

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO
SUB-SUPERFICIAL EN LA PLANTA EXPERIMENTAL DE CARRIÓN DE LOS
CESPEDES, (SEVILLA, ESPAÑA)**

INGRID JANETH FORERO SIACHOQUE

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2009

**ESTUDIO DEL COMPARTAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO
SUB-SUPERFICIAL EN LA PLANTA EXPERIMENTAL DE CARRIÓN DE LOS
CESPEDES, (SEVILLA, ESPAÑA)**

**Tesis de grado como requisito para optar
Al título de Ingeniera Ambiental**

Director:

Dr. JUAN JOSÉ SALAS R.

Lic. Química industrial e Ing. Tec. Industrial

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2009

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, 19 Junio de 2009.

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por bendecirme siempre en cualquier parte del mundo.

A mi familia, por el apoyo y el entusiasmo que me han transmitido durante este proceso de formación y aprendizaje; a pesar de la distancia los sentí siempre cerca de mí.

A mi Director de Tesis el Dr. Juan José Salas, por su asesoramiento científico.

A mis Co-tutores de Tesis: La Lic. Nieves Sardón y el Ing. Miguel Rodilla, de La PECC Y de la Escuela Superior de Gandía, respectivamente; por su acompañamiento, apoyo y consejos.

A todo el equipo técnico de La PECC, por su disposición y asesoramiento en la fase experimental del estudio.

A la Lic. Natalia Almagro y el Lic. Pedro Bustos, por su participación en los primeros ensayos de Conductividad Hidráulica y Sólidos Acumulados, y por brindarme su sincera amistad.

A la Ing. Consuelo Castillo, Directora de la Facultad de Ingeniería Ambiental de La Universidad Pontificia Bolivariana, por su implacable gestión.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. METODOLOGÍA	17
3.1. GENERALIDADES	17
3.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS	18
3.2.1. Humedales artificiales de flujo sub-superficial vertical	18
3.2.2. Humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal	20
3.3. CONDICIONES OPERATIVAS	22
3.4. ETAPAS DE ESTUDIO	24
3.4.1. Primera etapa: HAFSs	24
3.4.2. Segunda etapa: Combinaciones de HAFSs	26
3.4.3. Tercera etapa: Conductividad hidráulica y sólidos acumulados	27
3.4.3.1. Ensayo de Conductividad Hidráulica	27
3.4.3.2. Ensayo de Sólidos Acumulados	31
3.4.4. Cuarta etapa: Análisis y tratamiento de datos	40
4. MARCO TEÓRICO	41
4.1. LOS SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL Y LA PROBLEMÁTICA DE LA DEPURACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LAS PEQUEÑAS AGLOMERACIONES URBANAS	41
4.2. HUMEDALES ARTIFICIALES	44
4.3. HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL (HAFSs)	47
4.3.1. Humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal (HAFSsH)	47
4.3.2. Humedales artificiales de flujo sub-superficial vertical (HAFSsV)	50

4.4. MECANISMOS DE ELIMINACIÓN DE LOS CONTAMINANTES	53
4.4.1. Eliminación de sólidos en suspensión	53
4.4.2. Eliminación de materia orgánica	54
4.4.3. Eliminación de nitrógeno	56
4.4.4. Eliminación de Fósforo	57
4.4.5. Eliminación de patógenos	58
4.4.6. Eliminación de otros contaminantes	58
4.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS HAFSs	59
4.5.1. ventajas	59
4.5.2. Inconvenientes	60
4.6. LA PROBLEMÁTICA DEL SUSTRATO DE LOS HAFSsH	61
4.6.1. Sólidos acumulados	61
4.6.2. Conductividad hidráulica	62
5. RESULTADOS OBTENIDOS	63
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	99
6.1. Primera etapa: Los HAFSs	99
6.2. Segunda etapa: Las combinaciones de los HAFSs	102
6.3. Tercera etapa: Ensayos de conductividad hidráulica y sólidos acumulados	103
7. CONCLUSIONES	107
8. RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	110

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características de las aguas residuales tratadas a lo largo del estudio	63
Tabla 2. Carga orgánica mensual del influente de cada humedal	63
Tabla 3. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del influente	64
Tabla 4. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del tanque Imhoff	65
Tabla 5. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsV H ₁	66
Tabla 6. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsH H ₂	67
Tabla 7. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsV H ₃	68
Tabla 8. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsH H ₅	69
Tabla 9. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsH H ₆	70
Tabla 10. Rendimiento mes 1 de los HAFSs	77
Tabla 11. Rendimiento mes 2 de los HAFSs	78
Tabla 12. Rendimiento mes 3 de los HAFSs	79
Tabla 13. Rendimiento mes 4 de los HAFSs	80

Tabla 14. Rendimiento mes 5 de los HAFSs	81
Tabla 15. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos de combinación I	82
Tabla 16. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos de combinación II	83
Tabla 17. Rendimientos mensuales de las combinaciones I y II	86
Tabla 18. Conductividad hidráulica	87
Tabla 19. Caudal de salida HAFSsH con alimentación suspendida	92
Tabla 20. Datos de precipitación de la estación meteorológica de la PECC, Enero de 2009	94
Tabla 21. Sólidos intersticiales y adheridos del HAFSsH 6	96
Tabla 22. Porcentajes de sólidos volátiles	97
Tabla 23. Restos vegetales de la tercera aplicación del ensayo de sólidos acumulados	98

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Cumplimiento de la concentración de DBO_5 según la normativa 91/271 de los HAFSsV H_1 y H_3 y el HAFSsH H_2	71
Gráfico 2. Cumplimiento de la concentración DBO_5 según la normativa 91/271 de los HAFSsH H_5 y H_6	71
Gráfico 3. Cumplimiento de la concentración de DQO según la normativa 91/271 de los HAFSsV H_1 y H_3 y el HAFSsH H_2	72
Gráfico 4. Cumplimiento de la concentración DQO según la normativa 91/271 de los HAFSsH H_5 y H_6	72
Gráfico 5. Cumplimiento de la concentración de SS según la normativa 91/271 de los HAFSsV H_1 y H_3 y el HAFSsH H_2	73
Gráfico 6. Cumplimiento de la concentración SS según la normativa 91/271 de los HAFSsH H_5 y H_6	73
Gráfico 7. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de DBO_5 según la normativa 91/271 de los HAFSsV H_1 y H_3 y el HAFSsV H_2 .	74
Gráfico 8. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de DBO_5 según la normativa 91/271 de los HAFSsH H_5 y H_6	74
Gráfico 9. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de DQO según la normativa 91/271 de los HAFSsV H_1 y H_3 y el HAFSsV H_2 .	75
Gráfico 10. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de DQO según la normativa 91/271 de los HAFSsH H_5 y H_6	75

Gráfico 11. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de SS según la normativa 91/271 de los HAFSsV H ₁ y H ₃ y el HAFSsV H ₂ .	76
Gráfico 12. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de SS según la normativa 91/271 de los HAFSsH H ₅ y H ₆	76
Gráfico 13. Cumplimiento concentración DBO ₅ según la normativa 91/271 de las combinaciones I y II	84
Gráfico 14. Cumplimiento concentración DQO según la normativa 91/271 de las combinaciones I y II	84
Gráfico 15. Cumplimiento concentración SS según la normativa 91/271 de las combinaciones I y II	85
Gráfico 16. Conductividad hidráulica H ₂	87
Gráfico 17. Conductividad hidráulica H ₅	88
Gráfico 18. Conductividad hidráulica H ₆	88
Gráfico 19. Precipitaciones mensuales	94
Gráfico 20. Sólidos totales acumulados en los puntos de muestreo del HAFSsH H ₆	97

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Vista aérea de la PECC	17
Figura 2. Perfiles de los HAFSsV, H ₁ y H ₃	19
Figura 3. HAFSsV, H ₁ y H ₃	19
Figura 4. Características constructivas del HAFSsH, H ₂	21
Figura 5. Características constructivas del HAFSsH, H ₅	21
Figura 6. Características constructivas del HAFSsH, H ₆	22
Figura 7. Diagrama de funcionamiento estudiado	22
Figura 8. Distribución del caudal de entrada a los HAFSs	23
Figura 9. Laboratorio de físico-química de la PECC	24
Figura 10. Laboratorio de microbiología de la PECC	25
Figura 11. Combinación 1: HAFSsV H ₁ / HAFSsH H ₅	26
Figura 12. Combinación II, HAFSsH H ₂ / HAFSsH H ₆	27
Figura 13. Tubo de medición conductividad hidráulica	28
Figura 14. Equipo de medición de conductividad hidráulica	29
Figura 15. Conexión equipo de medición de la conductividad hidráulica	29
Figura 16. Vista del Software De Transfer	30
Figura 17. Distribución de los puntos de muestreo en el HAFSsH	32

Figura 18. Materiales implementados en el ensayo de sólidos acumulados	33
Figura 19. Punto de muestreo ensayo de sólidos acumulados	34
Figura 20. Muestras de grava a distintas profundidades	34
Figura 21. Lavado de la grava	35
Figura 22. Muestras de grava y agua de lavado a distintas profundidades	36
Figura 23. Equipo de filtración	36
Figura 24. Grava lavada	37
Figura 25. Preparación de las muestras para la determinación de sólidos adheridos	38
Figura 26. Equipo de ultrasonido	38
Figura 27. Grava sonicada	39
Figura 28. Humedal artificial de flujo superficial.	46
Figura 29. Humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal	46
Figura 30. Carrizo (<i>Phragmites australis</i>)	49
Figura 31. Humedal artificial de flujo sub-superficial vertical	51
Figura 32. Encharcamiento zona de alimentación del HAFSsH H ₆ I	89
Figura 33. Detalle zona de alimentación del H ₆ inundada	89
Figura 34. Nivel de agua inicial en la arqueta final de salida	90
Figura 35. Nivel de agua final en la arqueta de salida	90

Figura 36. Encharcamiento zona de alimentación del HAFSsH H ₆ II	91
Figura 37. Encharcamiento zona de alimentación del HAFSsH H ₆ III	91
Figura 38. Zona de alimentación del H ₆ evacuada I	92
Figura 39. Detalle de la grava zona de entrada del H ₆ evacuado I	93
Figura 40. Zona de alimentación evacuada II	93
Figura 41. Zona de alimentación del H ₆ evacuada III	95
Figura 42. Detalle de la grava zona de entrada del H ₆ evacuado I	95

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: STUDY OF THE SUB-SURFACE CONSTRUCTED WETLANDS'S BEHAVIOR IN THE CARRIÓN DE LOS CÉSPEDES'S DEPURATION PLANT

AUTOR(ES): Ingrid Janeth Forero Siachoque

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Juan José Salas Rodríguez

RESUMEN

The horizontal and vertical sub-surface flow constructed wetlands (SSF CWs) was evaluated in the Experimental Plant of Carrión de los Céspedes (PECC) (Seville, Spain), by means of the analysis of the main physical, chemical and microbiological parameters of the purified waters; the yield of each system was determined according to the conditions under those that operate. The best elimination yields of BOD₅, and COD, were obtained for the VSSF CWs H1 (>90%) working with CO of 9 g BOD/m².day. The HSSF CWs H2 reached the bests yields of SS's elimination (>90%), in spite of operating with CO (12 g BOD/m².day) superiors to those recommended (4 - 6 g BOD/m².day) and to make use of a gravel bed the larger size (12 - 20 mm). On the other hand, the HSSF- CWs presents serious problems of clogging of the gravel bed, overalls in the entrance area where the hydraulic conductivity was smaller (80 - 250 m/d); to solve these clogging problems, they were carried out one series of performances. The first one was the accommodation of the reception pipe of the effluents drained; establishing a monitoring period of 1 month observing that the flood level didn't diminish. According to the answer of the system, led to the suspension of the feeding during 3 weeks; during this time, the material stuck to the gravel dried off and due to the high precipitations registered in the month of January the system cleaned in a natural way.

PALABRAS CLAVES:

PECC, Wetlands, Wastewater, Horizontal flow, Hydraulic conductivity, Reed Beds

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL EN LA PLANTA EXPERIMENTAL DE CARRIÓN DE LOS CESPEDES, (SEVILLA, ESPAÑA)

AUTOR(ES): Ingrid Janeth Forero Siachoque

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Juan José Salas Rodríguez

RESUMEN

Se evaluaron los humedales artificiales de flujo sub-superficial (HAFSSs) horizontal y vertical en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) (Sevilla, España), por medio del análisis de los principales parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las aguas depuradas; se determinó el rendimiento de cada sistema de acuerdo a las condiciones bajo las que operan. Los mejores rendimientos de eliminación en cuanto a DBO₅, y DQO (>90%), fueron obtenidos por el HAFSSsV H1 trabajando con CO de 9 g DBO/m².día. El HAFSSsH H2 alcanzó los mejores rendimientos de eliminación de SS (>90%), a pesar de operar con CO (12 g DBO/m².día) superiores a las recomendadas (4 – 6 g DBO/m².día) y hacer uso de un sustrato filtrante de mayor granulometría (12 -20 mm). Por otro lado, los HAFSSsH presentan graves problemas de colmatación del sustrato, sobretodo en la zona de entrada donde la conductividad hidráulica fue menor (80 – 250 m/d); para solucionar estos problemas de encharcamiento, se realizaron una serie de actuaciones. La primera fue la acomodación de la tubería de captación de los efluentes drenados; se estableció un periodo de vigilancia de 1 mes observando que el nivel de inundación no disminuyó. De acuerdo a la respuesta del sistema, se procedió a la suspensión de la alimentación durante 3 semanas; durante este tiempo, el material adherido a la grava se secó y debido a las altas precipitaciones registradas en el mes de enero el sistema se limpió de forma natural.

PALABRAS CLAVES:

PECC, Wetlands, Wastewater, Horizontal flow, Hydraulic conductivity, Reed Beds

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

INTRODUCCIÓN

Los humedales artificiales son sistemas de depuración que se basan en la reproducción de las condiciones de los humedales naturales. Son técnicas que resultan ser estratégicas para las pequeñas y medianas poblaciones, debido a su versatilidad y adaptabilidad, su integración en el entorno rural y su menor coste de implantación y explotación.

En España hoy en día, la implantación de estas tecnologías extensivas en la modalidad de flujo sub-superficial está en crecimiento, es por esto que este estudio tiene como objeto establecer un panorama completo sobre su funcionamiento por medio del análisis de laboratorio de parámetros físicos, químicos y microbiológicos de los efluentes depurados, comprobando así, su utilidad y sus insuficiencias; De igual manera determinar en qué tipo de flujo (vertical u horizontal) operan mejor.

Por otra parte, el funcionamiento de los humedales artificiales depende de las condiciones del complejo suelo – vegetación, esto hace necesario conocer el estado de la matriz filtrante. En este estudio mediante la aplicación de ensayos de conductividad hidráulica y sólidos acumulados se comprobó el estado y la evolución del medio granular de un HAFsH con problemas de obstrucción.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL:

Estudiar el comportamiento de los humedales artificiales de flujo sub-superficial en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Evaluar el rendimiento de los humedales de flujo sub-superficial teniendo en cuenta parámetros físicos, químicos y microbiológicos.
- Valuar la combinación de diferentes humedales obteniendo mejores eficiencias.
- Seleccionar la mejor combinación de acuerdo a la valoración del rendimiento de cada uno de los sistemas de tratamiento.
- Determinar el nivel de colmatación de los humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal – HAFSsH, mediante la medida de la conductividad hidráulica en las zonas de carga y descarga.
- Comprobar el comportamiento del sustrato filtrante de un HAFSsH con problemas de colmatación frente a diferentes actuaciones.

3. METODOLOGÍA

3.1. Generalidades

Este estudio se realizó en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC), ubicada en el municipio del mismo nombre, junto a la autovía A-49 dirección Huelva, en el extremo occidental del Aljarafe, en la provincia de Sevilla, (España).

La PECC, es un centro de investigación y de promoción de modelos sostenibles de depuración de aguas residuales; su principal objetivo es obtener conocimientos concretos sobre las condiciones óptimas de diseño, explotación y mantenimiento de las tecnologías extensivas promovidas en el plan I+D, que se ha venido desarrollando desde 1987 hasta la actualidad.

Hoy en día es dirigida por la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA).



FIGURA 1. Vista aérea de la PECC.

3.2. Características constructivas

La planta cuenta con cinco Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial, dos de Flujo Vertical (H_1 Y H_3) y tres de Flujo Horizontal (H_2 , H_5 y H_6), con las siguientes dimensiones y características constructivas:

3.2.1. Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial Vertical

Los dos Humedales tienen una pendiente del 1% hacia la zona de evacuación.

Se han impermeabilizado con lámina plástica de polietileno de alta densidad (PEAD) de 2,5 mm de espesor, colocada sobre geotextil de 180 g/cm².

La alimentación de los humedales se lleva a cabo mediante cinco tuberías longitudinales de polietileno, de 32 mm de diámetro, con orificios de salida de 1 cm de diámetro cada 1,80 m. Estas tuberías se tienden directamente sobre el sustrato.

Una vez atraviesa el flujo verticalmente el sustrato, es recogido por las cinco tuberías de drenaje de 125 mm de diámetro, dispuestas longitudinalmente en el fondo de los humedales; y finalmente, es descargado en la arqueta de salida. Las tuberías de drenaje se encuentran embutidas en una capa de 15 cm de espesor compuesta por grava de 25 a 40 mm.

El HAFSsV H_1 tiene una superficie de 320 m² (23,5 x 13,5 m aprox.), cuenta con un sustrato de 60 cm de profundidad compuesto por arena gruesa de 1 - 2 mm y gravilla de 12-20 mm. Adicionalmente está plantado con carrizo (*Phragmites australis*), planta de la familia de la *Poaceae* o comúnmente llamadas gramíneas.

El HAFSsV H_3 tiene una superficie de 290 m² (24 x 12 m aprox.), el sustrato está compuesto por 30 cm de gravilla 4-12 mm, 30 cm de gravilla caliza de 3-8 mm y 10 cm de gravilla de 4-12 mm.

Con respecto a la oxigenación del sustrato de los humedales, cada tubería de drenaje cuenta con tres chimeneas, distribuidas equidistantemente, que sobresalen 1 m verticalmente sobre el sustrato, con el objeto de potenciar la circulación de aire por las tuberías.

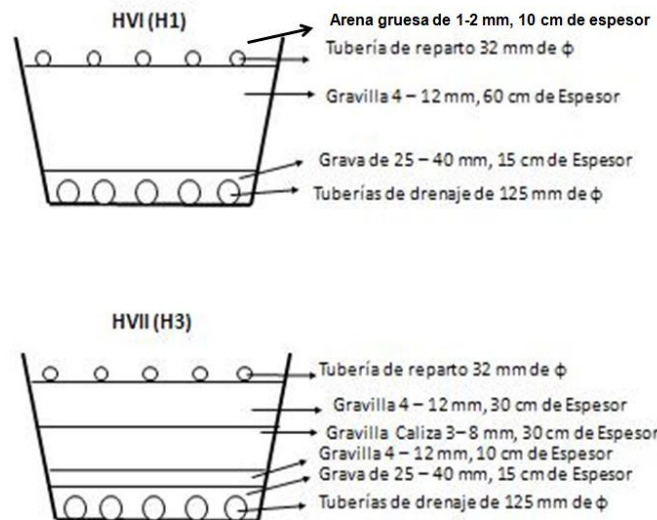


FIGURA 2. Perfiles de los HAFSSV, H₁ y H₃.



FIGURA 3. HAFSSV, H₁ y H₃.

3.2.2. Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial Horizontal

Los tres Humedales tienen una pendiente del 1% hacia la zona de evacuación.

Se han impermeabilizado con lámina plástica de polietileno de alta densidad (PEAD) de 2,5 mm de espesor, colocada sobre geotextil de 180 g/cm².

La alimentación se efectúa implementando tuberías de polietileno de 63 mm de diámetro, con perforaciones de 1 cm de diámetro. Estas tuberías se tienden directamente sobre el sustrato, en la parte superior de la zona de bolos dispuesta en la cabecera de los humedales.

La evacuación de los efluentes depurados se realiza por medio de tuberías de drenaje de 125 mm de diámetro, embutidas en el fondo de la zona de bolos dispuesta a la salida.

El drenaje conecta con una tubería final flexible, ubicada en la arqueta de evacuación de efluentes, de esta manera puede modificarse el nivel de encharcamiento del sustrato.

El HAFSsH H₂, tiene una superficie de 280 m² (24 x 11,5 m aprox.), su sustrato tiene una profundidad de 60 cm compuesto por gravilla silícea de 12-20 mm.

El HAFSsH H₅, tiene una superficie de 230 m² (26 x 8,8 m aprox.) y un sustrato de 40 cm de profundidad a base de gravilla silícea de 4-12 mm.

Y finalmente, el HAFSsH H₆ que posee una superficie de 210 m² (26 x 8,1 m aprox.) y 60 cm de sustrato constituido por gravilla caliza de 3-8 mm.

Al igual que el H₁, los humedales H₅ y H₆ están plantados con Carrizo (*Phragmites australis*).

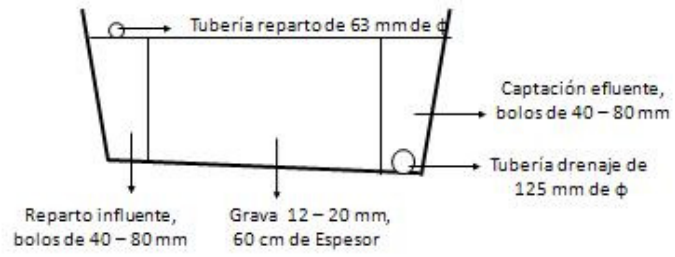


FIGURA 4. Características constructivas del HAFSsH, H₂.

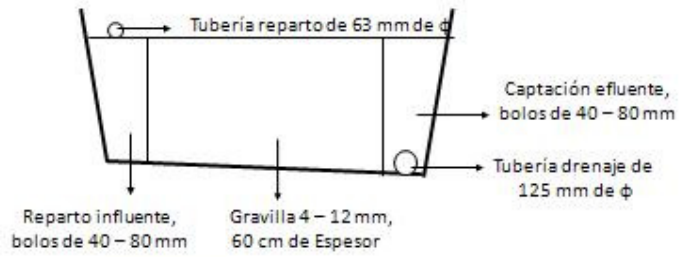


FIGURA 5. Características constructivas del HAFSsH, H₅.

