incertidumbre como parámetro.

Estas limitaciones no invalidan el diseño, pero sí delimitan su alcance. El proyecto consiste en un diseño técnico completo, cuya optimización final exige datos de campo y una fase de puesta en marcha monitorizada.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.3 RECOMENDACIONES Y POSIBLES MEJORAS (TRABAJOS FUTUROS)

De cara a la implementación real o a la continuidad del trabajo, se proponen las siguientes mejoras:

1. Una caracterización real del influente realizando pruebas de muestreo (DBO, DQO, SST, grasas, detergentes, patógenos) permitiría ajustar HRT, compartimentación y superficie de humedal, reduciendo incertidumbre y mejorando los costes
2. Implementar una unidad piloto permitiría registrar la evolución de lodos, estabilidad del ABR, señales tempranas de colmatación y calidad del efluente. Esto proporcionaría datos para mejorar el plan de mantenimiento y dimensionar con mayor precisión el almacenamiento de lodos.
3. Dado que el riesgo principal es el arrastre de sólidos, se podrían integrar mejoras de bajo coste como rejas dobles, trampas de grasas simples o cámaras de desarenado más accesibles. La ingeniería del inicio del sistema suele determinar el rendimiento del resto.
4. Para tener más usos de reutilización, puede incorporarse una desinfección simple (por ejemplo, cloración controlada o exposición UV si hubiera energía) como módulo opcional.
5. Este proyecto se orienta a la reutilización no potable, adicionalmente se podría estudiar el aprovechamiento del biogás (si se añade captura específica).

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACNUR, “Datos sobre campos de refugiados en el mundo”, Agencia de la ONU para los Refugiados, 2023.
- [2] UNICEF, “Water, sanitation, and hygiene insecurity and infectious disease outbreaks among internally displaced populations in Gaza”, *Environmental Health Perspectives*, 2021.
- [3] World Health Organization (WHO), “Health and Environmental Impact of Wastewater Management in Refugee Camps”, Organización Mundial de la Salud, 2022.
- [4] Palestinian Water Authority (PWA), “Impact of rainwater and sewage mixing on Gaza aquifers”, informe interno, 2025.
- [5] ONU-Hábitat, *Manual para la mejora del saneamiento en asentamientos informales*, Naciones Unidas, 2020.
- [6] Eawag, “Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales: DEWATS”, *Water Science and Technology*, 2011.
- [7] BORDA, “Decentralized Wastewater Treatment Solutions”, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.borda.org>
- [8] S. Bhuvaneshwari, R. Gupta y S. Anand, “Decentralized wastewater treatment systems for rural areas in developing countries: Performance evaluation and challenges”, *Journal of Environmental Management*, vol. 289, 2021.
- [9] Sigma Earth, “Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales: Revisión de avances tecnológicos y su impacto en comunidades rurales”, *Sustainability*, 2021.

BIBLIOGRAFÍA

- [10] WaterAid, “A system approach to water, sanitation, and hygiene resilience and sustainability in refugee communities”, *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 2020.
- [11] R. Crites y G. Tchobanoglous, *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw-Hill, 1998.
- [12] R. H. Kadlec y S. Wallace, *Treatment Wetlands*, 2nd ed., CRC Press, 2008.
- [13] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5th ed., McGraw-Hill, 2014.
- [14] Y. Liu *et al.*, “Performance and microbial community analysis of a full-scale anaerobic baffled reactor treating domestic wastewater”, *Journal of Environmental Sciences*, vol. 98, pp. 120–130, 2020.
- [15] C. Mara, *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*, Earthscan, 2004.
- [16] N. Langergraber y R. Muellegger, “Ecological sanitation—a way to solve global sanitation problems?”, *Environment International*, vol. 31, no. 3, pp. 433–444, 2005.
- [17] C. A. Rittmann y P. L. McCarty, *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, 2nd ed., McGraw-Hill, 2021.
- [18] J. Vymazal, “Constructed wetlands for wastewater treatment”, *Water*, vol. 6, no. 3, pp. 329–344, 2014.
- [19] C. Dotro *et al.*, *Wastewater Treatment by Constructed Wetlands*, IWA Publishing, 2017.
- [20] J. Vymazal, “Types of constructed wetlands for wastewater treatment: Their potential for nutrient removal”, *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 5, pp. 612–629, 2010.

BIBLIOGRAFÍA

- [21] J. García, D. P. L. Rousseau, J. Morató *et al.*, “Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: A review”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 40, no. 7, pp. 561–661, 2010.
- [22] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Design Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, EPA/625/R-99/010, 2000.
- [23] A. L. Spuhler *et al.*, “Anaerobic treatment and biogas use in decentralized sanitation systems”, *Water Science and Technology*, vol. 78, no. 5, pp. 953–965, 2018.
- [24] World Health Organization (WHO), *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater*, Vol. II: Wastewater use in agriculture, 2006.
- [25] E. Tilley *et al.*, *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*, 2nd ed., Eawag, 2014.
- [26] D. Singh *et al.*, “Sustainable Decentralized Wastewater Management in India: SARASWATI 2.0”, *Water Practice and Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 1017–1029, 2021.
- [27] BORDA, “Decentralized Wastewater Treatment Systems in the Pacific Region: CEWEPA-Fiji Report”, BORDA Publications, 2020.
- [28] European Commission, “Identifying best available technologies for decentralized wastewater treatment and resource recovery for India (Saraswati 2.0)”, CORDIS, Grant Agreement ID 821427, Aug. 1, 2019–Jul. 31, 2024. [En línea]. Disponible: <https://cordis.europa.eu/project/id/821427>
- [29] W. Astuti, “Community-based sanitation program (Sanimas) as an effort for improving environmental quality in urban slum settlements”, *Journal of Architecture & Environment*, no. 21/E/KPT/2018, 2023. [En línea]. Disponible: <https://iptek.its.ac.id/index.php/joae/article/view/2140>
- [30] R. M. Santoso *et al.*, “Stakeholder evaluation of sustainability in a community-led wastewater treatment facility in Jakarta, Indonesia”, *Environment, Development and*

BIBLIOGRAFÍA

Sustainability, vol. 26, pp. 8497–8523, 2023. [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-023-03056-9>

[31] *Fiji Times*, “Fiji requires about \$8.5 billion to upgrade water and wastewater infrastructure”, Apr. 15, 2024. [En línea]. Disponible: <https://maitv.fiji.com/8-5-billion-plan-to-address-water-woes/>

[32] Green Climate Fund, “Fiji Urban Water Supply and Wastewater Management Project (FP008) – Annual Performance Report”, May 5, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.greenclimate.fund/document/2024-annual-performance-report-fp008-fiji-urban-water-supply-and-wastewater-management>

[33] United Nations ESCAP, “Nature-based Solutions for Wastewater Management in the Mekong River Basin”, *UNESCAP Policy Brief* No. 122, 2023. [En línea]. Disponible: https://www.unescap.org/sites/default/d8files/2023-05/ESCAP-Policy-Brief-Nature-Based-Solutions_Wastewater-Mekong.pdf

[34] Japan International Cooperation Agency (JICA), “Project for Improvement of Water Environment in Mekong Delta”, JICA Vietnam Office, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.jica.go.jp/Resource/vietnam/english/activities/activity22.html>

[35] BORDA, “Decentralized Wastewater Treatment for Hospitals: Case Studies from India”, BORDA, Technical Paper, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.borda.org/publications/>

[36] S. Sivaramakrishnan, S. Chandrasekaran y S. Nagarajan, “Performance Evaluation of DEWATS at Chengalpattu Government Hospital, Tamil Nadu, India”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, no. 8, pp. 7861–7872, 2022. DOI: 10.1007/s13762-021-03583-7.

[37] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), “SANIMAS Programme: Community-Based Sanitation in Indonesia”, 2017.

