



# Selección del tratamiento óptimo de aguas residuales para poblaciones del medio rural de Galicia

La depuración de aguas residuales en pequeños núcleos debe orientarse hacia alternativas diferentes a las que se suelen aplicar en poblaciones de mayor tamaño. En este sentido, la tecnología actual ofrece un amplio abanico de tratamientos, especialmente los denominados naturales o de bajo coste. Teniendo en cuenta los últimos desarrollos en este campo, en el presente trabajo se aplica una metodología de ayuda a la toma de decisiones para facilitar la elección del sistema de tratamiento más adecuado en núcleos rurales de Galicia. Los núcleos escogidos para el análisis abarcan gran parte de la diversidad del problema en el ámbito rural gallego.

**PALABRAS CLAVE:**

Tratamiento de aguas, Sistemas ecológicos de depuración de aguas residuales, Aguas residuales en municipios pequeños

*The wastewater treatment in small towns should face different alternatives that are usually applied in larger populations. In this regard, the present technology provides a wide range of treatments, especially natural or known low cost. Given the latest developments in this field, in this paper a methodology to aid decision-making applies to facilitate the choice of appropriate treatment system in rural villages in Galicia. The nuclei chosen for analysis cover much of the diversity of the problem in the Galician rural environment.*

**KEYWORDS**

Water treatment, Ecological systems for wastewater treatment, Waste water in small municipalities

**J. Fernández-Parajes**

Diputación Provincial de Lugo

**G. Riesco Muñoz**

Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela.

EN UNA SOCIEDAD DESARROLLADA es deseable y necesaria la eliminación inmediata y sin molestias de las aguas residuales de los lugares donde se genera, seguida de su tratamiento y evacuación (Metcalf y Eddy, 1995) [29]. Las aguas residuales tienen origen diverso: doméstico, industrial, subterráneo (infiltración) y meteorológico (pluvial), por lo que no todas se pueden tratar de igual modo, al ser

diferentes las sustancias que contaminan el agua.

La política comunitaria de aguas tiene uno de sus fundamentos en la Directiva Europea 91/271/CEE (Comisión Europea, 1991) [11], cuyo objeto es proteger el medio natural de los efectos adversos del vertido de aguas residuales urbanas. La transposición de esta norma comunitaria a nuestro país se recoge en el Real Decreto-Ley

11/1995, por el que se establecen las Normas Aplicables al Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas, y en el Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración (2007-2015).

Esta normativa establece que las aguas residuales generadas por cualquier población, independientemente de su tamaño, deben ser tratadas adecuadamente antes de su vertido. En las poblaciones de cierta entidad, debido al volumen y variabilidad de la composición de las aguas tratadas, esto implica el empleo de sistemas de depuración de los llamados convencionales. En pequeños núcleos el volumen de residuos generado es menor y, además, está constituido principalmente por componentes orgánicos, de más fácil depuración.

La Directiva Europea 2000/60/CE, también conocida como Directiva Marco de Aguas (DMA), establece que para 2015 debe conseguirse el uso sostenible del agua y un buen estado ecológico para todas las aguas europeas (Comisión Europea, 2000) [21].

En España el Plan Hidrológico Nacional (Ley 10/2001, del Plan Hidrológico Nacional), el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de

**Tabla 1.** Localización de los núcleos poblacionales seleccionados para el estudio

Provincia	Comarca	Municipio	Parroquia	Núcleo a estudiar
La Coruña	Barbanza	Rianxo	Leiro	Rial
	Ferrol	Cariño	A pedra	A Cerca
	Arzúa	Arzúa	Oíns	Ferradal
	Fisterra	Fisterra	Sardiñeiro	Sardiñeiro de Arriba
Lugo	A Ulloa	Antas de Ulla	Casa de Naia	Casa de Naia
	Os Ancares	Navia de Suarna	Rao	Aigas
	Terra Chá	Castro de Rei	Triabá	Matodoso
Orense	Allariz	Allariz	Allariz	Outeiro de Orraca
	Viana	La Mezquita	A Vilavella	A Vilavella
Pontevedra	Baixo Miño	La Guardia	Salcidos	A Gándara
	Pontevedra	Vilaboa	Cobres	Santradán

**Tabla 2.** Información de contexto de los núcleos poblacionales seleccionados para el estudio. HE = habitantes equivalentes

Núcleo a estudiar	Superficie disponible	Presupuesto municipal		Población actual (HE)		Población futura (HE)		
		€	€/HE	De hecho	Estacional	De hecho	Estacional	Total
Rial	No	4.088.912	354	219	33	281	42	323
A Cerca	No	1.618.960	338	128	51	164	65	230
Ferradal	Si	2.590.200	392	31	6	40	8	47
Sardiñeiro de Arriba	No			59	15	76	19	95
Casa de Naia	Si			63	12	81	15	96
Aigas	Si			14	3	18	4	22
Matodoso	Si	2.264.828	391	263	33	337	42	380
Outeiro de Orraca	Si	2.624.502	490	192	75	246	96	342
A Vilavella	Si	418.688	301	196	6	251	8	259
A Gándara	No	4.189.478	410	446	198	572	254	826
Santradán	No			190	30	244	38	282

**Tabla 3.** Superficie necesaria en cada alternativa (Collado, 1990 [8]; Collado, 2003 [9]; Crites y Tchobanoglous, 2000) [14]

Alternativas	Superficie necesaria (m <sup>2</sup> /hab.)	Puntuación (T1)
Tanque Imhoff	0,05 a 0,1	10
Físico-químico	0,1 a 0,2	10
Fosa séptica	0,1 a 0,5	10
Lechos bacterianos	0,5 a 0,7	10
Biodisco	0,5 a 0,7	10
Aireación prolongada	0,2 a 1,0	10
Lechos de turba	0,6 a 1,0	10
Lagunas aireadas	1 a 3	9
Lagunas anaerobias	1 a 3	9
Filtros de arena	1 a 9	8
Lechos de juncos	2 a 8	8
Lagunas aerobias	4 a 8	8
Pozos filtrantes	1 a 14	8
Escorrentía superficial	5 a 15	7
Lagunas facultativas	2 a 20	7
Infiltración rápida	2 a 22	7
Lechos filtrantes	2 a 25	6
Zanjas filtrantes	6 a 66	1
Filtros verdes	12 a 110	1

la Planificación Hidrológica, aprobado por Real Decreto 972/1988, junto con el Decreto de diseño técnico del Plan Hidrológico de las cuencas intracomunitarias de Galicia, para el ámbito autonómico, establecen que en los Planes Hidrológicos de cuenca han de incluirse las características básicas de calidad de las aguas y la ordenación de los vertidos de aguas residuales.

Los planes hidrológicos de cuenca fueron redactados a mediados de los años 90 por las Confederaciones Hidrográficas, y aprobados en 1998 por Real Decreto 1664/1998. En Galicia rige el Plan Hidrológico de la Cuenca Norte I, redactado por la Confederación Hidrográfica del Norte (1997), y para las cuencas intracomunitarias se redactó el Real Decreto 1332/2012, de 14 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de Galicia-Costa. Los planes fijan unos exigentes índices de calidad en las aguas, y para lograr ese objetivo regulan los tipos de depuración.