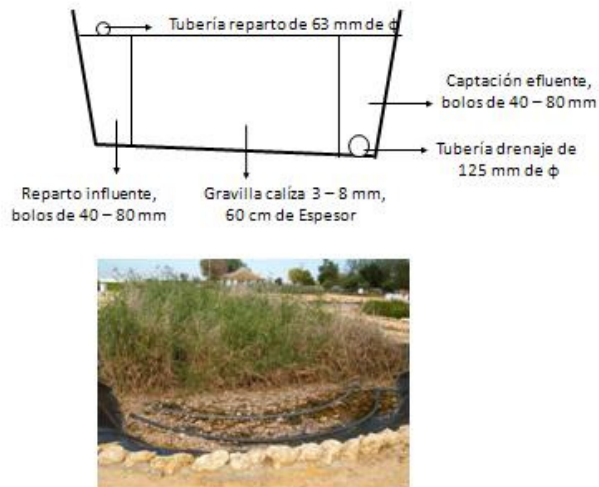


FIGURA 6. Características constructivas del HAFSsH, H₆.

3.3. Condiciones operativas

El diagrama general de funcionamiento tenido en cuenta para el desarrollo de esta tesis, se describe a continuación:

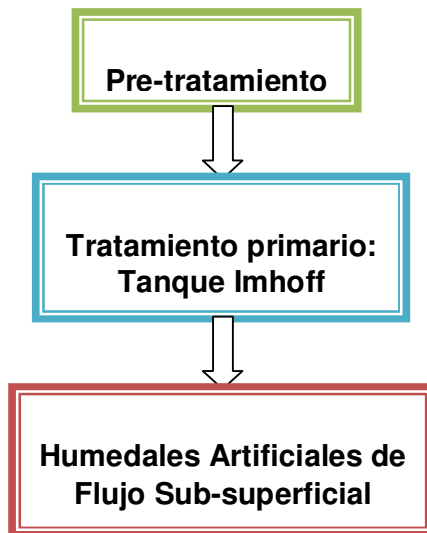


FIGURA 7. Diagrama de funcionamiento estudiado.

Los humedales de cabecera H_1 , H_2 Y H_3 , han sido alimentados con efluentes procedentes del Tanque Imhoff (capacidad: 500 habitantes equivalentes), que a su vez recibe las aguas residuales que primeramente han pasado por el pre-tratamiento (Desbaste, Desarenado y Desengrasado).

Por medio de un sistema de electroválvulas y de sondas de nivel, dispuesto en la arqueta de salida del Tanque Imhoff, ocurre la alimentación de los humedales de forma intermitente, variando así, el caudal para cada Humedal.

Para este estudio los caudales de entrada a cada Humedal se definen de acuerdo a la siguiente relación, al igual que la distribución por los humedales:

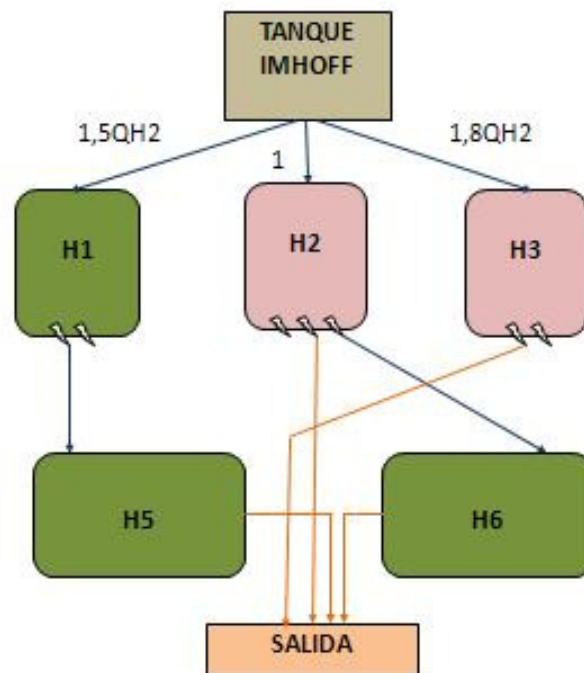


FIGURA 8. Distribución del caudal de entrada a los HAFSS.

Las válvulas dispuestas en la arqueta de salida de los Humedales de cabecera H_1 , H_2 y H_3 , controlan la dirección de los efluentes depurados, pueden enviarse directamente a cauce, o alimentar a los otros humedales existentes.

3.4. Etapas de estudio

El estudio se llevo a cabo en etapas:

3.4.1. Primera etapa: HAFSs

La duración de esta etapa fue de 19 semanas (de la semana 1 a la 19).

1. Se requirió de toma de muestras semanales en el influente, efluentes de puntos intermedios y efluentes finales para la ejecución de las analíticas de laboratorio, de acuerdo a Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (*APHA-AWWA-WPCF*), Ed. 17, 1060-B. Ediciones Díaz Santos.
2. Se utilizaron las instalaciones del laboratorio de físico-química y microbiología de la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes para la realización del estudio de los componentes físicos, químicos y microbiológicos del agua residual de Carrión de los Céspedes.



FIGURA 9. Laboratorio de físico-química de la PECC.



FIGURA 10. Laboratorio de microbiología de la PECC.

3. Se efectuaron pruebas de laboratorio para la determinación de parámetros físicos: Temperatura, pH, sólidos totales en suspensión y conductividad específica, tanto del influente, como del efluente, de acuerdo a los protocolos internos del laboratorio de la PECC (PA-0, PA-00, PA-02, PA-06, PA-01), basados en *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA-AWWA-WPCF)*, Ed. 17, 2130-B, 2550-B, 4500-H, 2540E, 2510-B. Ediciones Díaz Santos.
4. Se comprobaron los parámetros químicos: Requerimiento Biológico de Oxígeno y Requerimiento Químico de Oxígeno en el influente y el efluente, mediante pruebas de laboratorio siguiendo el manual de prácticas de laboratorio de la PECC (PA-04, PA05), basado en *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA-AWWA-WPCF, Ed. 17)*, 5210-D, 5220-C. Ediciones Díaz Santos.
5. Se establecieron las concentraciones de constituyentes inorgánicos no metálicos: Nitrógeno Amoniacal, Nitratos, Nitrógeno Total, Fósforo Total,

Fosfatos, Oxígeno disuelto, en el influente y en el efluente, de acuerdo a la guía de procedimientos del auto-analizador *Method No. [G-109-94 Rev.6 (Multitest MT7/MT8) G-157-96 Rev. 9 (Multitest MT17); G-189-97 Rev.2 (Multitest MT7/MT8); G-103-93 Rev.8 (Multitest MT7/MT8)]*; y al manual de prácticas de laboratorio de la PECC (PA-03), basado en *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA-AWWA-WPCF) Ed. 17, 4500-O*. Ediciones Díaz Santos.

6. Se determinó la concentración de *Escherichia coli*, mediante la filtración de membrana y posterior cultivo en medio de agar de diferenciación, tanto en el influente, como en el efluente; de acuerdo al manual de prácticas de laboratorio de la PECC.

3.4.2. Segunda etapa: Combinaciones de HAFSs

Se realizó de forma simultánea a la primera etapa, La duración será de 19 Semanas:

1. Se analizó el rendimiento por combinaciones:

El Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Vertical plantado (H_1) con el Humedal Artificial Sub-superficial de Flujo Horizontal plantado (H_5).



FIGURA 11. Combinación 1: HAFSsV H_1 / HAFSsH H_5 .

El Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Horizontal sin plantar (H_2) con el Humedal Artificial Sub-superficial de Flujo Horizontal plantado (H_6).



FIGURA 12. Combinación II, HAFSsH H_2 / HAFSsH H_6 .

3.4.3 Tercera etapa: Conductividad hidráulica y sólidos acumulados

Los ensayos se realizaron con el objeto de determinar el nivel de colmatación de los HAFSsH y la influencia de la materia orgánica (disuelta y particulada) en su eficiencia.

3.4.3.1 Ensayo de Conductividad Hidráulica:

El modelo utilizado para estimar la conductividad hidráulica (K) fue el de *Falling-head method* (NAVFAC, 1986 - medidas puntuales de conductividad), implementando un equipo de sondeo con software especializado.

En los HAFSsH H_2 , H_5 y H_6 se fijaron dos tubos, uno en la zona de entrada y el segundo, en la zona de salida. Las dimensiones de los tubos fueron las siguientes: 11 cm de diámetro y 100 cm de longitud. Los tubos se encontraban insertados 20 cm en el sustrato.

Los tubos son llenados de agua en un pulso; la sonda de presión dispuesta en el interior de los mismos por medio de un registrador de datos evalúa la evolución del nivel de la columna de agua



FIGURA 13. Tubo de medición conductividad hidráulica.

Para el cálculo de la K se utiliza la Ley de Darcy, según la expresión:

$$K = \frac{d^2 \ln \frac{2L}{d}}{8Lt} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

I) Materiales

- Tubo acero de \varnothing 10,5 cm (debe estar afilado de un extremo y el cilindro agujereado desde el extremo afilado hasta una distancia de 15 cm)
- Sonda de presión hidrostática (Transmisor de nivel modelo TNS-119)
- Data-taker DT50
- Ordenador portátil
- Programa “De Transfer”



FIGURA 14. Equipo de medición de conductividad hidráulica.

II) Procedimiento

Preparación del material

- 1 La sonda de presión se conecta a uno de los canales del data-taker, y éste se conecta a su vez al ordenador y a la corriente (o batería). Es necesario cebar la sonda. La conexión final se muestra en el dibujo a continuación:

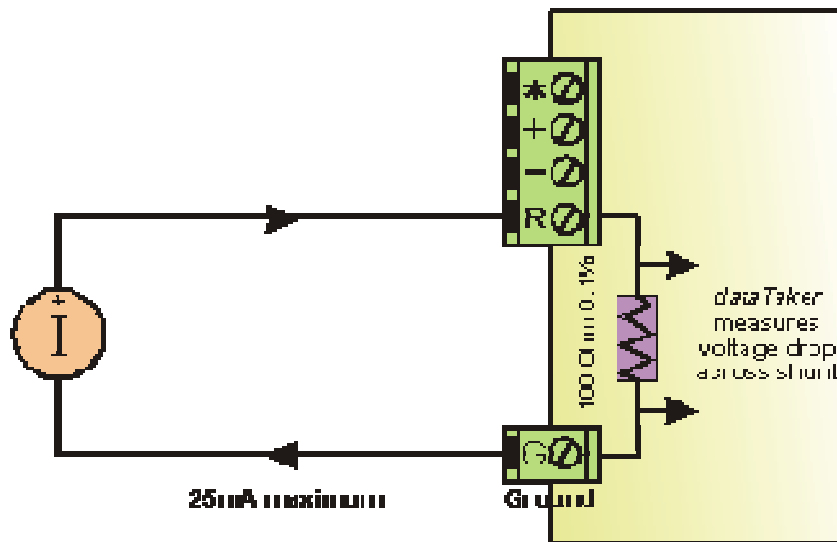


FIGURA 15. Conexión equipo de medición de la conductividad hidráulica.

- 2 La sonda toma las medidas en mA, con un rango de 4-20 mA, que corresponden a 0-1 m de columna de agua.
- 3 Una vez hecha la conexión abrir el programa “De Transfer” y conectar el data-taker (Menú Conexions/connect).

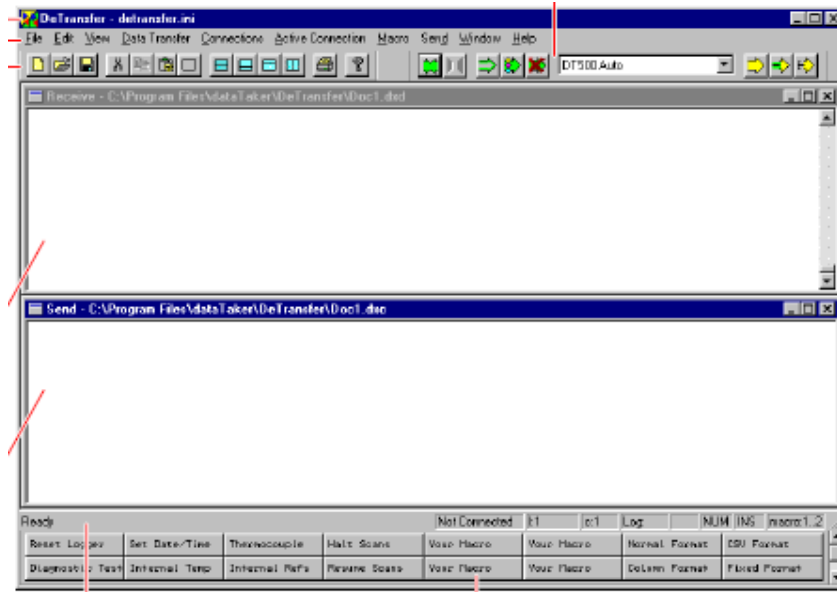


FIGURA 16. Vista del Software De Transfer.

- 4 En la ventana SEND se dan las órdenes para las medidas:

```

RESET
D=14/12/05
T=00:00
S1=4.0,20.0
RA1S D T 2#L(S1)
/n/u
HA
G

```

Donde,

D, es la fecha (d/m/a)

T, es el tiempo (mm/s)

S1, es el rango de medidas de la sonda en mA

RA, indica que estamos trabajando con una resistencia

1S, es el intervalo de tiempo que queremos entre medidas (en este caso cada segundo)

2#L, indica el canal donde se conecta la sonda al data-taker (2) y el tipo de conexión entre la sonda y el data-taker (un loop, L)

/n/u, permite ver los datos en una sola fila

HA, es la orden para parar la lectura

G, es la orden para continuar la lectura

5 En la ventana RECEIVE se observan las lecturas que va tomando la sonda

6 A presión atmosférica (0 m.c.a) el valor obtenido oscila entre 4,03 y 4,05 mA

3.4.3.2 Ensayo de Sólidos Acumulados

El modelo utilizado para la determinación de los sólidos acumulados (intersticiales y adheridos), fue diseñado en base a la metodología implementada en una tesis doctoral en Barcelona para determinar la influencia de las características de la materia orgánica en la eficiencia de un humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal.

El ensayo se aplicó en seis puntos del HAFSsH H₆ Tres puntos en la entrada y tres puntos en la salida. Los puntos eran escogidos al azar manteniendo una distancia lineal entre los muestreos de cabecera y los de salida.

Se basa en el tratamiento de una porción de grava húmeda del humedal con el fin de medir la cantidad de sólidos retenidos en el humedal.

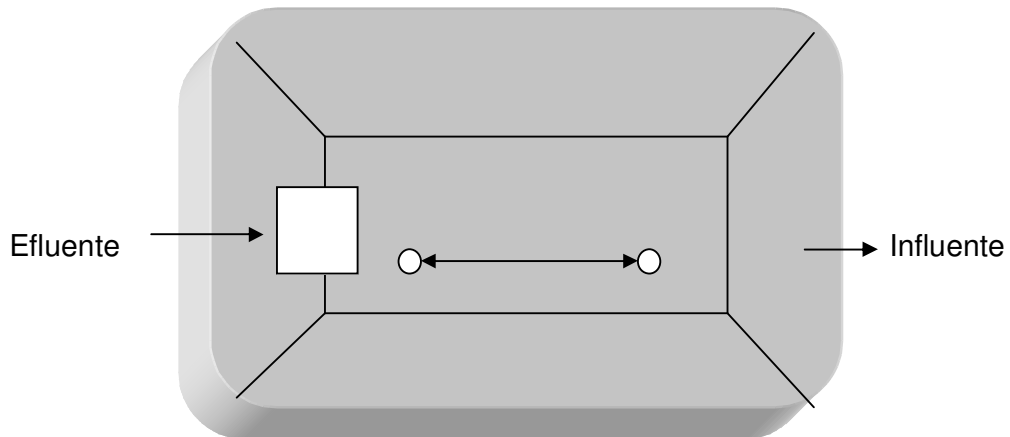


FIGURA 17. Distribución de los puntos de muestreo en el HAFSsH.

I) Materiales:

- Dos Tubos de acero de 40 cm de largo y 20 cm de diámetro.
- Mazo
- Un metro.
- Botes de plástico de dos litros para recogida de muestras.
- Tres cubos.
- Tamiz de 2 mm de luz de malla.
- Balanza de precisión.
- Vaso de precipitado.
- Probeta 100 ml.
- Equipo de ultrasonido.
- Filtros de fibra de vidrio de 0,45 micras de tamaño de poro.
- Bomba de filtración.
- Estufa
- Mufla

II) Procedimiento:

Este ensayo se realiza en tres fases:

1. Muestreo:

- Insertar los tubos de acero en el sustrato de la zona del influente y el efluente, cerca a la zona de medida de la conductividad hidráulica del humedal, utilizando para ello un mazo.



FIGURA 18. Materiales implementados en el ensayo de sólidos acumulados.

- Eliminar la capa de grava seca de la superficie, y recoger la grava húmeda. Es necesario extraer unos 20-30 cm de profundidad de grava. Atendiendo a las capas que se observen en la columna se tomarán distintas muestras.



FIGURA 19. Punto de muestreo ensayo de sólidos acumulados.

- Depositar las muestras en botes de plástico de 2 litros, cada bote contiene las muestras de grava a distintas profundidades.



FIGURA 20. Muestras de grava a distintas profundidades.

2. Determinación sólidos intersticiales:

- Depositar el contenido del primer bote en un cubo con una capacidad de ocho litros aproximadamente. Añadir agua del grifo hasta alcanzar un volumen total de unos dos litros.
- Retirar los restos vegetales.
- Remover la grava manualmente. El agua del 1º lavado se reserva.
- Realizar dos lavados a cada muestra.
- Mezclándose los volúmenes obtenidos se recoge un litro del agua de lavado.
- Se repite el mismo procedimiento para el resto de las muestras, finalmente, se obtienen un litro de agua de lavado, uno por cada estrato.
- La grava lavada se conserva en botes de plástico.



FIGURA 21. Lavado de la grava.

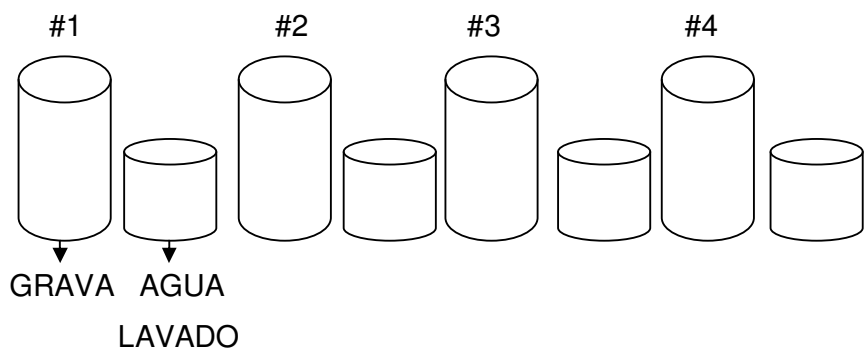


FIGURA 22. Muestras de grava y agua de lavado a distintas profundidades.

- Filtrar el agua de lavado de las muestras a diferentes profundidades, utilizando filtros de fibra de vidrio de 0,45 micras de diámetro. El volumen escogido depende de la concentración de cada muestra.



FIGURA 23. Equipo de filtración.

- Se realiza la determinación de SST (Sólidos en suspensión totales) y SSV (Sólidos en suspensión volátiles), de acuerdo a los protocolos internos del laboratorio de la PECC (PA-06), basados en *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA-AWWA-WPCF), Edición 17, 2540E*. Ediciones Díaz Santos.
- Se realizan 2 replicas de cada muestra a diferentes profundidades.

3. Determinación sólidos adheridos:

- De los botes de grava lavada de cada profundidad, se toman cinco porciones de 120 g de grava.



FIGURA 24. Grava lavada.

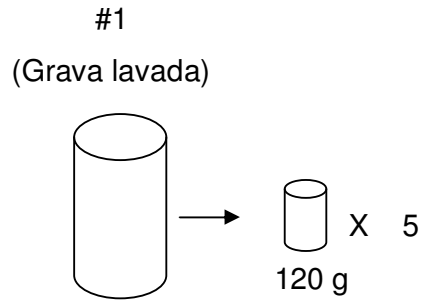


FIGURA 25. Preparación de las muestras para la determinación de sólidos adheridos.

- Introducir por separado cada muestra de 120 g en el equipo de ultrasonido durante 7 minutos, al cual se le añade 100 ml de agua destilada.



FIGURA 26. Equipo de ultrasonido.

- Recoger en un bote de plástico el agua resultante del ultrasonido, correspondiente a cada muestra, consiguiendo un volumen final de 500 ml.



FIGURA 27. Grava sonicada.

- Se repite el mismo procedimiento para las muestras del resto de los estratos, obteniéndose un bote de agua de 500 ml, uno por cada estrato.
- Se realiza la determinación de SST (Sólidos en suspensión totales) y SSV (Sólidos en suspensión volátiles), de acuerdo a los protocolos internos del laboratorio de la PECC (PA-06), basados en *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA-AWWA-WPCF)*, 2540E. Ediciones Díaz Santos.
- Se realizan 2 replicas de cada muestra a diferentes profundidades.

El contenido total de sólidos se calcula mediante la suma de los sólidos intersticiales más los sólidos adheridos.

3.4.4. Cuarta etapa: Análisis y tratamiento de datos

1. Se elaboró una base de datos, mediante la recolección y el tratamiento de los resultados obtenidos de la analítica de laboratorio, al finalizar el tiempo seleccionado para la ejecución del estudio.
2. Se evaluó el rendimiento individual de los humedales y de las combinaciones entre ellos.
3. Se estableció cuál de las combinaciones es la más eficaz y eficiente.
4. Se determinó el estado de la grava y la evolución del medio granular del HAFsH H₆ con problemas de obstrucción y la influencia de la acumulación de materia orgánica (particulada y disuelta) en su funcionamiento.
5. Se efectuó la correspondiente redacción del informe final.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Los sistemas de depuración natural y La problemática de la depuración de las aguas residuales de las pequeñas aglomeraciones urbanas

Los Sistemas de Depuración Natural (SDN) pueden definirse como el conjunto de procedimientos que ocurren en la naturaleza de forma espontánea, que contribuyen a la eliminación de sustancias contaminantes de las aguas residuales, cómo dicen García y Corzo, no requieren de energía externa ni de aditivos químicos¹.

“Los Sistemas de Depuración Natural (SDN) son también conocidos en la literatura científica y técnica como tecnologías no convencionales, [sistemas de bajo coste energético], tecnologías blandas, sistemas verdes y [Tecnologías extensivas], entre otros”².

Estos sistemas de descontaminación dependen en su mayoría, de los procesos realizados por sinergia de diferentes comunidades de organismos a velocidad natural, lo que no supone un problema, ya que es compensado con el tamaño que estos sistemas requieren.

Si se realiza un estudio de costos, para un sistema convencional de depuración la aportación de oxígeno-aire es el principal factor de incremento de los costes; sí, se requiere de una menor superficie debido a la aceleración de los procesos de descontaminación, pero los costes del terreno no superan los costes energéticos.