BIBLIOGRAFÍA

- [38] CIATEJ, “Implementación de humedales artificiales para tratamiento de aguas grises en zonas rurales de México”, Informe Técnico, 2022.
- [39] Eawag/SANDEC, “DEWATS: Decentralized Wastewater Treatment Systems and Sanitation in Developing Countries”, Eawag Report, 2011.
- [40] UN-Habitat, *Sustainable Sanitation in Cities: A Framework for Action*, 2008.
- [41] Ministry of Housing and Urban Affairs, Government of India, “Decentralized Wastewater Management in India: DEWATS Implementation in Healthcare Facilities”, Government Report, 2018.
- [42] BORDA South Asia, “Decentralized Wastewater Treatment Solutions for Hospitals: The Case of Chengalpattu General Hospital”, BORDA Technical Paper, 2019.
- [43] Japan International Cooperation Agency (JICA), “Integrated Community-Based Water Environment Improvement Project in the Mekong Delta”, Report, 2017.
- [44] N. T. Trinh y T. L. Nguyen, “Constructed Floating Wetlands in the Mekong Delta: Design, performance, and challenges”, *Environmental Technology & Innovation*, vol. 15, art. 100413, 2019.
- [45] WHO Regional Office for South-East Asia, “Sustainable Sanitation for Public Health: Approaches in the Mekong Region”, WHO Report, 2020.
- [46] A. von Muench *et al.*, *Technology Review of DEWATS (Decentralised Wastewater Treatment Systems)*, GIZ, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.susana.org>
- [47] A. Gutterer, L. Sasse, M. Panzerbieter y T. Reckerzügl, *Decentralised Wastewater Treatment Systems (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*, Bremen: BORDA, 2009.
- [48] UN-Habitat, *Sustainable Sanitation for All: Experiences, Challenges and Innovations*, 2016. [En línea]. Disponible: <https://unhabitat.org> (consultado: 15-ene-2026).

BIBLIOGRAFÍA

- [49] WaterAid, “Technology Brief: Anaerobic Baffled Reactor”, WaterAid UK, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.wateraid.org> (consultado: 15-ene-2026).
- [50] World Health Organization (WHO), *Wastewater Reuse in Agriculture*, WHO Technical Report Series 778, Geneva, 1989.
- [51] A. Jiménez y A. Pérez-Foguet, “Water, Sanitation and Hygiene in Humanitarian Contexts”, *Water International*, vol. 35, no. 6, pp. 696–712, 2010. DOI: 10.1080/02508060.2010.514094.
- [52] Médecins Sans Frontières (MSF), *Water and Sanitation in Humanitarian Action*, Internal Technical Report, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.msf.org> (consultado: 15-ene-2026).
- [53] C. Lüthi *et al.*, “The Urban Water and Sanitation Challenge in Low-Income Settlements”, *Environment and Urbanization*, vol. 23, no. 1, pp. 123–138, 2011. DOI: 10.1177/0956247811398602.
- [54] Oxfam International, *Emergency Sanitation Guidelines for Humanitarian Crises*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.oxfam.org> (consultado: 15-ene-2026).
- [55] BORDA, “Decentralised Wastewater Treatment Systems (DEWATS) - Technical Overview”, Bremen Overseas Research and Development Association, 2021.
- [56] D. Spuhler, A. Scheidegger y M. Maurer, “Decentralized Wastewater Management: A Modular Approach Integrating Technology and Governance”, *Journal of Environmental Management*, vol. 252, art. 109598, 2020.
- [57] S. Trémolet, P. Kolsky y R. Scott, “Economic Evidence on Sanitation Solutions in Humanitarian Settings”, Sanitation Learning Hub, Institute of Development Studies, 2020.
- [58] World Health Organization (WHO), *Guidelines on Sanitation and Health*, Geneva: WHO Press, 2018.

BIBLIOGRAFÍA

- [59] UN-Habitat, *Water and Sanitation for Cities in Crisis*, Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2021.
- [60] R. Gensch, U. Arnold, S. Reuter y F. Klingel, *Sustainable Sanitation for Emergencies and Reconstruction*, GIZ y SuSanA, 2020.
- [61] Reuters, “What is Gaza’s Al-Mawasi region struck by Israel’s military?,” Sep. 2024.

Bibliografía ordenada por autor:

- [1] ACNUR, “Datos sobre campos de refugiados en el mundo”, Agencia de la ONU para los Refugiados, 2023.
- [2] W. Astuti, “Community-based sanitation program (Sanimas) as an effort for improving environmental quality in urban slum settlements”, *Journal of Architecture & Environment*, no. 21/E/KPT/2018, 2023. [En línea]. Disponible: <https://iptek.its.ac.id/index.php/joae/article/view/2140>
- [3] S. Bhuvaneshwari, R. Gupta y S. Anand, “Decentralized wastewater treatment systems for rural areas in developing countries: Performance evaluation and challenges”, *Journal of Environmental Management*, vol. 289, 2021.
- [4] BORDA, “Decentralized Wastewater Treatment Solutions”, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.borda.org>
- [5] BORDA, “Decentralized Wastewater Treatment Systems in the Pacific Region: CEWEPA-Fiji Report”, BORDA Publications, 2020.
- [6] BORDA, “Decentralized Wastewater Treatment for Hospitals: Case Studies from India”, BORDA, Technical Paper, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.borda.org/publications/>
- [7] BORDA, “Decentralised Wastewater Treatment Systems (DEWATS) - Technical Overview”, Bremen Overseas Research and Development Association, 2021.
- [8] BORDA South Asia, “Decentralized Wastewater Treatment Solutions for Hospitals: The Case of Chengalpattu General Hospital”, BORDA Technical Paper, 2019.
- [9] CIATEJ, “Implementación de humedales artificiales para tratamiento de aguas grises en zonas rurales de México”, Informe Técnico, 2022.

BIBLIOGRAFÍA

- [10] R. Crites y G. Tchobanoglous, *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw-Hill, 1998.
- [11] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), “SANIMAS Programme: Community-Based Sanitation in Indonesia”, 2017.
- [12] C. Dotro et al., *Wastewater Treatment by Constructed Wetlands*, IWA Publishing, 2017.
- [13] Eawag, “Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales: DEWATS”, *Water Science and Technology*, 2011.
- [14] Eawag/SANDEC, “DEWATS: Decentralized Wastewater Treatment Systems and Sanitation in Developing Countries”, Eawag Report, 2011.
- [15] European Commission, “Identifying best available technologies for decentralized wastewater treatment and resource recovery for India (Saraswati 2.0)”, CORDIS, Grant Agreement ID 821427, Aug. 1, 2019–Jul. 31, 2024. [En línea]. Disponible: <https://cordis.europa.eu/project/id/821427>
- [16] Fiji Times, “Fiji requires about \$8.5 billion to upgrade water and wastewater infrastructure”, Apr. 15, 2024. [En línea]. Disponible: <https://maityfiji.com/8-5-billion-plan-to-address-water-woes/>
- [17] J. García, D. P. L. Rousseau, J. Morató et al., “Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: A review”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 40, no. 7, pp. 561–661, 2010.
- [18] R. Gensch, U. Arnold, S. Reuter y F. Klingel, *Sustainable Sanitation for Emergencies and Reconstruction*, GIZ y SuSanA, 2020.
- [19] Green Climate Fund, “Fiji Urban Water Supply and Wastewater Management Project (FP008) – Annual Performance Report”, May 5, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.greenclimate.fund/document/2024-annual-performance-report-fp008-fiji-urban-water-supply-and-wastewater-management>

BIBLIOGRAFÍA

- [20] A. Gutterer, L. Sasse, M. Panzerbieter y T. Reckerzügl, *Decentralised Wastewater Treatment Systems (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*, Bremen: BORDA, 2009.
- [21] Japan International Cooperation Agency (JICA), “Integrated Community-Based Water Environment Improvement Project in the Mekong Delta”, Report, 2017.
- [22] Japan International Cooperation Agency (JICA), “Project for Improvement of Water Environment in Mekong Delta”, JICA Vietnam Office, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.jica.go.jp/Resource/vietnam/english/activities/activity22.html>
- [23] A. Jiménez y A. Pérez-Foguet, “Water, Sanitation and Hygiene in Humanitarian Contexts”, *Water International*, vol. 35, no. 6, pp. 696–712, 2010. DOI: 10.1080/02508060.2010.514094.
- [24] R. H. Kadlec y S. Wallace, *Treatment Wetlands*, 2nd ed., CRC Press, 2008.
- [25] N. Langergraber y R. Muellegger, “Ecological sanitation—a way to solve global sanitation problems?”, *Environment International*, vol. 31, no. 3, pp. 433–444, 2005.
- [26] Y. Liu et al., “Performance and microbial community analysis of a full-scale anaerobic baffled reactor treating domestic wastewater”, *Journal of Environmental Sciences*, vol. 98, pp. 120–130, 2020.
- [27] C. Lüthi et al., “The Urban Water and Sanitation Challenge in Low-Income Settlements”, *Environment and Urbanization*, vol. 23, no. 1, pp. 123–138, 2011. DOI: 10.1177/0956247811398602.
- [28] C. Mara, *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*, Earthscan, 2004.
- [29] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5th ed., McGraw-Hill, 2014.

