

04-015

**FACTORS DETERMINING OPTIMUM LEVEL AGGLOMERATION WASTEWATER  
GENERATED IN SMALL URBAN POPULATION USING SUSTAINABILITY CRITERIA.**

Moya Llamas, María José ; Trapote Jaume, Arturo

Universidad de Alicante.- Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales

In recent decades have been developed increasingly efficient technologies in sanitation and wastewater treatment. In contrast, it has been less studied the previous planning phase, which has focused on the implementation of conventional treatment plants that centralize large volumes of wastewater. Currently, especially in small urban agglomerations or disseminated population centers, more sustainable strategies to wastewater treatment are needed. In order to adapt their systems to European standards regarding the protection of the environment, these populations must overcome a shortage of technical and economic means through solutions such as clustering or decentralizing its wastewater systems. Based on the fundamental criteria of sustainable development, this document analyzes the main factors influencing planning more convenient system which determine the most suitable level of aggregation of the wastewater generated by these populations for their more sustainable treatment and management. Factors such as the distances between population centers, the costs of operation and maintenance of facilities or opportunities for reuse of treated effluent, are key in the decision.

**Keywords:** *Sustainability; planning; wastewater treatment; small populations; aggregation*

**FACTORES DETERMINANTES DEL GRADO DE AGLOMERACIÓN ÓPTIMO DE LAS  
AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN PEQUEÑAS POBLACIONES URBANAS  
UTILIZANDO CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**

En las últimas décadas se han desarrollado tecnologías cada vez más eficientes en materia de saneamiento y depuración de las aguas residuales. Sin embargo, se ha profundizado menos en la fase de planificación previa, la cual se ha orientado a la implantación de estaciones de tratamiento convencionales que centralizan grandes caudales de agua residual. Actualmente, especialmente en pequeñas aglomeraciones urbanas o núcleos diseminados de población, son necesarias estrategias más sostenibles para la depuración de las aguas residuales. A fin de adaptar sus sistemas a los estándares europeos en cuanto a protección del medio ambiente, estas poblaciones deben suplir la escasez de medios técnicos y económicos mediante soluciones como la agrupación o la descentralización de sus sistemas de depuración. En base a los criterios fundamentales del desarrollo sostenible, este documento analiza los principales factores que influyen en la planificación del sistema más conveniente, es decir, aquellos que determinan el grado de aglomeración idóneo de las aguas residuales generadas por estas poblaciones para su tratamiento y gestión más sostenible. Factores como las distancias entre los núcleos de población, los costes de operación y mantenimiento de las instalaciones o las oportunidades de reutilización del efluente depurado, resultan clave en la decisión.

**Palabras clave:** *Sostenibilidad; planificación; depuración; pequeñas poblaciones; aglomeración*

Correspondencia: María José Moya Llamas [mjmoyallamas@telefonica.net](mailto:mjmoyallamas@telefonica.net)

Agradecimientos: Mi más sincero agradecimiento al Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales de la Universidad de Alicante donde he podido desarrollar la presente investigación, y en especial al Ing. Dr. D. Arturo Trapote Jaume, Tutor y Director de la misma, por su gran ayuda en esta labor.

## 1. Introducción

El informe Brundtland define desarrollo sostenible como satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades (World Commission on the Environment and Development, 1987).

Los sistemas de recursos del agua sostenibles aquellos diseñados y gestionados para la completa contribución a los objetivos de la sociedad, ahora y en el futuro, manteniendo a la vez su integridad ecológica, medioambiental e hidrológica. (Bradley et al., 2007).

En la actualidad existe una importante corriente en favor de la planificación de infraestructuras sostenibles, cuestionándose las tan generalizadas infraestructuras centralizadas. En el caso de la depuración de las aguas residuales se plantean sistemas de menor tamaño, más resilientes ante las cambiantes condiciones (cambio climático, demográfico, descenso del consumo urbano de agua, avances tecnológicos) o bien ante cualquier fallo del sistema. Situados más próximos al punto generación del agua residual, facilitan la recogida, tratamiento y gestión del agua residual, incrementando las posibilidades de reutilización (Schramm y Felmeden, 2012 y Gikas y Tchobanoglous, 2009).

Los nuevos requerimientos hacen necesarias otras estrategias para la gestión del agua residual, como los sistemas satélite y los descentralizados (Gikas y Tchobanoglous, 2009).

### 1.2 La problemática de la depuración de las aguas residuales en pequeñas aglomeraciones urbanas.

España cuenta con un gran número de pequeñas poblaciones. De los 8.111 municipios existentes el 72 % presenta una población inferior a los 2.000 habitantes, elevándose a 3.800 (47%) los municipios menores de 500 habitantes. (Ferrer, Ortega & Salas, 2012).

