



Análisis estadístico, seguimiento y prevención de la presencia de metales pesados en las depuradoras de Granollers, La Llagosta y Montornès del Vallès

La calidad del agua que entra en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) influye en la calidad de los efluentes de salida y de los lodos generados. Es relevante que las EDAR mejoren su capacidad de predecir la calidad de los lodos generados, para que este recurso pueda ser posteriormente valorizado en la agricultura. Este artículo presenta un análisis estadístico referente a la gestión de aguas residuales en las plantas de La Llagosta, Montornès del Vallès y Granollers (Cataluña). El análisis cubre el período de julio de 2018 a enero de 2019 y tiene como principal objetivo la obtención de modelos de regresión explicativos de la concentración de los metales pesados -cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) y zinc (Zn)- en los lodos tratados de las tres EDAR a partir de los resultados de las analíticas del agua que entra en las plantas, así como de los puntos intermedios referentes a la línea de lodos. Entre los principales resultados, se establecieron modelos explicativos de la concentración de metales pesados en los lodos tratados, a partir de las concentraciones a la entrada de la planta, lodos biológicos y lodos a la entrada del digestor.

Palabras clave

EDAR, lodos, metales pesados, residuos, agricultura, Granollers, La Llagosta, Montornès del Vallès.

STATISTICAL ANALYSIS, MONITORING AND PREVENTION OF THE PRESENCE OF HEAVY METALS IN THE WASTEWATER TREATMENT PLANTS OF GRANOLLERS, LA LLAGOSTA AND MONTORNÈS DEL VALLÈS (CATALONIA, SPAIN)

The quality of the water entering wastewater treatment plants (WWTP) influences the quality of the treated effluent and the sludge generated. It is relevant that the WWTP improve their ability to predict the quality of the sludge generated, so that this resource can be later used in agriculture. This article presents a statistical analysis applied at the treatment plants of La Llagosta, Montornès del Vallès and Granollers (Catalonia). The analysis covers the period from July 2018 to January 2019 and has the main objective to obtain explanatory regression models of the concentration of heavy metals -copper (Cu), chromium (Cr), nickel (Ni) and zinc (Zn)- in the treated sludge from the concentrations of these heavy metals in the water entering the plants, as well as in the intermediate points of the sludge treatment line. Among the main results, several explanatory models of the concentration of heavy metals in the treated sludge were defined, based on the concentrations found at the entrance of the WWTPs, biological sludge, and the sludge entering the digester.

Keywords

WWTP, sludge, heavy metals, waste, agriculture, Granollers, La Llagosta, Montornès del Vallès.

Luis Campos Rodrigues

consultor e investigador ambiental de ENT Environment & Management y Fundació ENT

Ignasi Puig Ventosa

responsable de proyectos de ENT Environment & Management y Fundació ENT

Miguel Ángel Rubio Castillejo

técnico de sistemas de saneamiento, Responsable de residuos del Consorci Besòs Tordera

Pedro Aguiló Martos

director de Operaciones del Consorci Besòs Tordera

Meri Pous Alo

responsable del Departament de Protecció del Sòl de la Agència de Residus de Catalunya

Glòria Batlló Fígols

técnica del Departament de Protecció del Sòl de la Agència de Residus de Catalunya

Sergi Latres Simó

técnico del Departament de Protecció del Sòl de la Agència de Residus de Catalunya



1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento controlado de las aguas residuales permite devolver agua depurada al medio natural, generando en el proceso de depuración lodos con un destino final ambientalmente sostenible, como puede ser la aplicación en suelos agrícolas. Eso posibilita el aprovechamiento de un recurso, evitando que sea dirigido hacia vertido o incineración. En todo caso, las analíticas obligatorias del agua que entra en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) no se han empleado hasta ahora para estimar los parámetros de calidad que se miden en los lodos y permitir así optimizar su gestión. Es relevante que las entidades gestoras de las EDAR incrementen la posibilidad de predecir cómo la calidad del agua residual que entra en las plantas puede influir en la calidad de los efluentes de salida, así como de los lodos generados, ayudando a optimizar el proceso de tratamiento y a determinar a priori si será posible la valorización agrícola de los lodos o si habrá que cambiar su vía de gestión.

La valorización de los lodos en la agricultura está sometida a las prescripciones establecidas en el RD 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. En este decreto se establece como criterio general que se deben analizar los lodos con una periodicidad determinada en relación a su volumen y características. Igualmente, son definidos los valores límite de concentración de metales pesados en los lodos para que estos puedan ser utilizados en agricultura (**Tabla 1**).