BIBLIOGRAFÍA

- [30] Médecins Sans Frontières (MSF), *Water and Sanitation in Humanitarian Action*, Internal Technical Report, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.msf.org> (consultado: 15-ene-2026).
- [31] Ministry of Housing and Urban Affairs, Government of India, “Decentralized Wastewater Management in India: DEWATS Implementation in Healthcare Facilities”, Government Report, 2018.
- [32] ONU-Hábitat, *Manual para la mejora del saneamiento en asentamientos informales*, Naciones Unidas, 2020.
- [33] Oxfam International, *Emergency Sanitation Guidelines for Humanitarian Crises*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.oxfam.org> (consultado: 15-ene-2026).
- [34] Palestinian Water Authority (PWA), “Impact of rainwater and sewage mixing on Gaza aquifers”, informe interno, 2025.
- [35] Reuters, “What is Gaza’s Al-Mawasi region struck by Israel’s military?”, Sep. 2024.
- [36] C. A. Rittmann y P. L. McCarty, *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, 2nd ed., McGraw-Hill, 2021.
- [37] R. M. Santoso et al., “Stakeholder evaluation of sustainability in a community-led wastewater treatment facility in Jakarta, Indonesia”, *Environment, Development and Sustainability*, vol. 26, pp. 8497–8523, 2023. [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-023-03056-9>
- [38] Sigma Earth, “Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales: Revisión de avances tecnológicos y su impacto en comunidades rurales”, *Sustainability*, 2021.
- [39] D. Singh et al., “Sustainable Decentralized Wastewater Management in India: SARASWATI 2.0”, *Water Practice and Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 1017–1029, 2021.

BIBLIOGRAFÍA

- [40] S. Sivaramakrishnan, S. Chandrasekaran y S. Nagarajan, “Performance Evaluation of DEWATS at Chengalpattu Government Hospital, Tamil Nadu, India”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, no. 8, pp. 7861–7872, 2022. DOI: 10.1007/s13762-021-03583-7.
- [41] A. L. Spuhler et al., “Anaerobic treatment and biogas use in decentralized sanitation systems”, *Water Science and Technology*, vol. 78, no. 5, pp. 953–965, 2018.
- [42] D. Spuhler, A. Scheidegger y M. Maurer, “Decentralized Wastewater Management: A Modular Approach Integrating Technology and Governance”, *Journal of Environmental Management*, vol. 252, art. 109598, 2020.
- [43] E. Tilley et al., *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*, 2nd ed., Eawag, 2014.
- [44] S. Trémolet, P. Kolsky y R. Scott, “Economic Evidence on Sanitation Solutions in Humanitarian Settings”, Sanitation Learning Hub, Institute of Development Studies, 2020.
- [45] N. T. Trinh y T. L. Nguyen, “Constructed Floating Wetlands in the Mekong Delta: Design, performance, and challenges”, *Environmental Technology & Innovation*, vol. 15, art. 100413, 2019.
- [46] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Design Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, EPA/625/R-99/010, 2000.
- [47] UN-Habitat, *Sustainable Sanitation in Cities: A Framework for Action*, 2008.
- [48] UN-Habitat, *Sustainable Sanitation for All: Experiences, Challenges and Innovations*, 2016. [En línea]. Disponible: <https://unhabitat.org> (consultado: 15-ene-2026).
- [49] UN-Habitat, *Water and Sanitation for Cities in Crisis*, Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2021.

BIBLIOGRAFÍA

- [50] UNICEF, “Water, sanitation, and hygiene insecurity and infectious disease outbreaks among internally displaced populations in Gaza”, *Environmental Health Perspectives*, 2021.
- [51] United Nations ESCAP, “Nature-based Solutions for Wastewater Management in the Mekong River Basin”, UNESCAP Policy Brief No. 122, 2023. [En línea]. Disponible: https://www.unescap.org/sites/default/d8files/2023-05/ESCAP-Policy-Brief-Nature-Based-Solutions_Wastewater-Mekong.pdf
- [52] A. von Muench et al., *Technology Review of DEWATS (Decentralised Wastewater Treatment Systems)*, GIZ, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.susana.org>
- [53] J. Vymazal, “Types of constructed wetlands for wastewater treatment: Their potential for nutrient removal”, *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 5, pp. 612–629, 2010.
- [54] J. Vymazal, “Constructed wetlands for wastewater treatment”, *Water*, vol. 6, no. 3, pp. 329–344, 2014.
- [55] WaterAid, “A system approach to water, sanitation, and hygiene resilience and sustainability in refugee communities”, *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 2020.
- [56] WaterAid, “Technology Brief: Anaerobic Baffled Reactor”, WaterAid UK, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.wateraid.org> (consultado: 15-ene-2026).
- [57] WHO Regional Office for South-East Asia, “Sustainable Sanitation for Public Health: Approaches in the Mekong Region”, WHO Report, 2020.
- [58] World Health Organization (WHO), *Wastewater Reuse in Agriculture*, WHO Technical Report Series 778, Geneva, 1989.
- [59] World Health Organization (WHO), *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, Vol. II: Wastewater use in agriculture*, 2006.

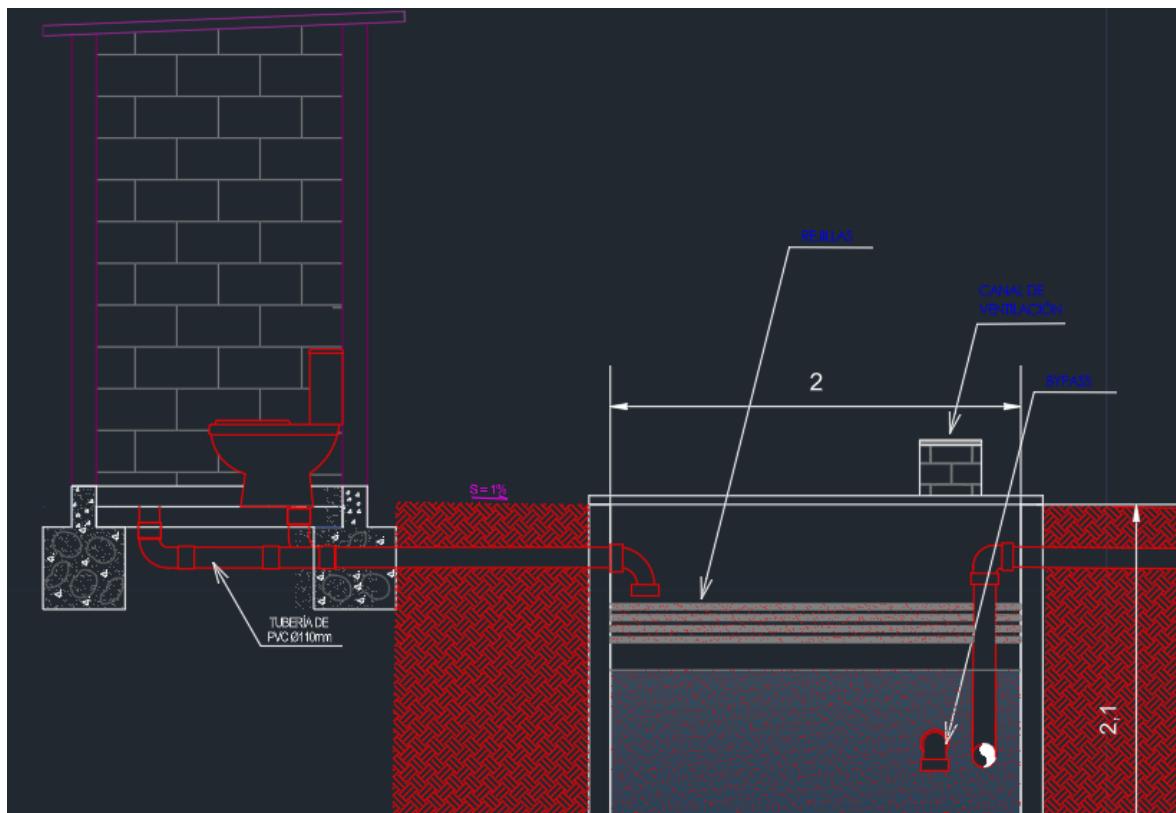
BIBLIOGRAFÍA

[60] World Health Organization (WHO), *Guidelines on Sanitation and Health*, Geneva: WHO Press, 2018.