En una primera fase del Plan Hidrológico se establece el tratamiento secundario de los vertidos urbanos de núcleos de más de 2.000 habitantes. Se fijó el 31 de diciembre de 2005 como fecha límite para que todas las aglomeraciones urbanas de entre 2.000 y 10.000 habitantes contaran con tratamientos adecuados. En los núcleos de población menores de 2.000 habitantes sólo se exige el tratamiento de las aguas residuales urbanas que entren en los colectores y cuando el vertido se realice a aguas dulces o estuarios. En una segunda fase se plantea el tratamiento de todos los vertidos urbanos que van a lechos interiores (de tipo primario para los núcleos de menos de 2.000 habitantes y secundario para los mayores de 2.000 habitantes), e igual tratamiento para todos los vertidos (urbanos e industriales) que van a la costa. La propuesta realizada por el Plan Hidrológico de Galicia-Costa en materia de infraestructuras de sa-

neamiento es sumamente ambiciosa, siendo uno de sus principales objetivos dotar a todos los núcleos de más de 100 habitantes de infraestructura de saneamiento.

El Plan de Saneamiento de Galicia propone acometer hasta 2015, entre otras actuaciones, la implantación de sistemas de saneamiento adecuados para aglomeraciones de menos de 2.000 habitantes.

Los esfuerzos se han centrado casi exclusivamente en núcleos de población mayores de 2.000 habitantes para cumplir lo establecido en la normativa europea. Pero hay que tener en cuenta que en Galicia existen 29.857 núcleos menores de 2.000 habitantes (IGE, 2004 [24]). Aunque los mismos totalizan una población equivalente relativamente reducida, se convierten en la práctica en un número nada despreciable de pequeños focos de contaminación. Su pequeño tamaño y elevada dispersión geográfica complican la conducción y el tratamiento

de las aguas residuales que generan (García et al., 2001 [22]).

En España se ha dado prioridad a las depuradoras convencionales de ámbito municipal, con financiación pública a través de las Confederaciones Hidrográficas para su construcción, pero no para su mantenimiento. Ante la falta de capacidad económica de muchos municipios pequeños para afrontar los costes de mantenimiento de una estación depuradora convencional (que incluye un alto coste en energía, productos químicos, personal y reparaciones), hay en España más de 3.000 depuradoras convencionales abandonadas (Seoánez Calvo, 2005 [33]). En esta situación también influye la mala gestión, debido a la falta de personal especializado (García, 1995 [20]).

Para núcleos de cierta entidad es necesario el empleo de sistemas convencionales, tanto por el volumen del efluente que llega a la depuradora como por su nivel de contaminación, y por la enorme variabilidad en la com-

**Tabla 4.** Simplicidad de construcción (EPA, 1992 [18]). MS = muy simple; S = simple; C = complicado; MC = muy complicado

Alternativas	Valoración; puntuación entre paréntesis						Puntuación media (T2)
	Movimiento de tierras		Obra civil		Equipos		
	Tipo	Puntuación	Tipo	Puntuación	Tipo	Puntuación	
Tanque Imhoff	C	5	S	8	MS	10	7,7
Físico-químico	S	8	MC	3	MC	3	4,7
Fosa séptica	MS	10	MS	10	MS	10	10,0
Lechos bacterianos	MS	10	C	5	C	5	6,7
Biodisco	MS	10	C	5	C	5	6,7
Aireación prolongada	S	8	MC	3	MC	3	4,7
Lechos de turba	MS	10	S	8	MS	10	9,3
Lagunas aireadas	C	5	MS	10	MS	10	8,3
Lagunas anaerobias	C	5	MS	10	MS	10	8,3
Filtros de arena	S	8	S	8	MS	10	8,7
Lechos de juncos	MS	10	MS	10	MS	10	10,0
Lagunas aerobias	C	5	MS	10	MS	10	8,3
Pozos filtrantes	MC	3	S	8	MS	10	7,0
Escorrentía superficial	MS	10	MS	10	MS	10	10,0
Lagunas facultativas	C	5	MS	10	MS	10	8,3
Infiltración rápida	S	8	MS	10	MS	10	9,3
Lechos filtrantes	MS	10	MS	10	MS	10	10,0
Zanjas filtrantes	MS	10	MS	10	MS	10	10,0
Filtros verdes	MS	10	MS	10	MS	10	10,0
Peso	10		10		10		

**Tabla 5.** Sencillez de explotación y mantenimiento (Collado, 1990 [8]; Seoánez Calvo, 1995 [32]). MS = muy simple; S = simple; N = normal; C = complicado; MC = muy complicado; P = poco; R = regular; M = mucho; PF = poco frecuente; RF = razonablemente frecuente; F = frecuente; MF = muy frecuente

Alternativas	Valoración puntuación entre paréntesis				Puntuación media (T3)
	Simplicidad de funcionamiento	Necesidad de personal	Duración en el control	Frecuencia en el control	
Tanque Imhoff	S (8)	P (10)	P (10)	PF (10)	9,5
Físico-químico	MC (2)	M (4)	M (4)	MF (3)	3,3
Fosa séptica	MS (10)	P (10)	P (10)	PF (10)	10,0
Lechos bacterianos	C (4)	M (4)	M (4)	F (5)	4,3
Biodisco	C (4)	M (4)	M (4)	F (5)	4,3
Aireación prolongada	MC (2)	M (4)	M (4)	MF (3)	3,3
Lechos de turba	S (8)	R (7)	P (10)	RF (8)	8,3
Lagunas aireadas	N (6)	R (7)	R (7)	RF (8)	7,0
Lagunas anaerobias	MS (10)	P (10)	P (10)	PF (10)	10,0
Filtros de arena	N (6)	R (7)	R (7)	RF (8)	7,0
Lechos de juncos	MS (10)	P (10)	P (10)	PF (10)	10,0
Lagunas aerobias	MS (10)	P (10)	P (10)	PF (10)	10,0
Pozos filtrantes	MS (10)	P (10)	P (10)	PF (10)	10,0
Escorrentía superficial	N (6)	P (10)	P (10)	PF (10)	9,0
Lagunas facultativas	MS (10)	P (10)	P (10)	PF (10)	10,0
Infiltración rápida	S (8)	P (10)	P (10)	PF (10)	9,5
Lechos filtrantes	S (8)	P (10)	P (10)	PF (10)	9,5
Zanjas filtrantes	S (8)	P (10)	P (10)	PF (10)	9,5
Filtros verdes	MS (10)	P (10)	P (10)	PF (10)	10,0
Peso	10	10	10	10	

**Tabla 6. Costes de construcción en euros por habitante equivalente (Collado, 1990 [8]). HE = habitante equivalente**

Alternativas	Coste de construcción (euros/habitante equivalente)									Puntuación (T4)
	< 100 HE	100-200 HE	201-500 HE	501-1.000 HE	1.001-2.000 HE	2.001-5.000 HE	5.001-10.000 HE	> 10.000 HE	medio	
Tanque Imhoff	100	83	70						76	8
Físico-químico					300	160	120	100	129	6
Fosa séptica	100	85							89	8
Lechos bacterianos	600	540	430	340	300	250	180	150	196	4
Biodisco	1.100	700	360	320	300	260	200	180	216	4
Aireación prolongada	1.200	620	500	400	350	300	250	220	261	2
Lechos de turba			330	220	200	170	140	120	145	6
Lagunas aireadas					310	260	220	150	201	4
Lagunas anaerobias					40	35	20	20	24	9
Filtros de arena	2.400	1.800	1.600	1.000	990				1.663	1
Lechos de juncos		250				200		100	115	7
Lagunas aerobias										
Pozos filtrantes	1.100	1.000	900						945	1
Escorrentía superficial										
Lagunas facultativas				160	120	100	70	50	72	8
Infiltración rápida					16	11	9	8	10	10
Lechos filtrantes	2.100	1.700	1.400						1.545	1
Zanjas filtrantes	1.400	1.100	800						1.031	1
Filtros verdes	450			190	180	160	130	100	132	6

**Tabla 7. Costes de explotación y mantenimiento, en euros por habitante equivalente y año (Collado, 1990 [8]). HE = habitante equivalente**

