

Resumen

Depurar es, esencialmente, concentrar la contaminación en un subproducto final: el fango o biosólido. Como ejemplo, la EDAR La Golondrina depuró el agua residual de Córdoba acumulando la contaminación presente en cada m³ en 1,3 kg de fango (años 2.002 y 2.003). También se redujo el contenido en nueve metales mayoritarios (Cu, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Cr, Zn y Hg) desde 2,72 mg/l hasta 1,42 mg/l en el agua depurada, concentrando la carga orgánica unas 340 veces, mientras que las tasas de concentración de metales en el fango dependieron de cada metal concreto (desde 10.000 para Fe hasta 1-2 para Cd y Hg). Por otra parte, el fango generado cumplía con la normativa aplicable para usos agrícolas, su principal destino. Finalmente, la concentración de un metal en el fango depende más de su eliminación en la depuración que de la propia concentración inicial de éste en el agua residual bruta.

Palabras clave:

Agua residual doméstica, EDAR, fangos de depuración, metales pesados.

Abstract**Characterization of sludges of La Golondrina WWTP: sludges as final containers of the domestic wastewater pollution**

Treatment of wastewater is to concentrate the original pollution in a by-product: the wastewater sludge or bio-solid. As example, La Golondrina WWTP (Córdoba-Spain) promotes the production of 1,3 kg of sludge per m³ of wastewater, yielding logically a treated water according to laws. Furthermore, the treatment process there applied reduces the levels of nine majority metals (Cu, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Cr, Zn y Hg) from 2,72 mg/l to 1,42 mg/l in the treated water, generating almost, a sludge agrees with the spanish normative to sludge intended to agricultural use (its main fate). Summarizing, the treatment of wastewater supposes the concentration of the original biodegradable load into the sludge around 340 times, while metals exhibited a different concentration degree for each one (from 10.000 times for Fe upto 1-2 times for Cd and Hg). Finally, the concentration degree of a metal in the sludge is mainly led by the removed concentration of metal in the treatment process, and after, by the original concentration of metal in the influent wastewater.

Keywords:

Domestic wastewater, WWTP, wastewater sludge, metals.

Caracterización de fangos de la EDAR La Golondrina (Emacsa-Córdoba): su función como receptores finales de la contaminación del agua residual urbana

Por: **R. Marín Galvín, L. Alonso Pérez de Siles y Fco. J. Rojas Moreno,** de Emacsa

Empresa Municipal de Aguas de Córdoba S.A. (Emacsa)

Servicio de Control de Calidad

C/ Cronista Rey Díaz, 2

14006 Córdoba

E-mail: rmargal@emacsa.es

Web: www.emacsa.es

1. Introducción

Cualquier proceso de depuración de aguas residuales (domésticas o industriales) implica un fenómeno más o menos complejo de concentración de la contaminación existente en origen, sea cual sea la que se considere (orgánica, fisicoquímica, microbiológica) en unos subproductos finales que acumulan tal contaminación. No debe perderse de vista, pues, que una EDAR no es ni más ni menos que un centro de transformación en donde se lleva a cabo una "reubicación" de sustancias dispersas en un efluente a depurar (agua residual influente) que se concentran en un subproducto final (fango, lodo de depuración o biosólido). Esto permite por último verter al medio natural un producto final (agua depurada) que cumpla los estándares de depuración aplicables en cada caso, y consiguientemente con un impacto ambiental admisible.

Dicho esto, el principal problema que se plantea tanto actualmente co-

mo de cara a un futuro inmediato en el tema de la depuración de aguas usadas, acaso sea la gestión y el destino final de los fangos o lodos de depuración producidos continuamente en nuestras EDARs. Puede parecer un contrasentido pero a medida que se es más exigente en la depuración de las aguas residuales es más acusado el problema de la cada vez más ingente producción de lodos de depuración, debiendo plantearse estrategias adecuadas en su gestión. Existe una correlación lógica que establece que cuanto más se depura en una colectividad más volumen de lodos de depuración se producen. Y a ellos hay inexcusablemente que darles una solución real, coherente y razonable, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental y económico.

Sin entrar en otros pormenores que no son el objetivo prioritario de este trabajo, todas las normativas tanto europeas como nacionales exigen por ley niveles de depura-

ción de nuestras aguas usadas y niveles de calidad adecuados de nuestros cursos naturales de aguas (Directiva de Control Integrado de la Contaminación, Directiva Marco de Aguas, Ley de Aguas y Reglamentos que la desarrollan, Plan Hidrológico Nacional y Planes de Cuenca, Ordenanzas y Reglamentos de vertidos autonómicos, provinciales o municipales...) [1-9].

Planteada la cuestión de la sobreproducción de fangos y lodos de depuración, a los técnicos y gestores ocupados en estos temas se les suscita la cuestión de qué hacer con ellos y cómo hacerlo. La respuesta a tal cuestión emana del marco legislativo aplicable en la Unión Europea que establece que la gestión de cualquier tipo de residuo (también los fangos de depuración) deben seguir una estrategia de minimización, valorización y tratamiento y vertido [10 y ref. citadas allí].