El Real Decreto Ley 11/1995, trasposición de la Directiva europea 91/271/CEE, estableció como fecha límite el 01 de Enero de 2006 para que estas poblaciones sometiesen a sus aguas residuales a un *tratamiento adecuado*, fijando el año 2015 como fecha límite para alcanzar el buen estado ecológico de las masas de agua. Los esfuerzos para alcanzar los estándares europeos se han centrado en primer lugar en las grandes aglomeraciones urbanas (Plan Nacional de Saneamiento y Depuración (1995-2005)) para posteriormente abordar la depuración de pequeñas poblaciones (Plan Nacional de Calidad de las Aguas (2007-2015)). En 2008 se estimó que la carga contaminante procedente de pequeñas poblaciones que aún no disponía de tratamiento adecuado se situaba entre 3 y 4 millones de habitantes equivalentes repartidos en más de 6.000 aglomeraciones, muchas de ellas menores de 500 h. e. (Ortega et al. 2008)

Las especiales características de estas poblaciones (variabilidad de caudales y cargas contaminantes, dispersión de la población, orografía, falta de medios técnicos y económicos, ausencia de criterios establecidos para la elección del sistema de depuración y de la tecnología adecuada, etc.) hacen que cobre mayor importancia una buena planificación del saneamiento y depuración de sus aguas residuales. No obstante, la tendencia generalizada sigue siendo aglutinar varias poblaciones cercanas en un solo punto para el tratamiento conjunto de sus aguas.

Establecer el nivel de aglomeración óptimo de los pequeños núcleos urbanos para una gestión y tratamiento sostenible de sus aguas residuales se torna fundamental aunque, como

asevera Ortega (2008) esta tarea no debe ser afrontada en el marco de un determinado proyecto, sino de planes estratégicos a escala regional o autonómica.

## **2. Objetivos.**

En caso de las infraestructuras para el tratamiento de las aguas residuales urbanas el concepto de economías de escala no siempre da lugar a la planificación del sistema de depuración más sostenible. En pequeñas aglomeraciones urbanas o núcleos diseminados de población son muchos los factores que deben ser tenidos en cuenta.

Se establece como objetivo principal de este estudio el análisis del grado de aglomeración idóneo de las aguas residuales provenientes de pequeñas aglomeraciones urbanas con el fin de planificar el sistema de depuración óptimo desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Partiendo de los criterios básicos del desarrollo sostenible se identifican y analizan las principales variables y parámetros que intervienen en la determinación del grado de integración o centralización de las aguas residuales provenientes de estas poblaciones.

El resultado del análisis, síntesis e integración de dichos factores y sus inter-relaciones deberá ser adaptado a cada caso concreto mediante una matriz de decisión a fin de servir a los planificadores como instrumento sencillo a la hora de discernir la opción idónea.

## **3. Metodología.**

La investigación se centra en el ámbito de las pequeñas poblaciones (<2.000 h.e.) dado que son éstas las que presentan mayores carencias en cuanto al cumplimiento de los estándares europeos en materia de saneamiento y depuración de las aguas residuales

En primer lugar se han analizado las diferentes configuraciones de los sistemas de depuración para la discusión del más adecuado dadas las especiales características de estas poblaciones.

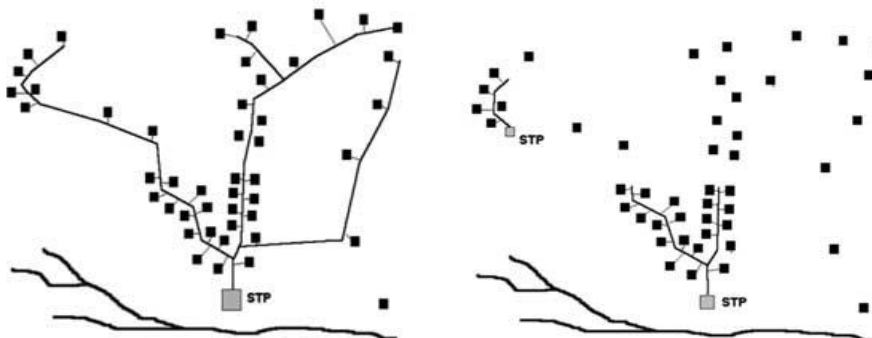
Posteriormente se han aplicado los criterios de sostenibilidad, identificándose los principales factores determinantes del nivel de aglomeración óptimo de pequeñas aglomeraciones urbanas para la gestión y tratamiento de sus aguas residuales.

### **3.1 Tipología de los sistemas de depuración. Ventajas e inconvenientes.**

La gestión del agua residual se ha llevado a cabo tradicionalmente mediante sistemas centralizados de tamaño "municipal" que recogen el agua residual de muchos productores (viviendas, zonas comerciales, industrias e instituciones) y la transportan a una EDAR situada en una zona alejada. Esta estación trata el afluente para la reutilización o el vertido al medio receptor, habitualmente lejos del punto de origen (Hophmayer-Tokich, 2006).

En la actualidad surgen otras configuraciones que, en determinadas condiciones, pueden resultar más convenientes para la gestión sostenible del agua residual urbana. Gikas y Tchobanoglous (2009) establecen una clasificación de los sistemas de depuración en: sistemas centralizados, sistemas satélite o semi-descentralizados, sistemas clúster o en racimo y sistemas on-site o descentralizados.