Alternativas	Coste de construcción (euros/habitante equivalente)									Puntuación (T5)
	< 100 HE	100-200 HE	201-500 HE	501-1.000 HE	1.001-2.000 HE	2.001-5.000 HE	5.001-10.000 HE	> 10.000 HE	media	
Tanque Imhoff										
Físico-químico		20		15		12		10	14	8
Fosa séptica	5,5								5,5	9
Lechos bacterianos	35	25	22	18	15	12	10	8	10	8
Biodisco	64					20	15	10	13	8
Aireación prolongada	40	36	30	25		18	15	13	16	7
Lechos de turba		25		20		10		5	6	9
Lagunas aireadas					22	14	10	7	10	8
Lagunas anaerobias					1,5	1,2	0,8	0,5	1	10
Filtros de arena	97	45							58	1
Lechos de juncos				4				2	3	10
Lagunas aerobias					1,5	1,2	0,8	0,5	1	10
Pozos filtrantes	25	10							14	8
Escorrentía superficial										
Lagunas facultativas	8	7		5			2	2	5	9
Infiltración rápida						5		4	4	9
Lechos filtrantes	50	25							31	5
Zanjas filtrantes	31,5	14							18	7
Filtros verdes					8	7	5	4	5	9

posición de las aguas, debido muchas veces a la presencia de industrias en zonas urbanas (Cajigas, 2000 [7]). Sin embargo, en pequeños núcleos el volumen de residuos generados no es tan importante, y está constituido, sobre todo, por componentes orgánicos. En general no suele haber problemas por metales pesados, compuestos halogenados, azufrados, etc. Todo ello permite una gran versatilidad para seleccionar el tratamiento que más se adapte a cada núcleo.

Según Droste (1997) [15], de forma genérica se pueden señalar tres tipos de procesos en la depuración de aguas: primario, secundario y terciario. Asimismo, suele ser necesaria la aplicación de un pre tratamiento, mediante rejillas y cribas. Se trata de sistemas notablemente eficaces y fiables, que permiten alcanzar un buen nivel de depuración (Metcalf y Eddy, 1995 [29]). Su principal inconveniente es su elevado coste de implantación y mantenimiento, imposible de asumir por municipios pequeños, junto con un

elevado consumo de energía y generación de grandes cantidades de lodo.

Existen soluciones menos onerosas, que requieren menos instalaciones y mucha menos inversión que una depuradora convencional, con un mantenimiento muchísimo más económico y una operación más sencilla. Serían una opción razonable y asumible para la depuración de aguas residuales en municipios pequeños. Pueden denominarse tratamientos ecológicos, naturales o de bajo coste (García et al., 2000 [21]; Reed et al., 1995 [31]). En definitiva, se trata de aprovechar la capacidad natural de autodepuración que posee cualquier suelo o masa de agua, siendo microorganismos y plantas los que transforman los contaminantes (Kadlec y Knight, 1996 [26]). Son procesos relativamente sencillos de adaptar a pequeños núcleos de población, debido a que los caudales tratados suelen ser reducidos y la carga contaminante del efluente no es elevada.

Los sistemas ecológicos de depuración de aguas residuales no son méto-

dos experimentales, pues ya funcionan desde hace mucho tiempo en numerosas instalaciones y en muy diversos países. En España se han construido solamente algunas instalaciones de este tipo, por los procedimientos de lagunaje, lechos de turba y otros.

Se distinguen tres tipos principales de tratamientos: los tratamientos primarios, los que aprovechan la capacidad natural de depuración del terreno (Crites y Tchobanoglous, 2000 [14]) y los denominados métodos acuáticos (Harberl et al., 1997 [23]).

En núcleos de población de menos de 500 habitantes es frecuente el empleo de la fosa séptica o el tanque Imhoff como tratamiento primario. En poblaciones superiores suele emplearse la decantación primaria u otros sistemas. La fosa séptica es un tratamiento primario aplicable a viviendas aisladas, comunidades o núcleos urbanos con una población no superior a 200 o 300 habitantes, y que cuentan con red de alcantarillado separativa. El objetivo de un

**Tabla 8. Rendimiento obtenido en la depuración (EPA, 1992 [18]). Puntuaciones asignadas entre paréntesis (Crites y Tchobanoglous, 2000 [14])**

Alternativas	Rendimiento (%) en la eliminación de						Puntuación media (T6)
	DQO	DBO	SS	Nt	Pt	Coliformes fecales	
Tanque Imhoff		25-60 (4)	37-82 (6)				5,0
Físico-químico	60-75 (7)	50-75 (6)	65-90 (8)	10-20 (2)	85-95 (9)	99 (10)	7,0
Fosa séptica	28-56 (4)	17-60 (4)	48-85 (6)	0-57 (3)	0-75 (4)	10-90 (5)	4,3
Lechos bacterianos	68-81 (7)	60-95 (8)	52-90 (7)	15-70 (4)	5-30 (2)	80-90 (9)	6,2
Biodisco	70-85 (8)	70-97 (8)	75-97 (9)	30-80 (6)	8-30 (2)	85 (9)	7,0
Aireación prolongada	68-90 (8)	85-99 (9)	83-99 (9)	50-90 (7)	15-70 (4)	90 (9)	7,7
Lechos de turba	60-75 (7)	60-85 (7)	85-90 (9)	20-70 (5)	20-25 (2)	99,5 (10)	6,7
Lagunas aireadas	70-90 (8)	60-96 (8)	70-90 (8)	8-50 (3)	25-35 (3)	99 (10)	6,7
Lagunas anaerobias	20 (2)	50-85 (6)	60-80 (7)	30 (3)	10 (1)	99-99,9 (10)	4,8
Filtros de arena	68-90 (8)	80-99 (9)	30-99 (6)	23-90 (6)	20-80 (5)	98-99,9 (10)	7,3
Lechos de juncos	55-80 (7)	60-92 (8)	56-95 (7)	25-65 (5)	20-40 (3)	99-99,9 (10)	6,7
Lagunas aerobias	50 (5)	65-85 (8)	90 (9)	60 (6)	10 (1)	99-99,9 (10)	6,5
Pozos filtrantes							
Escorrentía superficial		92-96 (9)	95 (9)	45 (5)	30 (3)	99,5 (10)	7,2
Lagunas facultativas	50-85 (7)	60-95 (8)	49-90 (7)	60 (6)	10-35 (2)	99-99,9 (10)	6,7
Infiltración rápida	60-75 (7)	80-99 (9)	92-99 (9)	25-90 (6)	90 (9)	99-99,9 (10)	8,3
Lechos filtrantes	90-93 (10)	80-99 (9)	50-90 (7)	10-90 (5)	35-55 (5)		7,2
Zanjas filtrantes	65-90 (8)	90-98 (9)		25-99 (6)	80-99 (9)		8,0
Filtros verdes	75-85 (8)	90-99 (9)	95-98 (10)	85-90 (9)	90 (9)	99-99,9 (10)	9,2
pesos	10	10	10	5	5	5	

tanque Imhoff es proceder a la decantación del agua residual y al almacenamiento y digestión de los fangos sedimentados, pero, a diferencia de la fosa séptica, con funcionamiento independiente de las líneas de tratamiento: agua y fangos.

Entre los métodos de tratamiento en el terreno suelen distinguirse: los filtros verdes, infiltración rápida, zanjas filtrantes, lechos filtrantes, pozos filtrantes, escorrentía superficial, lechos de turba y lechos o filtros de arena (EPA, 1993 [19]). Estos procedimientos utilizan diferentes clases de superficie, grosor, tipo de vegetación y granulometría, consiguiendo excelentes calidades de agua depurada con bajo coste de mantenimiento. Son sistemas que se integran perfectamente en el medio, no producen olores y permiten otros aprovechamientos (estanques ornamentales y para uso recreativo, cría de peces, producción de forrajes, explotación forestal, etc.). Se trata de alternativas muy apropiadas para pequeños núcleos urbanos,

granjas e industrias agroalimentarias (Bavor et al., 1986 [6]).