Con independencia de la gestión y destino posterior de los fangos de depuración, la práctica de la minimización supondrá la disminución del contenido en agua de los mismos a fin de reducir las instalaciones subsiguientes para su secado, reduciendo asimismo los costes de transporte del fango ya seco a su destino final.

Centrándonos ahora muy brevemente en el apartado de la valorización, que sin duda es la vía por la que debe aportarse fuerte en una colectividad comprometida ambientalmente, podríamos referirnos a los dos componentes valorizables de un fango de EDAR: la fracción orgánica y la inorgánica, cada una con connotaciones ciertamente distintas.

En un reciente y excelente trabajo sobre este tema [10], su autor comenta el uso actual de los fangos de depuración en agricultura mediante aplicación al suelo (compostaje) si bien esta práctica se va restringiendo cada vez más, tanto por la propia mala calidad de los fangos en cuestión, motivada por su contenido en sustancias posteriormente contami-

*La emisión
de gases ricos
en compuestos
indeseables sería la
cuestión prioritaria*

nantes del medio (especialmente metales pesados y compuestos orgánicos de síntesis) como por las propias restricciones emanadas de las Directivas de la Unión Europea. En este aspecto, un control exhaustivo de los vertidos industriales a las redes públicas de saneamiento de una colectividad es el único instrumento válido para garantizar una aceptable calidad de los fangos cara a su uso agrícola. Además, una acertada política de incentivos del empleo de composts elaborados con fangos de depuración puede ser absolutamente imprescindible en este tema.

Por otro lado, parece ser que la cogeneración mediante previa digestión anaerobia de fangos, con reducción importante del volumen de los mismos y obtención de energía, representa una salida emergente al sector. En este caso, la emisión de gases ricos en compuestos indeseables sería la cuestión prioritaria.

Finalmente, otras opciones prometedoras para gestionar fangos de depuración son las relativas a su empleo en cerámica, mediante fabricación de ladrillos, elementos de construcción y áridos diversos, así como la recuperación energética del calor ligado a la pirólisis o gasificación de fangos [10].

En el caso de la EDAR La Golondrina, que gestiona la Empresa Municipal de Aguas de Córdoba

(Emacsa), entidad pública de titularidad municipal que se ocupa del ciclo integral del agua en Córdoba, la mayoría de los fangos de depuración producidos se destinan a uso agrícola. Por ello, el presente trabajo, enmarcado dentro de las actividades de Investigación y Desarrollo de Emacsa, se ocupará de la caracterización de estos fangos la cual debe garantizar la adaptación de su calidad a las normativas que rigen esta actividad, así como de poner de relieve cómo cualquier proceso de depuración no implica más que una progresiva dinámica de concentración de contaminación desde una matriz inicial (agua residual bruta) hasta un producto final (fango de depuración o biosólido).

2. Metodología

Los datos presentados corresponden a los años 2002 y 2003, tanto los de las aguas residuales brutas y depuradas, como los de los fangos de depuración. En el caso de las aguas brutas residuales de llegada a la EDAR de La Golondrina, y las aguas depuradas en la misma, el seguimiento fue diario (muestras integradas 24 horas) y los valores presentados son valores medios. En el caso de los fangos, las muestras fueron tomadas en el curso de los cinco primeros días de cada mes.

Los parámetros de caracterización de aguas residuales y fangos analizados siguieron las habituales técnicas analíticas en control de aguas [11-13]. En particular los SSUS se determinaron tras filtración y posterior secado del residuo a 108 °C, la DBO₅ mediante el método del OXITOP empleando inhibidor de nitrificación, y la DQO mediante la técnica del dicromato potásico.

Además, los análisis de metales se llevaron a cabo mediante la técnica de la ICP (Acoplamiento Inducido de Plasma) usando un equipo Varian VISTA-AX y posteriormente a la digestión tanto del agua como del fango. Ésta se llevó a cabo, en el caso del agua, con adición de 3 ml de

HCl y 1 ml de HNO₃ concentrados a 20 ml de muestra, y en el caso del fango, añadiendo a 1 g de fango seco 20 ml de agua destilada, 3 ml de HCl y 1 ml de HNO₃ concentrados, todo ello y en ambos casos, introducido en recipiente cerrado de teflón mantenido a presión y calentado en placa calefactora a 180 °C durante 2 horas.

3. Resultados y discusión

3.1. Depuración de aguas en la EDAR de La Golondrina

La EDAR de La Golondrina se encarga de depurar todas las aguas residuales del municipio de Córdoba, a excepción de las barriadas periféricas las cuáles cuentan con sus propios sistemas de depuración independientes.

Dado que la red de saneamiento de la ciudad es unitaria, a ella acceden tanto vertidos de carácter doméstico, como los vertidos procedentes de las industrias allí radicadas. Si bien Córdoba no es una ciudad de fuerte implantación industrial, se cifra la aportación de aguas residuales industriales del total del agua residual que llegar a la EDAR en un 10%, pero contribuyendo en un 25% en DBO₅ y en un 15% en la carga total del agua residual bruta de la ciudad [14,15].