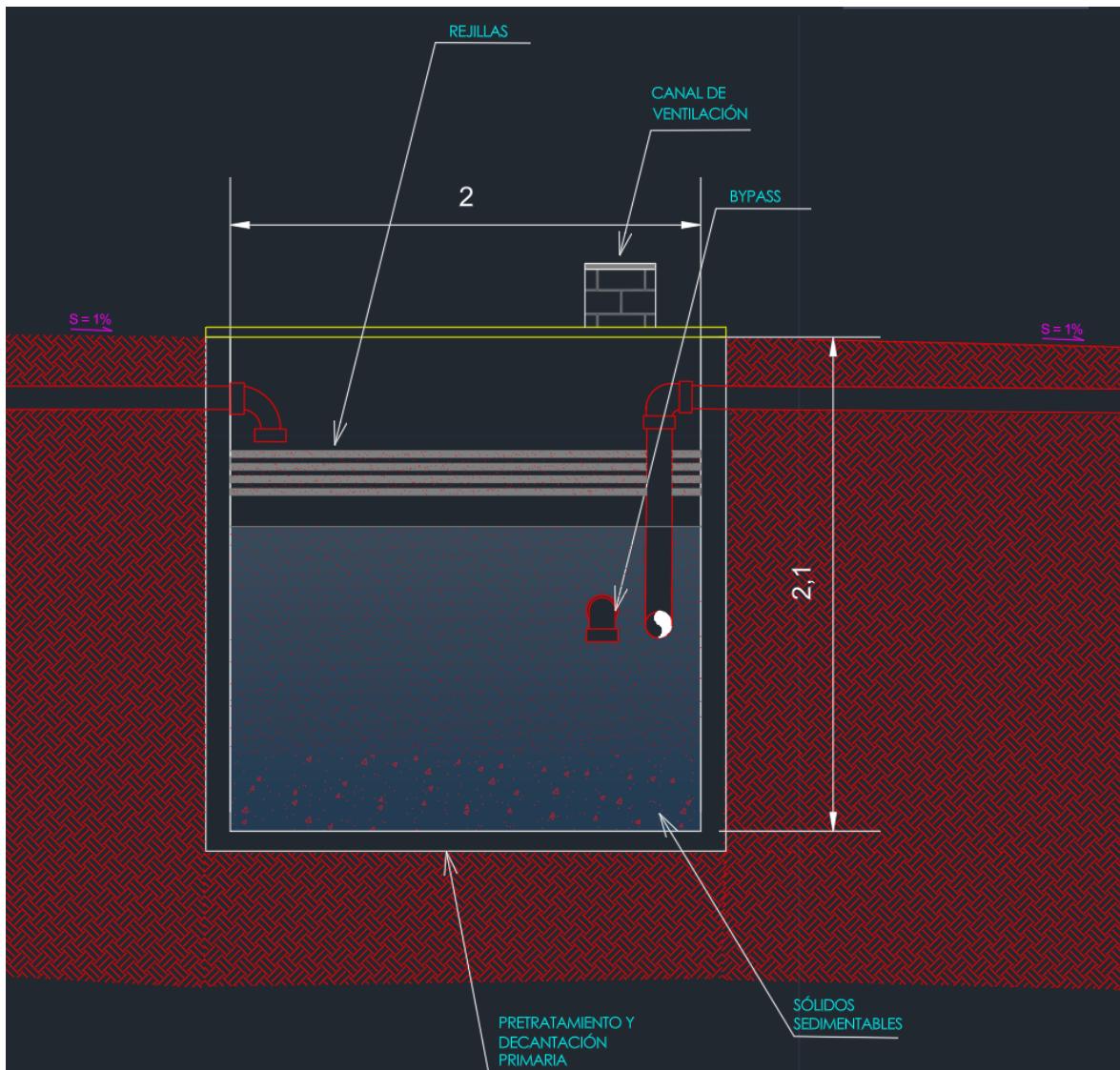
[61] World Health Organization (WHO), “Health and Environmental Impact of Wastewater Management in Refugee Camps”, Organización Mundial de la Salud, 2022.

ANEXO A PLANOS DEL SISTEMA

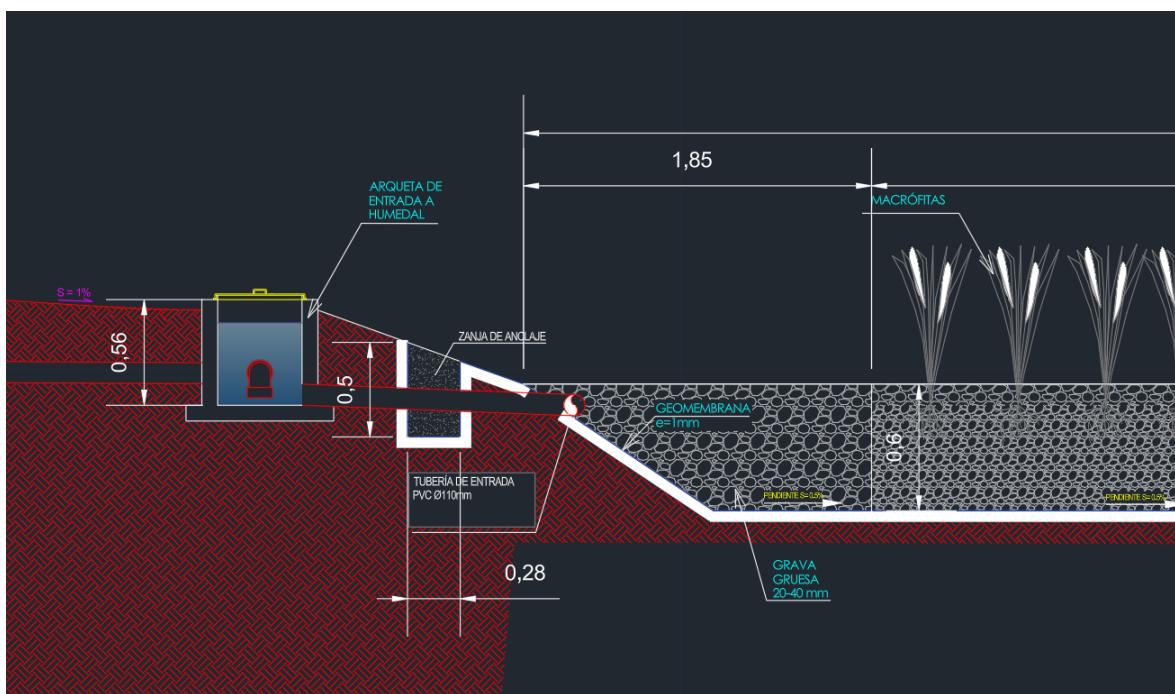
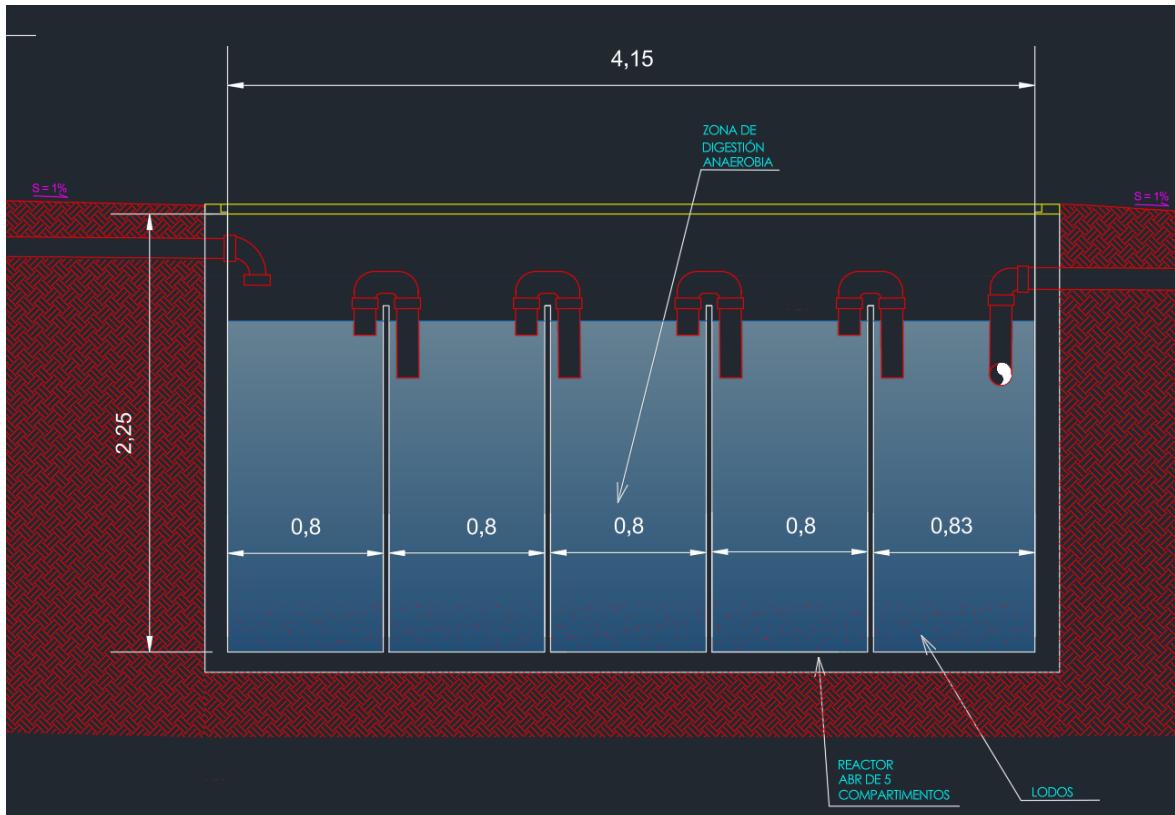
ANEXO A PLANOS DEL SISTEMA