Los Sistemas de Depuración Natural (SDN) son una alternativa que estimula la integración de conceptos básicos como: recuperación ambiental, ahorro de recursos y desarrollo socioeconómico; “Las aguas residuales, cargadas de materia orgánica

¹ García S., Joan y Corzo H., Angélica. Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Humedales de Flujo Sub-superficial. Barcelona: UPC. 2006. p. 6.

² *Ibid.*, p. 6.

y nutrientes, son una posible fuente de recursos para el entorno rural”³ y al implantarse los SDN, la gestión del agua residual se hace descentralizada, esto supone una alternativa atractiva para las explotaciones agropecuarias, de esta forma los sistemas de depuración se integran dentro del ciclo productivo. Y así, la generación inevitable de aguas residuales como producto de las actividades humanas, no sería una fuente lucrativa de ingresos como tal, pero tampoco sería sinónimo de malversación.

Al estudiar el ámbito geográfico y el grado de desarrollo de las pequeñas y medianas colectividades rurales, se observa que estas características representan la principal problemática de la provisión de servicios de saneamiento básico a estas comunidades:

DEPURANAT⁴ da algunas sugerencias para la selección de tecnologías para este tipo de colectividades:

Al seleccionar un tratamiento para las aguas residuales de las pequeñas aglomeraciones debe darse prioridad a las tecnologías que:

- Requieran de un mínimo o nulo gasto energético.
- Requieran mantenimiento y explotación simples.
- Garanticen el funcionamiento eficaz y estable frente a las grandes oscilaciones de caudal y carga contaminante de los influentes a tratar.
- Simplifiquen y minimicen la gestión de los lodos generados en los procesos de depuración.

³DEPURANAT. Gestión Sostenible del Agua Residual en Entornos Rurales. España. 2006. p. 31

⁴ Ibid., p 31

Al analizar en detalle los aspectos que caracterizan los SDN, se observa que cumplen con las prioridades planteadas por DEPURANAT⁵, ya que en la reproducción de los ecosistemas naturales, particularmente en los acuáticos intervienen los mismos procesos que en un sistema de depuración convencional:

- Sedimentación
- Filtración
- Adsorción
- Precipitación química
- Reacciones de óxido-reducción
- Intercambio iónico
- Degradación aeróbica
- Degradación anaeróbica

Además de los procesos que se dan en la naturaleza:

- La fotosíntesis.
- Foto-oxidación.
- Asimilación por parte de las plantas, entre otros;

Con la única diferencia y ventaja que no requieren de consumo energético.

⁵ Ibid., p 31

4.2. Humedales artificiales

“Los humedales artificiales, son zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen los procesos de eliminación de [materia orgánica, nutrientes, metales y patógenos] que tienen lugar en los humedales naturales”¹.

Los humedales naturales son ecosistemas que se caracterizan por tener vegetación adaptable a la inundación periódica. Normalmente existen en áreas adyacentes a cuerpos de agua, como ríos y lagos.

Son una unidad importante del paisaje debido a los muchos servicios que estos proporcionan, dentro de los que cabe destacar la mitigación de inundación y la purificación del agua. El propósito de los humedales artificiales o construidos es utilizar estas características naturales de depuración para el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Salas R. y Pidre B.², dicen:

El carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por las siguientes particularidades:

- El confinamiento del humedal se construye mecánicamente y se impermeabiliza para evitar las pérdidas de agua al subsuelo.
- Se emplean sustratos diferentes al terreno original para el enraizamiento de las plantas.
- Se eligen las plantas que van a colonizar el humedal.

¹ Salas R., JJ, Pidre B., JR y Sánchez F., Luciana. Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. CENTA. 2007. Cap. IV. p 19.

² *Ibíd.*, Cap. IV. p. 19

La depuración de las aguas residuales a tratar se consigue al hacerlas atravesar la zona húmeda artificial, en donde tienen lugar procesos físicos, químicos y biológicos.

Los principales componentes que intervienen en la depuración de las aguas residuales son: el sustrato que sirve de soporte tanto para la vegetación como para los microorganismos (en forma de biopelícula) que se encargan de la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes; y la vegetación, específicamente las plantas macrófitas, estas contribuyen a la oxigenación del sustrato, a la eliminación de los nutrientes y al desarrollo de la biopelícula.

De acuerdo al tipo de circulación del agua, los humedales se clasifican en flujo superficial o flujo sub-superficial.

“En los sistemas de flujo superficial el agua se encuentra expuesta directamente a la atmósfera y circula, preferentemente, a través de los tallos de las plantas”³. Muchos autores consideran estos humedales como una variedad de los Lagunajes clásicos, con la diferencia de que la lámina de agua no supera los 40 centímetros de profundidad.

Los humedales artificiales de flujo superficial usualmente son sistemas de grandes extensiones y se utilizan principalmente para mejorar la calidad de los efluentes procedentes de tratamientos secundarios, al igual que para crear y recuperar ecosistemas acuáticos.

³ Ibid., Cap. IV. p. 23

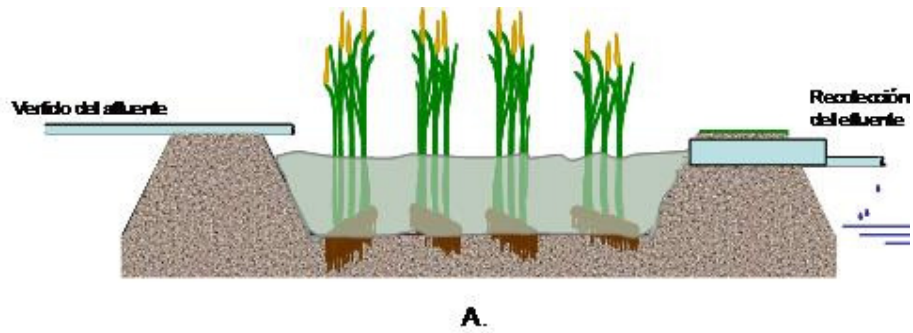


FIGURA 28. Humedal artificial de flujo superficial.

“En los humedales de flujo sub-superficial la circulación del agua es subterránea, a través de un medio granular (arena, gravilla, grava)”⁴; en caso de estar plantado, también en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. Estos sistemas requieren de menor tamaño a diferencia de los de flujo superficial, además de que se elimina la presencia de insectos y olores; pero son sistemas que demandan una mayor inversión, principalmente por el coste de adquisición y colocación del sustrato filtrante.

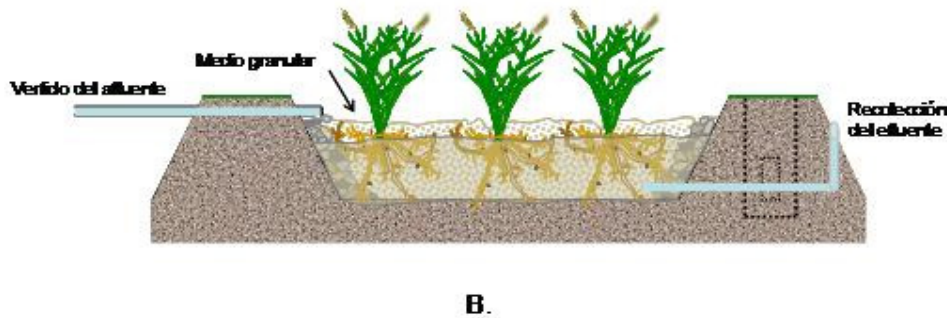


FIGURA 29. Humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal.

⁴ García S. y Corzo H., Op. cit. p. 8

4.3 Humedales artificiales de flujo sub-superficial (HAFSs)

Los humedales artificiales de flujo sub-superficial se clasifican de acuerdo a la dirección en que circula el agua a través del sustrato, en:

- Horizontales
- Verticales

4.3.1. Humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal (HAFSsH)

Los HAFSsH son aquellos sistemas en donde el agua circula de forma horizontal a través del medio granular, los rizomas y las raíces de las plantas, desde la zona de alimentación hasta la arqueta final de salida.

Los HAFSsH están compuestos por: las estructuras de alimentación (la entrada del afluente), los materiales de impermeabilización tanto del fondo como de los laterales del confinamiento del humedal, el medio granular (arena, grava, gravilla), la vegetación emergente y una tubería flexible a la salida del humedal que permite controlar el nivel de encharcamiento, que según Salas R. y colaboradores¹, suele mantenerse 5 cm por debajo del nivel de los áridos, lo que impide que las aguas sean visibles.

Para alcanzar buenos rendimientos es necesario que tanto la repartición como la recogida de las aguas estén bien distribuidas, al igual que las estructuras de entrada y de salida.

El agua procedente del tratamiento primario llega a una arqueta de distribución que reparte el flujo equitativamente a las tuberías que vierten al lecho.

Es necesario disponer de una barrera impermeable para evitar las pérdidas de agua al subsuelo.

¹ Salas R., Pidre B. y Sánchez F., Óp. cit. Cap. IV. p. 26

“Dependiendo de las condiciones locales puede ser suficiente una buena compactación del terreno, en otros casos será necesario realizar aportaciones de arcilla o láminas sintéticas”².

Los efluentes depurados son captados por una tubería perforada ubicada en el fondo del humedal. Esta tubería conecta con un tubo flexible en forma de “L” invertida que se encuentra en la arqueta final de salida. La altura de esta estructura puede modificarse con el objetivo de controlar el nivel de encharcamiento del humedal, al igual que drenar el sistema durante operaciones de mantenimiento.

En la zona de entrada y salida se instalan piedras para diferenciar estas zonas del medio granular principal. El medio granular principal debe tener las condiciones que permitan el buen desarrollo de la biopelícula y el enraizamiento de la vegetación, de esta forma, “el conjunto [formado por] el medio granular, la biopelícula y las plantas es el principal constituyente de los humedales”³, y encargado de los procesos de

retención / sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes y la eliminación de los microorganismos patógenos.

Con respecto a la vegetación, las especies utilizadas son los macrófitos emergentes, típicos de las zonas húmedas. “En Europa la planta más utilizada es el carrizo, con densidades de plantación de 3 ejemplares por metro cuadrado”⁴, aunque existen otras especies que pueden implementarse como la espadaña (*Typha*) o los Juncos (*Scirpus*).

² García S. y Corzo H., Op. cit. p. 9

³ Ibid., p. 9

⁴ Ibid., p. 9, 10



FIGURA 30. Carrizo (*Phragmites australis*).

Estas especies presentan adaptaciones especiales para vivir en ambientes susceptibles de inundaciones. Al interior de sus tallos disponen de espacios vacíos que permiten el flujo de gases desde las hojas hasta las raíces.

La vegetación tiene grandes efectos sobre el funcionamiento de los humedales, debido a que proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula, ésta crece adherida a las partes subterráneas de las plantas (raíces y rizomas) y sobre el medio granular.

Alrededor de las raíces, en los microambientes aeróbicos, tienen lugar los procesos de degradación de la materia orgánica y la nitrificación.

Las plantas desarrolladas reducen la intensidad de la luz sobre el medio granular evitando así las variaciones ambientales como los gradientes de temperatura en profundidad que pueden afectar el proceso de depuración. En zonas de clima frío la vegetación sirve de protección contra la congelación.

La vegetación asimila nutrientes. Según García S. y Corzo H.⁵, en los procesos de eliminación de Nitrógeno y Fósforo de aguas residuales de tipo medio, las plantas alcanzan hasta un 20% de reducción; en aguas residuales diluidas su contribución es mayor, de más del 50%.

⁵ *Ibid.*, p. 11

Según la bibliografía, existen una serie de recomendaciones que se deben tener en cuenta a la hora de escoger la vegetación que colonizará el humedal, García S. y Corzo H.⁶, dan sugerencias con respecto a las características de la región donde se realizará el proyecto:

- Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
- Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.
- La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
- Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.
- Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
- Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
- Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
- Se deben utilizar especies propias de la flora local.

4.3.2. Humedales artificiales de flujo sub-superficial vertical (HAFSsV)

“Esta tipología de humedales fue desarrollada en Europa como alternativa a los humedales horizontales para producir efluentes nitrificados”⁷ Generalmente la eliminación del nitrógeno se realiza combinando los sistemas de flujo vertical y horizontal para producir procesos de nitrificación des-nitrificación.

⁶ Ibid. p. 12

⁷ Cooper P. (2005). The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. Wat. Sci. Tech. 51 (9), 91-97.

La circulación en estos sistemas es de tipo vertical intermitente, de esta manera el medio granular no está permanentemente inundado, a diferencia de los de flujo horizontal. La profundidad del medio granular varía entre 0,5 y 0,8 m.

Estos sistemas tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales, “operan con cargas de alrededor de 20 g DBO/m².día”⁸.

Los humedales verticales tienen las mismas características constructivas de los horizontales, adicionalmente incluyen tuberías de aireación.

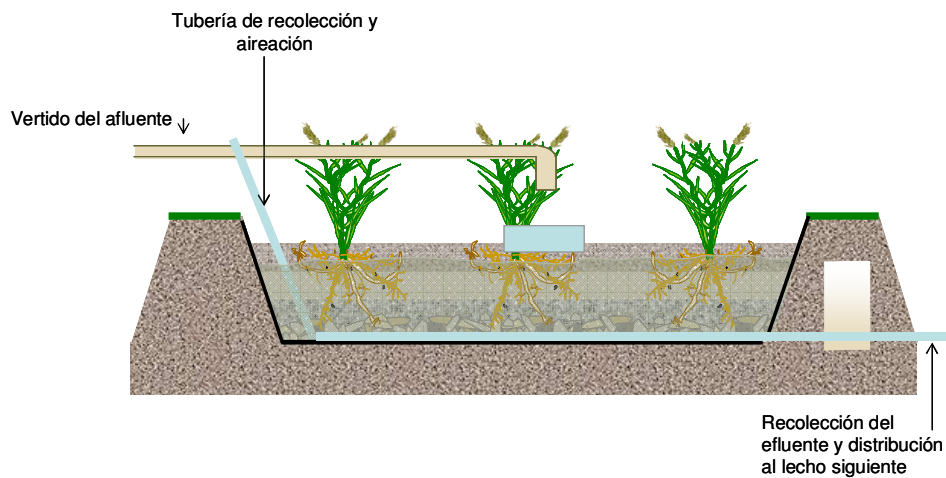


FIGURA 31. Humedal artificial de flujo sub-superficial vertical.

Al igual que para los humedales horizontales es importante que haya una buena distribución y recogida del agua en toda el área del sistema. Para la distribución se disponen de redes de tuberías ubicadas sobre la superficie. La forma puede variar, ya sea radial o longitudinal (a lo largo del lecho). En la recogida del agua se utilizan redes de tuberías perforadas instaladas en el fondo y a lo largo del lecho.

El medio granular debe ser de tipo heterogéneo, se disponen tres capas horizontales con distinta granulometría aumentando de tamaño a mayor profundidad del lecho.

⁸ García S. y Corzo H., Op. cit. p. 12

“La capa más superficial es de arena gruesa, la intermedia de grava y la del fondo de grava gruesa”⁹. El objetivo de esta disposición es disminuir la velocidad de paso del agua a través del lecho.

Las tuberías de aireación, como su nombre ya lo indica se utilizan para proporcionar oxígeno al lecho en profundidad, y así, mejorar y favorecer los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación. “Se recomienda la instalación de una tubería por cada 4 m²”¹⁰

⁹ Ibid., p.15

¹⁰ Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. y Haberl, R. (2000). Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing, 155 pp.

4.4. Mecanismos de eliminación de los contaminantes

A medida que el tiempo avanza los criterios calificativos de los sistemas de depuración son cada vez más exigentes. Hoy en día, las plantas depuradoras no sólo se diseñan para remover materia orgánica y en suspensión, sino que también para la eliminación de los nutrientes, como el Fósforo y el Nitrógeno; en un futuro la eliminación de los microorganismos fecales será también un objetivo generalizado.

Los mecanismos de depuración de los principales contaminantes presentes en el agua residual, mediante el empleo de los humedales artificiales de flujo sub-superficial, son:

4.4.1. Eliminación de sólidos en suspensión

La eliminación de la materia en suspensión tiene lugar por filtración a través del conjunto que forman el sustrato, los rizomas y las raíces, en donde tienen lugar tres procesos físicos: sedimentación, floculación y filtración

De acuerdo a Kadlec y Knight¹, la materia en suspensión sedimentable, principalmente de naturaleza orgánica, decanta por la acción de la gravedad, debido a la baja velocidad de circulación del agua, mientras en los espacios intersticiales del medio granular ocurre la floculación, en este proceso los sólidos de pequeño tamaño por su capacidad de adhesión forman partículas más grandes y finalmente decantan.

“El mayor porcentaje de eliminación de partículas en suspensión tiene lugar en la zona de entrada de los HAFSs”².

“Para los humedales horizontales casi toda la eliminación de la materia en suspensión ocurre entre 1/4 y 1/3 de la longitud del sistema.

¹ Kadlec, R.H. y Knight, R.L. (1996). Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Ratón, 893 pp.

² Salas R., Pidre B. y Sánchez F., Óp. cit. Cap. IV. p. 38

En los humedales verticales la retención de la materia en suspensión ocurre en los primeros centímetros del medio granular y va disminuyendo en forma vertical³.

La eliminación de la materia en suspensión, en los sistemas horizontales y en los verticales suele ser muy elevada. “Normalmente es de más del 90% produciendo efluentes con concentraciones menores de 20 mg/l de forma sistemática”⁴

4.4.2. Eliminación de materia orgánica

Muchos procesos físicos, químicos y biológicos participan de forma simultánea en la eliminación de la materia orgánica en los humedales artificiales sub-superficiales.

La materia orgánica particulada o materia en suspensión, es retenida por filtración en el sustrato. Mediante la fragmentación abiótica la materia retenida se descompone en partículas de menor tamaño, mientras las bacterias heterótrofas aeróbicas y fermentativas facultativas producen las enzimas extracelulares que se encargarán de la hidrólisis de las partículas fragmentadas. El resultado de la hidrólisis es un sustrato sencillo como, glucosa, aminoácidos, etc. Este sustrato ahora puede ser asimilado por las bacterias sulfato-reductoras, metanogénicas y heterótrofas aeróbicas. La materia orgánica disuelta puede ser asimilada directamente sin la necesidad de la hidrólisis previa.

“Se debe tener en cuenta que las sustancias disueltas pueden ser retenidas por adsorción, ya sea en la materia orgánica o en el sustrato, finalmente estas sustancias pueden permanecer allí, ser re-adsorbidas o degradadas por microorganismos”⁵.

³ García S. y Corzo H., Óp. cit. p.18

⁴ Ibíd., p. 18

⁵ Ibíd., p.19

En los humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal la eliminación de la materia orgánica sucede en los primeros metros, principalmente por procesos anaerobios, ya que está comprobado que en gran parte del lecho filtrante de estos humedales hay ausencia de oxígeno, debido a que las raíces no pueden producir suficiente para todo el confinamiento, y aunque se den procesos aerobios y anaerobios, la degradación de mayor importancia es la de tipo anaerobia. En ausencia de oxígeno, las bacterias heterótrofas degradan la materia orgánica, utilizando el nitrato como aceptor de electrones, este proceso se conoce como desnitrificación, eliminando rápidamente el nitrato formado. Otro de los fenómenos que ocurren bajo estas condiciones, es el crecimiento de las bacterias fermentativas facultativas que producen ácidos grasos como el acético y el láctico, alcoholes como el etanol y gases como el H₂. Estos compuestos representan sustratos para las bacterias sulfato-reductoras y metanogénicas. “La sulfato-reducción es una vía muy importante de degradación de la materia orgánica en sistemas horizontales”⁶. “Se ha observado que en los humedales horizontales las bacterias sulfato-reductoras y las metanogénicas pueden competir por el sustrato, y en presencia de sulfato y alta carga orgánica las bacterias sulfato-reductoras crecen con más éxito”⁷.

En los humedales verticales, la presencia de oxígeno en todo el lecho inhibe por completo las reacciones de tipo anaeróbicas.

Existen dos factores muy importantes que afectan tanto el mecanismo de degradación, como los rendimientos de eliminación: la carga orgánica y la profundidad del agua. A medida que aumentan los factores que favorecen las condiciones anaeróbicas disminuye la eficiencia, por esto los humedales de flujo vertical alcanzan mejores rendimientos de eliminación, ya que en estos prevalecen las condiciones aerobias.

⁶ Aguirre, P., Ojeda, E., García, J., Barragán, J., y Mujeriego., R. 2005. Effect of water depth on the removal of organic matter in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *J. Environ. Sci. Health.* 40, p. 1457-1466.

⁷ Baptista, J.D.C., Donnelly, T., Rayne, D. y Davenport., R.J. 2003. Microbial mechanisms of carbon removal in subsurface flow wetlands. *Wat. Sci. Tech.* 48 (5), p.127-134.

Sin embargo, si hay un buen diseño y una adecuada construcción y explotación, ambos sistemas horizontales y verticales, alcanzan buenos porcentajes de eliminación, tanto para la DQO, como para la DBO, entre el 70 y 90%, es decir, “efluentes con concentraciones de DQO menores a 60 mg/l y DBO menores a los 20 mg/l”⁸.

4.4.3. Eliminación de nitrógeno

Las aguas residuales urbanas están cargadas de nitrógeno, generalmente en forma de amonio y nitrógeno orgánico. La eliminación de este nutriente implementando la tecnología de humedales sub-superficiales, puede ocurrir mediante varios procesos, dentro de los que cabe resaltar: eliminación por nitrificación / des-nitrificación, adsorción del amonio o asimilación por parte de las plantas, aunque existen algunos otros mecanismos como la volatilización del amonio y la asimilación microbiana.

Para la eliminación del nitrógeno por nitrificación / des-nitrificación se recomienda utilizar combinaciones entre los humedales de flujo sub-superficial horizontal y vertical.

De acuerdo a la bibliografía, los sistemas verticales presentan altas concentraciones de oxígeno en el lecho, esto favorece los procesos de nitrificación, donde las bacterias autótrofas aerobias aprovechan la capacidad reductora de los nutrientes y forman nitratos. Dadas las condiciones del lecho de los sistemas horizontales se puede deducir que la nitrificación no es un proceso significativo, pero la des-nitrificación sí. En los humedales horizontales, las bacterias heterótrofas toman el nitrato formado y lo transforman en nitrógeno gas. De esta forma los dos sistemas se complementan.

⁸ García S. y Corzo H., Óp. cit. p.20

Por otra parte, el amonio entrante a los humedales sub-superficiales puede ser retenido por adsorción, según Kadlec y colaboradores⁹, este es un proceso inestable y variable, ya que el amonio puede regresar al agua si las condiciones que lo estabilizan cambian.

El amonio o el nitrato también pueden ser asimilados por las plantas. Para las aguas residuales de tipo medio se alcanza hasta un 20% de eliminación por medio de este mecanismo; la eliminación del agua se logra con la incorporación del nitrógeno a la biomasa

4.4.4. Eliminación de Fósforo

La eliminación del fósforo es un proceso complejo. “En general no se suele eliminar más del 10-20%, y sin haber grandes diferencias entre sistemas horizontales y verticales”¹⁰.

