

## SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA SU APLICACIÓN EN PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO

Arnal, J.M; García, B.<sup>(p)</sup>; Martínez, M., Lora, J.

### Abstract

The water deterioration and its pollution is one of the most important environmental problems that the humanity suffers nowadays, due to the intensive water use and overloading of natural waters to be self-treated.

In order to reduce water's pollution before its final disposal, it is necessary to install sewage treatment systems, which allow to obtain water for disposal or reuse back, without compromising the overall ecology of the receiving water.

While in developed countries wastewater treatments have a high degree of implementation, in developing countries, 2,600 million of people live nowadays without access to adequate sanitation. In fact, the Millennium Development Goals include reducing by half the proportion of people without sustainable access to sanitation by 2015.

In order to reach this objective in developing countries, it is necessary to design wastewater treatment systems characterized by its simplicity, effectiveness and easy of implementing, based on sustainable technologies that require small and compact facilities.

This paper includes the updating of existing wastewater treatments and basic criteria to design the most appropriate treatment, taking into account the resources available in the area where has to be located.

*Keywords:* Sanitation, developing countries, wastewater treatment, wastewater, Millennium Development Goals

### Resumen

La contaminación de las aguas es uno de los principales problemas ambientales que padece actualmente la humanidad, debido al uso intensivo de los recursos hídricos y la limitada capacidad de autodepuración de las aguas.

Para disminuir la contaminación de las aguas antes de su vertido, es necesario aplicar sistemas de tratamiento, que permitan obtener agua de calidad suficiente para su vertido o uso posterior, sin dañar al medio receptor.

Mientras que en los países desarrollados existe un elevado grado de implantación de las técnicas de depuración, en los países en vías de desarrollo, 2,600 millones de personas viven en la actualidad sin acceso a un saneamiento adecuado. De hecho, los Objetivos de Desarrollo del Milenio, fijan como meta reducir a la mitad el número de personas que carecen de saneamiento para el 2015.

Con el fin de conseguir este objetivo en los países en desarrollo, se deben diseñar sistemas de depuración, que sean sencillos, eficaces, basados en el uso de tecnologías sostenibles que requieran pequeñas infraestructuras.

En el presente trabajo se analizan los sistemas de depuración existentes y se establecen los criterios para el diseño del tratamiento más adecuado, teniendo en cuenta los recursos existentes en la zona de actuación.

*Palabras clave:* Saneamiento, países en vías de desarrollo, depuración, aguas residuales, Objetivos de desarrollo del Milenio

## 1. Introducción

El agua es necesaria para la vida y el desarrollo económico de la humanidad. Durante el último siglo, el uso de los recursos hídricos se ha intensificado considerablemente y mientras que el crecimiento de la población se ha triplicado, el consumo de agua para uso doméstico e industrial se ha sextuplicado, generando un grave desequilibrio entre los recursos disponibles y la calidad de los mismos. El uso intensivo de los recursos, especialmente a nivel industrial, provoca la contaminación del agua en mayor o menor medida y requiere para su descarga al medio receptor, de una etapa de depuración o tratamiento, que elimine o reduzca los contaminantes presentes en esta, hasta los límites marcados por la legislación. Alternativamente, pueden aplicarse otros tratamientos de depuración, que permitan la reutilización de las aguas previamente tratadas y la reducción del consumo de recursos hídricos [1].

Las técnicas de tratamiento de las aguas residuales evolucionaron considerablemente durante el siglo pasado en los países desarrollados alcanzándose un alto grado de implantación, mientras que en los países en vías de desarrollo su implantación actualmente sigue siendo escasa. Para responder a las necesidades de los países en vías de desarrollo en relación al tema del agua, medioambiente y desarrollo sostenible, la comunidad internacional ha marcado unas metas de desarrollo recogidas en los Objetivos de Desarrollo para el Milenio [2]. Estos objetivos están encaminados a lograr una estabilidad social y política mundial, poniendo en práctica los principios de gestión sostenible del agua y protección de los ecosistemas [3]. Para conseguir estos objetivos, se fijan los siguientes principios:

- Disminuir el gasto del agua disminuyendo su consumo o reciclando y reutilizando al máximo el suministro.
- Extraer el agua con el menor deterioro posible de los ecosistemas, dejando una parte del recurso para el desarrollo normal de los ríos, humedales y acuíferos subterráneos.
- Devolver el agua usada a las aguas naturales en condiciones aceptables para que el impacto sobre el ecosistema sea mínimo.
- Realizar la descontaminación de las aguas con un mínimo gasto energético e impacto ecológico.

A pesar de la concienciación mundial al respecto del acceso al agua en cantidad y calidad adecuada para la mayor parte de la población de los países en vías de desarrollo, en la actualidad, 1.500 millones de personas no tienen acceso a agua potable, 2.600 millones carecen de saneamiento adecuado y casi 5 millones, principalmente niños y mujeres, mueren cada año por enfermedades ligadas a la calidad del agua, tales como el cólera, la diarrea, la fiebre tifoidea o el paludismo. Con un acceso seguro a fuentes de agua y a un saneamiento adecuado, se llegarían a reducir hasta un 30% de las muertes provocadas por enfermedades relacionadas con el agua [4].