**Figura 1. Tipologías de los sistemas para el tratamiento del agua residual. Sistema centralizado (izquierda) y sistemas clúster, satélite y descentralizados (derecha).**



Fuente: Acosta, R., 2013

Se definen como sistemas satélite aquellos que suelen situarse en la parte alta del sistema de saneamiento y, generalmente carecen de instalaciones para el procesamiento de sólidos, los cuales se conducen a una estación centralizada para su tratamiento. Estos sistemas pueden ser usados para reducir el caudal de entrada a las estaciones centralizadas o para eliminar o reducir las descargas (impacto) sobre las masas de agua. Se clasifican a su vez en: sistemas de interceptación, sistemas de extracción y sistemas aguas abajo.

Otra tipología de sistemas de depuración son los sistemas agrupados, en racimo o clúster, los cuales a su vez pueden ser centralizados o descentralizados.

Finalmente, los sistemas on-site o descentralizados son aquellos que recogen, tratan y disponen (reutilizan) el agua residual cerca del punto de generación. Pueden ser aplicados en diferentes escalas: viviendas individuales, un grupo de viviendas, un distrito, instalaciones públicas, zonas comerciales, parques industriales e incluso una parte de una gran comunidad (Bakir, 2001 y Crites y Tchobanoglous, 1998).

La principal ventaja de los sistemas centralizados se deduce de su propia definición: sus procesos se basan en el tratamiento de grandes caudales, lo que los hace poco apropiados para pequeñas comunidades rurales o zonas periurbanas. Además, son infraestructuras con una larga vida útil, debido al alto capital invertido y al largo tiempo de depreciación, que cuentan con rutinas de decisión establecidas, importante experiencia de las Administraciones y una bien ensayada operativa diaria (Schramm y Felmeden, 2012).

De entre los inconvenientes de estos sistemas destacan sus altos costes de inversión, la fuerte dependencia de los mismos al tratarse de instalaciones de mayor escala, su baja flexibilidad y limitada resiliencia frente a cambios climáticos, demográficos, variaciones de la demanda, etc., y sus altos costes fijos, los cuales suponen un 70-80% de los costes totales. Además permiten un uso menos sostenible del agua, siendo menos adecuados para la reutilización del agua residual. (Gikas y Tchobanoglous, 2009).

En cuanto a los sistemas descentralizados, son más económicos en cuanto al volumen y longitud de las infraestructuras, operan con caudales inferiores (son muy adecuados para consumos inferiores a 50 l/hab·d y más rentables que los centralizados de 50 a 100 l/hab/d), aumentan las posibilidades de reutilización estando disponible el efluente a reutilizar cerca de los puntos de uso y pueden ser construidos gradualmente reduciéndose la necesidad de importantes inversiones instantáneas. La mayor protección de la salud y medioambiente, su idoneidad en comunidades de pequeña densidad, su mejor adaptación a la variación de las condiciones locales y el ahorro potencial en los costes (operación y mantenimiento, energía, etc.) son otros factores que juegan a favor de este tipo de sistemas (USEPA, 1997).

En cuanto a los sistemas agrupados, a pesar de que economías de escala sugieren que en determinadas condiciones una única EDAR de mayor tamaño puede más económica que

múltiples plantas, cuando la comunidad cubre un rango de alturas o bien en zonas amplias, los costes de distribución y bombeo del agua pueden ser mayores que los costes de construcción de múltiples plantas de tratamiento de agua residual. Chung et al. (2008) llevaron a cabo la modelización de un hipotético sistema de tratamiento de aguas residuales formado por una única planta frente a la opción de dos plantas y tres plantas de menor tamaño bajo el supuesto de una comunidad dispersa urbana-suburbana con una población máxima de 1.2 millones de h.e. Este estudio concluye que existe un mejor ajuste en el dimensionamiento de la instalación formada por tres plantas (mayor economía), siendo el factor determinante en la rentabilidad de múltiples EDARS el coste de transporte del agua a través del sistema, el cual queda determinado por la distancia y la orografía.

Sin embargo, a la hora de decidir el sistema de depuración a implantar hay que tener en cuenta la sostenibilidad del mismo teniendo siempre presentes las condiciones particulares de las poblaciones a aglomerar.

### 3.2 Criterios de sostenibilidad aplicados a la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones.

Los tres pilares básicos del desarrollo sostenible son: sociedad, economía y medio ambiente. A pesar de estar incluido en los anteriores, para la realización del presente estudio se considerado un cuarto criterio: el técnico, dada su especial relevancia sobre la planificación y diseño de este tipo de infraestructuras.

Mediante la integración de los cuatro criterios citados, la investigación se ha centrado en la búsqueda de la solución óptima respecto a un conjunto de subcriterios que han servido como indicadores de sostenibilidad para la determinación del grado de integración de los sistemas de depuración (Figura 1). Dichos criterios se describen brevemente a continuación.

Figura 2: Solución óptima en base a los criterios de sostenibilidad.



Fuente: Elaboración propia.

#### A. Criterios Técnicos:

##### A.1 Tamaño de la población.

El presente estudio incluye aquellas aglomeraciones cuya población es inferior a 2.000 h.e. El CEDEX excluye de la definición de pequeña población aquellas menores de 50 h.e. a fin

de dejar fuera de esta categoría las viviendas aisladas y aquellas poblaciones muy pequeñas que no dispongan de sistemas de colectores para el agua residual urbana.