Los mecanismos de eliminación del fósforo pueden ser biótico, que incluyen la asimilación por parte de las plantas y los microorganismos, o abióticos, principalmente la adsorción por el medio granular.

En los humedales sub-superficiales el medio granular tiene alta capacidad de adsorción, pero a medida que el tiempo transcurre disminuye, hasta que se tiene que cambiar el sustrato filtrante.

“La eliminación de fósforo en los sistemas humedales puede alcanzarse por precipitación al adicionar sales de aluminio”¹¹

⁹ Kadlec, R.H., Tanner, C.C., Hally, V.M. and Gibbs, M.M. (2005). Nitrogen spiraling in subsurface-flow constructed wetlands: Implications for treatment response. *Ecol. Eng.*,25,365-380.

¹⁰ García S. y Corzo H., Óp. cit. p.22

¹¹ Arias, C.A. y Brix, H. (2005). Phosphorus removal in constructed wetlands: can suitable alternative media be identified? *Wat. Sci. Tech.* 51 (9), p. 275-282.

4.4.5. Eliminación de patógenos

La eliminación de los organismos patógenos es un proceso muy complejo, que depende de tres procesos que tienen lugar en el sustrato: “La filtración, la adsorción y la depredación”¹².

Según García y colaboradores¹³, en sistemas horizontales y verticales existe una relación directamente proporcional entre la eliminación de patógenos y el tiempo de retención e inversamente proporcional al tamaño de la grava, es decir, a mayor tiempo de permanencia del agua en el sustrato y menor tamaño de la grava mayor es la eliminación de estos organismos. La evaluación de los sistemas en cuanto a eliminación de organismos patógenos se realiza en base al estudio de microorganismos indicadores de contaminación fecal, como los coliformes fecales. “El grado de eliminación obtenido en sistemas horizontales y verticales es similar y oscila entre 1 y 2 unidades logarítmicas/100 ml aproximadamente para todos los indicadores”^{14/15}. Para obtener un efluente con buena calidad sanitaria se recomienda combinar los humedales sub-superficiales con sistemas de lagunaje o humedales superficiales que favorezcan la desinfección.

4.4.6. Eliminación de otros contaminantes

Con respecto a la eliminación de contaminantes como metales pesados, productos farmacéuticos, de uso personal y de limpieza, implementando estas tecnologías aun está en estudio.

¹² Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. y Haberl, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing, p. 155.

¹³ García, J., Vivar J., Aromir M. y Mujeriego R. (2003). Role of hydraulic retention time and granular médium in microbial removal of indicator in tertiary treatment reed beds. *Wat. Res.*, 37, 2645-2653.

¹⁴ Rivera, F., Warren, A., Ramírez, E., Decamp, O., Bonilla, P., Gallegos, E., Calderón, A. y Sánchez, J.T. (1995). Removal of pathogens from wastewaters by the root zone method (RZM). *Wat. Sci. Tech.*, 32 (3), p. 211-218.

¹⁵ Ottová, V., Balcarová, J. y Vymazal, J. (1997). Microbial Characteristics of Constructed Wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 35 (5), p. 117-123.

4.5. Ventajas e inconvenientes de los HAFSs

Los humedales artificiales de flujo sub-superficial (horizontal y vertical), al igual que cualquier sistema de depuración de aguas residuales, presentan ventajas e inconvenientes.

4.5.1. ventajas

- Fácil explotación y mantenimiento. Las labores de sostenimiento se limitan a la recolección de los residuos del pre-tratamiento y tratamiento primario, y a la poda y recolección de la vegetación una vez seca.
- Mínimo consumo energético, siempre y cuando la alimentación del sistema se realice por gravedad.
- Tolerancia a los caudales pico y a las altas cargas orgánicas, debido los elevados tiempos de retención que estos manejan.
- Simplificación de la gestión de lodos generados. Al realizar las purgas de los tratamientos primarios tras largos periodos de tiempo.
- Aprovechamiento de la biomasa vegetal generada (ornamentación, alimentación animal).
- Prescinden de equipos mecánicos que son susceptibles de averías.
- Mínima producción de olores, debido a la circulación subterránea del agua residual.
- Restauración y mejora del paisaje.
- Perfecta integración ambiental.

4.5.2. Inconvenientes

- Requieren de grandes superficies, lo que incrementa los costes de construcción.
- Larga puesta en marcha. Requiere de meses o hasta un año para ver el sistema en operación.
- Presentan riesgos de colmatación del sustrato, ya sea porque recibe vertidos anómalos con elevadas concentraciones de sólidos en suspensión o grasas.
- Presentan pocas posibilidades de actuación y control ante posibles modificaciones de las condiciones operativas.
- Los rendimientos en cuanto a eliminación de nutrientes es bajo.

4.6. La problemática del sustrato de los HAFSsH

La eficiencia de los humedales sub-superficiales de flujo horizontal, depende de las condiciones del sustrato base donde ocurren los procesos físicos, químicos y biológicos para la depuración de las aguas residuales. Uno de los principales inconvenientes de los HAFSsH es la colmatación de este.

De acuerdo a Caselles Osorio¹, la cantidad de sólidos acumulados en el terreno tienen impacto en la eficiencia de HAFSsH, repercutiendo negativamente.

4.6.1. Sólidos acumulados

La acumulación de la materia orgánica particulada y disuelta en los poros del medio filtrante (arena o grava), ha sido estudiada extensivamente en los campos de la hidrología del agua subterránea y la geología. “La oclusión de los espacios porosos dentro de la matriz granular de los HAFSsH ocurre frecuentemente en la zona de entrada, donde, el crecimiento de los sólidos en suspensión y la biopelícula es mayor acumulándose y a atascando los espacios intersticiales entre los agregados de la grava”², es decir, la eliminación de la materia particulada, la orgánica disuelta y el material mineral ocurre cerca de la zona de entrada por sedimentación, adsorción y adhesión a la bio-película. En esta parte del humedal las raíces de las plantas y la bio-película microbiana crecen más rápidamente, debido a los influentes ricos en nutrientes y minerales.

¹ Caselles Osorio, Aracelly. 2007. Influence of the characteristics of the organic matter on the efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Barcelona: UPC.

² Hansen, A., Mimbela, L. E., Polka, R., and Zachritz, W. 2002. Unplugging the bed of sub-surface flow wetlands using H₂O₂. In: Wetlands and Remediation II. Proceeding of the second international conference on Wetlands and Remediation. 281 – 289. Editors: Karl W. Nehring and Susans E. Brauning. Batelle Press, Columbus, Ohio.

Platzer y Mauch³, como resultado de estos procesos químicos, físicos y biológicos se produce el bloqueo de los poros, ocasionando cambios perjudiciales en el comportamiento hidrodinámico del sistema, como reducción del tiempo de retención hidráulico, encharcamiento superficial de las aguas residuales, olores, presencia de insectos, y potencial reducción de la eficiencia del tratamiento. En el peor de los casos la vida útil del sistema de tratamiento puede reducir a un par de años.

Hoy en día existen muy pocos estudios cuantitativos acerca de los factores que contribuyen a estos problemas en los sistemas sub-superficiales, en la modalidad de flujo horizontal.

4.6 2. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es la propiedad del medio poroso que indica la movilidad del agua en el sustrato. También puede definirse como la función específica de la matriz del suelo y de las propiedades del fluido contenido en él. Depende del grado de saturación del mismo.

La medición y la estimación de este parámetro son de difícil desarrollo, debido a la gran incertidumbre tanto en los valores reales como en los modelos teóricos.


La conductividad está directamente relacionada con la capacidad de infiltración del sustrato. Algunos factores que influyen a la infiltración son:

- Cubierta vegetal.
- características hidráulicas del medio filtrante.
- Estado de humedad del suelo.
- Intensidad de lluvia.
- Calidad del influente.
- Formación de costras sub-superficiales.

³ Platzer, Ch. And Mauch, K. 1997. Soil clogging in vertical flow reed beds – mechanisms, parameters, consequences and... ..solutions?. Wat. Sci. Tech. 35(5), 175-181.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

TABLA 1. Características de las aguas residuales tratadas a lo largo del estudio.

 Centa	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5
Caudal (m ³ /d)	38,3	36,9	37,3	36,0	40,6
SS (mg/l)	134	97	125	105	101
DBO ₅ (mg/l)	275	273	252	140	196
DQO (mg/l)	447	450	475	466	399
NH ₄ (mg/l)	33,8	31,2	42,3	54,0	43,9
PO ₄ (mg/l)	7,85	5,82	6,64	6,76	5,03
Pt (mg/l)	10,1	7,1	8,5	9,1	6,1
pH	6,9	7,0	7,5	7,5	7,6
Temperatura (°C)	24	21	17	14	12
Conductividad (μS/cm)	1295	1236	1123	1166	1387

*Nota: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

TABLA 2. Carga orgánica mensual del influente de cada humedal.



 Centa	CARGA ORGÁNICA DEL INFLUENTE DE HUMEDALES				
	CO H ₁ (g DBO ₅ /m ² *d)	CO H ₂ (g DBO ₅ /m ² *d)	CO H ₃ (g DBO ₅ /m ² *d)	CO H ₅ (g DBO ₅ /m ² *d)	CO H ₆ (g DBO ₅ /m ² *d)
Septiembre	7,5	9,9	13,0	1,6	1,0
Octubre	9,8	12,9	17,0	1,2	1,3
Noviembre	9,0	11,8	15,5	2,0	1,4
Diciembre	8,7	11,3	15,0	1,5	1,6
Enero	19,2	14,7	25,4	3,0	3,7


TABLA 3. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del influente.

									PUNTO DE MUESTREO:		INFLUENTE	
									SEMANAS:		[1 - 19]	
N-NH ₄ (mg N/l)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	DQO (mg O ₂ /l)	PO ₄ (mg P/l)	P _t (mg/l)	Nitratos	NTK	SST (mg/l)	pH	Conductividad (μS/cm)	T (°C)	OD (mg/l)	E-coli
25,7	410	659	7,14	10,9	< 1,0	-	424	7,9	1603	26	< 0,5	470.000.000
28,7	290	574	7,15	8,8	< 1,0	63,0	98	8,1	1573	26	1,4	-
43,4	600	805	6,80	12,6	< 1,0	73,5	276	7,5	1573	25	2,0	200.000.000
46,2	440	634	7,06	9,8	< 1,0	-	240	7,3	1500	25	2,0	-
48,0	420	625	7,10	9,6	< 1,0	-	218	8,0	1539	24	1,9	390.000.000
61,6	520	730	8,24	11,0	< 1,0	81,0	280	8,0	1472	23	1,2	-
51,4	400	598	7,51	9,8	< 1,0	72,1	142	7,7	1165	23	< 0,5	30.000.000
52,8	500	635	7,40	10,0	< 1,0	58,8	226	8,1	1445	22	< 0,5	-
41,8	440	873	6,28	8,3	< 1,0	58,8	272	7,8	284	18	6,4	48.000.000
25,1	420	647	7,38	9,4	< 1,0	Analítica suspendida *	208	8,5	1470	20	< 0,5	-
55,4	440	634	7,53	9,7	< 1,0		178	8,1	1328	19	1,9	200.000.000
40,2	261	869	5,41	8,2	< 1,0		212	8,3	1239	18	3,2	-
52,4	480	959	6,58	9,6	1,2		236	8,2	1288	18	3,1	126.000.000
65,0	165	550	6,12	8,2	< 1,0		120	8,3	1207	16	0,5	-
33,4	104	346	4,00	6,1	10,8		116	8,0	1107	16	4,0	-
65,4	440	721	8,21	12,8	1,3		234	8,2	1269	15	3,5	-
-	520	808	-	-	< 1,0		344	8,2	1286	14	2,4	-
71,5	500	733	-	9,4	2		232	8,5	1383	15	5,0	-
53,0	360	410	-	-	1,5		126	8,1	1248	12	5,1	100.000.000

*Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

*Nota₂: La analítica de NTK fue suspendida por problemas técnicos.


TABLA 4. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del tanque Imhoff.

 <small>CENTRO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DEL AGUA</small>									PUNTO DE MUESTREO:		TANQUE
									SEMANAS:		IMHOFF
											[1 - 19]
N-NH ₄ (mg N/l)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	DQO (mg O ₂ /l)	PO ₄ (mg P/l)	P _t (mg/l)	Nitratos	NTK	SST (mg/l)	pH	Conductividad (μS/cm)	T (°C)	OD (mg/l)
35,1	260	433	7,30	9,4	< 1,0	-	124	7,2	1303	25	< 0,5
-	270	425	-	-	-	-	108	7,2	1280	25	< 0,6
32,4	300	508	8,40	10,7	< 1,0	74,2	173	6,8	1455	25	< 0,7
-	270	423	-	-	-	-	132	6,5	1143	24	0,5
31,5	72	369	5,60	6,9	< 1,0	-	74	6,9	1073	21	0,5
-	400	549	-	-	-	-	124	6,9	1368	22	< 0,5
30,9	340	425	6,04	7,3	< 1,0	65,1	96	7,2	1299	21	< 0,5
-	280	456	-	-	-	58,8	94	7,1	1205	22	0,5
30,8	250	472	5,65	6,6	< 1,0	44,1	90	7,1	1041	19	< 0,5
-	149	497	-	-	-	Analítica suspendida *	120	7,1	1157	17	0,5
34,5	320	535	7,50	9,5	< 1,0		130	7,2	1231	18	0,5
-	210	418	-	-	-		164	7,2	1044	16	0,5
61,6	330	455	6,77	9,3	< 1,0		120	7,1	1142	15	0,5
-	168	560	-	-	-		128	7,4	1253	13	< 0,5
-	100	333	-	-	-		76	7,4	1110	15	0,5
54,0	152	505	6,76	9,1	1,1		112	7,8	1136	13	0,8
43,9	119	395	5,16	6,4	2,65		106	7,6	1183	12	< 0,5
-	260	447	-	-	-		110	7,5	1580	13	0,5
43,8	210	355	4,91	5,9	< 1,0		86	7,7	1398	13	< 0,5

*Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

*Nota₂: La analítica de NTK fue suspendida por problemas técnicos.


TABLA 5. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsV H₁.

										PUNTO DE MUESTREO:		H ₁	
										SEMANAS:		[1 - 19]	
N-NH ₄ (mg N/l)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	DQO (mg O ₂ /l)	PO ₄ (mg P/l)	P _t (mg/l)	Nitratos	NTK	SST (mg/l)	pH	Conductividad (μS/cm)	T (°C)	OD (mg/l)	E-coli	
20,7	20	124	9,64	10,0	< 1,0	-	26	6,9	1191	25	1,3	4.600.000	
-	9	54	-	-	-	-	5	7,2	1319	25	0,6	-	
23,9	65	164	7,10	7,4	3,1	27,3	33	6,7	1219	24	1,3	2.700.000	
-	28	91	-	-	-	-	21	6,0	1070	24	0,6	-	
5,8	6	35	1,67	2,0	5,3	-	6	6,2	1113	21	2,6	800.000	
-	18	60	-	-	-	-	11	7,0	1182	20	0,6	50.000	
12,8	14	91	8,03	8,2	2,7	18,0	14	6,5	901	20	< 0,5	-	
-	17	53	-	-	-	17,5	9	6,8	1068	21	1,1	-	
17,6	30	71	7,70	7,7	1,3	21,7	14	6,9	1107	20	0,8	20.000.000	
-	28	78	-	-	-	-	23	7,0	1025	17	0,9	-	
26,3	37	122	10,60	10,9	< 1,0	-	23	7,0	1109	17	1,0	14.000.000	
-	33	110	-	-	-	-	30	6,9	1088	16	0,8	-	
29,2	35	116	8,54	9,3	< 1,0	-	21	7,0	1040	15	0,8	6.700.000	
-	21	79	-	-	-	-	8	7,4	1215	12	1,4	-	
-	30	101	-	-	-	-	7	7,2	1207	15	0,7	-	
27,1	28	106	6,05	7,0	8,5	-	17	7,0	1118	13	0,9	3.200.000	
29,0	55	184	6,19	6,4	2,5	-	20	6,8	1076	11	1,1	10.000.000	
-	50	144	-	-	-	-	54	7,1	1173	12	0,5	-	
29,5	30	92	6,14	6,2	3,5	-	6	7,1	1345	13	1,3	-	

*Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

*Nota₂: La analítica de NTK fue suspendida por problemas técnicos.


TABLA 6. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsH H₂.

									PUNTO DE MUESTREO:		H ₂	
									SEMANAS:		[1 - 19]	
N-NH ₄ (mg N/l)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	DQO (mg O ₂ /l)	PO ₄ (mg P/l)	P _t (mg/l)	Nitratos	NTK	SST (mg/l)	pH	Conductividad (µS/cm)	T (°C)	OD (mg/l)	E-coli
34,9	24	81	13,83	14,4	< 1,0	-	18	7,0	1369	26	2,0	6.400.000
-	20	121	-	-	-	-	15	7,5	1401	25	2,1	-
32,4	28	82	11,20	11,2	< 1,0	48,3	10	6,9	1251	24	2,0	1.520.000
-	21	71	-	-	-	-	7	6,8	1332	22	2,4	-
31,1	23	65	11,16	11,8	< 1,0	-	12	7,1	634	20	2,4	8.800.000
-	24	85	-	-	-	-	14	7,2	1170	21	2,8	4.000.000
30,9	70	195	8,30	8,3	< 1,0	55,3	5	7,0	1368	20	< 0,5	-
-	19	83	-	-	-	-	< 5	7,2	1110	20	1,0	-
30,7	26	71	8,20	8,2	< 1,0	42,7	8	7,1	1064	19	< 0,5	2.000.000
-	4	96	-	-	-	-	14	7,2	998	15	1,1	-
34,2	31	104	12,30	12,9	< 1,0	-	20	7,2	1161	15	1,6	3.000.000
-	55	130	-	-	-	-	28	7,1	1220	13	0,8	-
29,2	50	134	9,57	10,2	< 1,0	-	12	7,2	1023	13	1,5	3.500.000
-	54	102	-	-	-	-	15	7,4	1075	9	2,8	-
-	44	148	-	-	-	-	17	7,0	1176	13	0,5	-
42,4	35	80	7,51	8,2	< 1,0	-	7	7,1	830	9	< 0,5	3.600.000
47,9	105	148	6,24	6,5	1,2	-	15	7,0	1182	9	1,6	5.000.000
-	100	190	-	-	-	-	10	7,3	1216	11	1,2	-
54,2	65	135	6,30	6,3	< 1,0	-	10	6,0	1194	11	1,7	3.000.000

*Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

*Nota₂: La analítica de NTK fue suspendida por problemas técnicos.


TABLA 7. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsV 2 (H₃).

									PUNTO DE MUESTREO:		H ₃	
									SEMANAS:		[1 - 19]	
N-NH ₄ (mg N/l)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	DQO (mg O ₂ /l)	PO ₄ (mg P/l)	P _t (mg/l)	Nitratos	NTK	SST (mg/l)	pH	Conductividad (μS/cm)	T (°C)	OD (mg/l)	E-coli
25,0	9	63	8,80	8,4	1,0	-	9	6,7	1242	24	< 0,5	114.000.000
-	65	178	-	-	-	-	94	7,0	1357	26	< 0,5	-
24,2	32	95	8,00	8,0	1,3	25,9	16	7,1	1299	26	< 0,5	28.400.000
-	30	125	-	-	-	-	24	6,3	1143	24	1,3	-
7,7	5	32	4,30	4,3	6,6	-	10	6,8	986	22	2,1	4.100.000
-	36	107	-	-	-	-	46	7,4	1221	23	0,8	4.000.000
13,2	24	86	6,45	7,0	3,2	18,9	12	7,3	1114	22	1,3	-
-	16	59	-	-	-	18,9	20	7,0	1067	22	1,3	-
21,8	45	125	6,89	8,2	2,7	28,7	78	7,5	1031	21	< 0,5	10.000.000
-	55	123	-	-	-	-	59	7,2	1032	18	< 0,5	-
24,9	65	212	7,60	10,6	< 1,0	-	192	7,4	1075	16	1,8	3.000.000
-	45	121	-	-	-	-	22	7,1	1092	16	1,9	-
31,8	55	159	7,09	8,4	2,8	-	58	7,1	1076	16	< 0,5	25.000.000
-	26	92	-	-	-	-	12	7,5	1154	12	2,5	-
-	21	70	-	-	-	-	16	7,3	1163	16	1,5	-
30,9	30	141	6,56	8,5	8,1	-	51	7,1	1085	12	< 0,5	1.560.000
-	94	312	-	-	-	-	48	7,7	1218	-	-	-
25,5	36	120	5,59	5,9	7,3	-	20	7,0	1079	11	< 0,5	70.000.000
-	22	90	-	-	-	-	22	7,6	1231	13	< 0,5	-

*Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

*Nota₂: La analítica de NTK fue suspendida por problemas técnicos.


TABLA 8. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsH H₅.

									PUNTO DE MUESTREO:		H ₅	
									SEMANAS:		[1 - 19]	
N-NH ₄ (mg N/l)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	DQO (mg O ₂ /l)	PO ₄ (mg P/l)	P _t (mg/l)	Nitratos	NTK	SST (mg/l)	pH	Conductividad (μS/cm)	T (°C)	OD (mg/l)	E-coli
12,7	5	47	11,40	12,7	< 1,0	-	20	7,2	1277	22	0,7	210.000
-	7	< 30	-	-	-	-	< 5	7,4	1258	23	1,0	-
14,7	18	102	11,90	16,5	< 1,0	13,3	55	6,7	1191	21	1,6	1.020.000
-	12	65	-	-	-	-	16	6,6	1083	22	2,7	-
12,2	4	33	3,37	4,1	< 1,0	-	12	7,0	1093	20	1,2	59.000
-	7	34	-	-	-	-	11	7,1	1108	18	1,6	-
8,3	< 3	< 30	5,56	6,5	< 1,0	10,5	12	6,4	1536	20	0,5	-
13,0	6	45	5,72	5,8	< 1,0	14,0	7	7,0	1188	19	1,0	900.000
-	13	44	-	-	-	-	6	7,1	975	16	2,0	-
17,7	6	54	9,50	10,0	< 1,0	-	5	7,1	1027	15	0,7	1.500.000
-	8	46	-	-	-	-	< 5	7,1	1038	13	1,8	-
21,0	7	58	9,82	10,1	< 1,0	-	< 5	7,2	980	13	1,4	890.000
31,8	55	159	7,09	8,4	2,8	-	58	7,1	1076	16	< 0,5	25.000.000
-	13	50	-	-	-	-	< 5	7,3	1274	12	2,7	-
-	15	49	-	-	-	-	< 5	7,1	1014	14	0,8	-
25,8	6	53	3,64	4,0	1,2	-	< 5	7,5	1120	10	2,3	1.420.000
27,8	9	57	5,33	5,4	1,5	-	5	7,0	1022	10	1,4	2.000.000
-	8	54	-	-	-	-	5	7,4	1078	12	2,5	-
21,7	9	57	5,80	5,8	< 1,0	-	< 5	7,5	1371	12	2,2	200.000

*Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

*Nota₂: La analítica de NTK fue suspendida por problemas técnicos.