## **2. Objetivo**

El objetivo del presente trabajo es el análisis de las distintas técnicas de depuración existentes, susceptibles de ser aplicadas al tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeños núcleos de población rural (con menos de 100 habitantes equivalentes), así como establecer los principales criterios a considerar para la selección del tratamiento más adecuado a implantar en un zona objetivo.

## **3. Metodología**

La metodología de trabajo seguida consta de dos fases:

- Preselección de los posibles tratamientos de depuración susceptibles de ser aplicados en pequeños núcleos de población
- Selección del sistema de tratamiento más adecuado para su aplicación en países en vías de desarrollo

### **3.1 Preselección de los tratamientos de depuración susceptibles de ser aplicados en pequeños núcleos de población**

En primer lugar, es necesario realizar una preselección de los tratamientos de depuración aplicables en pequeños núcleos de población. Esta preselección se basa en los siguientes criterios generales propuestos por Collado Lara [5]:

- Tipo de agua residual
- Situación demográfica de la población de aplicación del sistema de tratamiento de las aguas residuales urbanas
- Población equivalente a la que dar servicio
- Grado de depuración requerido
- Limitaciones económicas
- Superficie necesaria para cada alternativa de depuración estudiada

De estos criterios, el que tiene mayor relevancia es del tamaño de población, ya que este análisis tiene carácter generalista, siendo desconocidas a priori las características específicas de las zonas de aplicación de dichos tratamientos.

### **3.2 Selección del sistema de depuración más adecuado para su aplicación en países en vías de desarrollo**

Una vez realizada la preselección de los distintos tratamientos de depuración susceptibles de ser aplicados en pequeños núcleos de población, se procede a la selección del sistema de depuración que mejor se adapte a países en vías de desarrollo, para lo que se consideran los siguientes aspectos:

- Superficie necesaria para el tratamiento de depuración
- Simplicidad de construcción: movimiento de tierras, obra civil y equipos
- Mantenimiento y explotación: simplicidad de funcionamiento, necesidad de personal, duración y frecuencia del control
- Costos de construcción

- Costos de explotación y mantenimiento
- Rendimientos de depuración: demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos en suspensión (SS), nitrógeno total ( $N_t$ ), fósforo total ( $P_t$ ) y coliformes.
- Estabilidad del sistema: Efecto de la temperatura, turbidez del efluente y variación del caudal y carga.
- Impacto ambiental: molestia de olores, ruidos e insectos, integración con el entorno, riesgos para la salud y efectos en el suelo.
- Producción de fangos

Los tratamientos de depuración de aguas residuales urbanas, susceptibles de ser aplicados en pequeños comunidades en países en vías de desarrollo, son los que se indican a continuación:

- Tratamientos primarios: fosa séptica, tanque Imhoff y decantación primaria.
- Aplicación subsuperficial o tratamientos in situ: Zanjas, lechos, pozos filtrantes, filtros intermitentes de arena y lechos de turba.
- Aplicación superficial: Lagunaje natural y artificial.
- Procesos de formación de biopelícula: Lechos bacterianos y biodiscos.
- Tratamientos convencionales de fangos: Fangos activos y fangos físico-químicos.

#### 4. Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras el análisis de las técnicas de depuración para aguas residuales domésticas, susceptibles de ser aplicadas en pequeños núcleos de población en países en vías de desarrollo.

Para llegar a cabo este análisis, se ha partido de la premisa inicial que un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas para poblaciones pequeñas está formado por las siguientes etapas de depuración:

1. Pretratamiento
2. Tratamiento de depuración principal.
3. Tratamiento de depuración complementario (en el caso de que los rendimientos de depuración alcanzados no sean suficientes para su posterior reutilización o vertido final).

En la figura 1, se muestra un diagrama de bloques con las etapas que conforman el tratamiento de depuración seleccionado.



Figura 1. Diagrama de bloques de tratamiento básico de depuración de aguas residuales susceptibles de ser aplicados en pequeños núcleos de población en países en vías de desarrollo

##### 4.1 Selección del pretratamiento de depuración

Los pretratamientos son los procesos que se sitúan a la entrada del sistema de depuración y que tienen como finalidad retener sólidos de gran tamaño, arenas y grasas, para evitar el

deterioro de las instalaciones posteriores del proceso de depuración. Entre los pretratamientos existentes cabe destacar:

- Desbaste.
- Desarenado.
- Desengrasado.