La normativa vigente establece que los análisis de los lodos generados en las EDAR se realicen en la mayoría de los casos dos veces al

año. Aun así, la Agència de Residus de Catalunya (ARC) y la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) determinaron un incremento de la frecuencia de análisis en función de las toneladas producidas, para asegurar un mayor seguimiento y control de las características del lodo como son los metales pesados (**Tabla 2**).

El hecho de que la frecuencia de análisis de los lodos y del agua que entra en las plantas sea diferente, implica que haya dificultad para relacionar las características de los lodos con las aguas de entrada. La imposibilidad de los gestores de depuradoras de predecir la calidad de los lodos generados en sus instalaciones resulta en un tiempo largo de reacción entre que una analítica de los lodos detecta un problema o

incumplimiento y su corrección, lo que puede conllevar implicaciones ambientales y económicas, dado que los destinos alternativos (por ejemplo, valorización energética y depósito controlado) son en general bastante más costosos. Además, puede haber incertidumbre sobre si los lodos destinados a valorización agrícola tienen la calidad suficiente en periodos alejados de las analíticas, a pesar de dar cumplimiento a la normativa.

El presente artículo se centra en un análisis estadístico de datos referentes a las tres mayores EDAR gestionadas por el Consorci Besòs Tordera (CBT) -La Llagosta, Montornès del Vallès y Granollers-, donde se implementa la digestión anaeróbica. El análisis tiene el principal objetivo

TABLA 1

VALORES LÍMITE DE CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS LODOS PERMITIDOS PARA EL USO AGRÍCOLA DE ACUERDO CON EL RD 1310/1990 (MG/KG SMS).

Metal pesado	Suelos con pH < 7	Suelos con pH > 7
Cadmio (Cd)	20	40
Cobre (Cu)	1.000	1.750
Cromo (Cr)	1.000	1.500
Mercurio (Hg)	16	25
Níquel (Ni)	300	400
Plomo (Pb)	750	2.000
Zinc (Zn)	2.500	4.000

TABLA 2

FRECUENCIA ANALÍTICA MÍNIMA DE LOS LODOS EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN ANUAL (MG/KG DE MATERIA SECA).

Cantidad anual de lodos producidos por instalación (toneladas de materia seca)	Frecuencia anual mínima de análisis
< 250	2
250 - 1.000	4
1.000 - 4.000	6
> 4.000	12

Fuente: Protocolo entre la ACA y la ARC por lo cual se aprueba el procedimiento de seguimiento de la concentración de metales pesados en los lodos de las EDAR urbanas destinadas a la valorización agronómica.

de obtener modelos de regresión explicativos de la concentración de diferentes metales pesados en los lodos tratados de las tres EDAR a partir de los resultados de las analíticas del agua que entra en las plantas, así como de los puntos intermedios referentes a la línea de lodos. Estos datos corresponden a un muestreo realizado semanalmente entre julio de 2018 y enero de 2019.

Este trabajo tiene la finalidad de contribuir al cuerpo de conocimiento referente al comportamiento y gestión de metales pesados en las EDAR, pudiendo dar soporte a la planificación de acciones de prevención, seguimiento e inspección con la finalidad de reducir la presencia de metales pesados en los lodos de las depuradoras por parte de las administraciones competentes. A continuación, se identifican algunas referencias en este ámbito.

Chipasa (2003) analizó la reducción de Cd, Cu, Pb y Zn en la EDAR de Gdansk (Polonia) durante un período de 27 meses (enero de 1998 a marzo de 2000). Este estudio comparó la concentración de estos metales entre el efluente de entrada y salida, así como en los lodos antes y después de su digestión anaerobia. Los resultados indican tasas de reducción de metales entre el efluente de entrada y salida cercanas a 15% (Cd), 30% (Pb), 50% (Cu) y 85% (Zn). En cuanto a la comparación entre los lodos en la entrada del digestor y el digestato, se obtuvo un incremento de la concentración de los metales (expresados sobre materia seca -sms-) en valores cercanos a 50% (Zn, Pb), 75% (Cu) y 100% (Cd).