TABLA 9. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del HAFSsH H₆.

									PUNTO DE MUESTREO:		H ₆	
									SEMANAS:		[1 - 19]	
N-NH ₄ (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	P _t (mg/l)	Nitratos	NTK	SST (mg/l)	pH	Conductividad (µS/cm)	T (°C)	OD (mg/l)	E-coli
34,2	6	53	9,63	9,0	< 1,0	-	< 5	7,2	1292	25	2,3	40.000
-	5	43	-	-	-	-	< 5	7,7	1348	24	1,7	-
31,1	8	< 30	9,10	9,1	< 1,0	32,9	< 5	6,8	1161	23	2,1	140
-	10	33	-	-	-	-	< 5	6,9	1171	22	1,9	-
26,0	10	48	1,04	1,3	2,5	-	7	7,3	907	20	3,2	7.080
-	8	< 30	-	-	-	-	9	7,1	907	20	2,0	200.000
28,9	15	62	10,80	10,9	< 1,0	42,0	< 5	7,3	945	20	1,9	-
-	11	59	-	-	-	11,9	13	7,1	1050	20	1,2	-
-	< 3	68	-	-	-	-	10	7,2	1121	20	1,0	-
27,8	8	37	9,70	9,7	< 1,0	28,7	< 5	7,3	945	19	1,4	2.000
-	11	36	-	-	-	-	< 5	7,3	980	16	2,1	-
33,3	6	53	9,80	10,2	< 1,0	-	< 5	7,3	1046	16	2,7	1.400
-	7	< 30	-	-	-	-	< 5	7,3	1177	14	2,3	-
-	17	68	-	-	-	-	< 5	7,4	1111	12	2,4	-
49,6	23	64	8,48	9,6	< 1,0	-	< 5	7,4	1219	14	1,3	-
47,0	8	69	7,68	8,1	< 1,0	-	< 5	7,6	1082	13	2,2	740
-	17	76	-	-	2,3	-	< 5	7,0	1142	12	2,0	-
41,3	14	39	3,41	3,9	2,4	-	6	6,6	1060	12	2,3	-
44,3	6	44	-	-	6,2	-	3	7,4	1186	10	2,9	600

*Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

*Nota₂: La analítica de NTK fue suspendida por problemas técnicos.

GRÁFICO 1. Cumplimiento de la concentración de DBO₅ según la normativa española 91/271 de los HAFSsV H₁ y H₃ y el HAFSsH H₂.

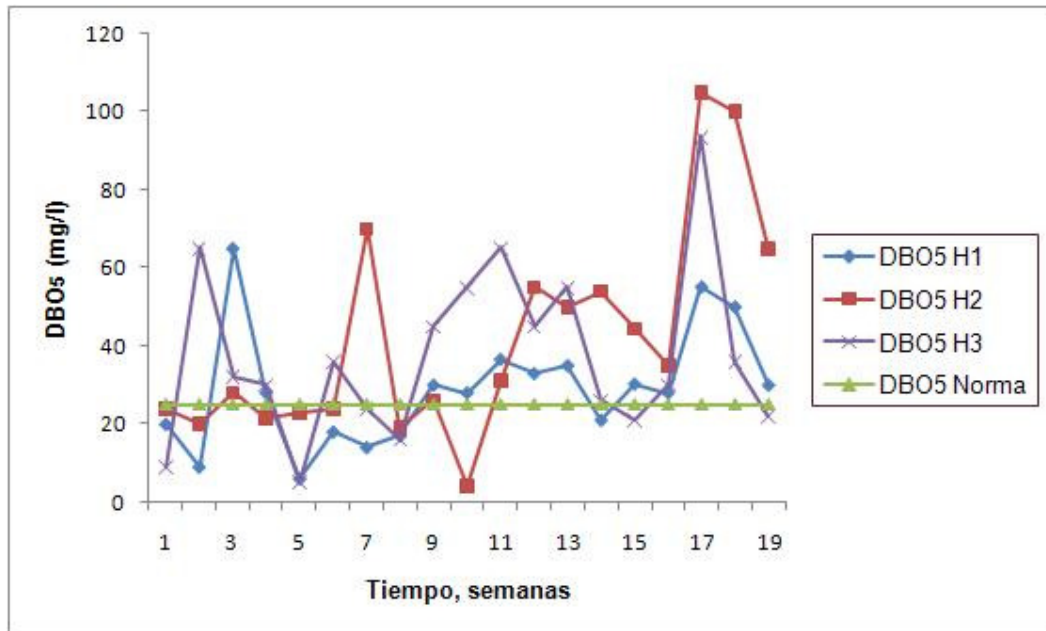


GRÁFICO 2. Cumplimiento de la concentración DBO₅ según la normativa española 91/271 de los HAFSsH H₅ y H₆.

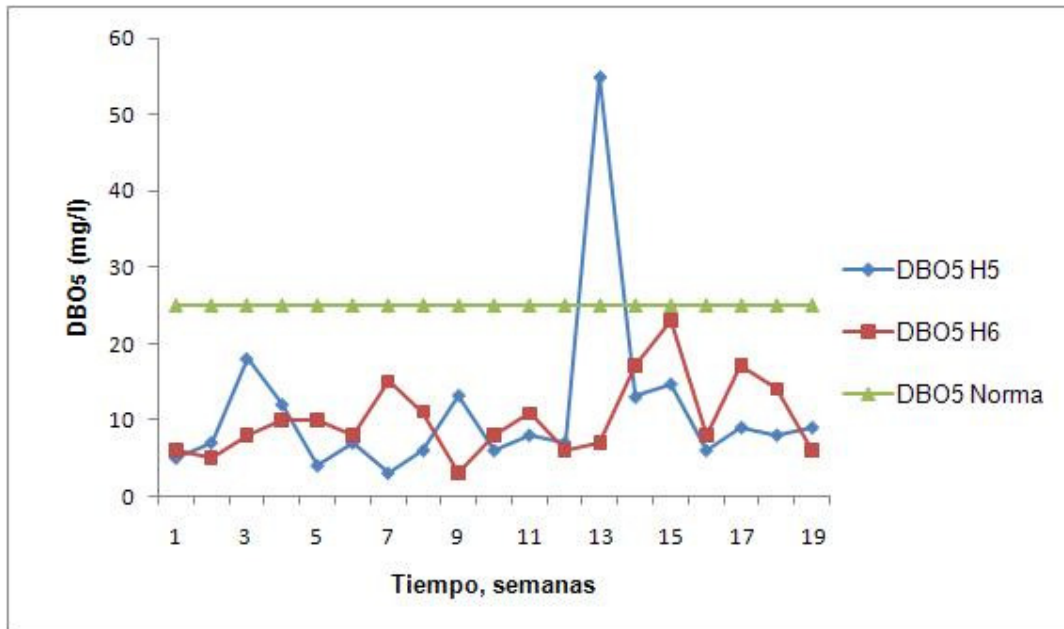


GRÁFICO 3. Cumplimiento de la concentración de DQO según la normativa española 91/271 de los HAFSsV H₁ y H₃ y el HAFSsH H₂.

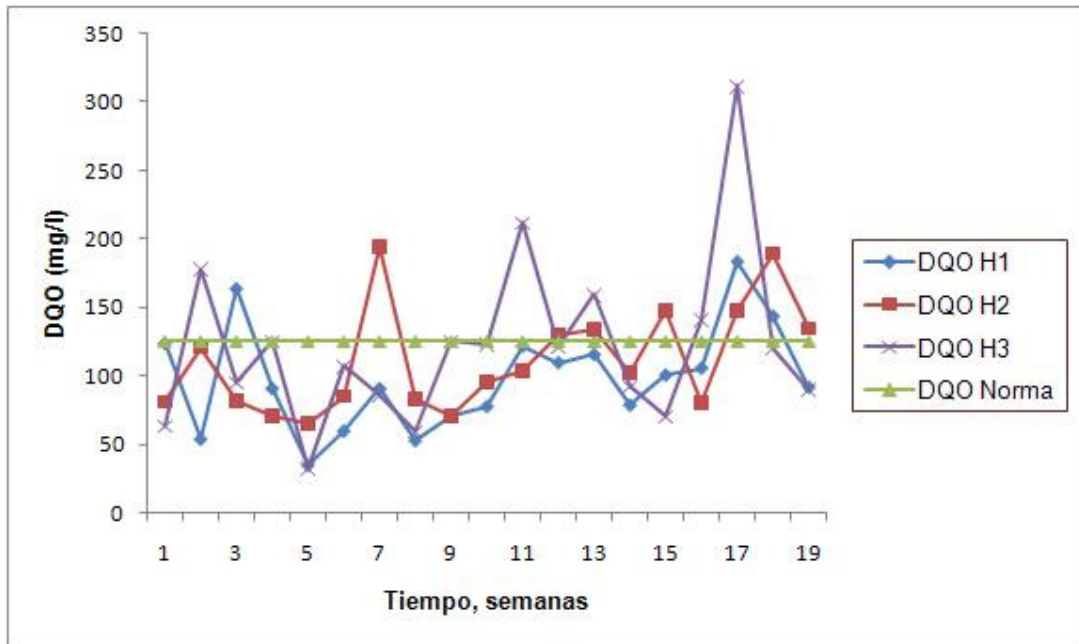


GRÁFICO 4. Cumplimiento de la concentración DQO según la normativa española 91/271 de los HAFSsH H₅ y H₆.

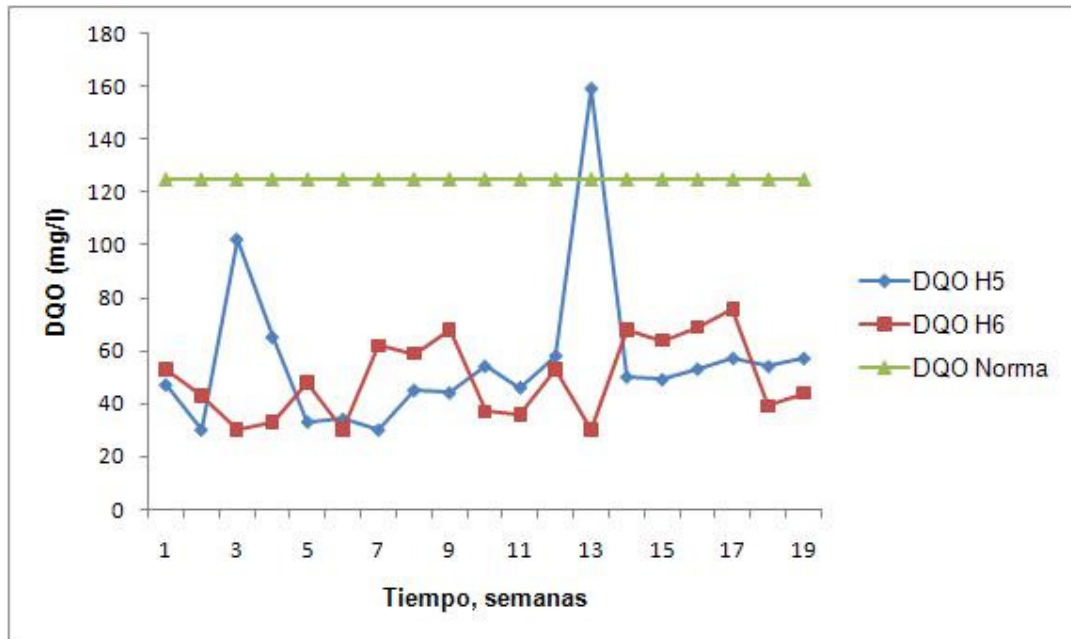


GRÁFICO 5. Cumplimiento de la concentración de SS según la normativa española 91/271 de los HAFSsV H₁ y H₃ y el HAFSsH H₂.

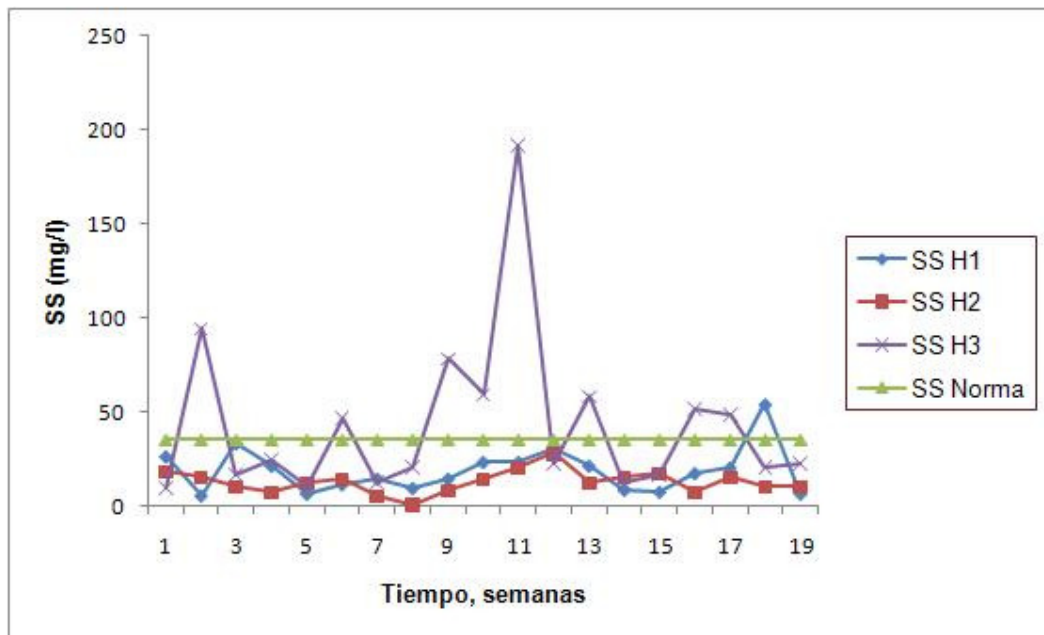


GRÁFICO 6. Cumplimiento de la concentración SS según la normativa española 91/271 de los HAFSsH H₅ y H₆.

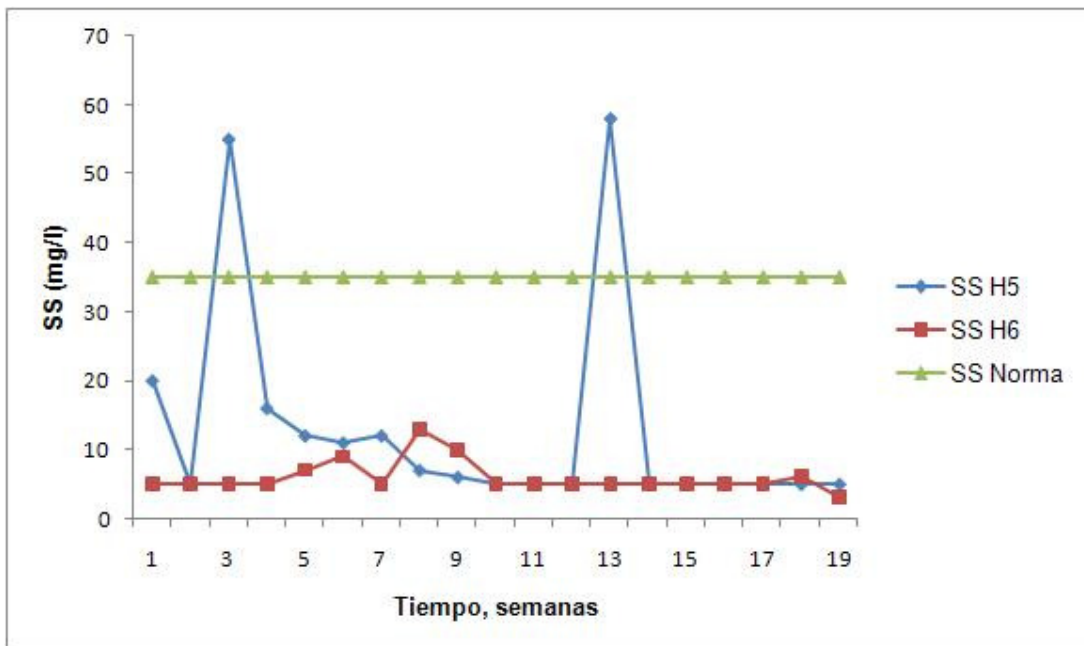


GRÁFICO 7. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de DBO₅ según la normativa española 91/271 de los HAFSsV H₁ y H₃ y el HAFSsV H₂.

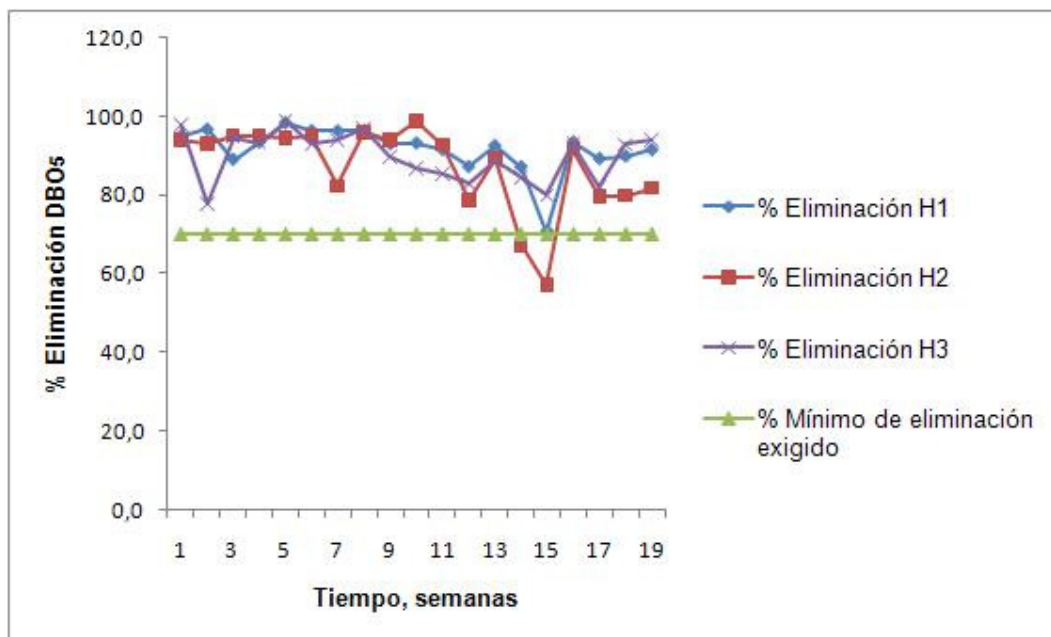


GRÁFICO 8. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de DBO₅ según la normativa española 91/271 de los HAFSsH H₅ y H₆.

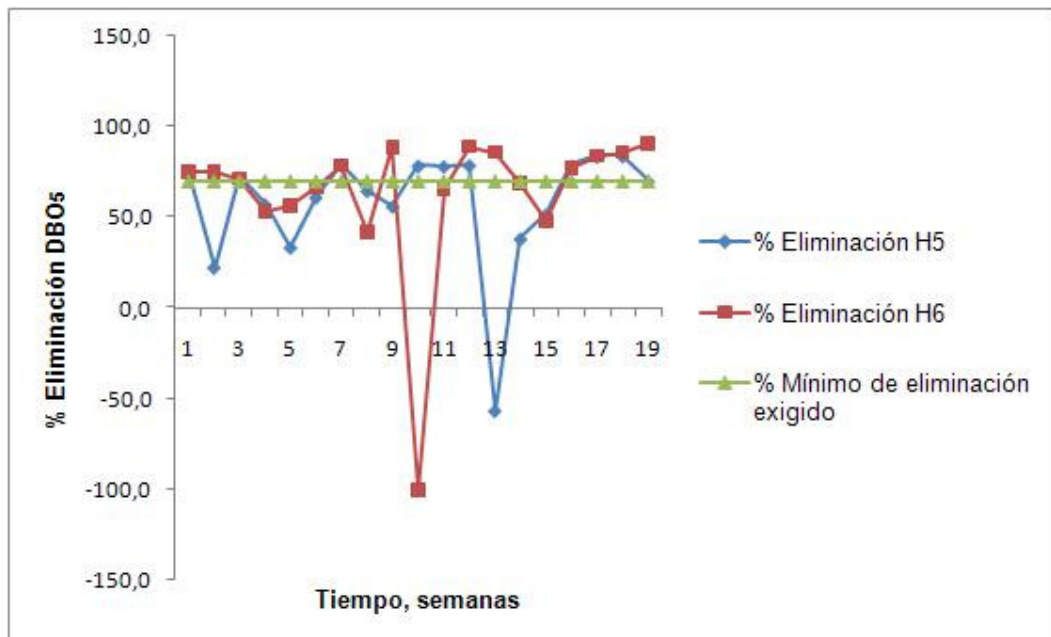


GRÁFICO 9. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de DQO según la normativa española 91/271 de los HAFSsV H₁ y H₃ y el HAFSsV H₂.

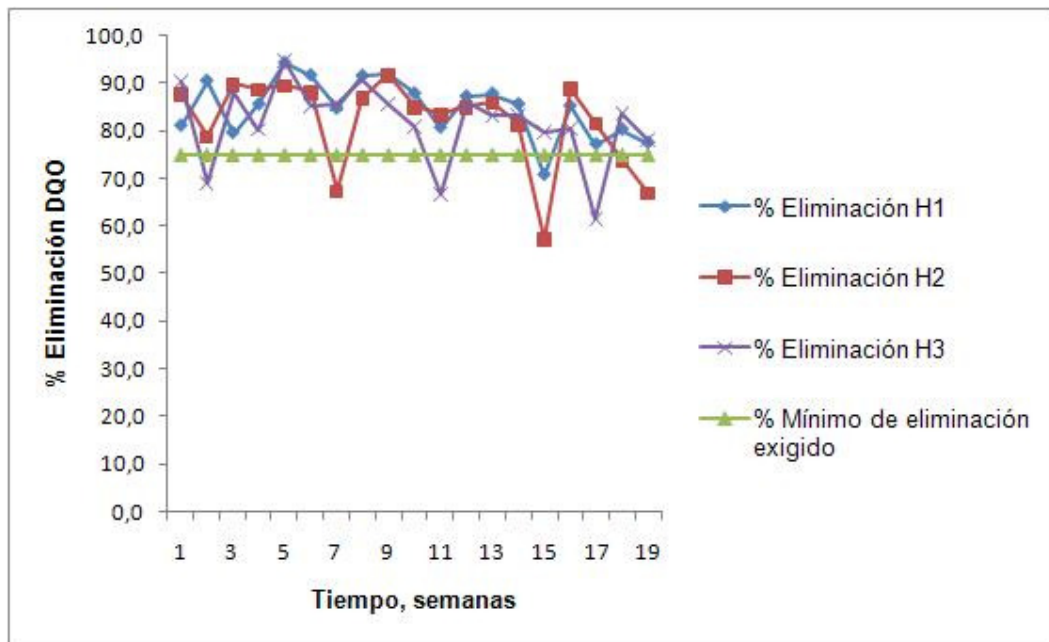


GRÁFICO 10. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de DQO según la normativa española 91/271 de los HAFSsH H₅ y H₆.