La EDAR es una planta convencional con depuración biológica por fangos activos, dotada de selectores anóxicos a la entrada del tratamiento biológico para eliminación de microorganismos filamentosos que provocarían diversos problemas en el proceso depurativo (floaming o bulking) y cuya línea de tratamiento puede esquematizarse como sigue:

- Tamizado en dos niveles.
- Desengrasado-desarenado.
- Decantación primaria sin adición de reactivos.
- Tratamiento biológico: selectores anóxicos y después aireación.
- Decantación secundaria.
- Recirculación de fangos.

- Primera deshidratación de fangos mediante flotación y espesamiento.
- Segunda deshidratación de fangos mediante adición de polielectrolito y centrifugado.
- Gestión de fangos mediante su destino a compostaje.

Además, de lo dicho más arriba, en los terrenos de la propia EDAR existe una depuradora anaerobia UASB que depura específicamente los vertidos procedentes de una fábrica de levaduras existente en la ciudad, y que después de esto son integrados con el resto de aguas residuales domésticas e industriales en la propia EDAR La Golondrina. En el proceso de depuración anaerobia se emplean coagulantes férricos para precipitar los sulfatos del agua residual de las levaduras que, de otro modo, generarían cantidades indeseables de sulfuros, tanto desde el punto de vista del proceso anaerobio, como desde el del posterior uso

del biogás generado en una instalación aneja de cogeneración energética [16].

La **Tabla 1** presenta los valores medios obtenidos durante los años 2002 y 2003, tanto de los parámetros de calidad de las aguas residuales brutas influentes a la EDAR, como los de las correspondientes aguas ya depuradas y vertidas al río Guadalquivir. Estos valores proceden a su vez de los seguimientos diarios implantados por Emacsa (dentro de su Sistema de Gestión de Calidad y Medio Ambiente) para optimización del proceso.

Puede observarse que el agua bruta es de contaminación media, con una relación (DQO/DBO₅) = 1,3 y con una relación (DBO₅/N/P)=(419/53/13), aproximadamente igual a (50/5/1), es decir dentro de los rangos adecuados para la depuración biológica aerobia de este tipo de aguas. Esto indica, entre otras cosas, que la DBO₅ se puede

Tabla 1

Parámetros	Unidades	Bruta 2002-03	Depurada 2002-03	Rendim. %	Concentración retenida
Conductividad	mS/cm	858	883	-	-
pH	u. pH	7,50	7,85	-	-
N-Kjeldahl	mg/l-NH ₃	53	29	45	24
P-total	mg/l-P2O ₃	13	3	77	10
Sól. Suspensión	mg/l	423	27	94	396
DBO ₅	mg/l	419	23	95	396
DQO	mg/l	550	100	87	450
Cobre	mg/l	0,220	0,155	30	0,065
Hierro	mg/l	1,545	0,385	75	1,160
Manganeso	mg/l	0,155	0,125	19	0,030
Plomo	mg/l	0,170	0,160	6	0,010
Cadmio	mg/l	0,155	0,150	3	0,005
Níquel	mg/l	0,160	0,150	6	0,010
Cromo	mg/l	0,165	0,160	3	0,005
Zinc	mg/l	0,190	0,110	42	0,080
Mercurio	mg/l	0,025	0,020	20	0,005

Tabla 1. EDAR de La Golondrina: características de aguas brutas y depuradas (valores medios [años 2002 y 2003]).

tomar como un buen referente del carbono metabolizable o materia orgánica biodegradable presente en las muestras [17-19].

Por otro lado, el contenido del agua residual bruta en los metales investigados (metal total tras digestión ácida en caliente) es relativamente bajo (2,72 mg/l, es decir un 0,3% aproximadamente). A destacar que el metal que presenta la concentración más alta es el hierro (1,545 mg/l, 85% sobre total), seguido de cobre y zinc (alrededor de 0,2 mg/l), con contenidos apreciables de manganeso, plomo, cromo, níquel y cadmio (alrededor de 0,15 mg/l) y mínimos de mercurio (0,025 mg/l) (**Figura 1**). El resto de metales presentaba contenidos inferiores a 0,02 mg/l y no han sido considerados en este estudio.

A su vez, el agua residual depurada presenta contenidos en sólidos en suspensión, DBO₅ y DQO acordes con lo exigido por la normativa para depuración de aguas residuales urbanas [6,9], tanto en concentración como en porcentaje de reducción de contaminación.

Si se consideran los metales presentes en el agua depurada se observa su reducción media hasta un valor de 1,42 mg/l (es decir, una reducción superior al 50% frente al contenido total inicial) siendo nuevamente el metal mayoritario el hierro (0,385 mg/l, 27% sobre total), seguido de plomo y cromo (0,16 mg/l), cobre, níquel y cadmio (unos 0,15 mg/l), manganeso (0,13 mg/l), zinc (0,11 mg/l), y mercurio (0,02 mg/l), presentando el resto de metales contenidos inferiores a 0,001 mg/l y no siendo considerados en el estudio (**Figura 1**). Por otro lado, puede calcularse el rendimiento de depuración para cada especie metálica de las investigadas observándose que las más altas tasas de reducción de metales son las de hierro (75%), seguidas de zinc (42%), seguidos de cobre, mercurio y manganeso (alrededor del 25%), siendo mucho más bajas las del resto de metales relevantes (plomo,

cadmio, níquel y cromo, entre el 3 y el 6%).