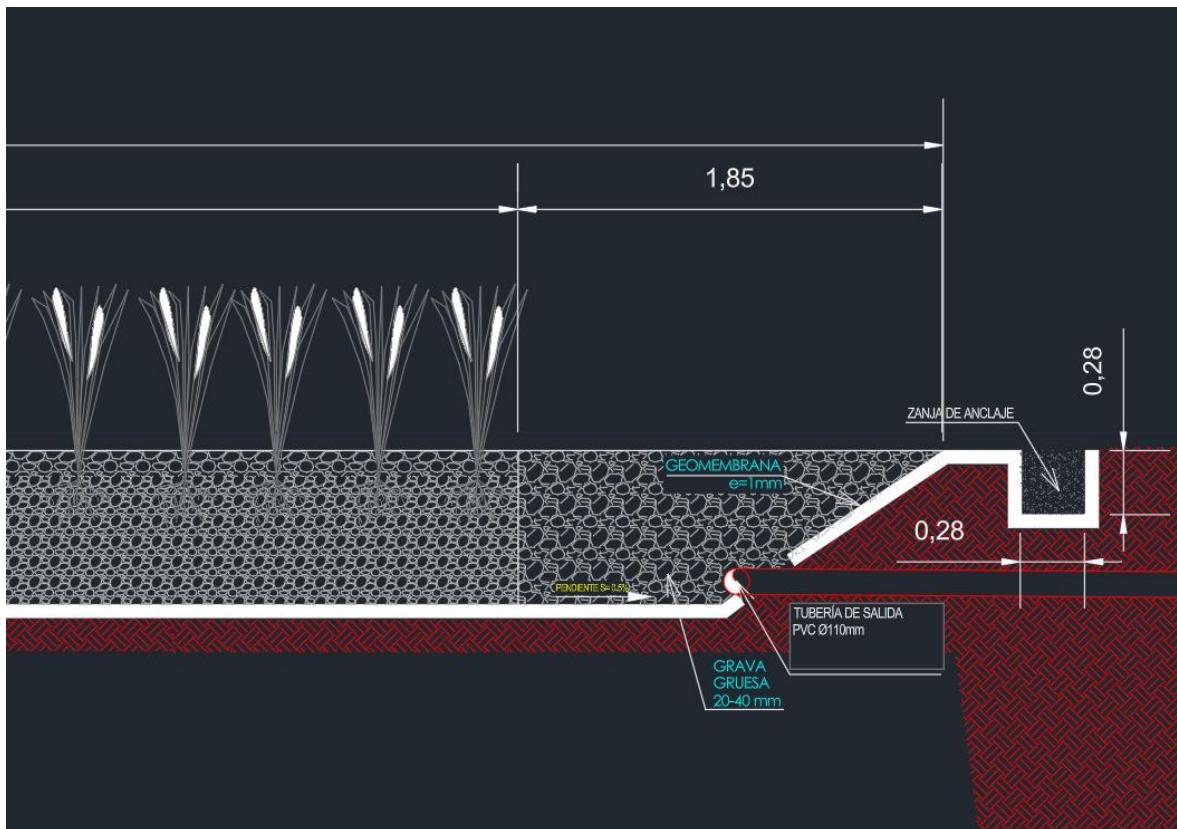
ANEXO A PLANOS DEL SISTEMA



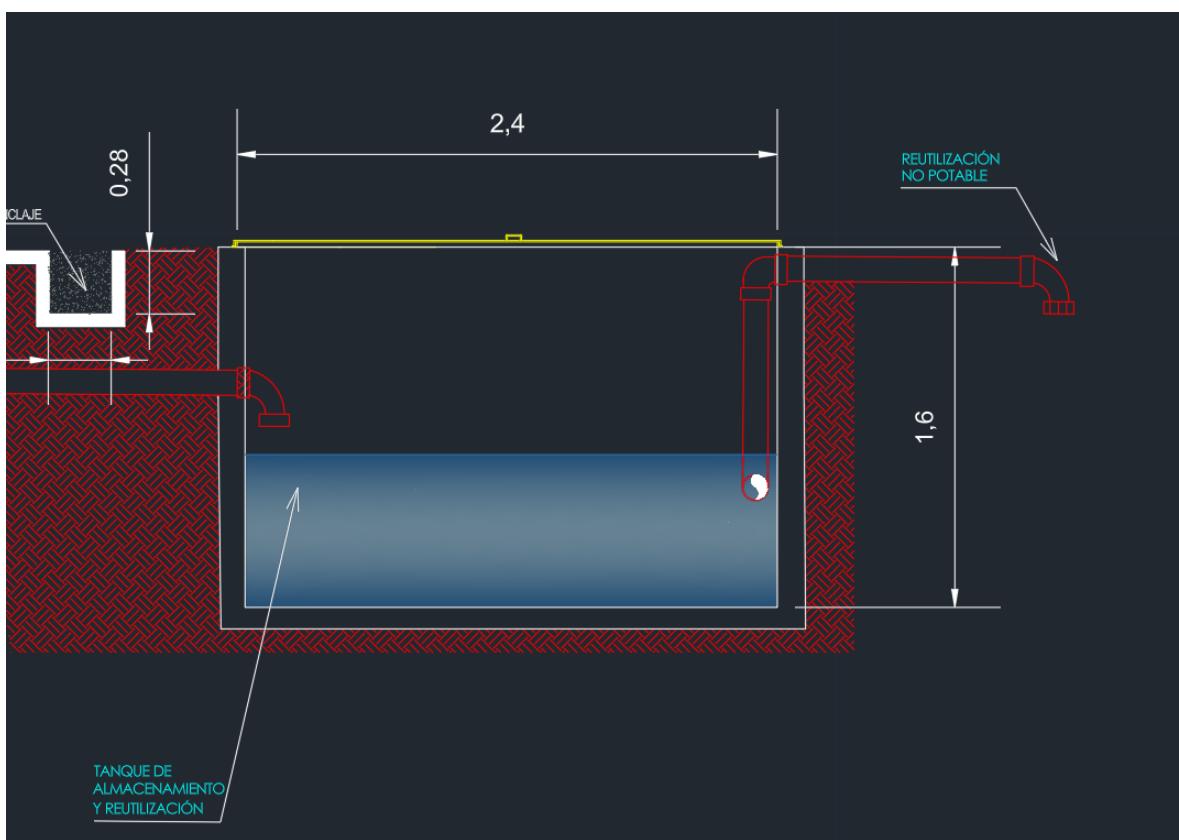
ANEXO A PLANOS DEL SISTEMA



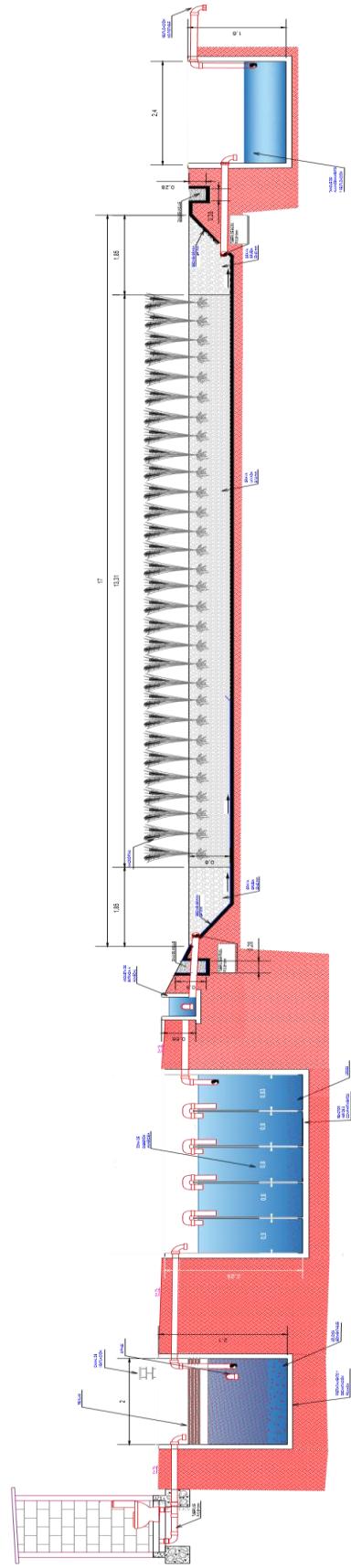
ANEXO A PLANOS DEL SISTEMA



ANEXO A PLANOS DEL SISTEMA



ANEXO A PLANOS DEL SISTEMA



ANEXO B CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES

ANEXO B CÁLCULOS DE

DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES

B.1 DATOS DE PARTIDA Y CONVERSIONES

El dimensionamiento parte de las hipótesis numéricas del Cap. 5.1 (Tabla 16).

Datos base:

- Población de diseño: $N = 150$ pers
- Dotación: $q = 80 \text{ L/pers/día}$
- Fracción a aguas residuales: $f = 0,85$
- Factor de pico: $K_p = 1,3$

Caudales:

$$Q_{med} = \frac{N \cdot q \cdot f}{1000} = \frac{150 \cdot 80 \cdot 0,85}{1000} = 10,2 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q_{max} = K_p \cdot Q_{med} = 1,3 \cdot 10,2 = 13,3 \text{ m}^3/\text{día}$$

Conversión a unidades hidráulicas:

$$Q_{max} = \frac{13,3}{86400} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 0,154 \text{ L/s}$$

Calidad del afluente (adoptada):

$$C_{DBO} = 300 \text{ mg/L} = 0,300 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{DQO} = 600 \text{ mg/L} = 0,600 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{SSR} = 250 \text{ mg/L} = 0,250 \text{ kg/m}^3$$

ANEXO B CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES

Cargas diarias:

$$L_{DBO} = Q_{med} \cdot C_{DBO} = 10,2 \cdot 0,300 = 3,06 \text{ kg/día}$$

$$L_{DQO} = 10,2 \cdot 0,600 = 6,12 \text{ kg/día}$$

$$L_{SST} = 10,2 \cdot 0,250 = 2,55 \text{ kg/día}$$

B.2 PRETRATAMIENTO Y DECANTACIÓN PRIMARIA

PARÁMETRO DE DISEÑO

Se adopta un tiempo de retención hidráulica:

$$HRT_1 = 8 \text{ h} = 0,333 \text{ días}$$

VOLUMEN ÚTIL Y VOLUMEN DE PROYECTO

$$V_1 = Q_{med} \cdot HRT_1 = 10,2 \cdot 0,333 = 3,40 \text{ m}^3$$

Se incorpora holgura del 25% (acumulación de sólidos + margen operativo):

$$V_{1,proj} = 1,25 \cdot V_1 = 4,25 \text{ m}^3$$

CIERRE GEOMÉTRICO DEFINITIVO

Se elige una geometría rectangular simple, ejecutable y con acceso de mantenimiento:

Dimensiones internas útiles: $L \times B \times h_u = 2,00 \times 1,20 \times 1,80 \text{ m}$