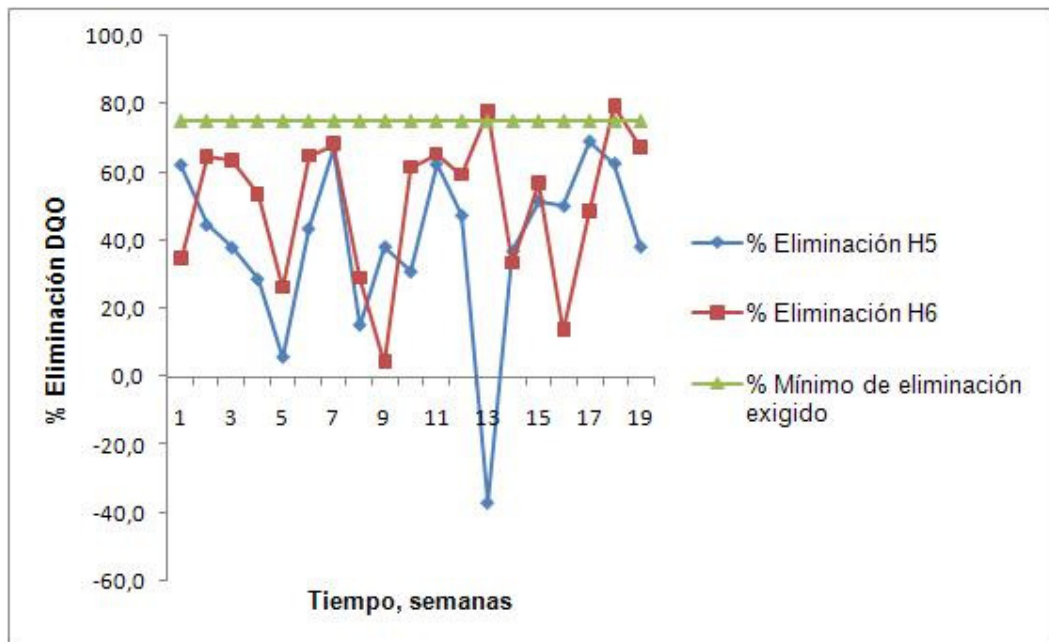


GRÁFICO 11. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de SS según la normativa española 91/271 de los HAFSsV H₁ y H₃ y el HAFSsV H₂.

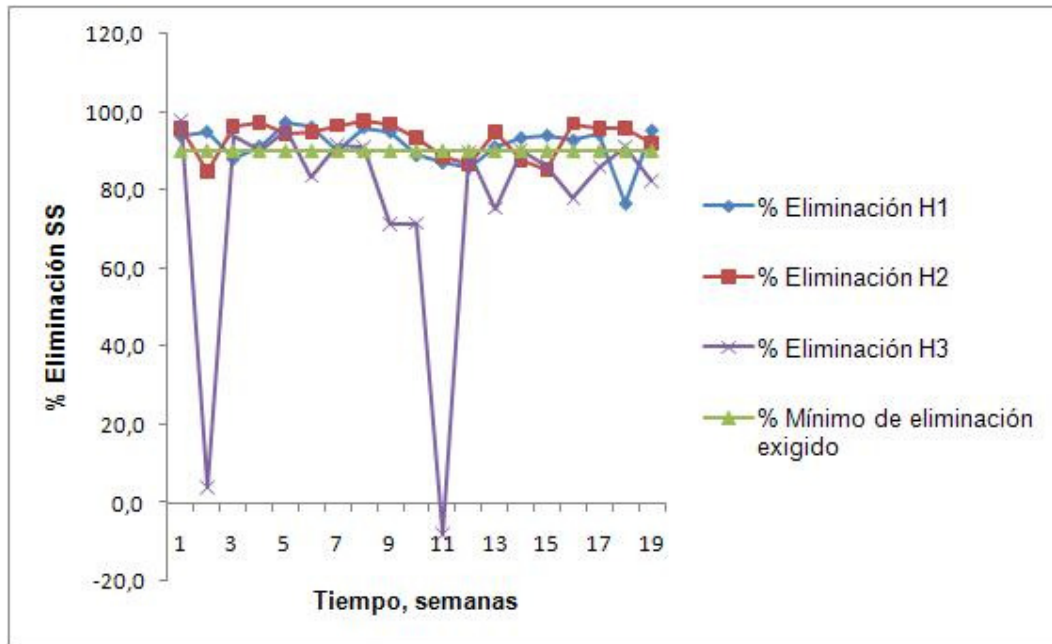


GRÁFICO 12. Cumplimiento del porcentaje de eliminación de SS según la normativa española 91/271 de los HAFSsH H₅ y H₆.

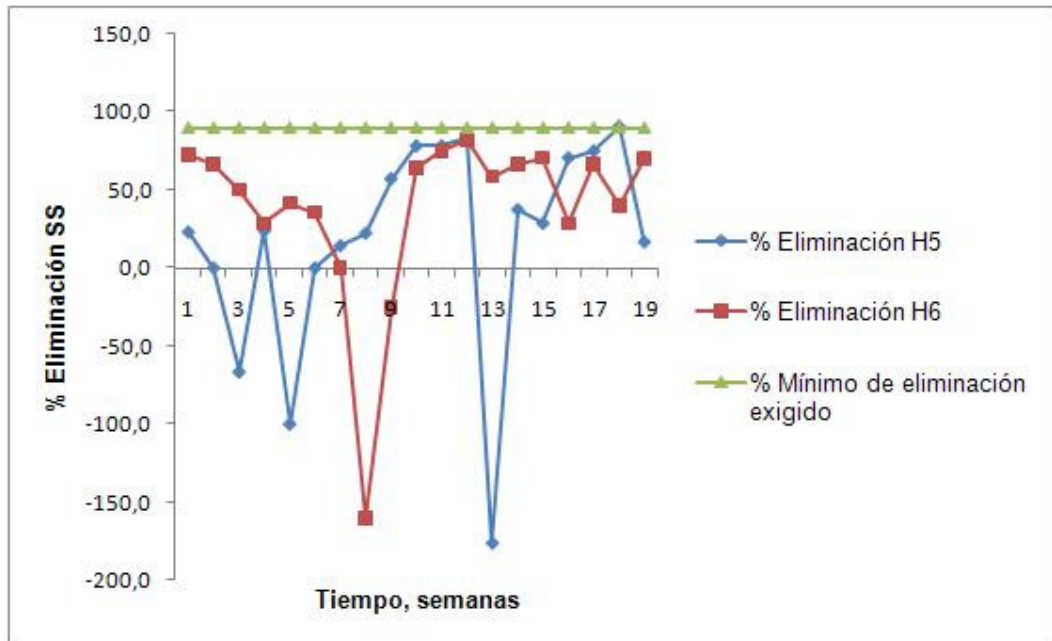




TABLA 10. Rendimiento mes 1 de los HAFSs.

						
PARÁMETROS	INFLUENTE	H ₁	H ₅	H ₂	H ₆	H ₃
SS						
Concentración (mg/l)	251	18	21	12	< 5	19
% Eliminación		92,8	-16,0 ★	95,2	66,7	92,6
DBO₅						
Concentración (mg/l)	432	26	9	24	8	23
% Eliminación		94,1	64,1	94,4	66,7	94,8
DQO						
Concentración (mg/l)	659	94	49	84	35	84
% Eliminación		85,8	47,2	87,3	58,3	87,3
NH₄⁺						
Concentración (mg /l)	38,4	16,8	13,2	32,8	30,4	20,5
% Eliminación		56,3	21,4	14,6	7,2	46,6
NTK						
Concentración (mg/l)	68,3	27,3	13,3	48,3	32,9	30,8
% Eliminación		60,0	51,3	29,2	31,9	54,9
PO₄⁻						
Concentración (mg/l)	7,05	6,14	8,89	12,06	6,59	7,03
% Eliminación		13,0	-44,9	-71,0	45,4	0,2
Pt						
Concentración (mg/l)	10,4	6,5	11,1	12,5	6,5	6,9
% Eliminación		37,6	-71,5	-20,3	48,2	33,4
E. coli						
Concentración (UFC)	353.333.333	2.700.000	429.667	5.573.333	15.740	48.833.333
% Eliminación		99	84	98	100	86

Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

Nota₂: Los % de eliminación de los valores acompañados con signo (<) fueron calculados con los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

TABLA 11. Rendimiento mes 2 de los HAFSs.




PARÁMETROS	INFLUENTE	H ₁	H ₅	H ₂	H ₆	H ₃
SS						
Concentración (mg/l)	230	12	10	7	8	39
% Eliminación		94,8	16,7	96,8	-7,6★	83,0
DBO₅						
Concentración (mg/l)	465	20	4	35	8	30
% Eliminación		95,8	78,1	92,5	75,8	93,5
DQO						
Concentración (mg/l)	709	69	< 30	109	45	94
% Eliminación		90,3	61,7	84,7	58,3	86,7
NH₄⁺						
Concentración (mg /l)	51,9	15,2	10,7	30,8	28,4	17,5
% Eliminación		70,7	29,9	40,7	8,0	66,3
NTK						
Concentración (mg/l)	67,7	19,1	12,3	49,0	27,5	22,2
% Eliminación		71,8	35,8	27,6	43,8	67,2
PO₄⁻						
Concentración (mg/l)	7,36	7,87	5,64	8,25	10,25	6,67
% Eliminación		-6,9	28,3	-12,1	-24,3	9,4
Pt						
Concentración (mg/l)	9,8	7,9	6,1	8,3	10,3	7,6
% Eliminación		18,7	22,7	15,6	-24,9	22,4
E. coli						
Concentración (UFC)	39.000.000	10.025.000	3.000.000	7.000.000	900.000	101.000
% Eliminación		74,3	70,1	82,1	87,1	99,7

Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

Nota₂: Los % de eliminación de los valores acompañados con signo (<) fueron calculados con los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

TABLA 12. Rendimiento mes 3 de los HAFSs.




PARÁMETROS	INFLUENTE	H ₁	H ₅	H ₂	H ₆	H ₃
SS						
Concentración (mg/l)	209	24	< 5	19	< 5	83
% Eliminación		88,4	84,5	91,1	93,2	60,3
DBO₅						
Concentración (mg/l)	447	32	7	36	7	55
% Eliminación		92,9	77,8	91,9	80,7	87,7
DQO						
Concentración (mg/l)	777	107	51	116	34	154
% Eliminación		86,3	52,6	85,1	70,9	80,2
NH₄⁺						
Concentración (mg/l)	43,3	27,8	19,4	31,7	37,9	28,4
% Eliminación		35,9	30,3	26,7	-19,4	34,5
PO₄⁻						
Concentración (mg/l)	6,72	9,57	9,66	10,93	10,86	7,35
% Eliminación		-42,4	-0,9	-62,6	0,7	-9,3
Pt						
Concentración (mg/l)	9,2	10,1	10,1	11,6	11,3	9,5
% Eliminación		-9,6	0,5	-25,4	2,4	-3,1
E. coli						
Concentración (UFC)	163.000.000	10.350.000	1.195.000	3.250.000	38.700	14.000.000
% Eliminación		93,7	88,5	98,0	98,8	91,4

Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

Nota₂: Los % de eliminación de los valores acompañados con signo (<) fueron calculados con los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

TABLA 13. Rendimiento mes 4 de los HAFSs.




PARÁMETROS	INFLUENTE	H ₁	H ₅	H ₂	H ₆	H ₃
SS						
Concentración (mg/l)	204	11	< 5	13	< 5	26
% Eliminación		94,8	71,9	93,6	71,2	87,1
DBO₅						
Concentración (mg/l)	480	25	10	45	16	28
% Eliminación		94,9	61,2	90,7	63,5	94,2
DQO						
Concentración (mg/l)	606	95	51	110	69	101
% Eliminación		84,3	46,9	81,9	37,0	83,3
NH₄⁺						
Concentración (mg/l)	54,6	27,1	25,8	42,4	48,3	30,9
% Eliminación		50,4	4,8	22,3	-13,9	43,4
PO₄⁻						
Concentración (mg/l)	6,11	6,05	3,64	7,51	8,08	6,56
% Eliminación		0,9	39,9	-22,9	-7,6	-7,4
Pt						
Concentración (mg/l)	9,0	7,0	4,0	8,2	8,8	8,5
% Eliminación		21,9	42,5	9,4	-8,2	5,3
E. coli						
Concentración (UFC)	-	3.200.000	1.420.000	3.600.000	740	1.560.000
% Eliminación		-	55,6	-	100,0	-

Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

Nota₂: Los % de eliminación de los valores acompañados con signo (<) fueron calculados con los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

TABLA 14. Rendimiento mes 5 de los HAFSs.




PARÁMETROS	INFLUENTE	H ₁	H ₅	H ₂	H ₆	H ₃
SS						
Concentración (mg/l)	179	27	5	12	< 5	30
% Eliminación		84,9	71,9	93,5	71,2	83,2
DBO₅						
Concentración (mg/l)	430	45	9	90	12	51
% Eliminación		89,5	80,7	79,1	86,3	88,2
DQO						
Concentración (mg/l)	572	140	56	158	53	174
% Eliminación		75,5	60,0	72,4	66,4	69,6
NH₄⁺						
Concentración (mg/l)	62,3	29,3	24,8	51,1	42,8	25,5
% Eliminación		53,0	15,4	18,1	16,2	59,1
PO₄⁻						
Concentración (mg/l)	9,40	6,20	5,56	6,30	3,41	5,59
% Eliminación		34,0	10,3	33,0	45,9	40,5
Pt						
Concentración (mg/l)	5,5	6,3	5,6	6,4	3,9	5,9
% Eliminación		-14,5	11,1	-16,4	39,1	-7,3
E. coli						
Concentración (UFC)	100.000.000	10.000.000	1.100.000	4.000.000	600	70.000.000
% Eliminación		90,0	89,0	96,0	100,0	30,0

Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

Nota₂: Los % de eliminación de los valores acompañados con signo (<) fueron calculados con los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.


TABLA 15. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos de combinación I.

									PUNTO DE MUESTREO:		COMBINACIÓN I	
									SEMANAS:		[1 - 19]	
N-NH ₄ (mg N/l)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	DQO (mg O ₂ /l)	PO ₄ (mg P/l)	P _t (mg/l)	Nitratos	NTK	SST (mg/l)	pH	Conductividad (μS/cm)	T (°C)	OD (mg/l)	E-coli
12,7	5	47	11,40	12,7	< 1,0		20	7,2	1277	22	0,7	210.000
-	7	< 30	-	-	-	-	< 5	7,4	1258	23	1,0	-
14,7	18	102	11,90	16,5	< 1,0	13,3	55	6,7	1191	21	1,6	1.020.000
-	12	65	-	-	-	-	16	6,6	1083	22	2,7	-
12,2	4	33	3,37	4,1	< 1,0	-	12	7,0	1093	20	1,2	59.000
-	7	34	-	-	-	-	11	7,1	1108	18	1,6	-
8,3	< 3	< 30	5,56	6,5	< 1,0	10,5	12	6,4	1536	20	0,5	-
13,0	6	45	5,72	5,8	< 1,0	14,0	7	7,0	1188	19	1,0	900.000
-	13	44	-	-	-	-	6	7,1	975	16	2,0	-
17,7	6	54	9,50	10,0	< 1,0	Analítica suspendida *	5	7,1	1027	15	0,7	1.500.000
-	8	46	-	-	-		< 5	7,1	1038	13	1,8	-
21,0	7	58	9,82	10,1	< 1,0		< 5	7,2	980	13	1,4	890.000
31,8	55	159	7,09	8,4	2,8		58	7,1	1076	16	< 0,5	25.000.000
-	13	50	-	-	-		< 5	7,3	1274	12	2,7	-
-	15	49	-	-	-		< 5	7,1	1014	14	0,8	-
25,8	6	53	3,64	4,0	1,2		< 5	7,5	1120	10	2,3	1.420.000
27,8	9	57	5,33	5,4	1,5		5	7,0	1022	10	1,4	2.000.000
-	8	54	-	-	-		5	7,4	1078	12	2,5	-
21,7	9	57	5,80	5,8	< 1,0		< 5	7,5	1371	12	2,2	200.000

*Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

*Nota₂: La analítica de NTK fue suspendida por problemas técnicos.

TABLA 16. Seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos de combinación II.

									PUNTO DE MUESTREO:		COMBINACIÓN II	
									SEMANAS:		[1 - 19]	
N-NH ₄ (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	P _t (mg/l)	Nitratos	NTK	SST (mg/l)	pH	Conductividad (μS/cm)	T (°C)	OD (mg/l)	E-coli
34,2	6	53	9,63	9,0	< 1,0	-	< 5	7,2	1292	25	2,3	40.000
-	5	43	-	-	-	-	< 5	7,7	1348	24	1,7	-
31,1	8	< 30	9,10	9,1	< 1,0	32,9	< 5	6,8	1161	23	2,1	140
-	10	33	-	-	-	-	< 5	6,9	1171	22	1,9	-
26,0	10	48	1,04	1,3	2,5	-	7	7,3	907	20	3,2	7.080
-	8	< 30	-	-	-	-	9	7,1	907	20	2,0	200.000
28,9	15	62	10,80	10,9	< 1,0	42,0	< 5	7,3	945	20	1,9	-
-	11	59	-	-	-	11,9	13	7,1	1050	20	1,2	-
-	< 3	68	-	-	-	-	10	7,2	1121	20	1,0	-
27,8	8	37	9,70	9,7	< 1,0	28,7	< 5	7,3	945	19	1,4	2.000
-	11	36	-	-	-	-	< 5	7,3	980	16	2,1	-
33,3	6	53	9,80	10,2	< 1,0	-	< 5	7,3	1046	16	2,7	1.400
-	7	< 30	-	-	-	-	< 5	7,3	1177	14	2,3	-
-	17	68	-	-	-	-	< 5	7,4	1111	12	2,4	-
49,6	23	64	8,48	9,6	< 1,0	-	< 5	7,4	1219	14	1,3	-
47,0	8	69	7,68	8,1	< 1,0	-	< 5	7,6	1082	13	2,2	740
-	17	76	-	-	2,3	-	< 5	7,0	1142	12	2,0	-
41,3	14	39	3,41	3,9	2,4	-	6	6,6	1060	12	2,3	-
44,3	6	44	-	-	6,2	-	3	7,4	1186	10	2,9	600

*Nota₁: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

*Nota₂: La analítica de NTK fue suspendida por problemas técnicos.

GRÁFICO 13. Cumplimiento concentración DBO₅ según la normativa 91/271 de las combinaciones I y II.

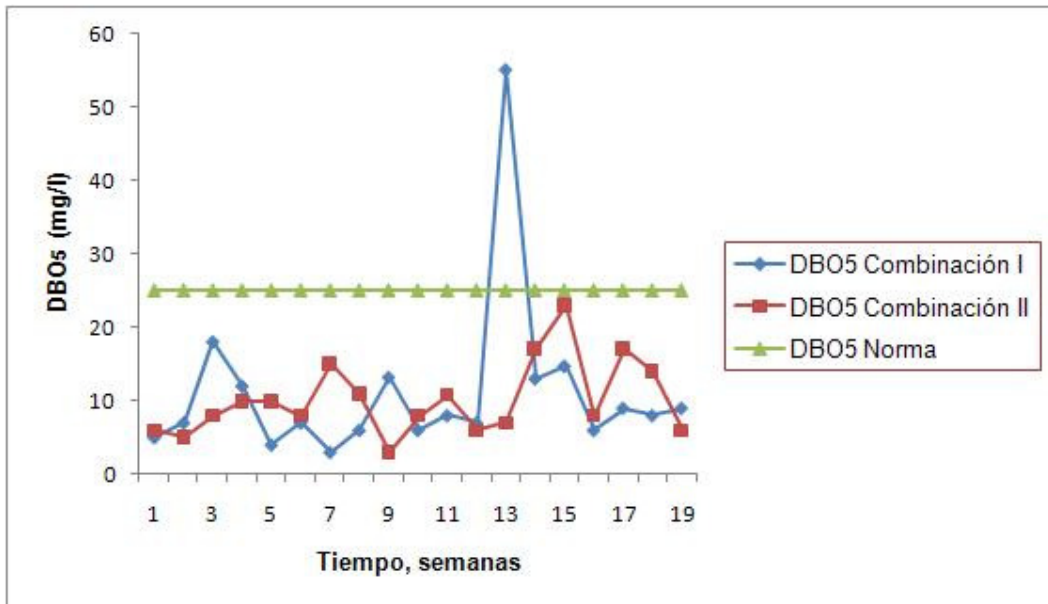


GRÁFICO 14. Cumplimiento concentración DQO según la normativa 91/271 de las combinaciones I y II.

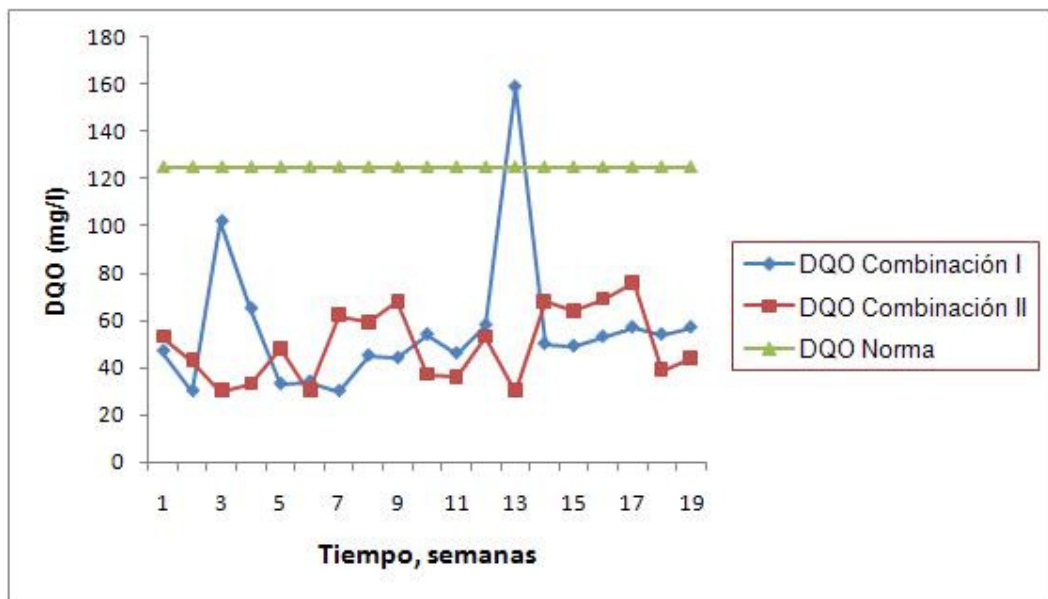


GRÁFICO 15. Cumplimiento concentración SS según la normativa 91/271 de las combinaciones I y II.