Da Silva Oliveira *et al.* (2007) incidió sobre la eliminación de Cd, Cu, Pb, Hg, Magnesio (Mn), Cr y Zn en la EDAR de Ribeirão Preto

(Brasil), comparando los valores de la concentración de estos metales en el efluente de entrada y salida, utilizando para ello muestras referentes al período junio-agosto de 2004. Las tasas de reducción de metales entre estos puntos fueron de 10,4% (Mn), 16,5% (Cr), 39,7% (Pb), 44,2% (Cu), 44,9% (Zn), 60% (Cd) y 61,5% (Hg). En este estudio también se presentaron las concentraciones medias de los metales en los lodos deshidratados (en mg/kg): 0,31 (Hg), 1,34 (Cd), 132,1 (Pb), 195,0 (Cr), 208,1 (Mn), 239,4 (Ni), 391,7 (Cu) y 864,4 (Zn).

Sierra *et al.* (2013) se centró en la gestión de lodos en la EDAR de Sant Feliu de Llobregat (Barcelona), analizando la relación entre la concentración de Zn en el agua de entrada y los lodos primarios y secundarios con la concentración de este metal en los lodos tratados. Entre otros resultados, el estudio presenta un modelo de regresión que pretende explicar la concentración del Zn en los lodos tratados (variable dependiente) a partir de las concentraciones en los lodos primarios y secundarios (variables independientes). Este modelo indica que incrementos en las concentraciones de los lodos intermedios contribuyen a la mayor concentración en los

lodos tratados, siendo que las concentraciones en los lodos secundarios pueden tener un peso superior en el resultado final que las de los lodos primarios.

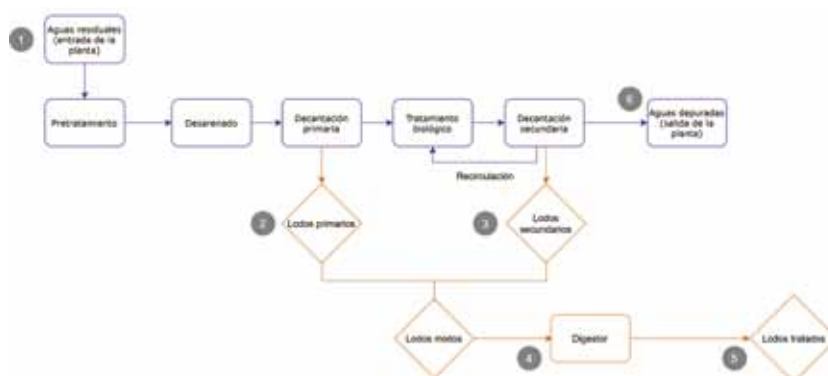
Este artículo se estructura de la siguiente forma: el apartado 2 presenta la metodología aplicada y los datos analizados; el apartado 3 presenta los resultados, incluyendo la estadística descriptiva y el análisis derivado de los modelos de regresión lineal múltiple y de logística binaria aplicados; y el apartado 4 presenta las principales conclusiones del estudio.

2. METODOLOGÍA Y DATOS

Este estudio analiza una base de datos elaborada por la ACA, la ARC y el CBT, que contiene información referente a la concentración de 4 metales pesados en diferentes flujos de las EDAR de Granollers, La Llagosta y Montornès del Vallès (Cataluña), en concreto: cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) y zinc (Zn).

El muestreo se realizó durante 26 semanas (entre julio de 2018 y enero de 2019) y en 6 puntos de las EDAR: 1, aguas residuales a la entrada de las plantas; 2, lodos primarios; 3, lodos secundarios; 4, lodos al digestor; 5, lodos tratados; y 6, aguas depuradas (salida de la planta) (Figura 1). Se obtuvieron

FIGURA 1. Esquema simplificado de funcionamiento de una EDAR y sus respectivos puntos de muestreo.





un total de 1.872 observaciones. Las analíticas fueron realizadas por laboratorios acreditados. En el caso de los 4 tipos de lodos por el laboratorio de la ARC y las aguas, por la ACA y el CBT. Las analíticas se expresan en mg/L, con la excepción de los lodos tratados, que se presentan en mg/kg sms.

En este artículo se presentan los siguientes análisis estadísticos:

- Análisis univariante: se presentan diversos indicadores de estadística descriptiva (promedio, mediana, valores máximos y mínimos, desviación estándar relativa).

- Análisis bivariante y multivariante expresada según los siguientes tipos de modelos estadísticos:

- **Modelos de regresión lineal múltiple.** Se han desarrollado diversos modelos con el objetivo de explicar la concentración de metales pesados observada en los lodos tratados a partir de los valores de concentración registrados en la entrada y puntos intermedios de las plantas.