#### A.2. Caudal de entrada y sus oscilaciones.

A la hora de dirimir la conveniencia de aglomerar varias poblaciones para el tratamiento de sus aguas residuales la variable fundamental es el caudal de agua residual generado por cada uno de ellas ( $Q_i$ ), el cual determinará el caudal a tratar o caudal de entrada ( $Q_e$ ):

$$Q_e = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1)$$

En las pequeñas aglomeraciones la estimación de los caudales de diseño es complicada dadas las grandes variaciones horarias, diarias y mensuales o estacionales del caudal de aguas residuales generado. Juan José Salas Rodríguez (CEDEX, 2007) estima que en estas poblaciones el caudal mínimo es del orden del 30% del caudal medio, considerando la siguiente relación empírica entre el caudal punta y el medio (factor punta):

$$C_p = \frac{5}{P^{\frac{1}{6}}} \quad (2)$$

#### A.3. Caracterización del agua residual a tratar.

Estas poblaciones generan pequeños volúmenes de aguas residuales pero con mayor nivel de contaminación que en poblaciones mayores debido al menor grado de dilución. Es por esto que los valores de los parámetros básicos para su caracterización pueden resultar muy dispares en función de las pautas de consumo y las singularidades de cada pequeña aglomeración. Por ello se recomiendan campañas de aforo y muestreo. No obstante, a continuación se reproduce la información de Collado (1991) sobre las características de la contaminación en pequeñas poblaciones:

**Tabla 1: Características de la contaminación en pequeños núcleos.**

| PARÁMETRO   | CARGA UNITARIA      | CONCENTRACIÓN      |
|-------------|---------------------|--------------------|
| Dotación    | 150 +/-50 (l/hab·d) |                    |
| DQO (mg/l)  | 75-80 (g/hab.d)     | 700 +/- 100 (mg/l) |
| DBO5 (mg/l) | 30-35 (g/hab.d)     | 300 +/- 65 (mg/l)  |
| SS          | 25-30 (g/hab.d)     | 250 +/- 30 (mg/l)  |
| N           | 8-9 (g/hab.d)       | 80 +/- 20 (mg/l)   |
| P           | 3,5-4 (g/hab.d)     | 35 (mg/l)          |

Fuente: Collado, 1991.

#### A.4. Tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales en pequeñas aglomeraciones.

Dadas sus limitaciones técnicas y económicas, son recomendables tecnologías que requieran poco mantenimiento, funcionen eficazmente frente a las variaciones de las condiciones locales, minimicen costes de operación y mantenimiento, sean poco sensibles al bajo nivel de formación técnico, los fallos en sus equipos y procesos deterioren en menor medida la calidad del efluente, tengan alta integración ambiental y sencillez en la gestión de los lodos.

Las tecnologías aplicables en pequeñas poblaciones pueden dividirse en función de los requerimientos de energía del tratamiento secundario en: tecnologías extensivas (no necesitan aporte de energía externo pero requieren mayores superficies) y tecnologías intensivas (demandan un aporte de energía externo para la aceleración de los procesos de depuración, lo que conlleva menor superficie requerida que las anteriores).

**Tabla 2: Tecnologías para la depuración de las aguas residuales de pequeñas poblaciones.**

| PRE-TRATAMIENTOS | TRATAMIENTOS PRIMARIOS | TRATAMIENTOS SECUNDARIOS   |   |
|------------------|------------------------|--|---|
|                  |                        | EXTENSIVOS   | INTENSIVOS  |
| - DESBASTE       | -FOSAS SÉPTICAS        | SUELO COMO ELEMENTO DEPURADOR:                                     | SISTEMAS DE BIOMASA SUSPENDIDA:                                 |
|                  |                        | - Aplicación subsuperficial: Zanjas Filtrantes, Lechos Filtrantes. | - Aireación Prolongada,   |
|                  |                        | - Aplicación superficial: Filtros Verdes.                          | - Canales de Oxidación,   |
| - DESARENADO     | -TANQUES IMHOFF        |  | - Reactores Secuenciales.                                       |
|                  |                        |  | - Biorreactores de Membranas.                                   |
|                  |                        | HUMEDALES ARTIFICIALES:  | SISTEMAS DE BIOPELÍCULA:  |
| - DESENGRASADO   | DECANTACIÓN PRIMARIA   | - de Flujo Superficial,  | - Lechos Bacterianos o Filtros percoladores.                    |
|                  |                        | - de Flujo Subsuperficial: Vertical u Horizontal.                  | - Contactores Biológicos Rotativos (CBR)                        |
|                  |                        |  | - Sistemas Biopelícula sobre Lecho móvil (MBBR).                |
|                  |                        | MACROFITAS EN FLOTACIÓN  |   |
|                  |                        | LAGUNAJES:   | SISTEMAS HÍBRIDOS   |
|                  |                        | - Naturales  | Combinación de procesos de biomasa en suspensión y biopelícula. |
|                  |                        | - Artificiales.  |   |
|                  |                        | FILTRACIÓN:  |   |
|                  |                        | - Filtros de Arena,  |   |
|                  |                        | - Filtros del Turba,   |   |
|                  |                        | - Infiltración-Percolación   |   |

Fuente: Elaboración propia.