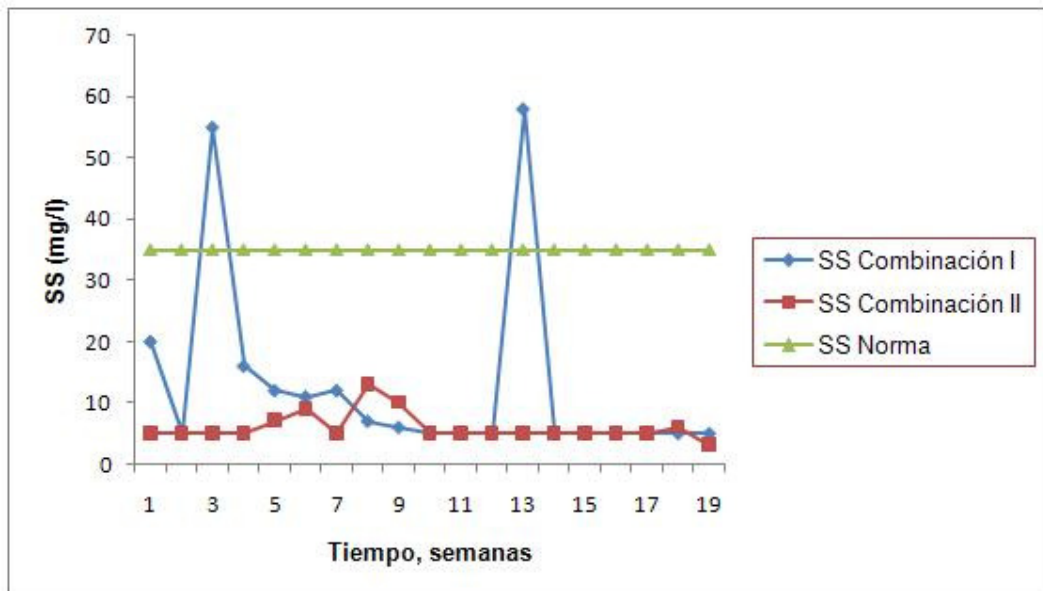



TABLA 17. Rendimientos mensuales de las combinaciones I y II.



PARÁMETROS	MES 1			MES 2			MES 3			MES 4			MES 5		
	INFLUENTE	COMBINACIÓN I	COMBINACIÓN II	INFLUENTE	COMBINACIÓN I	COMBINACIÓN II	INFLUENTE	COMBINACIÓN I	COMBINACIÓN II	INFLUENTE	COMBINACIÓN I	COMBINACIÓN II	INFLUENTE	COMBINACIÓN I	COMBINACIÓN II
SS															
Concentración (mg/l)	251	21	< 5	230	10	8	209	< 5	< 5	204	< 5	< 5	234	5	< 5
% Eliminación		91,6	98,4		95,7	96,6		98,0	99,0		99,0	98,0		97,9	97,9
DBO₅															
Concentración (mg/l)	432	9	8	465	4	8	447	7	7	480	10	16	460	9	12
% Eliminación		97,9	98,1		99,1	98,2		98,4	98,4		98,0	96,6		98,0	97,4
DQO															
Concentración (mg/l)	659	49	35	709	< 30	45	777	51	34	606	51	69	650	56	53
% Eliminación		92,5	94,7		96,3	93,6		93,5	95,7		91,6	88,6		91,4	91,8
NH₄⁺															
Concentración (mg/l)	38,4	13,2	30,4	51,9	10,7	28,4	43,28	19,35	37,85	54,6	25,8	48,3	62,3	24,8	42,8
% Eliminación		65,6	20,8		79,5	45,4		55,3	12,5		52,7	11,5		60,2	31,3
PO₄⁻															
Concentración (mg/l)	7,05	8,89	6,59	7,36	5,64	10,25	6,72	9,66	10,86	6,11	3,64	8,08	-	5,57	3,41
% Eliminación		-26,1	6,5		23,4	-39,3		-43,6	-61,5		40,5	-32,2		-	-
Pt															
Concentración (mg/l)	10,4	11,1	6,5	9,8	6,1	10,3	9,2	10,1	11,3	9,0	4,0	8,8	9,4	5,6	3,9
% Eliminación		-7,0	37,7		37,1	-5,5		-9,0	-22,4		55,1	2,0		40,4	58,5
E. Coli															
Concentración (UFC)	353.333.333	429.667	15.740	39.000.000	900.000	101.000	163.000.000	1.195.000	38.700	-	1.420.000	740	100.000.000	1.100.000	670
% Eliminación		99,9	100,0		97,7	99,7		99,3	100,0		-	-		98,9	100,0

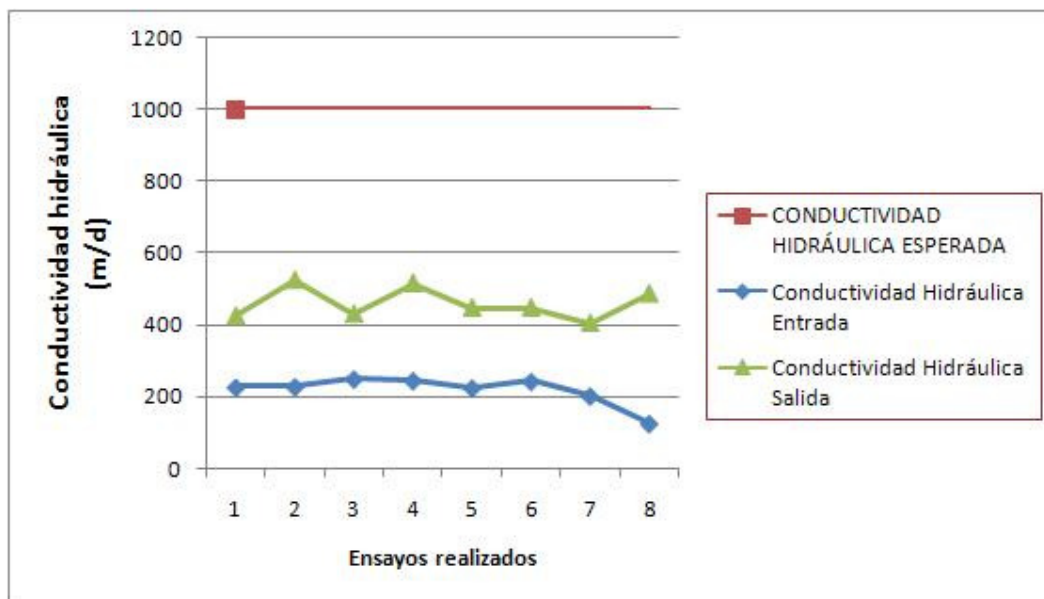
*Nota: Los valores acompañados con signo (<) hacen referencia a los límites de calidad establecidos por el laboratorio de la PECC.

TABLA 18. Conductividad hidráulica.

Humedales	MEDIDAS (m/d)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	H ₂ Entrada	227	229	251	246	226	244	203
H ₂ Salida	426	527	432	518	449	449	406	489
H ₅ Entrada	80	80	78	96	89	87	82	74
H ₅ Salida	117	117	116	130	130	130	130	138
H ₆ Entrada	79	79	86		95	86		112
H ₆ Salida	155	155	159	173	163	169	151	206

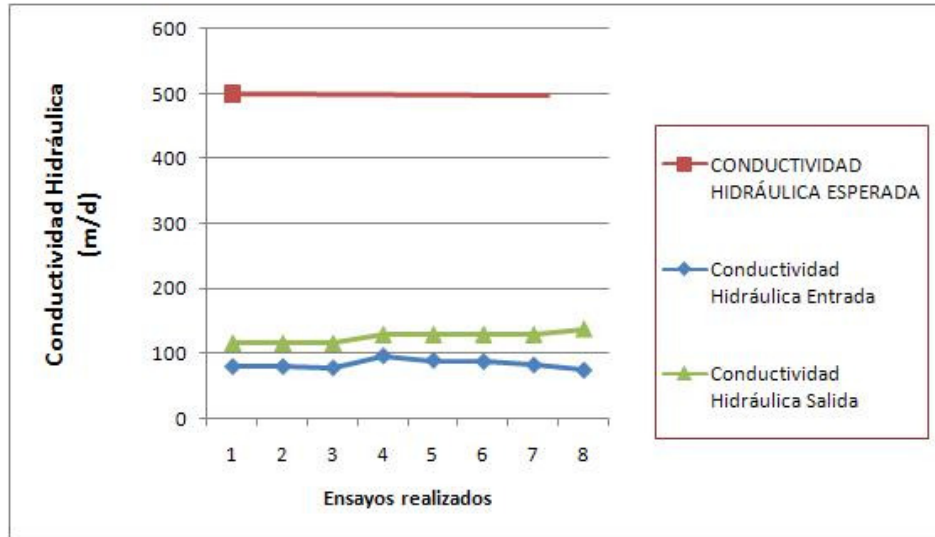
*Nota: El ensayo número 8 fue realizado manualmente debido a problemas técnicos.

GRÁFICO 16. Conductividad hidráulica H₂.



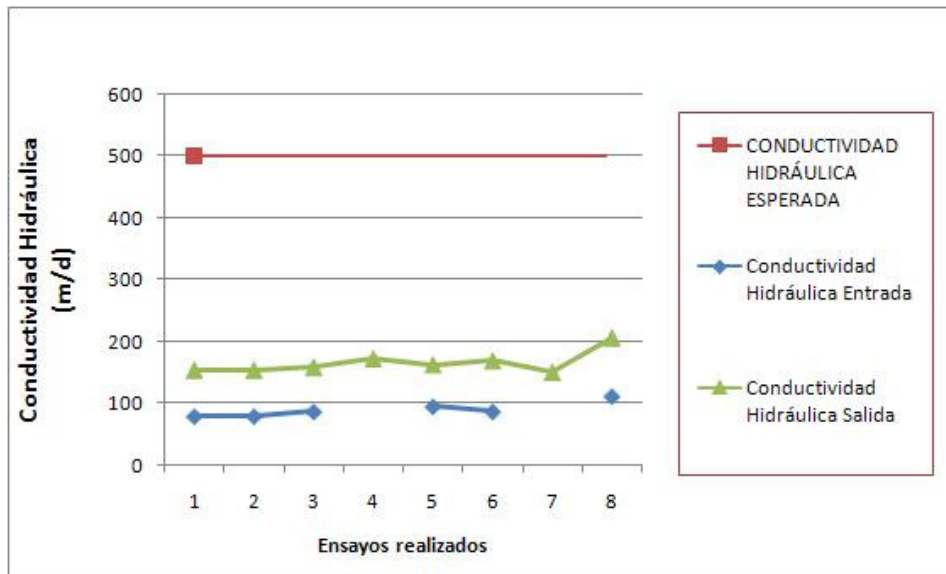
*Nota: Los valores teóricos de conductividad fueron tomados de Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. Second edition. McGraw Hill. 433 pp.

GRÁFICO 17. Conductividad hidráulica H₅.



*Nota: Los valores teóricos de conductividad fueron tomados de Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. Second edition. McGraw Hill. 433 pp.

GRÁFICO 18. Conductividad hidráulica H₆.



*Nota: Los valores teóricos de conductividad fueron tomados de Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. Second edition. McGraw Hill. 433 pp.



FIGURA 32. Encharcamiento zona de alimentación del HAFSsH H₆ I.

Nota: Primera aplicación del ensayo de sólidos acumulados.



FIGURA 33. Detalle zona de alimentación del H₆ inundada.



FIGURA 34. Nivel de agua inicial en la arqueta final de salida.

Nota: Nivel de agua en la arqueta de salida de 22 cm.



FIGURA 35. Nivel de agua final en la arqueta de salida.

Nota: Nivel de agua en la arqueta de salida de 0 cm.



FIGURA 36. Encharcamiento zona de alimentación del HAFSsH H₆ II.

Nota: Tubería de captación de los efluentes depurados abajo, cuarto día.



FIGURA 37. Encharcamiento zona de alimentación del HAFSsH H₆ III.

Nota: Un mes después sin observar cambios en el nivel de inundación en la zona de entrada, se suspendió la alimentación del humedal.

TABLA 19. Caudal de salida HAFSsH con alimentación suspendida.

HORA	Q (l/min)
1	2,5
2	2,0
3	2,0
4	1,7



FIGURA 38. Zona de alimentación del H₆ evacuada I.

Nota: Segundo día alimentación H₆ suspendida. Aplicación del segundo ensayo de sólidos acumulados.



FIGURA 39. Detalle de la grava zona de entrada del H₆ evacuado I.



FIGURA 40. Zona de alimentación evacuada II.

Nota: Octavo día de alimentación H₆ suspendida.

TABLA 20. Datos de precipitación de la estación meteorológica de la PECC, Enero de 2009.

Centa	
DÍA	PRECIPITACIÓN (mm)
12	0,0
13	5,9
14	0,0
15	0,6
16	0,0
17	0,0
18	0,5
19	1,7
20	0,0
21	0,0
22	7,0
23	0,0
24	0,4
25	7,2
26	0,0
27	0,0
28	0,0
29	0,0
30	7,5
31	38,0
TOTAL	68,8

Nota: Se tomaron los datos de precipitación desde el día en que la alimentación del H₆ fue suspendida, hasta la tercera aplicación del ensayo de sólidos acumulados.

GRÁFICO 19. Precipitaciones mensuales.

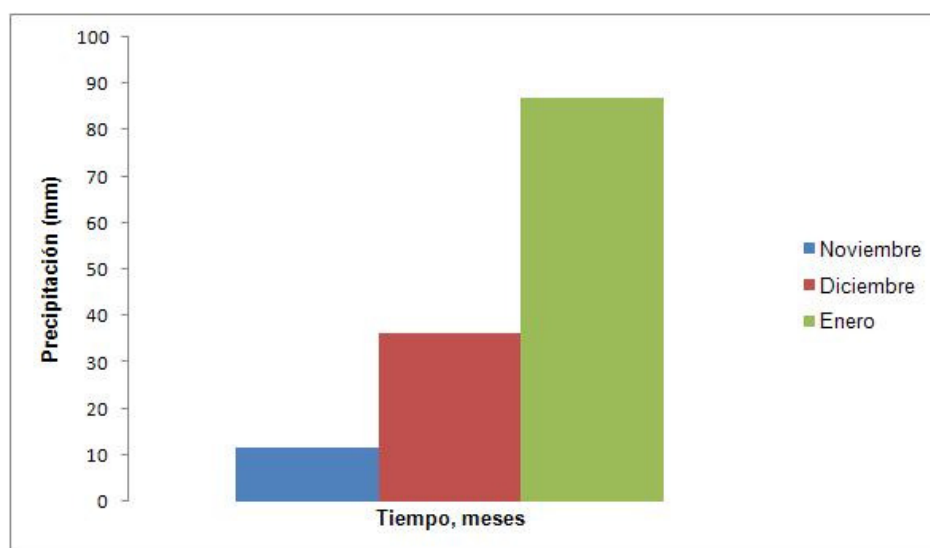




FIGURA 41. Zona de alimentación del H₆ evacuada III.

Nota: Tres semanas después de la interrupción de la alimentación del H₆. Aplicación del tercer ensayo de sólidos acumulados.



FIGURA 42. Detalle de la grava zona de entrada del H₆ evacuado I.

TABLA 21. Sólidos intersticiales y adheridos del HAFSsH 6.


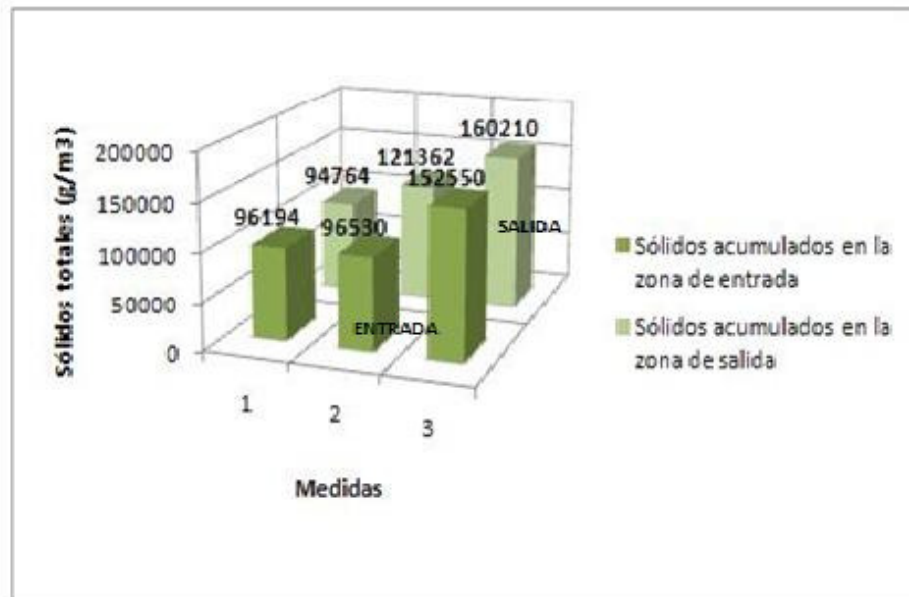
	ENTRADA						SALIDA						
	PROFUNDIDAD (cm)	MEDIDA 1		MEDIDA 2		MEDIDA 3		MEDIDA 1		MEDIDA 2		MEDIDA 3	
		SST (g/m ³)	SSV (g/m ³)	SST (g/m ³)	SSV (g/m ³)	SST (g/m ³)	SSV (g/m ³)	SST (g/m ³)	SSV (g/m ³)	SST (g/m ³)	SSV (g/m ³)	SST (g/m ³)	SSV (g/m ³)
INTERSTICIALES	[5 - 10]	31560	2540	13500	1410	20700	1920	35340	2640	18480	2070	28780	2440
	[10 - 15]	32220	2720	19370	1500	45460	3340	34940	1900	21720	1320	39760	1660
	[15 - 20]	2086	356	28880	2800	34820	3360	8616	746	19170	1080	41160	1580
	[20 - 25]	2646	280	19100	2060	21580	2440	4454	296	19245	840	27100	1100
TOTAL Sólidos Intersticiales		68512	5896	80850	7770	122560	11060	83350	5582	78615	5310	136800	6780
ADHERIDOS	[5 - 10]	14580	1540	4490	500	7330	590	3360	316	5205	612	5990	520
	[10 - 15]	8370	830	3720	310	10700	800	2650	198	6078	372	5800	360
	[15 - 20]	2236	296	3450	450	6450	630	2504	190	26925	1320	6520	290
	[20 - 25]	2496	216	4020	410	5510	510	2900	216	4539	390	5100	190
TOTAL Sólidos Adheridos		27682	2882	15680	1670	29990	2530	11414	920	42747	2694	23410	1360
TOTAL SÓLIDOS ACUMULADOS		96194	8778	96530	9440	152550	13590	94764	6502	121362	8004	160210	8140

GRÁFICO 20. Sólidos totales acumulados en los puntos de muestreo del HAFSsH H₆.



*Nota: Las 6 muestras fueron tomadas manteniendo el mismo perfil. Las muestras de la entrada se encuentran a 2,5 m de los bolos de alimentación. Las muestras de la salida, se ubican a 2.5 m de la arqueta de salida.

TABLA 22. Porcentajes de sólidos volátiles.

			
MEDIDA	PUNTO DE MUESTREO	SSV/SST (%)	
1	ENTRADA	9	
	SALIDA	7	
2	ENTRADA	10	
	SALIDA	7	
3	ENTRADA	9	
	SALIDA	5	

TABLA 23. Restos vegetales de la tercera aplicación del ensayo de sólidos acumulados.

	RESTOS VEGETALES (ml)	
	Entrada	Salida
	345	304

*Nota: Restos vegetales calculados para un volumen de 9425 ml.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Primera etapa: Los HAFSs.

De acuerdo a la distribución del caudal que se muestra en la figura 8, las cargas orgánicas (CO) de entrada a los HAFSs evaluados, variaron entre sí. El H₁ operaba con CO entre 8 – 10 g DBO/m².día, el H₂ con CO entre 10 – 13 g DBO/m².día; el H₃ con CO entre 13 - 17 g DBO/m².día, y los humedales H₅ y H₆ con CO entre 1 - 2 g DBO/m².día (Tabla 2). En el mes de enero, se observó un incremento del 90% en la materia orgánica del influente relacionado a las altas precipitaciones de la zona registradas por la estación meteorológica de la PECC (Tabla 21). Las CO recomendadas para sistemas verticales y horizontales son de 20 – 40 g DBO/m².día y de 4 – 6 g DBO/m².día, respectivamente (Salas, R., J.J.2005), en concordancia a los valores de referencia citados, los humedales H₁, H₃, H₅ y H₆ trabajaban bajo CO poco exigentes, mientras que el H₂ operaba con el doble de la concentración recomendada.

En general los efluentes depurados por cada sistema presentan características físicas, químicas y microbiológicas uniformes (Tablas 5 – 9).

En las gráficas 1 - 8, se observan algunos picos en las concentraciones de DBO₅, DQO Y SS, debido al incremento de la CO de las aguas residuales del municipio (Tabla 3). Como se ha mencionado anteriormente, las variaciones de CO del influente son poco frecuentes y están relacionadas a las condiciones meteorológicas, pues es una zona de uso exclusivo residencial.

Según la normativa española 91/271 sobre las características de los efluentes depurados, los humedales de cabecera H₁, H₂ y H₃ presentan algunas insuficiencias en cuanto al cumplimiento de las concentraciones de DBO₅, DQO y SS, mientras que los humedales de salida H₅ y H₆ no. Los efluentes depurados de los sistemas H₁, H₂ y H₃, superan la concentración de DBO₅ (25 mg O₂/l) en más del 60% de las

analíticas estudiadas y DQO (125 mg O₂/l) entre el 15 – 40 %. La concentración de los SS de los efluentes de los humedales H₁ y H₂ es buena, superando la de la norma (35 mg/l) solo en el 5% de los casos. Por otro lado el H₃ la supera en el 42%. Lo anterior no indica un mal funcionamiento de los sistemas de cabecera teniendo en cuenta que estos operan a CO más elevadas que los de salida, sino que demuestra que el proceso de depuración se optimiza al trabajar con sistemas híbridos.