Este tipo de modelos se expresan en su forma simplificada según la **Ecuación 1**, donde Y_i es la variable dependiente o explicada, en este caso, referente a la concentración del metal pesado i en los lodos tratados. Considerando que los lodos tienen un tiempo de retención de aproximadamente 21 días en los digestores de las plantas, la variable dependiente presenta un periodo de decalaje de 3 semanas en relación a la fecha de efluente de entrada en las plantas. Los otros elementos de la ecuación incluyen las variables independientes o explicativas ($X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ni}$), en este estudio

asociadas a la concentración del metal pesado i en los puntos de muestreo anteriores a los lodos tratados (puntos 1 a 4; **Figura 1**); los parámetros que miden el comportamiento de la variable Y en relación a las variables independientes ($\beta_{1i}, \beta_{2i}, \dots, \beta_{ni}$); el término constante (β_0); y el término de perturbación u otros factores que afectarían la concentración del metal pesado en los lodos tratados (ϵ).

En relación a los modelos de regresión lineal múltiple que se presentan en este estudio, se han hecho algunas modificaciones en las variables analizadas y se han creado nuevas variables. En algunos modelos se ha hecho una transformación logarítmica natural de la variable dependiente para asegurar la normalidad de los residuos y mejores resultados en la regresión. Se han testado modelos sin y con los valores atípicos (u *outliers*) encontrados en los muestreos utilizados. En algunos modelos de regresión se han creado variables *dummy*, que asumen solo los valores de 0 y 1. Estas variables representan datos ca-

tegóricos, en este estudio, asociados a las plantas analizadas. El uso de estas variables en algunos modelos hace que sea posible analizar los resultados por planta. Considerando que hay 3 plantas, se han creado 2 (3-1) variables *dummy*, en concreto Granollers y La Llagosta, que serán explicadas en comparación con la planta de Montornès del Vallès (variable omitida y que corresponde al nivel de referencia). La **Tabla 3** presenta la codificación realizada para las variables *dummy* que representan las plantas analizadas.

De un conjunto extenso de modelos testados para los metales pesados analizados, se han seleccionado aquellos que han cumplido con las siguientes condiciones: significancia estadística de los parámetros, medida a partir del test t de Student; significancia global del modelo, analizada con el test F de Fisher-Snedecor; bondad del ajuste del modelo, calculada a partir del coeficiente de determinación (R^2), que indica la proporción de la variación total de Y que es explicada por el modelo estimado;

$$\text{Ecuación 1} \quad Y_i = \beta_0 + \beta_{1i} X_{1i} + \beta_{2i} X_{2i} + \dots + \beta_{ni} X_{ni} + \epsilon$$

TABLA 3

CODIFICACIÓN DE LAS VARIABLES *DUMMY* CREADAS PARA REPRESENTAR LAS EDAR DE GRANOLLERS, LA LLAGOSTA Y MONTORNÈS DEL VALLÈS.

Plantas	Variables <i>dummy</i>	
	Granollers	La Llagosta
Granollers	1	0
La Llagosta	0	1
Montornès del Vallès	0	0

distribución normal de los residuos; ausencia de heteroscedasticidad (la varianza de los errores de las variables independientes es constante en todas las observaciones); y ausencia de multicolinealidad (no existencia de correlaciones elevadas entre las variables independientes).

- **Modelos de regresión logística binaria.** Analizan una variable dependiente categórica binaria en función de variables independientes o explicativas. En este estudio se ha utilizado este tipo de modelos para estimar la probabilidad de superación de determinados niveles de concentración del Zn en los lodos tratados a partir del conocimiento de las concentraciones de este metal en la entrada de las plantas.

El modelo de regresión logística binaria se expresa en su forma

generalista según la **Ecuación 2**, donde la variable dependiente Y es binaria, asumiendo el valor 1 (ocurrencia de la condición analizada) y 0 (no ocurrencia). En el caso del Zn, el valor 0 es para concentraciones en los lodos tratados inferiores a 2.500 mg/kg sms (límite establecido en el RD 1310/1990 para el uso agrícola en suelos con pH < 7) y el valor 1 para niveles iguales o superiores. La variable dependiente se expresa con el logaritmo de *odds* (posibilidades), que varía entre $-\infty$ y $+\infty$. *Odds* es un coeficiente que mide p (probabilidad de ocurrir la condición analizada) en relación a 1-p (probabilidad de no ocurrir). Sobre los otros elementos de la ecuación, β_0 es el término constante, siendo $\beta_{1i}, \dots, \beta_{ni}$ los parámetros que miden el comportamiento de la variable Y en relación a las variables independientes ($X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ni}$).