Es interesante señalar que las más altas tasas de reducción de metales desde el agua bruta, y por ello su acumulación en los fangos de depuración posteriormente generados, correspondieron al metal mayoritario (hierro) en valor absoluto, pero no en valor relativo, puesto que un metal menos frecuente en el influente como es el zinc redujo su concentración en el agua depurada un 42%. Además, metales relativamente abundantes en el agua residual bruta tales como plomo, cromo, níquel y cadmio experimentaron las más bajas tasas de reducción con respecto al agua depurada: esta situación sólo puede ser explicada por la diferente dinámica fisicoquímica de cada metal concreto y sus posibilidades de formar productos oxihidroxidados poco solubles [21].

Finalmente, obsérvese que cada litro de agua residual está compuesta del orden de 500 mg de materias orgánicas (materia biodegradable) y de unos 3 mg de especies metálicas entre las mayoritarias y las minoritarias (materias no biodegradables).

Concentración de metales: agua bruta vs agua depurada

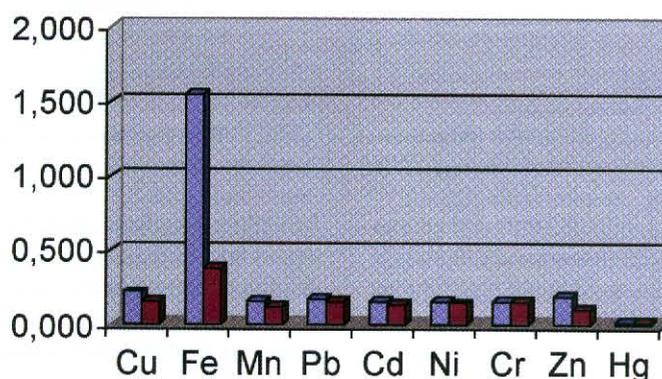


Figura 1. Comparación entre el contenido en metales mayoritarios del agua residual bruta y del agua depurada (años 2002 y 2003).

3.2. Fangos de depuración de la EDAR

Los fangos de depuración o biosólidos son la respuesta de cualquier proceso aplicado en la depuración de un agua residual. Ya se indicó antes que una EDAR concentra la contaminación del agua residual en volúmenes cada vez más reducidos, permitiendo lógicamente su retirada del influente, y acumulando aquélla en el fango o biosólido con una diferente tasa de eficiencia en función del propio proceso depurador aplicado. La **Tabla 2** recoge datos sobre caudales de depuración de la EDAR La Golondrina a lo largo de los años 2002 y 2003, así como el cálculo de la carga contaminante existente en el agua residual de la ciudad, con valores medios diarios y medios anuales. Obsérvese que suponiendo una densidad igual a 1 del agua residual influente (lo cual es razonable) y aplicando los datos aportados, el proceso de depuración supone concentrar unas 765 veces la contaminación original del influente. Es decir, por cada 111.251 m³/día de agua que accede a la EDAR (unas 111.000 t) se producen aproximadamente 145 t de biosólidos.

	Media diaria	Media anual
Caudal entrada EDAR, m ³	111.251	40.606.615
† Sólidos Suspensión	47,1	17.192
† DBO ₅	46,6	17.009
† DQO	61,2	22.338
Fangos retirados, t	145	53.000

Tabla 2. EDAR La Golondrina: agua residual influente (años 2002 y 2003) y producción en toneladas de fangos asociada a la depuración.

Por otro lado, la suma de la carga de sólidos en suspensión y demanda bioquímica de oxígeno (calculadas ambas como el producto de concentración en mg/l -o también, g/m³-por caudal en m³/día) del agua residual, puede suponer del orden del 65% de los fangos posteriormente producidos en la EDARs. Si el cálculo se hace considerando la DQO, el resultado sería de un 75%, valor que se aproxima más al teórico 100% de máxima eficiencia en la relación entre contaminación del agua en origen y su conversión en biosólidos.

Los fangos caracterizados presentan altos contenidos en nitrógeno y fósforo (8% y 4%, respectivamente) así como en calcio, magnesio y potasio (todos ellos nutrientes empleados por las plantas verdes) por lo cual, sin otra consideración, podrían presentar unas buenas aptitudes para su empleo agrícola. En este sentido, efectivamente los fangos de la EDAR La Golondrina se destinan mayoritariamente a compostaje, lo que justifica un seguimiento mensual de las características de los mismos para comprobar el cumplimiento de las normativas al respecto [20], las cuáles restringen su contenido en metales pesados con alta capacidad contaminante del suelo agrícola que después los pueda recibir como sustrato de abonado. Los datos de este seguimiento se recogen en la **Tabla 3**.