Dado que el sistema a diseñar va a ser implantado en zonas de escasos recursos, se seleccionará como pretratamiento únicamente una etapa de desbaste y desengrasado, que tendrá lugar en cámaras situadas a la salida de la vivienda, reteniendo los detergentes y/o grasas procedentes del ámbito doméstico que pueden interferir en el proceso de depuración posterior. Se declina la aplicación de la etapas de desarenado, al tratarse de sistemas de depuración de aguas residuales domésticas y no es previsible el arrastre de arenas, dado el origen de las aguas a tratar.

#### 4.2 Preselección del sistema de tratamiento primario

La preselección del tratamiento de depuración más adecuado a aplicar en pequeños núcleos de población, se basa en el número de habitantes a los que tiene que dar servicio el sistema, ya que el resto de criterios generales son desconocidos a priori, como ya se comentó en el apartado anterior. En la tabla 1 se indica el rango de habitantes óptimo para cada tratamiento de aguas residuales para pequeñas comunidades.

Como se trata de un sistema de tratamiento adaptado a pequeñas comunidades rurales, las técnicas preseleccionadas son aquellas que presentan mejor funcionamiento para rangos de población bajos, de hasta 100 habitantes equivalentes.

Los tratamientos evaluados con este criterio son: fosa séptica, tanque Imhoff, zanja filtrante, lecho filtrante, filtro de arena, lecho de turba, pozo filtrante, filtro verde, lecho de juncos, infiltración rápida, escorrentía superficial, laguna aerobia laguna facultativa, laguna anaerobia, lecho bacteriano y aireación prolongada.

La tabla 1, permite afirmar que para el criterio de núcleo de población reducida, los tratamientos de depuración que aparecen como recomendables son: Fosa séptica, Tanque Imhoff, zanja filtrante, lecho filtrante, filtro de arena y pozo filtrante.

A continuación se describe con mayor detalle cada uno de los sistemas preseleccionados:

Las **fosas sépticas** son sistemas de tratamiento que se construye de forma enterrada y que consta de dos o más compartimentos. En el primero, se produce la sedimentación, digestión y almacenamiento de los sólidos en suspensión del agua residual. Los siguientes compartimentos sirven para mejora de la sedimentación y reserva de los fangos que rebosen de la primera cámara. Es una solución muy aplicada en el saneamiento rural o saneamiento individual, en combinación con sistemas de aplicación del terreno. Los principales problemas de funcionamiento que presenta son los malos olores, el acumulo de grasas y flotantes, y la necesidad de tratar sus efluentes.

El **tanque Imhoff** es un sistema que consta de un depósito en el que se separa la zona de decantación, que se ubica en la parte superior, de la de digestión, situada en la inferior. Los sólidos que sedimentan atraviesan unas ranuras existentes en fondo del compartimento superior, pasando al inferior para su digestión a temperatura ambiente. Se emplea como tratamiento previo a la aplicación al terreno, biodiscos, lechos bacterianos, etc. y supone una mejora muy notable respecto del funcionamiento de la fosa séptica. El rango de aplicación es hasta 500 habitantes equivalentes, aunque se pueden situar varios módulos ampliando el rango de actuación.

Alternativa de depuración	Población (habitantes equivalentes)							
	100	200	500	1000	2000	5000	10000	>10000
Fosa séptica	+++	++	+					
Tanque Imhoff	+++	+++	++	+				
Zanja filtrante	+++	+++	+++	++	++	+		
Lecho filtrante	+++	+++	+++	++	++	+		
Filtro de arena	+++	+++	+++	++	+			
Lecho de turba	++	+++	+++	+++	+++	++	+	
Pozo filtrante	+++	+++	+++	++	++	+		
Filtro verde	+	++	+++	+++	+++	++	++	+
Lecho de juncos	+	++	+++	+++	+++	++	+	+
Infiltración rápida	+	++	+++	+++	+++	++	+	+
Escorrentía superficial	++	+++	+++	+++	++	+	+	+
Laguna aireada			+	++	+++	+++	+++	+++
Laguna aerobia	+	+	++	+++	+++	+++	++	++
Laguna facultativa	+	++	+++	+++	+++	+++	++	++
Laguna anaerobia	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	++
Laguna anaerobia modificada				++	++	+++	+++	++
Lecho bacteriano	+	++	+++	+++	++	++	++	++
Biodisco			+	+	++	+++	+++	+++
Aireación prolongada	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	++
Canal de oxidación				++	+++	+++	+++	+++
Tratamiento físico-químico		+	+	++	+++	+++	+++	++
(+ ) Malo (++) Regular (+++) Bueno								

Tabla 1. Preselección de la alternativa de depuración. Fuente: Modificado de Collado, 1991

Las **zanjas filtrantes** son excavaciones en el terreno de poca profundidad (< 1 m) y anchura (0,45-0,80 m), que recogen y distribuyen las aguas residuales pretratadas a través de una tubería agujereada, colocada sobre un lecho de arena y cubierta de grava. La grava se cubre con terreno vegetal, de forma que no se mezcle el espacio ocupado por la capa de grava. La superficie de infiltración está constituida por el fondo de zanja, aunque, en caso de atascamientos, las paredes verticales pueden ayudar a la infiltración.