#### A.5. Caudal de salida (Qs).

Como se ha citado anteriormente, las aguas residuales procedentes de pequeñas poblaciones en general son altamente biodegradables. Si existen posibilidades de reutilización parte del caudal de salida será destinado a ello. Sin embargo, el caudal que retorne a los cuerpos de agua debe ser tal que no suponga una afección negativa en la calidad de las aguas receptoras aguas abajo del punto de vertido, especialmente si se trata de zonas sensibles.

#### A.6. Caracterización del efluente depurado y rendimiento del proceso (Eficacia).

El Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, fija los valores máximos admisibles para vertidos procedentes de instalaciones secundarias o aquellos que se realicen en zonas "sensibles".

Sin embargo, la única estipulación contemplada en el citado Real Decreto en cuanto al vertido de las aguas residuales procedentes de pequeñas poblaciones es que sean sometidas a un *tratamiento adecuado*. En ausencia de valores específicos de las cargas contaminantes en este tipo de poblaciones, habitualmente se adoptan los valores reflejados en la Tabla 3.

**Tabla 3: Requisitos para vertidos de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas.**

| PARÁMETRO  | CONCENTRACIÓN                                     | PORCENTAJE MÍNIMO DE REDUCCIÓN (1) |
|--|---|------------------------------------|
| DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )                    | 25  | 70-90                              |
| DQO (mg/l O <sub>2</sub> )                                 | 125   | 75                                 |
| SS <sub>totales</sub> (mg/l) (2)                           | 35  | 90                                 |
| P <sub>total</sub> (vertidos en zonas sensibles) (mg/l)(3) | 2 (de 10.000 a 100.000 h-e)<br>1 (> 100.000 h-e)  | 80                                 |
| N <sub>total</sub> (vertidos en zonas sensibles) (mg/l)(3) | 15 (de 10.000 a 100.000 h-e)<br>10 (>100.000 h-e) | 70-80                              |

Fuente: Real Decreto 509/1996.

- (1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.  
(2) Requisito optativo.  
(3) Para vertidos en zonas con aguas eutróficas o con tendencia a serlo.

#### A.7 Superficie mínima requerida.

La superficie disponible para la implantación de las EDAR puede constituir una limitación importante a la hora de considerar ciertas tecnologías, como son las extensivas. A continuación se clasifican las principales tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales en pequeñas poblaciones en función de la superficie requerida para su implantación.

**Tabla 4: Requerimientos de superficie para la implantación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones.**

| REQUERIMIENTOS DE SUPERFICIE                            | TECNOLOGÍAS  |
|---|--|
| Muy Bajo (<1 m <sup>2</sup> /habitante equivalente)     | Aireación Prolongada<br>Lechos Bacterianos<br>Contactador Biológico Rotativo (CBR)<br>Reactor Biopelícula sobre Lecho Móvil MBBR<br>Reactor Secuencial SBR |
| Bajo (entre 1-3 m <sup>2</sup> /habitante equivalente)  | Filtro Intermitente de Arena   |
| Medio (entre 3-5 m <sup>2</sup> /habitante equivalente) | Filtro Intermitente de Arena<br>Filtro de Turba Modificado<br>Humedal Artificial Flujo Subsuperficial Vertical   |
| Alto (entre 5-7 m <sup>2</sup> /habitante equivalente)  | Infiltración-Percolación   |
| Muy Alto (>7 m <sup>2</sup> /habitante equivalente)     | Lagunaje<br>Humedal Artificial de Flujo subsuperficial Horizontal  |

Fuente: Ortega de Miguel, E. et al., 2010

#### A.8 Localización y distancia.

El emplazamiento de la o las EDARs debe ser elegido cuidadosamente dada su gran repercusión sobre la sostenibilidad del sistema ya que, a pesar de que a priori se pueda presuponer el concepto de economías de escala, si se han de cubrir grandes superficies, los costes de las instalaciones de saneamiento pueden ser mayores en el caso de estaciones centralizadas que los de construcción de múltiples plantas.



## B. Criterios Económicos:

### B.1 Costes.

Los costes globales de los sistemas de saneamiento y depuración constan de: costes de inversión (costes de proyecto, construcción y puesta en marcha de las infraestructuras) y costes de funcionamiento, que incluyen los costes de mantenimiento y de operación, y se subdividen en: costes fijos, como los costes de personal, y costes variables (energía, etc.).