Puede comprobarse que los fangos mantienen una calidad adecuada para su uso agrícola en los metales limitados por la normativa (co-

bre, plomo, cadmio, níquel, cromo, zinc y mercurio) tanto para suelos ácidos como básicos, con un alto porcentaje de materia orgánica. A destacar el elevado contenido en hierro (10 g/kg de materia seca) cuya fuente es el coagulante férrico empleado en el tratamiento anaerobio a que se someten las aguas residuales de la fábrica de levaduras comentada anteriormente, las cuáles

una vez predepuradas se integran con el resto de aguas residuales de la ciudad que se procesan en la EDAR.

De la **Tabla 3** también puede concluirse que el fango producido en la EDAR La Golondrina, además del muy elevado contenido en hierro comentado más arriba, presenta contenidos mayoritarios en cobre y zinc (unos 0,3 g/kg de materia seca en cada uno), probablemente a consecuencia de los vertidos de las industrias de transformación de cobre que se radican en la ciudad [23], y esto a pesar de la limitación en la emisión de estos metales recogida en la Ordenanza de Vertidos de Córdoba (6 mg/l de cobre y 10 mg/l de zinc) y comprobada en los seguimientos periódicos de estos efluentes llevados a cabo por Emacsa en su actividad de control de vertidos al saneamiento general [14,15,22].

Parámetros	Limites RD Suelos, pH<7	Limites RD suelos, pH>7	Medias 2002-03
Sequedad %	-	-	23,1
Mat. Orgánica %	-	-	71,5
pH	-	-	6,5
Nitrógeno %	-	-	8,3
Fósforo %	-	-	4,5
Calcio %	-	-	3,4
Magnesio %	-	-	0,5
Sodio %	-	-	0,1
Potasio %	-	-	0,4
Cobre mg/kg m.s.	1.000	1.750	359
Hierro mg/kg m.s.	-	-	10.415
Manganeso mg/kg m.s.	-	-	179
Plomo mg/kg m.s.	750	1.200	39,5
Cadmio mg/kg m.s.	20	40	1,1
Níquel mg/kg m.s.	300	400	10,7
Cromo mg/kg m.s.	1.000	1.500	15,2
Zinc mg/kg m.s.	2.500	4.000	323
Mercurio mg/kg m.s.	16	25	1,6

Tabla 3. Características de los fangos producidos en la EDAR La Golondrina (valores medios años 2002 y 2003).

Por el contrario, los fangos presentan un mínimo contenido en metales pesados de alto poder contaminante como son cadmio y mercurio (del orden de 1 mg/g de materia seca en cada uno). El resto de metales investigados se sitúan entre 0,18 g/kg y 0,010 g/kg de metal por materia seca (manganeso, plomo, cromo y níquel). En resumen, puede estimarse que, como media, el 1,1% en peso de los biosólidos producidos (unos 11 g por kg de materia seca) corresponde a estos nueve metales pesados investigados en nuestro estudio.

Para finalizar este apartado, indíquese que la calidad de los fangos mantiene una razonable homogeneidad a lo largo del tiempo, lo cual se corrobora de los controles mensuales periódicamente llevados a cabo.

3.3. Comportamiento de la "contaminación" del agua residual a lo largo del proceso convencional de depuración

De los datos aportados más arriba se deduce que cada m³ (unos 1.000 kg, aproximadamente) de agua residual doméstica de la ciudad de Córdoba que se depura en la EDAR genera aproximadamente unos 1,3 kg de biosólidos. Sin duda alguna esta alta producción de fangos es el principal problema a corto plazo que puede encontrarse la depuración de aguas residuales urbanas. De no contarse con una adecuada, eficaz y ambientalmente correcta gestión de estos subproductos, todas las estrategias de depuración pueden ser simplemente inviables.

Por otro lado, de los datos aportados hasta ahora podemos extraer una panorámica sobre el comportamiento de las sustancias contaminantes presentes en el agua residual doméstica desde su origen, a su definitiva instalación en los biosólidos o fangos finales de depuración.

Si nos fijamos en la ya referida **Tabla 1**, podemos hacer estimaciones acerca de las concentraciones de sustancias eliminadas del agua resi-

dual bruta, o lo que es igual, de la cantidad de sustancias que quedan retenidas en los subproductos de depuración: de la diferencia entre las concentraciones de carga orgánica y/o metales presentes en el agua bruta y las concentraciones medidas en el agua ya depurada, se concluyen las cantidades que teóricamente deben pasar a los fangos de depuración. Así, aproximadamente 0,065 mg de cobre deberían pasar al fango por cada litro de agua residual depurada, o en el caso de las materias orgánicas (DBO₅ o DQO) del orden de 400-450 mg deberían integrarse en ese mismo fango.

Siguiendo estos cálculos, el metal de más fuerte retención (insístase, medida ésta como concentración en agua influente menos concentración en agua depurada) es el hierro (1,160 mg), seguido de zinc y cobre (0,080 y 0,065 mg, respectivamente), manganeso (0,030 mg) y presentando las mínimas tasas de retención el resto de metales investigados (entre 0,010 y 0,005 mg).