Los **lechos filtrantes** son un proceso de tratamiento similar a las zanjas filtrantes, siendo estos últimos más anchos (0,9-2 m), y actúan de forma similar a los lechos de grava que albergan en su fondo varias tuberías perforadas. En este caso, la superficie de infiltración está limitada a la del fondo, lo que constituye un inconveniente frente a posibles

obstrucciones. Sin embargo, presentan la ventaja de ocupar menor superficie a igualdad de habitantes equivalente que el caso de zanjas filtrantes.

El **filtro de arena** consiste en la creación de un suelo artificial, de permeabilidad controlada, para la obtención de un sistema de infiltración natural. Se trata de lechos de arena, de espesor entre 60 y 90 cm, sobre una capa de grava graduada, equipada con las correspondientes tuberías drenantes para la evacuación del efluente. El agua residual se distribuye en la parte superior del lecho, a través de conductos perforados. La aplicación del agua se hace de forma intermitente, de forma que no se sature el lecho y se mantengan las condiciones aerobias para el correcto tratamiento del agua residual.

El **pozo filtrante** es un sistema de aplicación subsuperficial con el que se obtienen efluentes de gran calidad, pero presenta más problemas de construcción que las zanjas y lechos filtrantes. Se usan cuando el nivel freático es bajo ( $> 4$  m), construyendo pozos con una gran superficie vertical respecto de la horizontal

### 4.3 Selección del tratamiento de depuración primario

La selección del sistema de depuración de las aguas residuales se lleva a cabo confeccionando una matriz de valoración con los criterios considerados, para cada alternativa de tratamiento. En estas matrices se valora cada efecto para cada alternativa preseleccionada y se normalizan los valores para su posterior comparación.

Los criterios a evaluar para realizar el diseño son:

- Efecto 1 (E1): Superficie necesaria.
- Efecto 2 (E2): Simplicidad de construcción: Movimientos de tierra, obra civil y construcción.
- Efecto 3 (E3): Explotación y mantenimiento: Simplicidad de funcionamiento, necesidad de personal, duración del control y frecuencia del control.
- Efecto 4 (E4): Costos de construcción.
- Efecto 5 (E5): Costos de explotación y mantenimiento.
- Efecto 6 (E6): Rendimientos: Tanto por ciento de reducción de DQO (demanda química de oxígeno), DBO (demanda biológica de oxígeno), SS, Nitrógeno total, Fósforo total y coliformes fecales.
- Efecto 7 (E7): Estabilidad: Efectos de la temperatura, turbidez del efluente y variación del caudal con la carga.
- Efecto 8 (E8): Impacto ambiental: Molestia de olores, ruidos e insectos, integración con el entorno, riesgos para la salud y efectos en el suelo.
- Efecto 9 (E9): Producción de fangos.

#### 4.3.1 Efecto E1: Superficie necesaria

Respecto a la superficie necesaria, las fosas sépticas requieren una superficie por habitante equivalente de entre  $0.1-0.5$  m<sup>2</sup>, los tanques Imhoff de  $0,05$  a  $0,1$  m<sup>2</sup>, las zanjas filtrantes de  $6$  a  $66$  m<sup>2</sup>, el lecho filtrante de  $2$  a  $25$  m<sup>2</sup>, el filtro de arena de  $1$  a  $9$  m<sup>2</sup> y el pozo filtrante de  $1$  a  $14$  m<sup>2</sup>.

Para la valoración se considera como adecuado (10 en la valoración), aquellas técnicas de depuración que requieran una superficie para su construcción pequeña (inferior a  $1$  m<sup>2</sup>), hasta  $10$  m<sup>2</sup> (9 en la valoración), hasta  $15$  m<sup>2</sup> (8 en la valoración), hasta  $20$  m<sup>2</sup> (7 en la valoración), hasta  $30$  m<sup>2</sup> (6 en la valoración),  $35$  m<sup>2</sup> (5 en la valoración), hasta  $40$  m<sup>2</sup> (4 en la

valoración), hasta 45 m<sup>2</sup> (3 en la valoración), hasta 50 m<sup>2</sup> (2 en la valoración), más de 50 m<sup>2</sup> (valoración de 1, muy poco adecuada).

#### 4.3.2 Efecto E2: Simplicidad de construcción

Para valorar la simplicidad de la construcción, se estimará el movimiento de tierras (resulta habitualmente sencillo en su ejecución en la mayoría de los casos, salvo en circunstancias especiales debidas a la naturaleza del terreno), la obra civil y la construcción en sí, considerando el nivel de dificultad que presente cada una de las operaciones.

Se valora el nivel de dificultad en una escala que valora desde Muy simple (10), Simple (8), Complicado (5) a Muy complicado (3).