Volumen útil real: $V = 2,00 \cdot 1,20 \cdot 1,80 = 4,32 \text{ m}^3 (\geq V_{1,proj})$

Altura libre: 0,30 m → altura total $\approx 2,10 \text{ m}$

Elementos funcionales definidos (conceptuales):

- Cesta/rejilla de sólidos a la entrada (retención de gruesos).
- Deflectores anti-flotantes y calma hidráulica.

ANEXO B CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES

- Registro superior (mantenimiento) y bypass de emergencia.

B.3 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO COMPARTIMENTADO (ABR)

PARÁMETROS DE DISEÑO

- Tiempo de retención adoptado:

$$HRT_{ABR} = 24 \text{ h} = 1 \text{ día}$$

- Compartimentos: $n = 5$

VOLUMEN ÚTIL (HRT)

$$V_{ABR,util} = Q_{med} \cdot HRT_{ABR} = 10,2 \cdot 1 = 10,2 \text{ m}^3$$

VERIFICACIÓN POR CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA (OLR)

$$OLR = \frac{L_{DBO}}{V_{ABR,util}} = \frac{3,06}{10,2} = 0,30 \text{ kg } \text{DBO}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{día})$$

El OLR es conservador, lo que favorece estabilidad del proceso y tolerancia a variaciones hidráulicas/carga.

VOLUMEN TOTAL DE PROYECTO (HOLGURA + LODOS)

Se adopta un 30% adicional para holgura hidráulica y almacenamiento de lodos:

$$V_{ABR,proj} = 1,30 \cdot V_{ABR,util} = 1,30 \cdot 10,2 = 13,26 \text{ m}^3$$

CIERRE GEOMÉTRICO DEFINITIVO

Se elige una geometría compacta, sencilla con 5 compartimentos:

- Dimensiones internas útiles: $L \times B \times h_u = 4,15 \times 1,60 \times 2,00 \text{ m}$
- Volumen útil real:

ANEXO B CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES

$$V = 4,15 \cdot 1,60 \cdot 2,00 = 13,28 \text{ m}^3 \approx V_{ABR,proj}$$

- Altura libre: 0,30 m → altura total $\approx 2,30$ m
- Longitud libre por compartimento (aprox.): $\sim 0,75$ m (ajustada por tabiques)

Detalles funcionales mínimos:

- Tabiques tipo bafle que fuerzan flujo ascendente por compartimento
- Registros superiores (uno por compartimento recomendado)
- Ventilación/escape de gas (seguridad y control de olores)
- Puntos de inspección y extracción de lodos (operación periódica)

VERIFICACIÓN HIDRÁULICA RÁPIDA (VELOCIDAD ASCENSIONAL)

Se evalúa con Q_{max} y el área en planta de un compartimento.