Los costes de construcción y puesta en marcha (inversión) de las conducciones de saneamiento son función del diámetro los colectores y de las longitudes a cubrir (Clark, 2002):

$$f_1(D_1, L_1) = a \cdot D_1^b \cdot L_1 \text{ (Siendo a y b constantes)}$$

Walski et al. (1987) utilizan la siguiente formulación para la estimación de los costes de construcción y puesta en marcha de bombeo en función de la descarga del bombeo diseñado ( $x_i$ ) y de la cota ( $H_i$ ) a alcanzar:

$$f_2(x_i, H_i) = c \cdot x_i^d \cdot H_i^e \text{ (Siendo c y d constantes)}$$

En cuanto a los costes de construcción y puesta en marcha de las estaciones de tratamiento de aguas residuales, según Tang et al. (1987) éstos son función de la capacidad de tratamiento ( $w_i$ ) según la siguiente expresión:

$$f_3(q_i, L_i) = k + w_i^n \text{ (Siendo k y n constantes)}$$

De manera similar, los costes de mantenimiento y operación de colectores, conducciones y estaciones de bombeo quedan determinados según Clark (2002), U.S. Army Corps of Engineers (1980) y Walski et al. (1987) por el caudal de descarga ( $q_i$ ) y el rango de altura ( $L_i$ ):

$$f_4(q_i, L_i) = l \cdot q_i^m \cdot L_i^o \text{ (Siendo l, m y o constantes)}$$

Chung et al. (2007) concluyen que el factor determinante en la rentabilidad de múltiples plantas es el coste del transporte del agua a través del sistema, determinado por la distancia y las diferencias de altura (orografía) entre centros de demanda.

## C. Criterios Ambientales:

### C.1 Vertido al medio receptor.

Los principales factores influyentes en la afección del vertido son: el caudal de vertido (el cual no debe suponer notable influencia sobre la calidad del medio receptor), vertidos directos desde la red de saneamiento, nutrientes, materia orgánica y modificaciones en el medio receptor aguas arriba del punto de vertido que mermen la capacidad de autodepuración.

A fin de conocer el estado del cuerpo de agua receptor y predecir la influencia del vertido lo conveniente es realizar campañas de muestreo. También pueden resultar de gran utilidad herramientas para la modelización matemática del medio receptor.

### C.2 Potencia instalada.

En este apartado se considera tanto la potencia requerida para el funcionamiento de las instalaciones como la potencia necesaria para las infraestructuras que las albergan, en kW/hab.

### C.3 Energía consumida.

Contempla la energía necesaria para el tratamiento (equipamiento electromecánico) como la energía consumida por las infraestructuras (fundamentalmente la iluminación).

Los principales aspectos que influyen en el consumo energético son: la carga contaminante recibida, la estacionalidad, el tamaño de la planta, el tipo de tratamiento aplicado y los procesos que lo componen, el tipo de aireación y agitación, la modularidad, la escala de los

equipamientos electromecánicos, las condiciones elegidas para la explotación y los criterios y metodologías de control (Andreu, P.S., et al., 2012)

#### C.4 Emisiones de CO<sub>2</sub>.

El consumo de energía se asocia generalmente a impactos medioambientales a causa de las emisiones de dióxido de carbono.

Es posible reducir el consumo de energía y los impactos asociados incidiendo en factores como la tecnología seleccionada para el tratamiento de las aguas residuales. Por ejemplo, un sistema de fangos activos con una capacidad de 1000 h-e (<3,8 · 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>) puede producir más de 1400 toneladas de dióxido de carbono para su operación y 50 toneladas para el mantenimiento en unos 15 años de vida. (Emmerson et al., 1995).

#### C.5 Opciones de reutilización.

La escasez de recursos convencionales para cubrir la actual demanda de agua, la creciente preocupación medioambiental, el contexto económico y su repercusión en las economías familiares, entre otros motivos, conllevan la necesidad de recurrir a recursos alternativos de aguas, como los no convencionales. Entre ellos cabe destacar la reutilización de aguas procedentes de otros usos antes de ser vertidas al medio receptor.

#### C.6 Lodos estabilizados.

La producción de lodos está ligada a la tecnología empleada para el tratamiento de las aguas residuales. Así, mientras que los Humedales Artificiales, Lagunajes, Filtros de Turba, etc. generan poca cantidad de fangos, otras tecnologías como la Aireación Prolongada, o los sistemas Biopelícula generan cantidades importantes.

En pequeñas poblaciones que empleen sistemas con baja estabilización del fango (plantas de capacidad entre 1.000-2.000 h-e. excepto las de Aireación Prolongada) es recomendable la centralización de lodos procedentes de diferentes aglomeraciones urbanas para su tratamiento conjunto. Por el contrario, las plantas que disponen de sistemas de decantación-digestión o fango procedentes de sistemas de Aireación Prolongada, dado que el fango está estabilizado pueden optar por la valorización del fango para su uso local.

#### C.7 Generación de gas (CH<sub>4</sub>)

Dada la elevada potencia calorífica de los lodos, la generación de gas metano y su aprovechamiento en forma de energía calorífica producida por su combustión puede jugar un importante papel en la recuperación energética de la planta. Hernández Muñoz, A. (2001) cifra el volumen de CH<sub>4</sub> producido en la digestión anaerobia de los lodos en 17 l/hab·d en el caso de fango primario hasta los 28 l/hab·d para el fango mezcla de primario y activado.