La especificación lineal anterior puede ser expresada como una curva logística a partir de la **Ecuación 3**, lo que permite modelar la probabilidad de la ocurrencia que se pretende analizar.

Para la validación de los modelos de regresión logística, se ha analizado la significancia individual de los parámetros y la bondad del ajuste a partir del Test de la Razón de Verosimilitud (*Likelihood Ratio Test*) y del valor de R^2 de McFadden.

La **Tabla 4** hace un resumen del tipo de análisis estadístico realizado según metal pesado.

3. RESULTADOS

3.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

La **Tabla 5** presenta la estadística descriptiva referente a la concentración de los metales pesados Cu, Cr, Ni y Zn para el conjunto de las tres plantas y 26 semanas de muestreo (78 observaciones de cada metal para cada punto de muestreo). No se presentan las plantas de forma desagregada para respetar su anonimato.

Los resultados indican que el Zn fue el único metal pesado donde se registraron concentraciones en los lodos tratados superiores a las definidas por el RD 1310/1990, sobrepasando el límite de 2.500 mg/kg sms para suelos con pH inferior a 7. En cuanto a la desviación estándar relativa, que indica la dispersión de los datos en relación al promedio, esta fue mayor en la entrada de las plantas, con desviaciones más elevadas en los casos del Cr (321,7%), Zn (160,5%) y Ni (148,8%). A nivel agregado, el Cu fue el metal que registró valores de dispersión más bajos.

Ecuación 2

$$Y = \log \frac{p}{(1-p)} = \log(odds) = \beta_0 + \beta_{1i} X_{1i} + \dots + \beta_{ni} X_{ni}$$

Ecuación 3

$$p = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_{1i} X_{1i} + \dots + \beta_{ni} X_{ni})}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_{1i} X_{1i} + \dots + \beta_{ni} X_{ni})}}$$

TABLA 4

ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADA SEGÚN METAL PESADO.

Análisis estadístico	Cobre (Cu)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Zinc (Zn)
Estadística descriptiva	√	√	√	√
Regresión estadística – modelos de regresión lineal múltiple	√	√	√	-
Regresión estadística – modelo de regresión logística binaria	-	-	-	√



TABLA 5

RESUMEN DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA SEGÚN METAL PESADO (2018).

Metal pesado	Punto de muestreo ^a	Unidades	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar relativa (%)
Cobre (Cu)	1	mg/L	0,1	0,04	0,001	1,9	0,3
	2	mg/L	1,9	1,2	0,1	7,9	1,7
	3	mg/L	0,9	0,9	0,2	2,9	0,5
	4	mg/L	6,7	5,6	0,2	20	3,9
	5	mg/kg sms	372,1	369	230	564	73,3
	6 ^b	mg/L	0,01	0,01	0,005	0,04	0,01
Cromo (Cr)	1	mg/L	0,1	0,02	0,01	2,1	321,7
	2	mg/L	1,1	0,7	0,1	10,0	128,1
	3	mg/L	0,6	0,4	0,1	3,6	101,2
	4	mg/L	5,9	3,3	0,1	28,0	96,5
	5	mg/kg sms	318,8	307,5	110,0	801,0	52,8
	6 ^b	mg/L	0,004	0,004	0,002	0,01	58,2
Níquel (Ni)	1	mg/L	0,1	0,1	0,02	0,9	148,8
	2	mg/L	0,7	0,4	0,1	2,8	106,5
	3	mg/L	0,4	0,4	0,1	1,7	78,3
	4	mg/L	2,7	1,8	0,1	10,8	101,6
	5	mg/kg sms	134,4	118,5	34	286	61,9
	6 ^b	mg/L	0,04	0,03	0,01	0,2	72,7
Zinc (Zn)	1	mg/L	0,5	0,3	0,03	5,2	160,5
	2	mg/L	7,1	3,9	0,3	27	98,8
	3	mg/L	3,5	3	0,2	16	79,6
	4	mg/L	39,3	22,9	0,9	207,8	99,9
	5	mg/kg sms	1.912,3	1.635,5	912	3.760	36,5
	6 ^b	mg/L	0,07	0,06	0,01	0,5	82,2

Fuente: Consorci Besòs Tordera, Agència Catalana de l'Aigua y Agència de Residus de Catalunya.