Además de los tratamientos que aprovechan la capacidad depuradora del terreno, existen los denominados métodos acuáticos (lagunajes, humedales, cultivos acuáticos), que aprovechan la capacidad natural de autodepuración de cualquier masa de agua (EPA, 1988 [17]). Hacen pasar el agua por un circuito que reproduce determinadas condiciones de profundidad, tipo de vegetación y sombreado de las plantas (Llórens et al., 2004 [28]). Algunos se basan en la creación de ecosistemas propios de humedales y zonas acuáticas (Kadlec y Knight, 1996 [26]). Muchos de ellos parecen a simple vista estanques ornamentales.

La combinación de la digestión anaerobia y las zonas húmedas construidas con objetivos de depuración ofrece grandes ventajas económicas y ambientales, como son: bajo coste y bajo consumo de materiales de construcción, escaso o nulo consumo de energía, y una reducida generación de

lodos (Álvarez et al., 2003 [3]; Barros y Soto, 2002 [4]; Ligeró et al., 2001 [27]). El tratamiento anaerobio reduce el área de la zona húmeda, al tiempo que evita problemas de colmatación y malos olores (Álvarez, 2002 [2]; Barros y Soto, 2004 [5]; Soto et al., 2001 [34]). El coste de operación de una planta está relacionado principalmente con el consumo de energía y los costes de gestión de los lodos generados, y, en este sentido, tanto las zonas húmedas como los digestores anaerobios presentan los costes más bajos en estos capítulos.

Los tratamientos primarios (fosa séptica, tanque Imhoff y decantación primaria) solo resuelven parcialmente la depuración, por lo que deben combinarse con otros sistemas. En general, resulta necesario o conveniente la combinación de sistemas de depuración, como pueden ser los siguientes casos: tanque Imhoff + lechos de turba, tanque Imhoff + filtros verdes, lagunaje + filtros verdes, lechos bacterianos + aireación prolongada, lagunaje aireado + lagunaje facultativo, lagunaje anaerobio + lagunaje facultativo + lagunaje de maduración, etc.

La elección del sistema de tratamiento adecuado para las comunidades pequeñas es un problema complejo, al considerar aspectos de diferente naturaleza, relativos a la comunidad estudiada, al ambiente receptor y a las tecnologías de depuración disponibles (Comas et al., 2003 [10]). La gama de posibilidades es amplia, por lo que resulta necesario fijar unos criterios para seleccionar la mejor opción para la depuración de efluentes de un núcleo poblacional concreto, considerando las ventajas e inconvenientes de cada sistema en cuanto a rendimiento, fiabilidad técnica, estabilidad, control y explotación, mantenimiento, costos de implantación y explotación, impacto ambiental, necesidad de superficie, etc. Para realizar la selección se parte de las recomendaciones propuestas por diferentes autores (e.g., EPA, 1977 [16]; Crites y Tchobanoglous, 2000

[14]) para la instalación de plantas depuradoras en pequeños núcleos:

- Procesos que requieran un tiempo mínimo de operador.
- Bajo mantenimiento.
- Funcionamiento eficaz en un amplio rango de caudal y carga.
- Gasto mínimo de energía.
- Instalaciones donde las averías causen un mínimo deterioro en la calidad del efluente.
- Máxima integración en el medio natural.

En el presente trabajo se presenta un método para seleccionar la alternativa de depuración más conveniente, entre 19 sistemas ecológicos o de bajo coste, para el tratamiento de las aguas residuales en once núcleos de población del ámbito rural de Galicia, cada uno de ellos con circunstancias diferentes en cuanto a población, ubicación, disponibilidad de suelo, precio del mismo, etc. (Tabla 1, Tabla 2, Figura 1).

### MATERIAL Y MÉTODOS

Los núcleos de población analizados presentan características diferentes desde el punto de vista de la depuración de aguas: núcleos del centro de Galicia, con gran carga ganadera y alta disponibilidad de suelo; núcleos de montaña donde se prevé una gran despoblación y donde también hay elevada disponibilidad de suelo; núcleos costeros, con suelo escaso y caro, pero con alta disponibilidad presupuestaria municipal por los ingresos procedentes de la actividad turística y de otras fuentes.

Los datos de población empleados en la Tabla 2 proceden del padrón de 2004 (INE, 2004 [25]), y se toma como año horizonte el 2031. Para el cálculo de la población estacional (incremento estival de la población en el territorio gallego) se consideró el número de viviendas desocupadas según el Censo de Población de 2001, tomando un valor medio de tres habitantes por vivienda. Para el cálculo de la población

horizonte se consideró un crecimiento vegetativo del 1%, que es un valor medio para toda España.

La carga contaminante generada por un núcleo de población se obtendrá por la suma de la población estable y la estacional, junto con las aguas procedentes de las industrias asentadas en el núcleo que vierten a la red de colectores del mismo, y las explotaciones ganaderas estabuladas. El concepto de carga contaminante de una población, industria o territorio se cuantifica como número de habitantes equivalentes (HE). En España, por cada habitante de hecho existen, aproximadamente, dos habitantes equivalentes (Alfonso, 2002 [1]).

Los sistemas de depuración analizados aparecen listados en la primera columna de la Tabla 3 y siguientes. Se han considerado tratamientos primarios (tanque Imhoff, fosa séptica, lagunas anaerobias) y, entre otros, los siguientes tratamientos secundarios (Coto Fernández, 2006 [13]):

**Tabla 9. Estabilidad de las diferentes alternativas (Collado, 2003) [9]**

Alternativas	Estabilidad del sistema frente a cambios en las características del efluente			Puntuación media (T7)
	Temperatura	Turbidez	Caudal, carga	
Tanque Imhoff	4	1	3	2,7
Físico-químico	7	2	10	6,3
Fosa séptica	3	1	2	2,0
Lechos bacterianos	5	5	5	5,0
Biodisco	5	5	10	6,7
Aireación prolongada	5	3	10	6,0
Lechos de turba	8	5	5	6,0
Lagunas aireadas	3	2	10	5,0
Lagunas anaerobias	3	3	10	5,3
Filtros de arena	3	10	10	7,7
Lechos de juncos	5	3	10	6,0
Lagunas aerobias	3	1	10	4,7
Pozos filtrantes	8	10	10	9,3
Escorrentía superficial	10	3	10	7,7
Lagunas facultativas	3	3	10	5,3
Infiltración rápida	6	10	10	8,7
Lechos filtrantes	7	10	10	9,0
Zanjas filtrantes	7	10	10	9,0
Filtros verdes	10	3	10	7,7
Peso	10	10	10	

**Tabla 10. Impacto ambiental generado por los sistemas de depuración (Muiño et al., 2005 [30]). Puntuaciones entre paréntesis. PI = problema inexistente; PA = problema atípico; PN = problema normal; PF = problema frecuente; B = buena; N = normal; M = mala; A = alto; Me = medio; Ba = bajo**