Puesto que el aprovechamiento energético de una planta es creciente en función del tamaño de la población, incluso en el caso de configuraciones de semi o descentralizadas, puede resultar beneficioso desde el punto de vista de la sostenibilidad centralizar la línea de fangos de estas poblaciones para el aprovechamiento del gas generado en su digestión anaerobia.

#### C.8 Otros factores ambientales.

La producción de malos olores, la generación de ruidos y la integración paisajística (impacto visual) son factores a considerar en la planificación del sistema de depuración óptimo en pequeñas poblaciones.

### D. Criterios Sociales:

#### D.1 Características y singularidades de la población.

Entre las principales características de las pequeñas aglomeraciones urbanas en cuanto a la depuración de sus aguas residuales se refiere están: la ausencia de economías de escala,

la escasez de medios técnicos y económicos, la dispersión de la población y su disposición en pequeñas comunidades o zonas rurales. Todo ello complica notablemente la gestión adecuada de sus aguas residuales, siendo necesarios instrumentos eficientes para la planificación del sistema óptimo de depuración.

#### 4. Resultados y discusión.

Se ha profundizado en los principales factores que inciden en la planificación del sistema de depuración más adecuado en pequeñas poblaciones en función del nivel de aglomeración de sus aguas residuales, los cuales se resumen a continuación.

**Tabla 5: Principales factores influyentes en el grado de aglomeración óptimo de las aguas residuales de pequeñas poblaciones.**

| CRITERIOS       | SUBCRITERIOS   | PARÁMETROS/VARIABLES  |
|-----------------|--|---|
| Técnico         | Tamaño de la población   | P (H.e.)  |
|                 | Caudal de entrada y sus oscilaciones   | $Q_m$ , $C_p$   |
|                 | Caracterización agua residual  | $T^a$ , pH, S.S, M.O (DQO y DBO <sub>5</sub> ), N, P,   |
|                 | Tecnología tratamiento   |   |
|                 | Caudal de salida   | $Q_s$   |
|                 | Caracterización del efluente depurado y límites de vertido                             | DBO <sub>5</sub> (mg/L O <sub>2</sub> ), DQO (mg/L O <sub>2</sub> ), SS <sub>T</sub> (mg/L), P <sub>T</sub> (zonas sensibles) (mg/L), N <sub>total</sub> (zonas sensibles) (mg/L) |
|                 | Superficie mínima requerida  | A (m <sup>2</sup> /H.e.)  |
|                 | Localización y distancia entre poblaciones   | L (km), Ø (mm) (colectores saneamiento)   |
| Económico       | Costes inversión y puesta en marcha saneamiento  | L (km), Ø (mm) (colectores saneamiento), H(m) (bombeo)  |
|                 | Costes estaciones de tratamiento   | $W_i$ (capacidad de tratamiento)  |
|                 | Costes operación y mantenimiento estaciones bombeo                                     | H(m) (bombeo), $Q_m$  |
| Medio-ambiental | Vertido al medio receptor  | $Q_{vert}$ , DBO, O.D., M.O., Nutrientes (N, P)   |
|                 | Potencia Instalada   | kW/Hab.   |
|                 | Energía consumida  | kWh/m <sup>3</sup>  |
|                 | Emissiones de CO <sub>2</sub>  | Tn  |
|                 | Opciones de reutilización  | $Q_{reut}$  |
|                 | Lodos estabilizados  | Kg/d  |
|                 | Generación de gas metano (CH <sub>4</sub> )  | M <sup>3</sup> /d   |
|                 | Otros: malos olores, generación de ruidos, integración paisajística                    |   |
| Social          | Características de la población: dispersión, estacionalidad, , escasez de medios, etc. |   |

Fuente: Elaboración propia.

De la investigación realizada se deduce que los criterios con mayor incidencia sobre el nivel de integración o aglomeración de pequeños núcleos de población próximos son:

- la elección de la tecnología de tratamiento más adecuada, dado su influencia sobre la práctica totalidad de los criterios expuestos,
- la localización y distancia de las poblaciones. La orografía y el grado de dispersión de las poblaciones, el coste de los sistemas de saneamiento necesarios para su centralización

puede obrar en contra del concepto de economías de escala favoreciendo sistemas como los satélites o los descentralizados.

- los lodos generados en el tratamiento de sus aguas residuales ya que, a pesar de las ventajas de la descentralización o semi-descentralización, desde el punto de vista del aprovechamiento energético puede resultar conveniente centralizar la línea de fangos.
- los costes de inversión y puesta en marcha de las instalaciones de saneamiento (bombeos e impulsiones, colectores) de agua residual, que son función del diámetro y longitudes de las conducciones de saneamiento, de la descarga del bombeo diseñado y de la capacidad de tratamiento de la planta.

## 5. Conclusiones.

Durante las últimas décadas se han producido importantes avances en materia de saneamiento y depuración. No obstante, los cada vez más exigentes requerimientos en cuanto a la calidad final del efluente, la descentralización de los sistemas de tratamiento y depuración, los contaminantes emergentes, la regeneración y posterior reutilización, los subproductos generados, etc. hacen necesario un nuevo modelo de gestión de las aguas residuales urbanas donde la planificación sostenible de los sistemas de depuración se torna fundamental.