Notas: ^a Los puntos de muestreo son los siguientes: 1, aguas residuales a la entrada de las plantas; 2, lodos primarios; 3, lodos secundarios; 4, lodos al digestor; 5, lodos tratados; y 6, aguas depuradas. ^b La concentración analizada en los lodos tratados considera un decalaje aproximado de 3 semanas en relación a la fecha del efluente de entrada en las plantas.

» Los resultados indican que el Zn fue el único metal pesado en el que se registraron concentraciones en los lodos tratados superiores a las definidas por el RD 1310/1990, sobrepasando el límite de 2.500 mg/kg sms para suelos con pH inferior a 7

3.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN ESTADÍSTICA

La **Tabla 6** presenta los modelos de regresión seleccionados: siete modelos de regresión lineal múltiple asociados al análisis de los metales pesados del Cu, Cr, Ni y Zn, y un modelo de regresión logística binaria para el Zn.

3.2.1. Modelos de regresión lineal múltiple

Estos modelos son:

- **Modelo 1 - Cu.** La **Ecuación 4** y la **Tabla 7** presentan el modelo estimado, donde la variable dependiente

se refiere a la concentración de Cu en los lodos tratados. Esta variable se expresa en logaritmo natural para asegurar la normalidad de los residuos y mejores resultados en la regresión. La concentración de Cu en los lodos tratados se analizó en función de las siguientes variables independientes: una variable continua asociada a la concentración de este metal pesado en la entrada de las plantas (medida en mg/L); y dos variables *dummy*, que están asociadas a las plantas de Granollers y La Llagosta, en comparación con la planta de Montornés del Vallès (variable omitida y que corresponde al nivel de referencia).

Los resultados indican que, en promedio y para el conjunto de las plantas analizadas, por cada aumento unitario de la concentración de Cu en la entrada de las plantas, se incrementará la concentración de este metal pesado en los lodos tratados en $e^{0,156465}$, o sea, aproximadamente 1,17 mg/kg sms. Para estimar los resultados correspondientes a la planta de Granollers, es necesario que la variable *dummy* correspondiente tome el valor 1 y la variable *dummy* de La Llagosta tome el valor 0, y viceversa para estimar los resultados para La Llagosta. Para estimar los resultados para la planta

TABLA 6				
MODELOS DE REGRESIÓN SELECCIONADOS.				
Modelo	Tipo de modelo	Variable dependiente	Variables independientes	
1	Regresión lineal múltiple	Concentración de Cu en los lodos tratados (expresada en logaritmo natural) ^a	- Concentración de Cu en la entrada de la planta (en mg/L) - Dos variables <i>dummy</i> , referentes a las plantas de Granollers y La Llagosta	
2		Concentración de Cr en los lodos tratados (en mg/kg sms) ^a	- Concentración de Cr en la entrada de la planta (en mg/L) - Dos variables <i>dummy</i> referentes a las plantas de Granollers y La Llagosta	
3			- Concentración de Cr en los lodos biológicos (en mg/L) - Dos variables <i>dummy</i> referentes a las plantas de Granollers y La Llagosta	
4			- Concentración de Cr en los lodos a la entrada del digestor (en mg/L) - Dos variables <i>dummy</i> referentes a las plantas de Granollers y La Llagosta	
5			Concentración de Ni en los lodos tratados (en mg/kg sms) ^a	- Concentración de Ni en la entrada de la planta (en mg/L) - Dos variables <i>dummy</i> , referentes a las plantas de Granollers y La Llagosta
6			Concentración de Ni en los lodos tratados (expresada en logaritmo natural) ^a	- Concentración de Ni en la entrada de la planta (en mg/L) - Concentración de Ni en los lodos a la entrada del digestor (en mg/L)
7			Concentración de Zn en los lodos tratados (en mg/kg sms) ^a	- Concentración de Zn en los lodos biológicos (en mg/L) - Dos variables <i>dummy</i> referentes a las plantas de Granollers y La Llagosta
8	Regresión logística binaria	Variable <i>dummy</i> que representa valores de concentración del Zn en los lodos tratados iguales o superiores a 2.500 mg/kg sms (la variable asume el valor 1) y valores de concentración de Zn inferiores a 2.500 mg/kg sms (la variable asume el valor 0) ^a	- Concentración de Zn en la entrada de la planta (en mg/L)	