Con respecto a las tasas de acumulación de sustancias en el biosólido,

entendidas éstas como el cociente entre concentración en el fango (en mg/kg) de sustancia, dividido entre concentración en el agua a depurar (en mg/l, es decir, suponiendo una densidad del agua residual de aproximadamente 1, mg/l puede equivaler a mg/kg) la materia orgánica (media estadística entre DBO₅ y DQO) y el nitrógeno se concentran unas 350 veces desde el agua influente al biosólido, mientras que el fósforo del orden del doble (**Tabla 4**). Esta circunstancia acaso pudiera indicar en primera instancia y con las salvedades correspondientes, que existe un mecanismo adicional de acumulación de fósforo en el fango, que tal vez podría adscribirse al incremento de la actividad en determinados momentos, de organismos filamentosos presentes en el cultivo biológico aerobio encargado de la depuración del agua residual en la EDAR.

En cualquier caso, la tasa de acumulación de la carga biodegradable mantiene unos valores razonablemente homogéneos (entre 350 y 800 veces) en el sentido de

Tabla 4

Parámetros	Agua Bruta (mg/l)	Lodos Mat. Seca (mg/kg)	Tasa Concentrac.
Mat. Orgánica (*)	485	165.000	340
Nitrógeno (como N)	44	15.790	359
Fósforo (como P)	7,3	6.124	839
Cobre	0,220	359	1.632
Hierro	1,545	10.415	6.741
Manganeso	0,155	179	1.154
Plomo	0,170	39,5	232
Cadmio	0,155	1,1	7
Níquel	0,160	10,7	67
Cromo	0,165	15,2	92
Zinc	0,190	323	1.700
Mercurio	0,025	1,6	64

(*) media entre DBO₅ y DQO.

Tabla 4. Comportamiento de la contaminación a lo largo del proceso global de depuración (años 2002 y 2003).

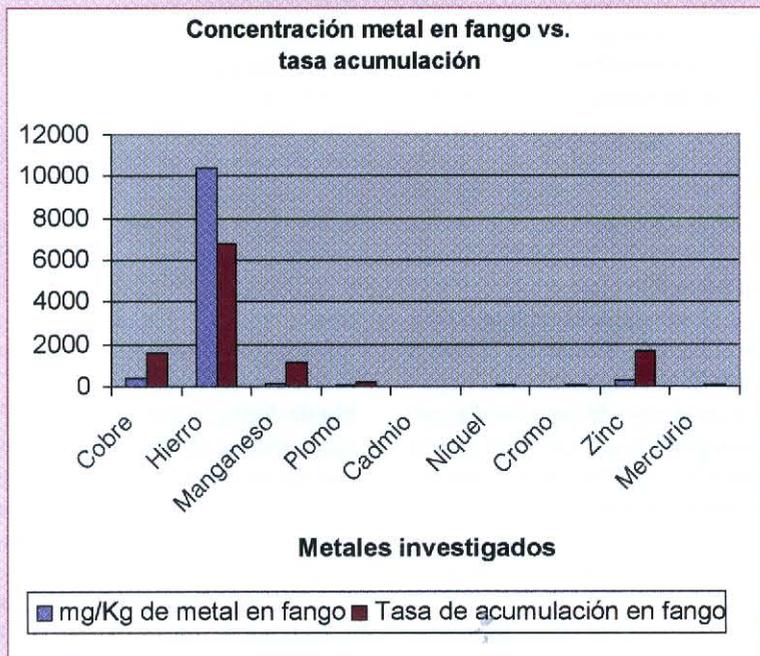


Figura 2. Comparación entre el contenido en metales mayoritarios en el fango y tasa de acumulación de metales en éste (años 2002 y 2003).

que son cantidades del mismo orden de magnitud.

La situación considerando ahora los metales pesados investigados es ciertamente distinta en cuanto a su acumulación en el fango (Tabla 4 y Figura 2). Dejando al margen el caso del hierro por lo ya indicado de su empleo en el proceso de depuración, los metales que más se acumulan son zinc y cobre (unas 1.600-1.700 veces), seguidos del manganeso que se multiplica por un factor de 1.100. La secuencia de acumulación continúa con plomo (232 veces), cromo (92), níquel y mercurio (67 y 64, respectivamente) y cadmio (sólo 7 veces).

Si comparamos estos factores de acumulación en fangos, con las concentraciones retenidas en la depuración, es decir, la diferencia entre la concentración de metal que tiene el agua residual influente y la concentración de metal en el agua depurada, se comprueba que los metales que son más drásticamente eliminados en el proceso depurativo (a excepción del hierro) que son zinc y cobre, también son los más bioacumulados en los fangos. Asimismo,

los metales menos eficazmente eliminados en el proceso depurativo, plomo, cromo, níquel, mercurio y cadmio (con diferencias sensibles entre ellos) también son los que menos se bioacumulan en los fangos (Figura 2).