Alternativas	Molestia por olores	Molestia por ruidos	Molestia por insectos	Integración en el entorno	Riesgo para la salud	Efecto en el suelo	Puntuación media (T8)
Tanque Imhoff	PF (2)	PI (10)	PA (8)	B (10)	A (4)	PA (8)	7
Físico-químico	PN (5)	PI (10)	PI (10)	M (4)	Ba (10)	PI (10)	8
Fosa séptica	PF (2)	PI (10)	PA (8)	B (10)	A (4)	PA (8)	7
Lechos bacterianos	PA (8)	PA (8)	PA (8)	M (4)	Ba (10)	PI (10)	8
Biodisco	PA (8)	PI (10)	PI (10)	M (4)	Ba (10)	PI (10)	9
Aireación prolongada	PA (8)	PF (2)	PI (10)	M (4)	Ba (10)	PI (10)	7
Lechos de turba	PN (5)	PI (10)	PN (5)	N (7)	Me (7)	PI (10)	7
Lagunas aireadas	PA (8)	PF (2)	PN (5)	N (7)	Me (7)	PN (5)	6
Lagunas anaerobias	PF (2)	PI (10)	PN (5)	N (7)	A (4)	PN (5)	5
Filtros de arena	PF (2)	PI (10)	PF (2)	N (7)	Me (7)	PN (5)	6
Lechos de juncos	PA (8)	PI (10)	PN (5)	B (10)	A (4)	PN (5)	7
Lagunas aerobias	PN (5)	PI (10)	PN (5)	N (7)	Me (7)	PN (5)	6
Pozos filtrantes	PI (10)	PI (10)	PA (8)	B (10)	A (4)	PF (2)	7
Escorrentía superficial	PN (5)	PI (10)	PN (5)	N (7)	A (4)	PF (2)	5
Lagunas facultativas	PN (5)	PI (10)	PN (5)	N (7)	Me (7)	PN (5)	6
Infiltración rápida	PF (2)	PI (10)	PN (5)	N (7)	A (4)	PF (2)	5
Lechos filtrantes	PN (5)	PI (10)	PA (8)	N (7)	A (4)	PF (2)	6
Zanjas filtrantes	PN (5)	PI (10)	PA (8)	N (7)	A (4)	PF (2)	6
Filtros verdes	PN (5)	PI (10)	PF (2)	B (10)	A (4)	PF (2)	5
Peso	10	10	10	10	10	10	

- Tratamientos de aplicación sub-superficial (zanjas, pozos y lechos filtrantes, filtros de arena, lechos de turba e infiltración rápida).
- Tratamientos de aplicación superficial (filtro verde y escorrentía superficial).
- Lagunaje (facultativo, aireado).
- Procesos biopelícula (lechos bacterianos, biodiscos).
- Procesos de fangos activados (aireación prolongada).

Entre los posibles sistemas de depuración se hace una primera preselección en la que intervienen como factores la población de cálculo (Tabla 2) y la superficie disponible (Tabla 3). En efecto, aunque los sistemas naturales o de bajo coste presentan gran versatilidad en cuanto a número de habitantes equivalentes en la población a tratar, cada alternativa ofrece sus rendimientos óptimos dentro de unos rangos determinados. Por otra parte, el mayor problema de estos sistemas

de depuración naturales es la gran superficie que requieren.

En la fase de selección se elige justificadamente algunas alternativas entre las preseleccionadas. Para facilitar la toma de decisiones Muiño et al. (2005) [30] proponen un indicador de comparación que considera el grado de aptitud de cada alternativa en función del número de habitantes equivalentes de aplicación, la superficie necesaria, los costes de inversión inicial en obra civil, los costes en equipos, las necesidades de mantenimiento y los rendimientos obtenidos en eliminación de demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos en suspensión (SS), nitrógeno (N), fósforo (P) y carbono (C). A cada uno de los aspectos señalados se le asigna una puntuación mínima de 0 y máxima de 10, según que sea nada, poco o muy favorable para la implantación del tratamiento que se esté puntuando. El valor del indicador es la puntuación media de las obteni-

das (Tablas 3 a 11). Se observa que la puntuación obtenida (T1, T2, T3, etc.) por cada alternativa para cada efecto es una media ponderada en la que los pesos o factores de ponderación se indican en la última fila de cada tabla. En este análisis se dieron pesos iguales en todas las tablas, salvo en la de rendimientos de la depuración (Tabla 8).

Para elaborar las matrices de selección (Tablas 12, 13, 14 y 15) se realiza la media ponderada de las puntuaciones obtenidas por cada alternativa de depuración, tomando pesos o factores de ponderación (a1, a2, a3, etc.) que se asignan justificadamente en función de las características propias del núcleo poblacional que se esté analizando. En la matriz de selección aparece en la última columna la puntuación global de cada alternativa, tras considerar de forma ponderada los nueve efectos analizados en las Tablas 3 a 11. Se elegirán como soluciones más adecuadas aquellas que estén entre las que alcanzan la máxima puntuación.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicando la matriz a cada núcleo en estudio se obtienen los siguientes resultados (Tablas 12 a 15). Para la asignación de pesos se agruparon núcleos con características similares. Así, en la Tabla 12 se incluyen núcleos de costa, con disponibilidad de suelo escasa y número de habitantes equivalentes similar. Para estos núcleos de población los mejores sistemas naturales serían: fosa séptica, lecho de juncos, infiltración rápida, biodisco, lechos de turba y lagunas anaerobias. De todos ellos se descartaría la fosa séptica por no ser suficiente para la población del núcleo. También se descarta el biodisco por ser más adecuado para poblaciones mayores. Con respecto a los otros cuatro sistemas de depuración, la elección en este caso es la infiltración rápida, por ser el sistema que menos terreno necesita, lo cual es importante en estas zonas, en las que la disponibilidad de suelo es muy limitada.

Se analizan también de forma agru-

pada los núcleos de interior con una elevada disponibilidad de suelo (Tabla 13). Para estos núcleos los mejores sistemas serían: lecho de juncos e infiltración rápida. Los lechos de juncos ofrecen menos rendimiento, pero requieren menor superficie para su implantación, generan menos olores y son menos sensibles a la temperatura.

Para el núcleo de A Gándara (Tabla 14), que tiene un número mayor de habitantes equivalentes (826), los sistemas naturales más adecuados son: lecho de turba, lecho de juncos, lecho bacteriano y biodisco, no presentando ninguno de ellos limitación por población. En este caso se seleccionará el biodisco, por necesitar menos superficie para su implantación, criterio en este caso muy importante por ser un núcleo de costa donde la disponibilidad de terreno es baja.

Los núcleos Sardiñeiro de Arriba, Ferradal, Casa de Naia y Aigas fueron valorados todos de igual modo, debido a que la población de cada uno de

ellos es inferior a 100 HE. Es decir, los pesos asignados fueron los mismos en cada núcleo (Tabla 15). Según los resultados, el mejor sistema natural para estos pequeños núcleos es la fosa séptica. Como en casos anteriores, aparecen también otros sistemas con una puntuación igual que la fosa séptica, pero se descartan por no ser económicamente viables para núcleos de poca población.

En general, sobre las tablas precedentes (Tabla 12 a Tabla 15), los mejores métodos para las poblaciones estudiadas serían: lechos de juncos, infiltración rápida, fosa séptica y biodiscos.