En el presente estudio se ha puesto de manifiesto la importancia esta planificación previa a la implantación de un determinado sistema de depuración especialmente en pequeñas poblaciones, asignatura pendiente en cuanto a cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE se refiere y objetivo prioritario del Plan Nacional de Calidad de las Aguas (PNC 2007-2015).

Los sistemas centralizados no son factibles o bien no son la estrategia más rentable en determinados casos (pequeñas poblaciones, zonas rurales, poblaciones diseminadas, etc.) donde otras configuraciones como los sistemas satélite o semi-descentralizados pueden ser más sostenibles.

Para determinar la configuración más adecuada se han aplicado los criterios de sostenibilidad a los sistemas de depuración de las aguas residuales urbanas, identificándose los principales factores determinantes grado de aglomeración de las aguas residuales procedentes de pequeñas poblaciones. Se concluye que los factores más relevantes de manera general son: la elección de la tecnología apropiada, la localización y distancia entre núcleos de población, los lodos generados en el proceso de depuración, y los costes de inversión y puesta en marcha de las instalaciones de saneamiento de agua residual.

A fin de que el planificador pueda considerar las singularidades de las poblaciones a integrar, se propone la creación de una matriz de decisión que valore el grado de influencia de los criterios y subcriterios expuestos sobre la sostenibilidad del sistema de depuración en cada caso particular.

## 6. Referencias.

- Acosta, R., (2013) So, you think you want to build a decentralized wastewater treatment system?. *Rural Community Assistance Partnership*. Obtenido de <http://www.rcap.org/node/1283>.
- Andreu, P. S., Mifsut, C. L., & Soler, M. A. (2012). Optimización energética en EDAR de la Región de Murcia. *Ingeniería civil*, (168), 93-112.
- Bakir, H. A. (2001). Sustainable wastewater management for small communities in the Middle East and North Africa. *Journal of Environmental Management*, 61 (4), 319-328.
- Bradley, B. R., Daigger, G. T., Rubin, R., & Tchobanoglous, G. (2002). Evaluation of onsite wastewater treatment technologies using sustainable development criteria. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 4(2), 87-99.

- CEDEX, (2007). XXV Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas [CEDEX]. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Chung, G., Lansey, K., Blowers, P., Brooks, P., Ela, W., Stewart, S. & Wilson, P. (2008). A general water supply planning model: Evaluation of decentralized treatment. *Environmental Modelling & Software*, 23 (7), 893-905.
- Clark, R. M., Sivaganesan, M., Selvakumar, A. & Sethi, V., (2002). Cost models for water supply distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128 (5),312-321.
- Collado, R., & Vargas, G. (1991). La depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades. Criterios de selección. *Tecnología del Agua*, 80, 28-47.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). Small and decentralized wastewater management systems. Boston. McGraw-Hill.
- Emmerson, R. H. C., Morse, G. K., Lester, J. N., & Edge, D. R. (1995). The life-cycle analysis of small-scale sewage-treatment processes. *Water and Environment Journal*, 9(3), 317-325.
- Ferrer, Y., Ortega, E. & Salas, J. J. (2012). Tendencias actuales en las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. *Ingeniería Civil*, (168), 131-143.
- Gikas, P., & Tchobanoglous, G. (2009). The role of satellite and decentralized strategies in water resources management. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 144-152.
- Hernández Muñoz, A. (2001). Depuración y desinfección de aguas residuales. *Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Quinta edición. España*.
- Hophmayer-Tokich, S. (2006). Wastewater Management Strategy: centralized v. decentralized technologies for small communities. *CSTM Studies and Reports*, (271), 1-27.
- Ortega, E., Ferrer, Y., Salas, J. J., Aragón, C., & Real, A. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. *Ministerio de Medioambiente, Medio Rural y Marino. Madrid*.
- Ortega, E., Salas, J. J., Ferrer, Y., Sobrados, L., & Aragón, C. (2008). La depuración de las aguas residuales en pequeñas poblaciones españolas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas [CEDEX]. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Schramm, E., & Felmeden, J. (2012). Towards more resilient water infrastructures. In *Resilient Cities 2* (pp. 177-186). Springer Netherlands.
- Tang, C.C., Brill, E.D., Pfeffer, J.T., (1987). Optimization techniques for secondary wastewater treatment system. *Journal of Environmental Engineering* 113 (5), 935e951.
- US Army Corps of Engineers, (1980). Methodology for area wide planning studies. *Engineer Technical*. Letter No. 1110-2-502, Washington, DC.
- USEPA (1997). Response to Congress on use of decentralized wastewater treatment systems. United States Environmental Protection Agency Office of Water & Office of Wastewater Management, Washington DC.
- Walski, T.M., Brill, E.D., Gessler, J., Goulter, I.C., Jeppson, R.M., Lansey, K., Lee, H., Liebman, J.C., Mays, L., Morgan, D.R., Ormsbee, L., (1987). Battle of the network models: epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management* 113 (2), 191-203.
- World Commission on Environment and Development. (1987). Our common future (p. XV). Oxford: Oxford University Press.