Para cada uno de los elementos considerados la valoración de los factores resulta de la siguiente forma: la fosa séptica, zanja filtrante y el lecho filtrante son sistemas muy sencillos tanto en el movimientos de tierra como en la obra civil y la construcción por lo que obtienen la máxima puntuación (10), en el tanque Imhoff, el movimiento de tierra resulta complicado, la obra civil simple y la construcción muy simple por lo que la valoración final es de 8, en el filtro de arena el movimiento de tierra resulta simple, la obra civil simple y la construcción muy simple resultando una puntuación de 9 y finalmente, el pozo filtrante el movimiento de tierras es muy complicado, la obra civil es simple y la construcción muy simple, resultando una puntuación de 7.

#### 4.3.3 Efecto 3: Explotación y mantenimiento

Se valora la simplicidad de funcionamiento, la necesidad de personal, la duración del control y la frecuencia de control.

La valoración final de las alternativas de depuración se realiza en función de la dificultad de explotación y mantenimiento de la instalación se realiza de acuerdo con la siguiente leyenda:

- Simplicidad de funcionamiento: Muy simple (10), Simple (8), Normal (6), Complicado (5), Muy complicado (2).
- Necesidad de personal y Duración del control: Poco (10), Regular (7), Mucho (4)
- Frecuencia del control: Poco frecuente (10), razonablemente frecuente (8), frecuente (5), Muy frecuente (3)

La tabla 2 muestra las valoraciones de cada uno de los sistemas de depuración:

	Simplicidad de funcionamiento	Necesidad de personal	Duración del control	Frecuencia del control	Puntuación final
Fosa séptica	10	10	10	10	40
Tanque Imhoff	8	10	10	10	38
Zanja filtrante	8	10	10	10	38
Lecho filtrante	8	10	10	8	36
Filtro arena	6	7	7	8	28
Pozo filtrante	10	10	10	10	40

Tabla 2: Matriz de valoraciones para el efecto 3 (explotación y mantenimiento)

Una vez obtenida la valoración final, se asigna un valor a cada tratamiento en función de la puntuación obtenida, teniendo en cuenta que el valor máximo es 40, y se relaciona con el valor entero más próximo. Así, por ejemplo para el tanque Imhoff, la puntuación obtenida es 38, respecto de 40, la relación es 0,95 (que equivale a un 9 en la valoración final de la tabla resumen).

#### 4.3.4 Efecto 4: Costes de construcción

Los costes de construcción por \$/habitante son los siguientes: fosa séptica (89), tanque Imhoff (76), zanjas filtrantes (1031), lechos filtrantes (1545), filtros de arena (1663) y pozos filtrantes (945).

Se observa que los costes son más elevados para los sistemas de aplicación subsuperficial tales como la zanja filtrante, el lecho filtrante y el filtro de arena al ser necesario la realización de excavaciones. La valoración oscila desde un 10 para las opciones más económicas (menos de 10 dólares por habitante), 8 para las opciones económicas (hasta 100 dólares por habitante), 6 para el coste aceptable (hasta 150 dólares por habitante), 4 para el coste elevado (hasta 200 dólares por habitante), 2 para el coste muy elevado (hasta 300 dólares por habitante), 1 para el coste excesivamente elevado (para más de 300 dólares por habitante).

#### 4.3.5 Efecto 5: Costes de explotación y mantenimiento

Los costes de construcción por \$/habitante son los siguientes: fosa séptica (5.5), tanque Imhoff (0), zanjas filtrantes (32), lechos filtrantes (50), filtros de arena (97) y pozos filtrantes (25).

La valoración oscila desde un 10 para las opciones más económicas (menos de 5 dólares por habitante), 9 para las opciones económicas (hasta 10 dólares por habitante), 8 (hasta 15 dólares por habitante), 7 (hasta 20 dólares por habitante), 6 (hasta 25 dólares por habitante), 5 (hasta 30 dólares por habitante), 4 hasta 35 dólares por habitante, 3 hasta 40 dólares por habitante, 2 hasta 45 dólares por habitante y 1 para el coste excesivamente elevado (para más de 50 dólares por habitante).

#### 4.3.6 Efecto 6: Rendimientos

A continuación se muestra los porcentajes de eliminación de DQO (demanda química de oxígeno), DBO (demanda biológica de oxígeno), SS, Nitrógeno total, Fósforo total y coliformes fecales de cada una de las técnicas de depuración seleccionadas.

En la tabla 3, se muestra además la valoración (V) de cada uno de los factores, que resulta de realizar la media entre los valores límite de los intervalos dados, y eligiendo el valor entero más cercano al valor resultante.