Nota: ^a Las variables dependientes referentes a la concentración de metales pesados consideran un periodo de decalaje de aproximadamente 3 semanas en comparación con la fecha de entrada en la planta.



de Montornès del Vallès, hace falta que las dos variables *dummy* tomen el valor 0. Los resultados indican que, en promedio, las concentraciones de Cu en los lodos tratados son inferiores en Granollers y La Llagosta en comparación con Montornès del Vallès. Para valores de 1 mg/L de Cu en la entrada de las plantas de Granollers, La Llagosta y Montornès del Vallès, la concentración de este metal en los lodos tratados ser estimaría en $e^{6,012940+0,156465-0,310408}$ (i.e., 350,4 mg/kg sms), $e^{6,012940+0,156465-0,077508}$ (i.e., 442,3 mg/kg sms) y $e^{6,012940+0,156465}$ (i.e., 477,9 mg/kg sms), respectivamente.

- **Modelo 2 - Cr.** En este modelo estadístico, el objetivo fue explicar la concentración de Cr en los lodos tratados (en mg/kg sms) a partir de las siguientes variables independientes: concentración de Cr en la entrada de la planta (en mg/L); y dos variables *dummy*, que representan datos categóricos asociados a las plantas de Granollers y La Llagosta, en comparación con la planta de Montornès del Vallès. Los resultados presentados en la **Ecuación 5** y la **Tabla 8** indican que, en promedio y para el conjunto de las plantas, por cada incremento unitario de la concentración de Cr en la entrada de las plantas, la concentración de este metal en los lodos tratados aumentaría 158,2 mg/kg sms. En cuanto a las variables *dummy*, se estima que para una concentración de 1 mg/L de Cr en la entrada de las plantas, la concentración en los lodos tratados en mg/kg sms sería de 149,9 (Granollers), 285,02 (La Llagosta) y 485,1 (Montornès del Vallès).

- **Modelo 3 - Cr.** En este modelo estadístico, el objetivo fue explicar la concentración de Cr en los lodos

TABLA 7

PARÁMETROS ESTIMADOS EN LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE REFERENTE AL MODELO 1 - CU.

Metal	Coefficiente	Error estándar	T estadístico	Valor P
C	6,012940	0,03	203,02	<0,05
Entrada planta	0,156465	0,06	2,66	<0,05
Granollers ¹	-0,310408	0,04	-8,02	<0,05
La Llagosta ¹	-0,077507	0,04	-1,99	0,05
Resumen estadístico				
Observaciones	78			
R ²	0,56			
F estadístico	31,73			
Prob. (F estadístico)	<0,05			
Durbin-Watson (DW)	0,59			

Nota: ¹ Representan variables *dummy* respecto de la variable de referencia que representa la planta de Montornès del Vallès.

Ecuación 4 (Modelo 1 - Cu)

$$\text{LnLodos tratados} = 6,012940 + 0,156465 * \text{Entrada planta} - 0,310408 * \text{Granollers} - 0,077507 * \text{La Llagosta}$$

Ecuación 5 (Modelo 2 - Cr)

$$\text{Lodos tratados} = 485,0510 + 158,1545 * \text{Entrada planta} - 335,1770 * \text{Granollers} - 200,0276 * \text{La Llagosta}$$

TABLA 8

PARÁMETROS ESTIMADOS EN LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE REFERENTE AL MODELO 2 - CR.

Metal	Coefficiente	Error estándar	T estadístico	Valor P
C	485,0510	15,01	32,31	<0,05
Entrada planta	158,1545	33,92	4,66	<0,05
Granollers ¹	-335,1770	20,12	-16,66	<0,05
La Llagosta ¹	-200,0276	20,11	-9,95	<0,05
Resumen estadístico				
Observaciones	78			
R ²	0,83			
F estadístico	123,37			
Prob. (F estadístico)	<0,05			
Durbin-Watson (DW)	0,46			

Nota: ¹ Representan variables *dummy* respecto de la variable de referencia que representa la planta de Montornès del Vallès.

tratados (en mg/kg sms) a partir de la concentración de Cr en la los lodos biológicos (en mg/L) y de dos variables dummy (Granollers y La Llagosta). Los resultados presentados en la **Ecuación 6** y la **Tabla 9** indican que, en promedio y para el conjunto de las plantas, por cada incremento unitario de la concentración de Cr en los lodos biológicos, la concentración de este metal en los lodos tratados aumentaría 52,8 mg/kg sms. En cuanto a las variables *dummy*, se estima que para una concentración de 1 mg/L de Cr en los lodos biológicos, la concentración en los lodos tratados en mg/kg sms sería de 177,9 (Granollers), 333,1 (La Llagosta) y 504,9 (Montornès del Vallès).