Como resumen de la aplicación del indicador a los núcleos poblacionales analizados, la mayoría de los sistemas naturales de depuración son aptos para su población equivalente, unos en mayor medida que otros, pero solo la laguna aireada sería totalmente desaconsejable (HE < 1.000). En los núcleos con más de 100 HE el sistema natural de fosa séptica se descarta to-

**Tabla 11. Producción de fangos (Collado, 1990) [8]**

Alternativas	Producción de fangos (l/m <sup>3</sup> agua residual)	Puntuación (T9)
Tanque Imhoff	1,5-2	9
Físico-químico	6-25	1
Fosa séptica	0,9-2	9
Lechos bacterianos	1-3	9
Biodisco	3-4	8
Aireación prolongada	3-7	7
Lechos de turba	0,5-1	10
Lagunas aireadas	1-2,5	9
Lagunas anaerobias	0,4-0,7	10
Filtros de arena		10
Lechos de juncos		10
Lagunas aerobias	1-2	9
Pozos filtrantes		10
Escorrentía superficial		10
Lagunas facultativas	1,2-1,6	9
Infiltración rápida		10
Lechos filtrantes		10
Zanjas filtrantes		10
Filtros verdes		10
Peso	10	

**Tabla 12. Matriz de selección para los núcleos de Rial, A Cerca y Santradán (núcleos de costa)**

Alternativas	Superficie necesaria	Simplicidad de construcción	Sencillez de explotación y mantenimiento	Coste de construcción	Coste de explotación y mantenimiento	Rendimiento	Estabilidad	Impacto ambiental	Producción de fangos	Puntuación media
Tanque Imhoff	10	7,7	9,5	8,0		5,0	2,7	7,0	9,0	6,6
Físico-químico	10	4,7	3,3	6,0	8,0	7,0	6,3	8,2	1,0	7,1
Fosa séptica	10	10,0	10,0	8,0	9,0	4,3	2,0	7,0	9,0	7,7
Lechos bacterianos	10	6,7	4,3	4,0	8,0	6,2	5,0	8,0	9,0	7,1
Biodisco	10	6,7	4,3	4,0	8,0	7,0	6,7	8,7	8,0	7,5
Aireación prolongada	10	4,7	3,3	2,0	7,0	7,7	6,0	7,3	7,0	6,7
Lechos de turba	10	9,3	8,3	6,0	9,0	6,7	6,0	7,3	10,0	8,0
Lagunas aireadas	9	8,3	7,0	4,0	8,0	6,7	5,0	5,7	9,0	6,9
Lagunas anaerobias	9	8,3	10,0	9,0	10,0	4,8	5,3	5,5	10,0	7,7
Filtros de arena	8	8,7	7,0	1,0	1,0	7,3	7,7	5,5	10,0	6,1
Lechos de juncos	8	10,0	10,0	7,0	10,0	6,7	6,0	7,0	10,0	8,0
Lagunas aerobias	8	8,3	10,0		10,0	6,5	4,7	6,5	9,0	7,7
Pozos filtrantes	8	7,0	10,0	1,0	8,0		9,3	7,3	10,0	7,6
Escorrentía superficial	7	10,0	9,0			7,2	7,7	5,5	10,0	7,4
Lagunas facultativas	7	8,3	10,0	8,0	9,0	6,7	5,3	6,5	9,0	7,5
Infiltración rápida	7	9,3	9,5	10,0	9,0	8,3	8,7	5,0	10,0	7,9
Lechos filtrantes	6	10,0	9,5	1,0	5,0	7,2	9,0	6,0	10,0	6,6
Zanjas filtrantes	1	10,0	9,5	1,0	7,0	8,0	9,0	6,0	10,0	5,9
Filtros verdes	1	10,0	10,0	6,0	9,0	9,2	7,7	5,5	10,0	6,5
Peso (ai)	a1=10	a2=3	a3=5	a4=4	a5=5	a6=5	a7=5	a8=8	a9=1	

talmente, siendo esta opción aconsejable para núcleos de menos de 100 HE.

Las exigencias en cuanto a movimiento de tierras, obra civil y equipos suelen ser pocas, sobre todo en relación a equipos y maquinaria (Tabla 4). El movimiento de tierras en la fase constructiva de un sistema de tratamiento de aguas residuales resulta habitualmente simple en su ejecución, salvo circunstancias debidas a la naturaleza del terreno. Los sistemas de lagunaje, y especialmente los pozos filtrantes, son los sistemas que pueden presentar mayor complejidad, debido a que dependen mucho de la topografía y su implantación está limitada a áreas relativamente llanas.

En los principales sistemas de tratamiento naturales el nivel de depuración alcanzado es con frecuencia excelente (Tabla 8), en muchos casos similar a los de una depuradora convencional y, combinando procesos, puede llegarse a niveles equivalentes a un tratamiento terciario. De forma global, en los sistemas de aplicación al terreno, tanto superficial como sub-superficial, se alcanzan los más altos rendimientos, y en los tratamientos previos (fosa séptica, tanque Imhoff) se obtienen los rendimientos más bajos.

El tratamiento de los lodos producidos en un proceso de depuración puede suponer gran parte del coste de explotación, por lo que deben considerarse prioritarios aquellos sistemas donde la producción de fangos sea menor. La Tabla 11 muestra la producción de fangos generada con los distintos métodos. Los sistemas donde se produce la mayor cantidad de fangos son la aireación prolongada y, sobre todo, el tratamiento físico-químico (6-25 l/m<sup>3</sup> de agua residual).

Analizando las Tablas 6 y 7 se observa el bajo coste, tanto en la inversión inicial como en el mantenimiento, que presentan las fosas sépticas. Sus pequeñas necesidades de espacio son otro factor muy favorable de cara a su implantación en Galicia. Sin embargo, solo resultan válidas para un número pequeño de habitantes equivalentes,

y el grado de depuración alcanzado equivale únicamente a un tratamiento primario, por lo que esta alternativa impide por sí sola el cumplimiento de la legislación sobre vertidos. No obstante, sería una opción interesante en combinación con otras. Algo similar ocurre con los tanques Imhoff, con la diferencia de que sus costes en cuanto a inversión inicial son algo mayores, y que también proporcionan mejores resultados en reducción de DBO y SS.

En contra de las zanjas y lechos filtrantes pesan mucho las grandes necesidades de superficie y los elevados costes de funcionamiento. A cambio, consiguen buenas calidades del efluente sin necesidad de combinar con otros sistemas. Asimismo, el coste de inversión inicial es reducido.

Los pozos filtrantes son una instalación que profundiza verticalmente en el terreno, por lo que demandan un importante movimiento de tierras, que encarece considerablemente su implantación. En contraposición, los filtros de arena son una instalación sencilla que supone poca inversión. Ambos sistemas incurren en elevados costes de mantenimiento, compensados con unas necesidades de superficie no excesivamente grandes. El nivel de depuración alcanzado es bueno en el caso de los filtros de arena.

Los lechos de turba son válidos para poblaciones de hasta 2.000 habitantes equivalentes, con necesidades de espacio relativamente pequeñas y pocos requerimientos en cuanto a obra e instalación. Los costes de mantenimiento son elevados, aunque el nivel de tratamiento alcanzado es muy aceptable.

Los sistemas de infiltración rápida y, sobre todo, la escorrentía superficial tienen la gran ventaja de obtener agua depurada de excelente calidad. Además de ello, presentan bajos costes de mantenimiento y sus necesidades de obra e instalación no son elevadas. Su rango de aplicación en cuanto a habitantes equivalentes es amplio, lo que les proporciona una gran versatilidad, aunque presentan grandes necesidades de espacio.