Estas evidencias son lógicas en el sentido de que aquellos metales que son menos eficientemente retirados del agua residual, se acumulan menos en el fango, y consiguientemente, estarán presentes en el agua depurada en cantidades más altas. Una consecuencia práctica de esto, es que para aquellos metales que presentan una más baja acumulación en los fangos (caso del cadmio, mercurio y níquel) e independientemente de su potencial tóxico o contaminante, se deberían restringir las concentraciones admitidas en las aguas residuales urbanas, y lógicamente, en sus principales emisores cuáles son las industrias que los vierten a las redes de saneamiento generales.

Llegado este momento podemos preguntarnos si existe un factor más determinante que otros que rijan la presencia y concentración de meta-

les pesados en los biosólidos estudiados. En este sentido, las correlaciones matemáticas lógicas serían las existentes entre las concentraciones de metales medidas en los fangos o la tasa de acumulación de metales en estos, y las concentraciones de metales en agua bruta o la tasa de eliminación de estos metales en el proceso depurador o concentración retenida en el proceso (ambas evidentemente relacionadas entre sí). Se han realizado las correlaciones anteriores con los siguientes resultados:

- La relación entre concentración de metales en fango y concentración de metales presentes en agua bruta ofreció un coeficiente de correlación $r^2=0,9908$, es decir, con un valor estadísticamente muy significativo.
- La relación entre concentración de metales en fango y concentración de metales retenida en el proceso depurador (diferencia entre concentración en agua bruta y en agua depurada) ofreció un coeficiente de correlación $r^2 = 0,9987$, es decir, con un valor estadísticamente más significativo que el anterior.
- La relación entre concentración de metales en fango y tasa (%) de eliminación de metales en el proceso depurador ofreció un coeficiente de correlación $r^2=0,7169$, es decir, con un valor estadísticamente poco significativo.
- La relación entre tasa de concentración de metales en fango y concentración de metales presentes en agua bruta ofreció un coeficiente de correlación $r^2 = 0,9219$, es decir, con un valor estadísticamente significativo.
- La relación entre tasa de concentración de metales en fango y concentración de metales retenida en el proceso depurador (diferencia entre concentración en agua bruta y en agua depurada) ofreció asimismo un coeficiente de correlación $r^2=0,9344$, es decir, con un valor estadísticamente significativo.

f) Finalmente, la relación entre tasa de concentración de metales en fango y tasa (%) de eliminación de metales en el proceso depurador ofreció un coeficiente de correlación $r^2 = 0,8889$, es decir, con un valor estadísticamente poco significativo.

De estas correlaciones matemáticas puede establecerse que, cuantitativamente, la presencia de metales en el fango de la EDAR La Golondrina está regida mayoritariamente por dos factores determinantes: concentración de metales retenida en el proceso depurador y concentración de metales en agua bruta, que en principio podría estimarse que sería el factor más crítico.

Finalmente habría que comentar las importantes variaciones en las tasas de acumulación de metales en los biosólidos que pueden ser explicadas por varios factores sobre los que normalmente no se incide o no se puede incidir. En primer lugar, coméntese el propio comportamiento fisicoquímico de cada metal concreto (formación de compuestos y complejos, fenómenos de adsorción, etc..) y su posibilidad de ser más o menos adsorbido por las bacterias depuradoras, o también su posibilidad de ser ingerido por microorganismos depuradores (circunstancia ésta de baja incidencia, a priori [24]).

Y en segundo lugar, la propia dinámica práctica de generación de los fangos, con una producción cambiante a lo largo del tiempo en función del propio rendimiento depurativo obtenido en la EDAR y de los caudales de tratamiento, lo que implica distintas tasas de recirculación de fangos secundarios, con lo que el envío de fangos excedentarios para secado se hace en función de criterios prácticos de explotación de la EDAR y disponibilidad de su gestión.

Para terminar, toda esta serie de estudios deben encaminar cualquier estrategia sobre depuración al conjunto de todo el proceso, es decir:

restricción de emisión de contaminantes a redes de saneamiento generales, eficiencia en el proceso depurador en la EDAR, cumplimiento de objetivos de calidad en cauces públicos a los que se vierten las aguas depuradas, y gestión más idónea de fangos de depuración en función de su caracterización.

4. Conclusiones

De las evidencias aportadas hasta ahora se deduce lo siguiente:

1. El contenido en metales pesados mayoritarios del agua residual de Córdoba (Cu, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Cr, Zn y Hg) se sitúa en 2,72 mg/l, cantidad que queda reducida a 1,42 mg/l en el agua depurada vertida a cauce público. En todo caso, la EDAR cumple con los estándares de depuración exigibles.
2. El fango de la EDAR La Golondrina se adecua a los requerimientos establecidos para ser utilizado en usos agrícolas, presentando niveles de metales pesados muy por debajo de la normativa. Se producen del orden de 1,3 kg de fango seco (23% de sequedad) por cada m³ de agua residual depurada en la EDAR.
3. El proceso depurador aplicado en la EDAR supone la concentración de la carga orgánica global presente en el agua residual bruta en unas 340 veces, y en unas 350 veces para los compuestos de nitrógeno y 830 veces para los compuestos de fósforo. Esta variación puede indicar procesos de bioacumulación de fósforo ligados a presencia de bacterias filamentosas en el fango activo de la EDAR.
4. La cantidad de los nueve metales pesados investigados en el biosólido producido en la EDAR está relacionado con dos factores determinantes: en primer lugar con la concentración de metales retenida en el proceso depurador, y en segundo, con la propia concentración de metales del agua bruta a depurar, que en principio

podría pensarse que fuera el factor más importante.