	DQO <sub>1</sub>	DBO <sub>2</sub>	SS <sub>3</sub>	Nt <sub>4</sub>	Pt <sub>5</sub>	Col. Fec <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>
Fosa séptica	28-56	17-60	48-85	0-57	0-75	10-90	4	4	6	3	4	5
Tanque Imhoff	-	25-60	37-82	-	-	-	-	4	6	-	-	-
Zanja filtrante	65-90	90-98	-	25-99	80-90	-	8	9	-	6	9	-

Lecho filtrante	90-93	80-99	50-90	90	35-55	-	10	9	7	5	5	-
Filtro arena	68-90	80-99	30-99	23-90	20-80	98-99.9	9	9	6	6	5	10
Pozo filtrante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 3: Matriz de valoraciones para el efecto 6 (rendimientos)

La valoración final para el rendimiento de depuración se realiza asignando un peso de 10 a los rendimientos de DQO, DBO, SS, frente al 5 que se asigna a Nt, Pt y coliformes fecales, por lo que el peso frente al que se calcula la valoración final es de 45.

Por ejemplo, para el caso de la fosa séptica, la valoración de los factores de DQO, DBO y SS se multiplicará por 10 para cada uno de ellos (resultando la suma una puntuación de 140) y la valoración de los factores de Nt, Pt y coliformes fecales por 5 (resultando una puntuación de 60). El valor final obtenido de la suma (200) se relaciona respecto de la puntuación final máxima 450 y el resultado obtenido se expresa en base 10 y se aproxima al número entero más próximo.

#### 4.3.7 Efecto 7: Estabilidad

Para valorar la estabilidad del tratamiento, se tendrán en cuenta los factores de: efectos de la temperatura, turbidez del efluente y variación del caudal con la carga

La valoración final de las alternativas de depuración se realiza de acuerdo con la siguiente leyenda:

- 10 muy poco sensible al factor estudiado,
- 7 poco sensible al factor estudiado
- 4 sensible al factor estudiado
- 1 muy sensible al factor estudiado

La 5 muestra la valoración de los factores asociados al efecto 8.

	Efectos de la temperatura	Turbidez del efluente	Variación del caudal con la carga	Total	Valoración
Fosa séptica	4	1	1	6	2
Tanque Imhoff	4	1	4	9	3
Zanja filtrante	7	10	10	27	9
Lecho filtrante	7	10	10	27	9
Filtro de arena	4	10	10	24	8
Pozo filtrante	7	10	10	27	9

Tabla 5: Matriz de valoraciones para el efecto 7 (estabilidad)

#### 4.3.8 Efecto 8: Impacto ambiental

Para valorar el impacto ambiental de cada uno de los sistemas seleccionados, se tendrán en cuenta los factores de: molestia de olores, ruidos e insectos, integración con el entorno, riesgos para la salud y efectos en el suelo.

La valoración final de las alternativas de depuración se realiza de acuerdo con la siguiente leyenda:

- Molestia de olores, ruidos e insectos y efectos en el suelo: Problema inexistente (10), problema atípico (8), problema normal (5), problema frecuente (2).
- Integración con el entorno: Buena (10), normal (7) y mala (4)
- Riesgos para la salud: Alto (4), medio (7) y bajo (10)

La tabla 5 muestra la valoración de los factores asociados al efecto 8.

	Olores	Ruidos	Insectos	Integración con el entorno	Riesgos para la salud	Efectos en el suelo	Total parcial	Total
Fosa séptica	2	10	8	10	4	8	42	7
Tanque Imhoff	2	10	8	10	4	8	42	7
Zanja filtrante	5	10	8	7	4	2	36	6
Lecho filtrante	5	10	8	7	4	2	36	6
Filtro arena	2	10	2	7	7	5	33	5.5
Pozo filtrante	10	10	8	10	4	2	44	7.3

Tabla 5: Matriz de valoraciones para el efecto 8 (impacto ambiental)

#### 4.3.9 Efecto 9: Producción de fangos

La producción y el tratamiento de los lodos producidos en un proceso de depuración de aguas residuales, en muchas ocasiones, ocasionan una gran parte de los costos de explotación, por lo que deben considerarse prioritarios, para el caso de países en vías de desarrollo, aquellos que generen menor cantidad de fangos. Los sistemas de aplicación al terreno, tanto superficial como subsuperficial, tienen una producción de fangos nula o casi nula, aunque no hay que olvidar los fangos que se producen en los tratamientos previos a su aplicación.

La fosa séptica y el tanque Imhoff poseen una tasa de producción de fangos de 0.9-2 l/m<sup>3</sup> de agua residual y de 1,5-2 l/m<sup>3</sup> respectivamente. El resto de las técnicas estudiadas generan un volumen mínimo de fangos de menos de 0.1 l/m<sup>3</sup>, que además son estabilizados y parcialmente mineralizados en el sistema. Por tanto se valoran con 10 a las citadas técnicas y con 9 a aquellas que generan un volumen de hasta 2 l/m<sup>3</sup>.

Finalmente, en la tabla 6 se indican el resumen de las valoraciones de cada uno de los criterios para cada técnica de depuración preseleccionadas en el apartado anterior. Los

valores de los criterios son el resultado del análisis y valoración pormenorizado de cada uno de los factores según los criterios preestablecidos en función de la adecuación del tratamiento de depuración al criterio evaluado.