**Tabla 13.** Matriz de selección para los núcleos de Matodoso, Outeiro de Orraca y A Vilavella (núcleos del interior)

Alternativas	Superficie necesaria	Simplicidad de construcción	Sencillez de explotación y mantenimiento	Coste de construcción	Coste de explotación y mantenimiento	Rendimiento	Estabilidad	Impacto ambiental	Producción de fangos	Puntuación media
Tanque Imhoff	10	7,7	9,5	8,0		5,0	2,7	7,0	9,0	5,9
Físico-químico	10	4,7	3,3	6,0	8,0	7,0	6,3	8,2	1,0	5,5
Fosa séptica	10	10,0	10,0	8,0	9,0	4,3	2,0	7,0	9,0	7,7
Lechos bacterianos	10	6,7	4,3	4,0	8,0	6,2	5,0	8,0	9,0	7,0
Biodisco	10	6,7	4,3	4,0	8,0	7,0	6,7	8,7	8,0	7,2
Aireación prolongada	10	4,7	3,3	2,0	7,0	7,7	6,0	7,3	7,0	6,3
Lechos de turba	10	9,3	8,3	6,0	9,0	6,7	6,0	7,3	10,0	8,3
Lagunas aireadas	9	8,3	7,0	4,0	8,0	6,7	5,0	5,7	9,0	7,2
Lagunas anaerobias	9	8,3	10,0	9,0	10,0	4,8	5,3	5,5	10,0	8,2
Filtros de arena	8	8,7	7,0	1,0	1,0	7,3	7,7	5,5	10,0	6,3
Lechos de juncos	8	10,0	10,0	7,0	10,0	6,7	6,0	7,0	10,0	8,7
Lagunas aerobias	8	8,3	10,0		10,0	6,5	4,7	6,5	9,0	8,2
Pozos filtrantes	8	7,0	10,0	1,0	8,0		9,3	7,3	10,0	8,7
Escorrentía superficial	7	10,0	9,0			7,2	7,7	5,5	10,0	8,1
Lagunas facultativas	7	8,3	10,0	8,0	9,0	6,7	5,3	6,5	9,0	8,1
Infiltración rápida	7	9,3	9,5	10,0	9,0	8,3	8,7	5,0	10,0	8,6
Lechos filtrantes	6	10,0	9,5	1,0	5,0	7,2	9,0	6,0	10,0	7,6
Zanjas filtrantes	1	10,0	9,5	1,0	7,0	8,0	9,0	6,0	10,0	7,9
Filtros verdes	1	10,0	10,0	6,0	9,0	9,2	7,7	5,5	10,0	8,4
Peso (ai)	a1=2	a2=1	a3=8	a4=1	a5=9	a6=5	a7=5	a8=6	a9=9	

**Tabla 14.** Matriz de selección para el núcleo de A Gándara (núcleo más poblado de la muestra analizada)

Alternativas	Superficie necesaria	Simplicidad de construcción	Sencillez de explotación y mantenimiento	Coste de construcción	Coste de explotación y mantenimiento	Rendimiento	Estabilidad	Impacto ambiental	Producción de fangos	Puntuación media
Tanque Imhoff	10	7,7	9,5	8,0		5,0	2,7	7,0	9,0	7,1
Físico-químico	10	4,7	3,3	6,0	8,0	7,0	6,3	8,2	1,0	7,4
Fosa séptica	10	10,0	10,0	8,0	9,0	4,3	2,0	7,0	9,0	7,5
Lechos bacterianos	10	6,7	4,3	4,0	8,0	6,2	5,0	8,0	9,0	7,3
Biodisco	10	6,7	4,3	4,0	8,0	7,0	6,7	8,7	8,0	7,7
Aireación prolongada	10	4,7	3,3	2,0	7,0	7,7	6,0	7,3	7,0	7,2
Lechos de turba	10	9,3	8,3	6,0	9,0	6,7	6,0	7,3	10,0	8,0
Lagunas aireadas	9	8,3	7,0	4,0	8,0	6,7	5,0	5,7	9,0	6,9
Lagunas anaerobias	9	8,3	10,0	9,0	10,0	4,8	5,3	5,5	10,0	7,2
Filtros de arena	8	8,7	7,0	1,0	1,0	7,3	7,7	5,5	10,0	6,4
Lechos de juncos	8	10,0	10,0	7,0	10,0	6,7	6,0	7,0	10,0	7,7
Lagunas aerobias	8	8,3	10,0		10,0	6,5	4,7	6,5	9,0	7,4
Pozos filtrantes	8	7,0	10,0	1,0	8,0		9,3	7,3	10,0	7,4
Escorrentía superficial	7	10,0	9,0			7,2	7,7	5,5	10,0	7,1
Lagunas facultativas	7	8,3	10,0	8,0	9,0	6,7	5,3	6,5	9,0	7,2
Infiltración rápida	7	9,3	9,5	10,0	9,0	8,3	8,7	5,0	10,0	7,6
Lechos filtrantes	6	10,0	9,5	1,0	5,0	7,2	9,0	6,0	10,0	6,5
Zanjas filtrantes	1	10,0	9,5	1,0	7,0	8,0	9,0	6,0	10,0	5,6
Filtros verdes	1	10,0	10,0	6,0	9,0	9,2	7,7	5,5	10,0	6,2
Peso (ai)	a1=10	a2=2	a3=3	a4=3	a5=2	a6=9	a7=2	a8=10	a9=1	

Figura 1. Situación de los núcleos poblacionales analizados.



Tabla 15. Matriz de selección para los núcleos de Sardiñeiro de Arriba, Ferradal, Casa de Naia y Aigas (los núcleo más débilmente poblados de la muestra analizada)

Alternativas	Superficie necesaria	Simplicidad de construcción	Sencillez de explotación y mantenimiento	Coste de construcción	Coste de explotación y mantenimiento	Rendimiento	Estabilidad	Impacto ambiental	Producción de fangos	Puntuación media
Tanque Imhoff	10	7,7	9,5	8,0		5,0	2,7	7,0	9,0	7,1
Físico-químico	10	4,7	3,3	6,0	8,0	7,0	6,3	8,2	1,0	5,9
Fosa séptica	10	10,0	10,0	8,0	9,0	4,3	2,0	7,0	9,0	8,6
Lechos bacterianos	10	6,7	4,3	4,0	8,0	6,2	5,0	8,0	9,0	7,0
Biodisco	10	6,7	4,3	4,0	8,0	7,0	6,7	8,7	8,0	7,1
Aireación prolongada	10	4,7	3,3	2,0	7,0	7,7	6,0	7,3	7,0	6,0
Lechos de turba	10	9,3	8,3	6,0	9,0	6,7	6,0	7,3	10,0	8,5
Lagunas aireadas	9	8,3	7,0	4,0	8,0	6,7	5,0	5,7	9,0	7,3
Lagunas anaerobias	9	8,3	10,0	9,0	10,0	4,8	5,3	5,5	10,0	8,6
Filtros de arena	8	8,7	7,0	1,0	1,0	7,3	7,7	5,5	10,0	6,2
Lechos de juncos	8	10,0	10,0	7,0	10,0	6,7	6,0	7,0	10,0	8,7
Lagunas aerobias	8	8,3	10,0		10,0	6,5	4,7	6,5	9,0	8,4
Pozos filtrantes	8	7,0	10,0	1,0	8,0		9,3	7,3	10,0	7,5
Escorrentía superficial	7	10,0	9,0			7,2	7,7	5,5	10,0	8,3
Lagunas facultativas	7	8,3	10,0	8,0	9,0	6,7	5,3	6,5	9,0	8,1
Infiltración rápida	7	9,3	9,5	10,0	9,0	8,3	8,7	5,0	10,0	8,6
Lechos filtrantes	6	10,0	9,5	1,0	5,0	7,2	9,0	6,0	10,0	7,1
Zanjas filtrantes	1	10,0	9,5	1,0	7,0	8,0	9,0	6,0	10,0	6,6
Filtros verdes	1	10,0	10,0	6,0	9,0	9,2	7,7	5,5	10,0	7,5
Peso (ai)	a1=10	a2=10	a3=10	a4=8	a5=9	a6=4	a7=2	a8=7	a9=9	

Los lagunajes poseen también necesidades de superficie importantes, sobre todo las lagunas aerobias y las facultativas, y las necesidades de obra (movimiento de tierras) son elevadas. No obstante, los rendimientos alcanzados en depuración son bastante buenos, especialmente las lagunas aireadas, al disponer de elementos mecánicos que facilitan el tratamiento.