Con respecto al cumplimiento de los porcentajes de eliminación de DBO₅ y DQO de la norma, los humedales H₅ y H₆ incumplen en casi todos los casos. Es importante resaltar el incumplimiento del porcentaje de eliminación de SS que se muestra en la gráfica 12, puesto que revela la baja capacidad de retención de sólidos del H₅ y H₆. Estos sistemas son alimentados con aguas residuales que han sido tratadas previamente por los humedales H₁ y H₂, respectivamente, y en lugar de eliminar los sólidos remanentes, aumentan su concentración (Tabla 10); para el caso puntual del H₆ es posible que el sustrato, de origen calizo, esté interfiriendo con los resultados.

En base a los resultados obtenidos con las CO de operación actual, se cree que si éstas aumentaran, la respuesta de los sistemas H₅ y H₆ sería insuficiente.

Los humedales H₁, H₂ y H₃ muestran rendimientos de eliminación de DBO₅, DQO y SS elevados, cercanos al 90% (Tablas 10 – 14). El H₂, alcanza los mejores porcentajes de eliminación de SS (>90%), a pesar de operar con CO por encima de las recomendadas y hacer uso de un sustrato filtrante de mayor granulometría (Salas, R., J.J.2005). El H₁ es el sistema que logra los mejores porcentajes de eliminación de materia orgánica (>90%).

Acorde a los rendimientos obtenidos en cuanto a la eliminación de nitrógeno (N), hay una diferencia importante entre los HAFSsH y los HAFSsV (<20%, >50%, respectivamente) (Tablas 10 -14). Es claro que las altas concentraciones de O₂ en el lecho del H₁ y H₃ favorecen los procesos de nitrificación / des-nitrificación para la eliminación de N. (García S. y Corzo H. 2006). El H₁ en contraste con el H₃, alcanza

rendimientos superiores, esto permite visualizar mejor, el aporte de la vegetación al sistema de depuración. Cabe resaltar que el estudio se realizó en época de invierno, donde la vegetación empieza su proceso de descomposición. Se cree que en otros periodos del año, la asimilación de N por parte de las plantas es mayor (Hadad*, H.R., Maine, M.A. 2007).

En relación a la eliminación de P_t y PO_4^- , no es posible establecer qué sistema se desempeña mejor, pues como se evidencia en las tablas 10 -14, en casi todos los sistemas los efluentes depurados aumentaron su concentración. Los resultados mas bajos fueron obtenidos por los humedales H_2 y H_3 que no están plantados, esto indica que el incremento en la concentración de nutrientes se asocia al desgaste natural del medio granular que disminuye su capacidad de adsorción, aumentando el riesgo de que ocurra una liberación de nutrientes. Este desgaste además afecta los procesos biológicos que tienen lugar en la matriz filtrante (García S., Joan. 2004).

Por otro lado, las altas CO de operación del H_2 (10 – 13 g $DBO_5/m^2.d$) también influyen en la eliminación del P, pues estimulan el crecimiento de microorganismos heterótrofos facultativos que a su vez, inhiben las bacterias que metabolizan los nutrientes (Muñoz C., Ana. 1995).

Al igual que en los sistemas H_2 y H_3 , los rendimientos obtenidos de los humedales plantados H_5 y H_6 fueron desfavorables. Teniendo en cuenta el periodo en el que se realizó el estudio, es posible que el P tomado por las raíces y transportado a los órganos superiores de la planta, retornara al agua como resultado de la descomposición de la vegetación. (Hadad*, H.R., Maine, M.A. 2007).

Dadas las condiciones anaerobias de los humedales H_2 , H_5 y H_6 , se inhibe la reproducción de los microorganismos que metabolizan el P (Muñoz C., Ana. 1995).

Conforme a los resultados de este estudio y a los obtenidos por García S., Joan (2004) (eliminación de P_t y $PO_4^- < 20\%$) los HAFSS resultan insuficientes en cuanto a

la eliminación de P_t y PO_4^- ; se sugiere adicionar sales de aluminio para lograr la eliminación del P por precipitación. (Arias, C. A. y colaboradores. 2005).

En general, la eliminación de microorganismos patógenos obtenida por los HAFSS evaluados es satisfactoria, consiguiendo disminuir en promedio un orden de 10^8 UFC a 10^6 UFC en los sistemas de cabecera H_1 , H_2 y H_3 ; por otro lado, en los humedales de salida H_5 y H_6 las concentraciones disminuyen hasta un orden de 10^3 UFC, estos valores aun son altos, pero aun así, la calidad sanitaria de los efluentes depurados es elevada, estos resultados se asocian a los elevados tiempos de retención con que operan los sistemas. (García, J y colaboradores. 2003).

6.2 Segunda etapa: Las combinaciones de HAFSSs.

Conforme a lo esperado, la combinación de humedales de distinto tipo de flujo consigue mejorar indiscutiblemente la calidad del efluente hasta en un 30% (Tablas 15 – 16), lo cual resulta ser un porcentaje muy significativo. Cada combinación posee sus fortalezas y debilidades; dependiendo de los contaminantes que se establezcan como prioridad de eliminación, un sistema será más eficiente que el otro.

Ambas combinaciones presentan rendimientos satisfactoriamente similares en cuanto a eliminación de materia orgánica (> 90%), sin embargo de acuerdo a la CO de entrada a los sistemas hay que resaltar el funcionamiento de la combinación II, pues son superiores (10 – 13 g $DBO_5/m^2.d$) (Tabla 17).

Una de las fortalezas de la combinación I, es la eliminación de N (% Eliminación >50%) (Tabla 17), debido a que los dos sistemas H_1 y H_5 se complementan. En el primero las condiciones aerobias favorecen los procesos de nitrificación y en el segundo las condiciones anaerobias favorecen los procesos de des-nitrificación (García S. y Corzo H. 2006). La eliminación de N en la combinación II, no es tan alta, sin embargo las concentraciones alcanzadas son aceptables.

Por otro parte, la combinación II, tiene una capacidad de retención de sólidos mayor a la de la combinación I, presentando rendimientos de eliminación cercanos al 100% (Tabla 17). Los rendimientos conseguidos por la combinación I son buenos, (>90%).

Conforme a los resultados de este estudio y a los obtenidos por García S., Joan (2004) (eliminación de P_t y $PO_4^- < 20\%$), las combinaciones de humedales resultan insuficientes en cuanto a la eliminación de P_t y PO_4^- , como se ha expuesto anteriormente. Se recomienda adicionar sales de aluminio para lograr la eliminación de P por precipitación. (Arias, C. A. y colaboradores. 2005).

En general, la eliminación de microorganismos patógenos obtenida por las combinaciones evaluadas es satisfactoria, consiguiendo disminuir en promedio las concentraciones de E- coli hasta un orden de 10^4 UFC; La combinación II presenta mejores porcentajes de eliminación con una disminución en la concentración hasta de un orden de 10^2 UFC. estos valores aun son altos, pero aun así, la calidad sanitaria de los efluentes depurados es elevada, estos resultados se asocian a los elevados tiempos de retención con que operan los sistemas. (García, J y colaboradores. 2003).

6.3 Tercera etapa: Ensayos de conductividad hidráulica (K) y sólidos acumulados.

En lo concerniente al ensayo de conductividad hidráulica aplicado en los HAFSS estudiados, la capacidad de infiltración del sustrato fue claramente menor en la zona de entrada que en la zona de salida. El H_2 , fue el sistema que obtuvo los mejores resultados de K, entre 200 – 250 y 400 – 530 m/d, en la zona de entrada y salida, respectivamente. Las K de los humedales H_5 y H_6 , en la zona de entrada coincidían, de 78 – 96 m/d, mientras que en la zona de salida no; de 117 -130 y 150 – 170 m/d, correspondientemente (Tabla 18). Los tamaños efectivos de la grava de los humedales H_2 , H_5 y H_6 son, [12 -20 mm], [4 – 12 mm] y [3 – 8 mm] en orden; para estas especificaciones granulométricas, los valores teóricos de K establecidos son: 500 -5000 m/d para los humedales H_5 y H_6 , y 1000 – 10.000 m/d para el H_2 (Reed,

S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. 1995). De acuerdo a los valores citados, todos los HAFSsH presentaban graves problemas de colmatación del sustrato. Se recomienda realizar actuaciones de mantenimiento para la prevención de futuros problemas de encharcamiento y obstrucción.

Al igual que los valores de K reportados por Caselles O., A. (2007) (0 -30 y 12 – 217 m/d), las K obtenidas en este estudio, son menores a las determinadas por Watson y Choate (2001) (340 – 8400 m/d); aunque siguen la misma tendencia: valores en la zona de alimentación menores a los de la zona de salida.

De acuerdo a la hipótesis planteada por Tanner Et al. (1998) K puede ser afectada por algunos factores como la presencia de sólidos, su composición y el patrón de distribución de los mismos. Sin embargo de acuerdo a los resultados obtenidos a lo largo de este estudio y a los reportados por Caselles O., A. (2007), no se encontró una relación directa entre la cantidad de sólidos acumulados y K.

El primer ensayo de sólidos se llevó a cabo cuando el HAFSsH estaba obstruido, como se evidencia en las figuras 32 y 33, debido a estas condiciones, la cantidad de sólidos acumulados en la entrada (96.194 g/m^3) fue mayor que en la salida (94.764 g/m^3) (Tabla 21), aunque no hay gran diferencia en los datos reportados. Lo anterior indica que la concentración de los sólidos en el sustrato filtrante es mas o menos uniforme y está directamente relacionada con la distribución heterogénea del influente, como ha sido descrito anteriormente por Caselles O., A. (2007).

Con el objetivo de modificar el nivel de encharcamiento del agua estancada en la cabecera del humedal, la primera actuación fue la acomodación de la tubería flexible que conecta al drenaje del sistema (Figuras 34) (Salas, R., J.J.2005). Al cuarto día de operación del humedal con la tubería abajo, el nivel del agua en la arqueta final de salida era mínimo (1 cm) (Figura 35), sin embargo no se observaron cambios en el nivel de agua acumulado en la cabecera del humedal (Figuras 36). Al cabo de 5 semanas se procedió a la interrupción de la alimentación del HAFSsH (Figura 37). Adicionalmente, se midió el caudal (Q) de salida del sistema, observándose

claramente la tendencia a disminuir con el tiempo (Tabla 19). Efectivamente, el agua concentrada en la zona de alimentación del humedal drenó (Figura 38).

En contraste al primer ensayo aplicado, en el segundo, la cantidad de sólidos acumulados (intersticiales y adheridos) fue mayor en la entrada y en la salida.

Los sólidos en la salida fueron mayores que los de la entrada (96.530 – 121.362 g/m³, entrada y salida respectivamente) (Tabla 21). Como se muestra en la figura 39 la cantidad de material adherido al sustrato filtrante de cabecera era elevada, al suspenderse la alimentación del humedal, el agua estancada drenó provocando un arrastre de los sólidos acumulados.

De igual manera, al no alimentarse el humedal, el material adherido a la grava se secó (Figura 40).

Es importante resaltar la influencia de las condiciones meteorológicas sobre el sustrato filtrante. En relación a las precipitaciones de meses anteriores (Gráfica 19) los registros del mes de enero fueron altos (68,8 mm) (Tabla 21), esto contribuyó a la limpieza natural del medio filtrante (Figuras 41 y 42). Los datos anteriores refuerzan los obtenidos en el tercer ensayo, pues se mantuvo la distribución de los sólidos en el sustrato del segundo ensayo, con un incremento en su concentración ocasionado por la limpieza de la grava de la zona de entrada (152.530 – 160.210 g/m³, entrada y salida respectivamente) (Tabla 21).

En general, la concentración de sólidos intersticiales es mayor (79%) que la de los sólidos adheridos (<21%) (Tabla 21). Este porcentaje es menor a los reportados por Caselles O., A. (2007) (99, <1 %, respectivamente), pero mantienen la misma tendencia.

Por otra parte, se esperaba que los sólidos acumulados (intersticiales y adheridos) tuvieran altos contenidos de materia orgánica, los resultados obtenidos indicaron que la fracción orgánica en todos los casos, fue menor al 10% (Tabla 22). Esta baja

proporción puede estar relacionada a un mayor grado de mineralización de la materia orgánica de las muestras de grava que fueron tomadas a una profundidad de 25 cm; como Caselles O., A. (2007) ha descrito, esta hipótesis es reforzada por los resultados de Nguyen (2000), Langergraber et al. (2003) y Chazarenc and Merlín (2005), quienes reportaron que el grado de mineralización de la materia orgánica es directamente proporcional a la profundidad. Otro factor que pudo influir en los resultados es el medio filtrante del humedal de tipo calizo. Para futuros estudios se recomienda realizar un blanco y así determinar el grado de interferencia de la grava. Como se muestra en la tabla 23, la cantidad de sólidos acumulados no está relacionada a los restos vegetales, pues del volumen de sustrato filtrante extraído (9425 ml), los restos vegetales ocupan menos del 4%. El resto del volumen se reparte entre la grava y los sólidos.

7. CONCLUSIONES

A lo largo de este estudio los mejores rendimientos de eliminación en cuanto a DBO₅, y DQO (>90%), fueron obtenidos por el HAFSsV H₁ trabajando con CO de 9 g DBO/m².día; esto indica que las condiciones aerobias favorecen los procesos de eliminación de materia orgánica.

El HAFSsH H₂ alcanzó los mejores rendimientos de eliminación de SS (>90%), a pesar de operar con CO (12 g DBO/m².día) superiores a las recomendadas (4 – 6 g DBO/m².día) y hacer uso de un sustrato filtrante de mayor granulometría (12 -20 mm).

En cuanto a los rendimientos de eliminación de N, hay una diferencia importante entre los sistemas verticales y horizontales, las altas concentraciones de O₂ en el lecho de los HAFSsV favorecen los procesos de nitrificación / des-nitrificación, alcanzando porcentajes >50%, mientras que los HAFSsH obtuvieron rendimientos <20%.

El aporte de la vegetación a los procesos de eliminación de N es hasta del 10% en época de invierno, de acuerdo a los rendimientos obtenidos por HAFSsV H₁ y H₃, se cree que en otras épocas el aporte es superior.

En general, los HAFSs producen efluentes de alta calidad sanitaria, disminuyendo la concentración de E. coli hasta un orden de 10² UFC.

La combinación de humedales de distinto tipo de flujo mejora la calidad del efluente con respecto a parámetros de DBO₅, DQO y SS hasta en un 30%. Las combinaciones estudiadas en esta tesis obtuvieron rendimientos de DBO₅ y DQO cercanos al 100%. Una combinación entre un HAFSsV y un HAFSsH obtiene

mejores % eliminación de N (>50); y la combinación de dos HAFSsH favorece la retención de sólidos, alcanzando porcentajes de eliminación cercanos al 100%, por lo anterior, la selección de la combinación depende de las características de las aguas residuales a tratar y de los contaminantes que se establezcan como prioridad de eliminación, de acuerdo a ello, un sistema será más eficiente que otro.

Los HAFSsH presentan graves problemas de colmatación del sustrato, sobretodo en la zona de entrada donde la conductividad hidráulica fue menor (80 – 250 m/d); a pesar de que los valores de K determinados en la de salida fueron mas altos (110 – 530 m/d), están por de bajo de los establecidos para las especificaciones granulométricas de cada sistema.

La obstrucción del sustrato de un HAFSsH genera un incremento en la cantidad de sólidos acumulados en la entrada (96.194 g/m³) en contraste con la salida (94.764 g/m³), la diferencia es leve, lo cual indica que la concentración de los sólidos en el sustrato filtrante es mas o menos uniforme y está directamente relacionada con la distribución heterogénea del influente.

Para solucionar los problemas de encharcamiento de los HAFSsH, se recomiendan las siguientes actuaciones: la acomodación de la tubería de captación de los efluentes drenados; se establece un periodo de vigilancia de 1 mes observando si el nivel de inundación disminuye. De acuerdo a la respuesta del sistema, se procede o no a la suspensión de la alimentación durante 3 semanas; durante este tiempo, el material adherido a la grava se seca y se limpia naturalmente. La aplicación de estas actuaciones, dependen del grado de obstrucción del medio filtrante.

La limpieza del medio filtrante de un HAFSsH obstruido en cabecera mediante la suspensión de la alimentación, genera un incremento en la cantidad de sólidos acumulados en la zona de salida (160.210 g/m³), mientras que la cantidad de sólidos en la entrada disminuye (152.530 g/m³).

8. RECOMENDACIONES

Con respecto al ensayo de sólidos acumulados, el tubo implementado para la extracción de la grava debe tener la longitud necesaria para alcanzar la profundidad total del humedal, proporcionando un conocimiento más completo en cuanto a la distribución de los sólidos en el sustrato.

Los puntos de muestreo seleccionados para la extracción de la grava en el ensayo de sólidos acumulados deben ubicarse tanto a lo largo como a lo ancho del humedal.

El análisis de la grava extraída en el ensayo de sólidos acumulados a diferentes profundidades no aporta datos relevantes, puede realizarse un análisis general para toda la profundidad tomada.

Los restos vegetales deben cuantificarse para el volumen de sustrato extraído, de esta manera se determina la influencia de la vegetación en la acumulación de sólidos.

Para futuros ensayos, puede realizarse un análisis de sólidos de grava limpia (blanco), para determinar el grado de interferencia de la composición del material filtrante en los resultados.

En posteriores estudios, el ensayo de sólidos acumulados puede realizarse simultáneamente en varios humedales, para comparar resultados.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, P., Ojeda, E., García, J., Barragán, J., y Mujeriego., R. (2005). Effect of water depth on the removal of organic matter in horizontal sub-surface flow constructed wetlands. *J. Environ. Sci. Health.* 40, pp. 1457-1466.

Arias, C. A y Brix, H. (2005). Phosphorus removal in constructed wetlands: can suitable alternative media be identified? *Wat. Sci. Tech.* 51 (9), pp. 275-282.

Baptista, J. D. C., Donnelly, T., Rayne, D. y Davenport, R. J. (2003). Microbial mechanisms of carbon removal in subsurface flow wetlands. *Wat. Sci. Tech.* 48 (5), pp.127-134.

Caselles Osorio, Aracelly. (2007). Influence of the characteristics of the organic matter on the efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Barcelona: pp. 100 – 120.

-----, García, J., (2006). Performance of experimental horizontal subsurface flow constructed wetlands fed with dissolved or particulate organic matter. *Water Res.* 40 (19), pp. 3603–3611.

CENTA-Secretaría General de Aguas (2004). Planta Experimental de Carrión de los Céspedes. Informe 1999-2002. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

----- (2007). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Instituto del Agua de Andalucía. Tomos I, II y IV.

Chazarenc and Merlin, (2005) F. Chazarenc and G. Merlin, Influence of surface layer on hydrology and biology of gravel bed vertical flow constructed wetlands, *Water Sci. Tech.* 51 (9), pp. 91–97.

Collado, R. (1992). Depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades. Colegio de Ingenieros de Caminos, canales y Puertos. Colección Señor nº 12. Ed. Paraninfo. S.A. (Madrid)

Cooper P. (2005). The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. *Wat. Sci. Tech.* 51 (9), pp. 91-97.

Depuranat. Gestión sostenible del agua residual en entornos rurales. España. (2006). p. 31.

Directiva del Consejo 91/271/CEE. (1991). Tratamiento de las aguas residuales urbanas. p. 11.

García J. (2003). Design factors of horizontal flow constructed wetlands. In: *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands*, 1st International Seminar.

-----, Vivar J., Aromir M. y Mujeriego R. (2003). Role of hydraulic retention time and granular médium in microbial renoval of indicador in tertiary treatment reed beds. *Wat. Res.*, 37, pp. 2645-2653.

----- y Corzo H., Angélica. *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Humedales de Flujo Sub-superficial.* Barcelona: UPC. (2006). p. 6 - 22.

Hansen, A., Mimbela, L. E., Polka, R., and Zachritz, W. (2002). Unplugging the bed of sub-surface flow wetlands using H₂O₂. In: *Wetlands and Remediation II. Proceeding of the second international conference on Wetlands and Remediation.* 281 – 289. Editors: Karl W. Nehring and Susans E. Brauning. Batelle Press, Columbus, Ohio.

Hadad, H., H.R., Maine, M.A. (2007). *Utilización de humedales construidos para el tratamiento de efluentes industriales.* p. 9.

Kadlec, R.H. y Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands.* CRC Press, Boca Ratón, 893 pp.

-----, Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. y Haberl, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation.* IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing, p. 155.

-----, Tanner, C.C., Hally, V.M. and Gibbs, M.M. (2005). Nitrogen spiraling in subsurface-flow constructed wetlands: Implications for treatment response. *Ecol. Eng.*,25,365-380

Langergraber et al., (2003) G. Langergraber, R. Haberl, J. Laber and A. Pressl, Evaluation of substrate clogging processes in vertical flow constructed wetlands, Water Sci. Tech. 48 (5), pp. 25–34.

Métodos Normalizados Para El Análisis de aguas Potables y Residuales (1992). APHA, AWWA, WPCF. 17 Ed. Díaz de Santos, S.A. Parte 1000, 2000, 4000, 9000.

Muñoz C., Ana. (1995). Remoción biológica de fósforo condiciones de operación. p. 4.

Nguyen, 2000 L. Nguyen, Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewater, Ecol. Eng. 16 (2000), pp. 199–221.

Ottová, V., Balcarová, J. y Vymazal, J. (1997). Microbial Characteristics of Constructed Wetlands. Wat. Sci. Tech., 35 (5), p. 117-123.

Platzer, Ch. And Mauch, K. 1997. Soil clogging in vertical flow reed beds – mechanisms, parameters, consequences and... ..solutions?. Wat. Sci. Tech. 35(5), 175-181.

Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. Second edition. McGraw Hill. 433 pp.

Rivera, F., Warren, A., Ramírez, E., Decamp, O., Bonilla, P., Gallegos, E., Calderón, A. y Sánchez, J.T. (1995). Removal of pathogens from wastewaters by the root zone method (RZM). *Wat. Sci. Tech.*, 32 (3), p. 211-218.

Salas R., JJ, Pidre B., JR y Sánchez F., Luciana. Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. CENTA. 2007. Cap. IV. p 19.

----- (2005). Investigaciones sobre humedales artificiales en la planta experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla).

Tanner et al., (1998) C.C. Tanner, J.P.S. Sukias and M.P. Upsdell, Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters, *Water Res.* 32 (10), pp. 3046–3054.

Watson and Choate, 2001 Watson, J.T., Choate, K.D., 2001. Hydraulic conductivity of onsite constructed wetlands. American Society of Agricultural and Biological Engineers. In: *On-Site Wastewater Treatment, Proceedings of Ninth National Symposium on Individual and Small Community Sewage Systems*. St. Joseph, Michigan, USA, pp. 631–648.