Efecto	Tratamiento primario de depuración					
	Fosa séptica	Tanque Imhoff	Zanja filtrante	Lecho filtrante	Filtro de arena	Pozo filtrante
E1	10	10	1	6	9	8
E2	10	8	10	10	9	7
E3	10	9	9	9	7	10
E4	8	8	1	1	1	1
E5	9	1	7	5	1	8
E6	4	5	8	8	7	1
E7	2	3	9	9	8	9
E8	7	7	6	6	5	8
E9	9	9	10	10	10	10

Tabla 6: Matriz de valoraciones finales de las alternativas de depuración

Una vez valorados los efectos para cada alternativa, se aplica un factor de corrección de 2 a los criterios más relevantes, con el fin aumentar el peso específico en la ponderación final. Para el resto de criterios, se aplicara un factor de corrección de valor la unidad en la ponderación.

Los criterios más relevantes considerados en el caso de tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeñas comunidades rurales en países en vías de desarrollo son fundamentalmente la simplicidad de construcción (E2), los costes de explotación y mantenimiento (E3), y los costes de construcción (E4).

Finalmente, el gráfico 1 muestra el valor de la ponderación final para cada uno de los tratamientos primarios analizados.

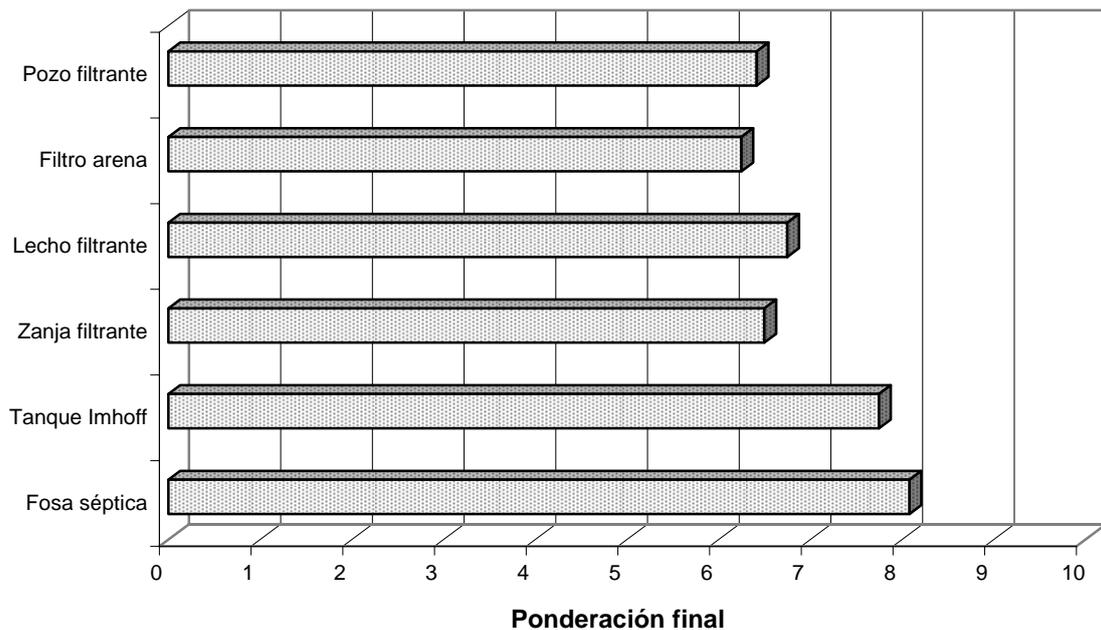


Gráfico 1. Valoración media de los tratamientos de depuración primarios preseleccionados

Atendiendo a esta comparación, el tratamiento primario que mayor puntuación ha obtenido en la ponderación y que se ajusta con los criterios establecidos es la fosa séptica.

#### 4.4. Selección del tratamiento complementario de depuración

Dado que las fosas sépticas tienen un rendimiento de depuración moderado: 25-56% de DQO, 17-60% de DBO, 48-85% de SS, 0-57 de  $N_{total}$ , 0-75 de  $P_{total}$  y 10-90% de coliformes fecales, será necesario aplicar un tratamiento de depuración complementario que mejore la calidad del efluente tratado.

Los tratamientos superficiales complementarios propuestos para mejorar el efluente séptico son:

- Zanjas filtrantes.
- Pozos filtrantes.
- Filtro de plantas macrófitas.

En este caso, la elección del sistema de tratamiento para el efluente parcialmente depurado tendrá en cuenta la simplicidad de construcción, mantenimiento y explotación, como en el caso de la alternativa principal.