Los lechos bacterianos, los biodiscos, la aireación prolongada y los tratamientos físico-químicos presentan a su favor unos requerimientos de espacio muy reducidos, sobre todo en comparación con el resto de sistemas de tratamiento secundario. La calidad del agua depurada es también muy alta, aunque los lechos bacterianos y los biodiscos ofrecen rendimientos discretos en cuanto a reducción de nitrógeno y fósforo total. Su mayor problema son sus elevados costes de construcción y mantenimiento.

En líneas generales, siempre que

las disponibilidades de terreno sean suficientes y los efluentes tengan la calidad exigida, la prioridad en la selección de los procesos de depuración va en el siguiente orden: aplicación superficial al terreno, lagunaje, procesos biopelícula y tratamiento convencional.

En núcleos muy reducidos (menos de 200 habitantes equivalentes), cuando se disponga de terreno suficiente y adecuado, las soluciones de aplicación sub-superficial pueden resultar económicas y viables, obteniéndose efluentes de alta calidad. En poblaciones mayores, los costos y necesidades de terreno hacen inviable el uso de los sistemas de aplicación sub-superficial.

Sin embargo, no es adecuado dejar en manos de los procesos de depuración toda la responsabilidad en cuanto a la gestión del agua. También son necesarias otras acciones. Siempre que sea posible, se debe optar por la reutilización. Se debe tratar de re-

ducir la demanda de agua para riego agrícola, ya que esta es una de las actividades donde más volumen se consume (62% del total), frente al 12% de consumo para abastecimiento y el 26% para usos industriales.

Como complemento, debe impulsarse la investigación y la innovación tecnológica hacia el tratamiento terciario de las aguas residuales, por medio de técnicas biológicas como la fitodepuración mediante macrófitos acuáticos, ya que los tratamientos terciarios convencionales tienen unos costes altos, tanto en inversión inicial como en mantenimiento posterior.

**Bibliografía**

[1] Alfonso, C. (2002). Saneamiento y depuración de aguas residuales urbanas: Máxima calidad. *Ambiente*: 20-29.  
 [2] Álvarez, J.A. (2002). Tratamiento hidrolítico anaerobio de aguas residuales urbanas. Real Academia Gallega de Ciencias (inédito).  
 [3] Álvarez, J.A., Zapico, C.A., Gómez, M., Presas, J., Soto, M. (2003). Anaerobic hydrolysis of a municipal wastewater in a pilot scale digester. *Wat. Sci. Technol.*, 47(12): 223-230.  
 [4] Barros, P., Soto, M. (2002). Anaerobic systems for domestic wastewater treatment in rural areas. *International Conference on Small*

*Wastewater Technologies and Management for the Mediterranean Area*, Sevilla.  
 [5] Barros, P., Soto, M. (2004). Depuración natural avanzada en núcleos rurales. En: *El Congreso internacional de ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*, Santiago de Compostela.  
 [6] Bavor, H.J., Roser, D.H., Fisher, P.J., Smalls, J.C. (1986). *Joint Study on Sewage Treatment Using Shallow Lagoon-Aquatic Plant Systems*. Water Research Laboratory Agricultural College, Richmond, Australia.  
 [7] Cajigas, A. (2000). La gestión de la calidad de las aguas. *OP. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, 50 (1).  
 [8] Collado, R. (1990). Tecnologías de depuración para pequeñas comunidades. Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Cedex, Madrid.  
 [9] Collado, R. (2003). Depuración de las aguas residuales en pequeños núcleos. Situación actual, compromisos y alternativas. *Tecnología del Agua*, 234: 41-48.  
 [10] Comas, J., Alemany, J., Poch, M., Torrens, A., Salgot, M., Bou, J. (2003). Development of a knowledge-based decision support system for identifying adequate wastewater treatment for small communities. *Water Science and Technology*, 48 (11-12): 393-400.  
 [11] Comisión Europea (1991). Directiva Europea 91/271/CEE, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. European Comision. Brussels, Belgium.  
 [12] Comisión Europea (2000). Directiva Europea 2000/60/CEE, de 23 de octubre de 2000, Directiva Marco de Aguas. European Comision. Brussels, Belgium.  
 [13] Coto Fernández, N. (2006). Depuración de aguas residuales en pequeños núcleos

rurales. Estudio da parroquia de San Pedro de Triabá (Castro de Rei, Lugo). Proyecto fin de carrera. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.  
 [14] Crites, R., Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales en núcleos pequeños y descentralizados*. MacGraw-Hill, Madrid.  
 [15] Droste, R.L. (1997). *Theory and practice of water and wastewater treatment*. John Wiley & Sons.  
 [16] EPA (1977). *Process design manual. Wastewater treatment facilities for sewerage small communities*. Environmental Protection Agency. Washington, EEUU.  
 [17] EPA (1988). *Design Manual: Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. A Technology Assessment*. S.C. Reed, ed., EPA/832/R-93/008. US EPA Office of Research and Development. Cincinnati, EEUU.  
 [18] EPA (1992). *Manual of Wastewater Treatment & Disposal for Small Communities*. U.S. Environmental Protection Agency.  
 [19] EPA (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. A Technology Assessment*. S.C. Reed, ed., EPA/832/R-93/008. US EPA Office of Water. Washington, EEUU.  
 [20] García, E. (1995). Situación del saneamiento y la depuración en la Comunidad Autónoma Gallega. *OP*, 33.  
 [21] García, J., Mujeriego, R., Bourrouet, A., Peñuelas, G., Freixes, A. (2000). *Wastewater treatment by pond systems: experiences in Catalonia, Spain*. *Water Science and Technology*, 42(10-11): 35-42.  
 [22] García, J., Mujeriego, R., Obis, R., Bou, J. (2001). *Wastewater treatment for small communities in Catalonia (Mediterranean region)*. *WaterPolicy*, 3 (4): 341-350.  
 [23] Harberl, R., Perfler, R., Laber, J., Cooper, P.

(1997). *Wetland systems for water pollution control*. *Water Science and Technology*, 35 (5).  
 [24] IGE (2004). *Encuesta de explotaciones de vacuno en Galicia*. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, España.  
 [25] INE (2004). *Nomenclátor 2003*. Instituto Nacional de Estadística. Ministerio de Economía y Hacienda, Madrid.  
 [26] Kadlec, R.H., Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. CRC Press.  
 [27] Ligeró, P., de Vega, A., Soto, M. (2001). *Pretreatment of urban wastewaters in a hydrolytic upflow digester*. *Water SA*, 17(3): 399-404.  
 [28] Llórens, M., Portero, S., Sáez, J., Aguilar, M., Ortuño, J., Meseguer, V. (2004). *Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales urbanas de pequeños núcleos de población: la depuración simbiótica*. *Tecnología del agua*, 246.  
 [29] Metcalf y Eddy (1995). *Ingeniería de las aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill.  
 [30] Muíño, D., Cuesta, T.S., Iglesias, G., Neira, X.X. (2005). *Alternativas en la depuración de aguas residuales en pequeños núcleos rurales: el caso de la Comunidad Autónoma de Galicia*. IX International Congress on Project Engineering, Málaga.  
 [31] Reed, S.C., Crites, R.W., Middlebrooks, E.J. (1995). *Natural systems for waste management and treatment*. McGraw-Hill.  
 [32] Seoáñez Calvo, M. (1995). *Aguas residuales urbanas: Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*. Ediciones Mundi-Prensa.  
 [33] Seoáñez Calvo, M. (2005). *Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo*. Ediciones Mundi-Prensa.  
 [34] Soto, M., Gómez, M., Presas, J. (2001). *Depuración de aguas residuales mediante zonas húmedas: proxecto para a sua aplicación nun núcleo rural*. <http://www.cepis.ops-oms.org>.