- $Q_{max} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
- longitud por compartimento $\approx 0,8$ m
- Área aproximada por cámara: $A_{cam} \approx 0,8 \cdot 1,60 = 1,28 \text{ m}^2$

$$v_{up} = \frac{Q_{max}}{A_{cam}} = \frac{1,54 \cdot 10^{-4}}{1,28} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Se obtiene un valor bajo que favorece retención de sólidos y reduce arrastre de biomasa.

B.4 HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (HSSF)

PARÁMETROS DE DISEÑO

- Carga hidráulica adoptada:

$$HLR = 0,10 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$$

- Profundidad del lecho:

ANEXO B CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES

$$h = 0,60 \text{ m}$$

- Porosidad efectiva adoptada (medio granular):

$$n_e = 0,35$$

- Pendiente longitudinal del fondo: 0,5%

ÁREA REQUERIDA

$$A_{base} = \frac{Q_{med}}{HLR} = \frac{10,2}{0,10} = 102 \text{ m}^2$$

Margen del 20% (robustez frente a colmatación parcial y variabilidad):

$$A_{proj} = 1,20 \cdot 102 = 122,4 \text{ m}^2$$

CIERRE GEOMÉTRICO DEFINITIVO

Se fija una geometría cercana al objetivo

- Dimensiones: $L \times B = 21,0 \times 6,0 \text{ m}$
- Área real: $A = 126 \text{ m}^2 (\geq A_{proj})$
- Profundidad del lecho: $h = 0,60 \text{ m}$

VERIFICACIÓN POR HRT EN MEDIO POROSO

$$HRT_{HSSF} = \frac{A \cdot h \cdot n_e}{Q_{med}} = \frac{126 \cdot 0,60 \cdot 0,35}{10,2} = 2,59 \text{ días}$$

Un HRT poroso $\approx 2,6$ días es coherente con un pulido pasivo tras etapa anaerobia.

ESPECIFICACIÓN CONCEPTUAL DE CAPAS Y COLECTORES

- Impermeabilización: geomembrana (evita infiltraciones no controladas).
- Arqueta de entrada a humedal 0,45x0,56

ANEXO B CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES

- Zona de entrada: grava gruesa 20–40 mm ($\approx 1,85$ m de longitud) para disipar energía y distribuir flujo.
- Zanja de anclaje: Se prevé la fijación de la geomembrana mediante zanja de anclaje en coronación, su objetivo es evitar deslizamientos de la lámina, garantizar la estanquidad en bordes y proteger frente a tracciones durante operación y mantenimiento.
- Lecho principal: grava lavada 8–16 mm (para conductividad y soporte biológico).
- Zona de salida: grava gruesa + dren colector.
- Salida regulable: tubo vertical tipo *standpipe* para ajustar nivel y facilitar vaciado.

B.5 DEPÓSITO FINAL / PUNTO DE REUTILIZACIÓN

PARÁMETRO DE REGULACIÓN

$$t_{reg} = 12 \text{ h} = 0,5 \text{ días}$$

VOLUMEN

$$V_{reg} = Q_{med} \cdot t_{reg} = 10,2 \cdot 0,5 = 5,1 \text{ m}^3$$

Se añade holgura del 20%:

$$V_{proj} = 1,20 \cdot 5,1 = 6,12 \text{ m}^3$$

CIERRE GEOMÉTRICO DEFINITIVO

- Dimensiones internas útiles: $L \times B \times h_u = 2,40 \times 2,00 \times 1,30 \text{ m}$
- Volumen útil real:

$$V = 2,40 \cdot 2,00 \cdot 1,30 = 6,24 \text{ m}^3 (\geq V_{proj})$$

- Altura libre: 0,30 m → altura total $\approx 1,60 \text{ m}$

Elementos definidos:

ANEXO B CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES

- Rebose de seguridad.
- Punto de muestreo (calidad).
- Toma de reutilización (iego no alimentario / control de polvo).

B.6 INTERCONEXIONES HIDRÁULICAS (TUBERÍAS, PENDIENTES Y VERIFICACIÓN RÁPIDA)

CRITERIO DE SELECCIÓN

En redes con caudales pequeños, el diámetro se selecciona más por operabilidad (sólidos, mantenimiento, riesgo de atascos) que por capacidad. Se eligen:

- PVC DN110 como troncal por gravedad.
- Pendiente mínima recomendada: $S \geq 1\%$ (si el trazado lo permite, 2% mejora autolimpieza).

VERIFICACIÓN DE CAPACIDAD (MANNING)

Se estima la capacidad a sección llena (caso conservador de máxima capacidad en gravedad) mediante la ecuación de Manning para flujo uniforme:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

Para PVC se toma $n = 0,011$. Con diámetro interior aproximado $D \approx 0,104$ m y $S = 1\%$

- Q : caudal (m^3/s)
- n : coeficiente de rugosidad de Manning (PVC: $n = 0,011$)
- A : área mojada (m^2)
- R : radio hidráulico $R = A/P(\text{m})$
- S : pendiente hidráulica (m/m)

Área mojada:

ANEXO B CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIONES

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0,104)^2}{4} = 0,008495 \text{ m}^2$$

Para tubería llena, el radio hidráulico es:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{\pi D^2 / 4}{\pi D} = \frac{D}{4} = \frac{0,104}{4} = 0,026 \text{ m}$$

$$R^{2/3} = (0,026)^{2/3} = 0,08776; S^{1/2} = \sqrt{0,01} = 0,10$$

Caudal de capacidad:

$$Q_{cap} = \frac{1}{0,011} \cdot 0,008495 \cdot 0,08776 \cdot 0,10 = 0,00678 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{cap} = 0,00678 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1000 = 6,78 \text{ L/s}$$

$Q_{max} = 0,154 \text{ L/s}$ por lo que la capacidad hidráulica es muy superior al caudal máximo

OBSERVACIÓN OPERATIVA (VELOCIDAD BAJA)

Con caudales tan bajos, la velocidad media en DN110 es reducida, por lo que se incorporan:

- pretratamiento eficaz,
- registros/arqueta en cambios de dirección,
- posibilidad de limpieza/flushing,
- pendientes lo más altas posibles dentro del emplazamiento.

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

C.1 OBJETO Y ALCANCE DEL ANEXO

Este anexo desarrolla la trazabilidad completa del CAPEX del sistema DEWATS propuesto (unidad modular para N = 150 personas), detallando:

- Mediciones (cantidades) por unidad de obra
- Precios unitarios (€/unidad) referenciados a bases de precios y descompuestos
- Criterios de cálculo y coeficientes de imprevistos
- Presupuesto por componentes

Los precios unitarios se han obtenido de bases de referencia tipo Generador de Precios (CYPE).

C.2 DATOS DE ENTRADA USADOS PARA MEDICIONES

Se adoptan los valores de hipótesis/dimensionamiento descritos en el capítulo 5.

- Caudal medio: $Q_{med} = 10,2 \text{ m}^3/\text{día}$
- Caudal máximo: $Q_{max} = 13,3 \text{ m}^3/\text{día}$ (factor de pico $K_p = 1,3$)
- ABR: HRT = 24 h, volumen total $V_{ABR,tot} = 13,26 \text{ m}^3$, n = 5 compartimentos
- Humedal HSSF: $A_{tot} = 122,4 \text{ m}^2$, $h = 0,60 \text{ m}$

C.3 PRECIOS UNITARIOS ADOPTADOS

Los precios unitarios empleados en el CAPEX se referencian a partidas tipo del Generador de Precios (CYPE):

- Geomembrana HDPE 1 mm: 9,53 €/m²
- Tubería PVC Ø110: 14,65 €/m

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

- Excavación mecánica de zanjas/ pozos: 26,60 €/m³
- Encachado/gravilla extendida (base granular tipo): 11,56 €/m³
- Acero B500S (ferralla, por kg): 2,06 €/kg
- Encofrado de muro (montaje/desmontaje, por m² de cara encofrada): 19,01 €/m²

C.4 CÁLCULO DEL CAPEX POR COMPONENTES

Criterio de imprevistos: se aplica un porcentaje reducido ($\approx 2-10\%$) porque los precios unitarios ya incluyen en muchos casos maquinaria y mano de obra.