Otro de los criterios a considerar para realizar la selección de tratamiento complementario, es la calidad del efluente tratado. Dicho criterio es fundamental, teniendo en cuenta que el objetivo de la aplicación del tratamiento de depuración es no solo reducir el impacto del vertido al medio receptor sino también la posible reutilización del agua tratada para riego de cultivos. Dicha alternativa favorece el desarrollo económico y social de las zonas donde se aplique el tratamiento de depuración y que además posean una problemática de escasez de agua.

Atendiendo a las consideraciones anteriormente citadas, se selecciona como tratamiento de depuración complementario el filtro de macrófitas, ya que se trata de un sistema basado en un proceso de depuración natural caracterizado por la simplicidad de construcción y

explotación, no presenta impacto visual (ya que los jardines se integran de forma natural con el entorno), precisa únicamente luz solar para permitir la acción fotosintética de las plantas y que alcanza un rendimiento de depuración superior al 90% para DBO, DQO, SS,  $P_{TOTAL}$  y  $N_{TOTAL}$ , por lo que se obtiene un efluente final tratado con calidad similar a agua de manantial que se puede reutilizar en el riego de todo tipo de cultivos, incluyendo el riego de cultivos de consumo en crudo [6].

La figura 2, representa la secuencia final de tratamiento propuesta para la depuración de aguas residuales procedentes de un núcleo de población que no supere los 100 habitantes equivalentes.



Figura 2. Esquema de la secuencia de tratamiento de depuración seleccionada para 100 habitantes equivalentes

## 5. Conclusiones

Las principales conclusiones de este trabajo son las que se indican a continuación:

- El tratamiento de depuración de las aguas residuales es imprescindible para eliminar o reducir la contaminación provocada al agua por su uso en las distintas actividades, antes de su vertido final para evitar enfermedades relacionadas con el agua y la contaminación del medio receptor.
- El pretratamiento de las aguas residuales es fundamental para evitar la colmatación de los sistemas de depuración primarios así como para mejorar los rendimientos de depuración y la vida útil de las instalaciones.
- Todas las técnicas de tratamientos analizadas son susceptibles de ser aplicadas en pequeños núcleos de población con menos de 100 habitantes equivalentes. Sin embargo, estas técnicas tienen que cumplir ciertos requisitos, sobre todo en cuanto a su coste de construcción y mantenimiento, para que puedan ser aplicadas en países en vías de desarrollo, dados los limitados recursos económicos de que disponen.
- La fosa séptica constituye un sistema de depuración adecuado para su aplicación en la zona objetivo propuesta en el presente trabajo por su simplicidad de construcción y mantenimiento, los reducidos costes de construcción y la inexistencia de consumo energético.
- Los sistemas complementarios de depuración, como el filtro de macrófitas son una solución adecuada para completar el tratamiento de depuración y proporcionar una calidad de agua al efluente tratado suficiente como para permitir su reutilización en el riego de cultivos agrícolas.
- La reutilización de las aguas residuales previamente tratadas permite favorecer el desarrollo de la zona donde se implanta el sistema de depuración, ya que mejorar el medio receptor y con ello el ecosistema además de permitir el reaprovechamiento de los recursos hídricos.

## 6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer su colaboración a las personas e instituciones que apoyan el proyecto AQUAPOT: Excelentísimo Ayuntamiento de Valencia, Excelentísimo Ayuntamiento de Náquera, Conselleria de Inmigración y Ciudadanía de la Generalita Valenciana, Universidad Politécnica de Valencia, Instituto ISIRYM, Dirección de Acción Internacional, Instituto IIAMA, BANCAJA y Linea Aereas IBERIA.

## Referencias

- [1] Rodríguez M.T., Alba C., Rodríguez F., Rodríguez L.A. “Estudio prospectivo relativo al uso y disponibilidad de agua con fines industriales”, *Actas del X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO)*, Vol. 1, Valencia 2006, pp. 13-15
- [2] Naciones Unidas. “Objetivos de Desarrollo para el Milenio”, 2005 (Disponible via web: [www.un.org](http://www.un.org); fecha de consulta 20-2-2008)
- [3] Secretariado Internacional del Agua. Al servicio del desarrollo comunitario sostenible (Disponible via web: [www.i-s-f.org](http://www.i-s-f.org); fecha de consulta: 20-2-2008)
- [4] Organización Mundial de la Salud (Disponible via web: [www.who.int](http://www.who.int); fecha de consulta: 20-2-2008)
- [5] Collado R., “*Depuración de aguas residuales en pequeños núcleos de población*”, Editorial Paraninfo, Madrid, 2001.
- [6] Brasó J.M., Mas M., “Depuradora ecológica a base de plantas para zonas aisladas” *Proceedings in International Meeting on phytodepuration*, Lorca (Murcia), 2005, pp. 142-149

## Correspondencia

José Miguel Arnal Arnal.  
Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Química y Nuclear.  
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (España).  
Phone: +34 96 387 96 33  
Fax: +34 96 387 76 39  
E-mail: [jarnala@iqn.upv.es](mailto:jarnala@iqn.upv.es)