5. Por último, aquellos metales que presentan una más baja acumulación en los fangos (caso de Cd, Hg y Ni) e independientemente de su potencial tóxico o contaminante, deberían ver más restringidas las concentraciones admitidas en las aguas residuales urbanas, y lógicamente, en los principales emisores a ellas cuáles son las industrias que los vierten a las redes de saneamiento generales.

5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la colaboración en este trabajo al resto de los técnicos del Servicio de Control de Calidad de Emacsa: María del Mar González Jiménez, Inmaculada Chamber Pérez y Magdalena de la Fuente Darder.

6. Bibliografía

- [1] RD 849/1986, de 11-4-1986, BOE 103, de 30-4-1986, aprobando el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.
- [2] RD 927/1988, de 29-7-1988, BOE 209, de 31-8-1988, aprobando el Reglamento de la Administración Pública del Agua.
- [3] RD 995/2000, de 2-6-2000, BOE 147, de 20-6-2000, fijando objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes y modificando el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.
- [4] Ley 10/2001, de 5-7-2001, BOE 161, de 6-7-2001, del Plan Hidrológico Nacional.
- [5] RD Legislativo 1/2001, de 20-7-2001, BOE 176, de 24-7-2001, aprobando el texto refundido de la Ley de Aguas.
- [6] RD 606/2003, de 23-5-2003, BOE 135, de 6-6-2003, modificando el RD 849/1986 que aprobaba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.
- [7] Ley 16/2002, de 1 de julio, BOE 157, de 2-7-2002, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación.

ARTICULOS TECNICOS

- [8] Resolución de 28-4-1995, BOE 113, de 12-5-1995, aprobando el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales.
- [9] RD 509/1996, de 15-3-1996, BOE 77, de 29-3-1996, que establece normas sobre tratamiento de aguas residuales urbanas.
- [10] X. Elías, Gestión y posttratamientos de fangos de EDAR. Las directivas de la UE condicionan su reutilización e inducen a la valorización energética. *Tecnología del Agua*, 249 (2004) 34-52.
- [11] AAWA. Standard Methods for the examination of water and wastewater, 17ª ed. Washington (1997).
- [12] J. Rodier. *Análisis de Aguas*. Ed. Omega S.A., Barcelona (1989).
- [13] R. Marín Galvín. *Análisis de Aguas y Ensayos de Tratamiento. Principios y Aplicaciones*. Ed. GEPSA, Barcelona (1995).
- [14] R. Marín Galvín. Vigilancia y control de los principales vertidos industriales a la red de saneamiento de Córdoba. *Tecnología del Agua*, 228 (2002) 48-58, y referencias citadas allí.
- [15] R. Marín Galvín, L. Alonso Pérez de Siles, F.J. Rojas Moreno y Mª.M. González Jiménez. Contribución de las aguas residuales domésticas a la carga total que accede a una EDAR municipal. *Tecnología del Agua*, 246 (2004) 32-37.
- [16] *Memorias anuales de Emacsa*, 1999, 2000, 2001 y 2002. Editadas por Emacsa.
- [17] Metcalf y Eddy Inco. *Wastewater Engineering. Treatment and reuse*, 4th ed. Ed. Mc Graw Hill, New York (2003).
- [18] H.H. Han y R. Klute. *Chemical water and wastewater treatment*. Ed. Springer-Verlag, Darmstad (1990).
- [19] J. Catalán Lafuente. *Depuradoras: Bases científicas*. Ed. Bellisco, Madrid (1997).
- [20] RD 1310/1990, de 29-10-1990, BOE 262, de 1-11-1990, regulando la utilización de los lodos de depuración.
- [21] R. Marín Galvín. *Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos. Tratamiento y Control de Calidad de Aguas*. Ed. Díaz de Santos, Madrid (2003).
- [22] Ordenanza de vertidos no domésticos e industriales de Córdoba, B.O.P. de Córdoba nº 32, de 4-3-2003 (descargable desde la página web de Emacsa <http://www.emacsa.es>).
- [23] N.L. Nemerow y A. Dasgupta. *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Ed. Díaz de Santos. Madrid (1998).
- [24] R. Vílchez, B. Rodelas, M.A. Gómez, M.V. Martínez-Toledo y J. González-López. Bioadsorción de metales pesados. XVIII Jornadas Técnicas de ASA, Comunicaciones de la Universidad de Granada (pp. 5-20), Ed. por ASA, Granada (2004).