PREFILTRO + DECANTACIÓN PRIMARIA + POZO DE LODOS

- Excavación: 7,0 m³
- Hormigón: 1,7 m³
- Ferralla: 25 kg
- Encofrado: 8,0 m²
- PVC Ø110: 4,0 m
- Mortero impermeable interior: 12 m²
- Varios (rejilla/cesto + tapas)

Partida	Medición	Ud	Precio unitario (€)	Importe (€)
Excavación mecánica	7	m ³	26,6	186,2
Hormigón HA-25	1,7	m ³	134,79	229,14
Ferralla B500S	25	kg	2,06	51,5
Encofrado muro	8	m ²	19,01	152,08
Tubería PVC Ø110	4	m	14,65	58,6
Mortero impermeable interior	12	m ²	4	48

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

Rejilla/cesto desbaste	1	ud	30	30
Tapas/registro	2	ud	20	40
Subtotal directo				795,52
Imprevistos (10%)				79,55
TOTAL				874,07 ≈ 874 €

Tabla 20 Pretratamiento CAPEX

Justificación técnica de mediciones: el prefiltro/decantación se dimensiona para asegurar retención de sólidos y protección hidráulica del ABR; la cuantía de obra civil se diseña deliberadamente compacta (unidad modular) para minimizar materiales y mantenimiento.

REACTOR ANAEROBIO COMPARTIMENTADO ABR

- Volumen total: $V_{ABR,tot} = 13,26 \text{ m}^3$, $n = 5$ compartimentos
- Excavación: $22,5 \text{ m}^3$
- Hormigón: $7,2 \text{ m}^3$
- Ferralla: 200 kg
- Encofrado: 38 m^2
- PVC Ø110: 11 m
- Lote válvulas/bypass + registros + sellados

Partida	Medición	Ud	Precio unitario (€)	Importe (€)
Excavación mecánica	22,5	m^3	26,6	598,5
Hormigón HA-25	7,2	m^3	134,79	970,49
Ferralla B500S	200	kg	2,06	412
Encofrado muro	38	m^2	19,01	722,38

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

Tubería PVC Ø110	11	m	14,65	161,15
Válvulas/bypass (lote)	1	lote	150	150
Tapas/registro	3	ud	20	60
Accesorios y sellados	1	lote	80	80
Subtotal directo				3.154,52
Imprevistos (2%)				63,09
TOTAL				3.217,61 $\approx 3.220 \text{ €}$

Tabla 21 ABR CAPEX

HUMEDAL ARTIFICIAL HSSF

- Área de lecho: $A_{\text{tot}} = 122,4 \text{ m}^2$
- Profundidad: $h = 0,60 \text{ m}$
- Volumen de sustrato: $V_{\text{sustrato}} = A_{\text{tot}} \cdot h = 73,44 \text{ m}^3$
- Geomembrana: 135 m^2

Partida	Medición	Ud	Precio unitario (€)	Importe (€)
Geomembrana HDPE 1 mm	135	m^2	9,53	1.286,55
Sustrato/gravilla (encachado)	73,44	m^3	11,56	848,97
Tubería PVC Ø110 (distribución)	12	m	14,65	175,8

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

Macrófitas plantación	+	122,4	m ²	0,5	61,2
Geotextil de protección	de	135	m ²	0,85	114,75
Subtotal directo					2.487,27
Imprevistos (3,6%)					89,54
TOTAL					2.576,81 $\approx 2.576 \text{ €}$

Tabla 22 Humedal artificial HSSF CAPEX

CONEXIONES, VÁLVULAS Y OBRAS MENORES

Esta partida agrupa los elementos en relación con la continuidad hidráulica, capacidad de aislamiento de unidades, bypass de seguridad y registros.

Partida	Medición	Ud	Precio unitario (€)	Importe (€)
Tubería PVC Ø110 (interconexión)	40	m	14,65	586
Accesorios PVC (codos/tees/manguitos)	1	lote	120	120
Válvulas de corte	3	ud	35	105
Arquetas/registros	3	ud	30	90
Bypass + aliviadero seguridad	1	lote	150	150
Subtotal directo				1.051,00

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

Imprevistos (5%)				52,55
TOTAL				1.103,55 \approx 1.104 €

Tabla 23 Conexiones, válvulas y obras menores CAPEX

FORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

- 2 técnicos \times 8 h \times 22,00 €/h = 352 €
- Material impreso/manuales = 62 €
- TOTAL = 414 €

SUPERVISIÓN TÉCNICA DE PUESTA EN MARCHA

- 2 técnicos \times 12 h \times 22,00 €/h = 528 €
- Logística menor/desplazamientos = 24 €
- TOTAL = 552 €

(Se conserva coherencia de criterio con la referencia de coste horario anterior.)

C.5 RESUMEN DEL CAPEX TOTAL

Componente	Coste (€)
Prefiltro, decantación y pozo lodos	874
Reactor ABR	3.220
Humedal HSSF	2.576
Conexiones, válvulas y obras menores	1.104

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

Formación y documentación	414
Supervisión puesta en marcha	552
TOTAL CAPEX	8.740 €

Tabla 24 Resumen CAPEX total

HIPÓTESIS ECONÓMICAS ADOPTADAS

Se adopta como valor de referencia para coste de mano de obra:

$$p_h = 22 \text{ €/h}$$

Este valor se utiliza como valor de referencia para tareas operativas y técnicas, manteniendo consistencia con el criterio económico en el CAPEX.

Además, se asumen tiempos de operación mínimos coherentes con un DEWATS pasivo:

- Inspección semanal + limpieza puntual: t_{sem} (h/semana)
- Limpiezas mensuales: t_{mes} (h/mes)
- Acciones trimestrales de apoyo (poda, señalización, formación): t_{tri} (h/trimestre)

CÁLCULO DE MANO DE OBRA

La mano de obra anual se estima como:

$$C_{MO} = p_h \cdot (52 \cdot t_{sem} + 12 \cdot t_{mes} + 4 \cdot t_{tri})$$

Valores adoptados (unidad 150 pers.):

- $t_{sem} = 0,15 \text{ h/sem}$ ($\approx 9 \text{ min/semana}$)
- $t_{mes} = 0,25 \text{ h/mes}$ ($\approx 15 \text{ min/mes}$)

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

- $t_{tri} = 0,50 \text{ h/trim} (\approx 30 \text{ min/trimestre})$

$$C_{MO} = 22 \cdot (52 \cdot 0,15 + 12 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,50) = 22 \cdot (7,8 + 3 + 2) = 22 \cdot 12,8 \\ = 281,6 \text{ €/año}$$

GESTIÓN DE LODOS

El coste anual equivalente de retirada de lodos es:

$$C_{lodos,eq} = \frac{C_{lodos}}{T_{lodos}}$$

Adoptando:

- periodicidad $T_{lodos} = 3 \text{ años}$ (extracción parcial y controlada),
- coste por evento C_{lodos} (incluye extracción y transporte).

Ejemplo de trazabilidad (si se adopta un coste por evento de 450 €):

$$C_{lodos,eq} = \frac{450}{3} = 150 \text{ €/año}$$

En ausencia de tarifa local cerrada, C_{lodos} se trata como parámetro de sensibilidad (p. ej., 300–600 €/evento).

CONSUMIBLES Y CORRECTIVO

Se adoptan valores mínimos anuales:

- $C_{cons} = 30 \text{ €/año}$ (EPI básico, bolsas, registro)
- $C_{corr} = 60 \text{ €/año}$ (válvulas/juntas/pequeñas reposiciones)

RESULTADO DE OPEX ANUAL

$$OPEX_{anual} = C_{MO} + C_{cons} + C_{lodos,eq} + C_{corr}$$

ANEXO C COSTES Y MATERIALES

Sustituyendo valores:

$$OPEX_{anual} = 281,6 + 30 + 150 + 60 = 521,6 \text{ €/año}$$

Y por persona:

$$OPEX_{pers} = \frac{OPEX_{anual}}{N} = \frac{521,6}{150} = 3,48 \text{ €/pers · año}$$