- **Modelo 4 - Cr.** En este modelo estadístico, el objetivo fue explicar la concentración de Cr en los lodos tratados (en mg/kg sms) a partir de la concentración de Cr en los lodos a la entrada al digestor (en mg/L) y dos variables dummy (Granollers y La Llagosta). Los resultados presentados en la **Ecuación 7** y la **Tabla 10** indican que, en promedio y para el conjunto de las plantas, por cada incremento unitario de la concentración de Cr en los lodos a la entrada del digestor, la concentración de este metal en los lodos tratados aumentaría 5,5 mg/kg sms. En cuanto a las variables *dummy*, se estima que para una concentración de 1 mg/L de Cr en los lodos a la entrada del digestor, la concentración en los lodos tratados en mg/kg sms sería de 147 (Granollers), 276,3 (La Llagosta) y 452,5 (Montornès del Vallès).

- **Modelo 5 - Ni.** Este modelo, indicado en la **Ecuación 8** y la **Tabla 11**, analiza la concentración de Ni en los lodos tratados (en mg/kg

TABLA 9

PARÁMETROS ESTIMADOS EN LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE REFERENTE AL MODELO 3 - CR.

Metal	Coefficiente	Error estándar	T estadístico	Valor P
C	452,0623	25,43	17,77	<0,05
Lodos biológicos	52,80517	17,88	2,953	<0,05
Granollers ¹	-326,9341	23,62	-13,84	<0,05
La Llagosta ¹	-171,7700	27,37	-6,28	<0,05
Resumen estadístico				
Observaciones	78			
R ²	0,81			
F estadístico	103,23			
Prob. (F estadístico)	<0,05			
Durbin-Watson (DW)	0,50			

Nota: ¹ Representan variables *dummy* respecto de la variable de referencia que representa la planta de Montornès del Vallès.

Ecuación 6 (Modelo 3 - Cr)

$$\text{Lodos tratados} = 452,0623 + 52,80517 * \text{Lodos biológicos} - 326,9341 * \text{Granollers} - 171,7700 * \text{La Llagosta}$$

Ecuación 7 (Modelo 4 - Cr)

$$\text{Lodos tratados} = 447,0291 + 5,484909 * \text{Lodos a la entrada del digestor} - 305,5197 * \text{Granollers} - 176,2461 * \text{La Llagosta}$$

TABLA 10

PARÁMETROS ESTIMADOS EN LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE REFERENTE AL MODELO 4 - CR.

Metal	Coefficiente	Error estándar	T estadístico	Valor P
C	447,0291	33,21	13,46	<0,05
Lodos a la entrada del digestor	5,484909	2,452	2,24	<0,05
Granollers ¹	-305,5197	32,19	-9,49	<0,05
La Llagosta ¹	-176,2461	30,19	-5,84	<0,05
Resumen estadístico				
Observaciones	78			
R ²	0,80			
F estadístico	97,50			
Prob. (F estadístico)	<0,05			
Durbin-Watson (DW)	0,44			

Nota: ¹ Representan variables *dummy* respecto de la variable de referencia que representa la planta de Montornès del Vallès.



TABLA 11

PARÁMETROS ESTIMADOS EN LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE REFERENTE AL MODELO 5 - NI.

Metal	Coefficiente	Error estándar	T estadístico	Valor P
C	119,7340	5,64	21,24	<0,05
Entrada planta	63,54074	29,53	2,15	0,03
Granollers ¹	106,7052	7,62	14,00	<0,05
La Llagosta ¹	-77,14788	7,53	-10,24	<0,05
Resumen estadístico				
Observaciones	78			
R ²	0,90			
F estadístico	224,77			
Prob. (F estadístico)	<0,05			
Durbin-Watson (DW)	0,50			

Nota: ¹ Representan variables *dummy* respecto de la variable de referencia que representa la planta de Montornès del Vallès.

Ecuación 8 (Modelo 5 - Ni)

$$\text{Lodos tratados} = 119,7340 + 63,54074 * \text{Entrada planta} + 106,7052 * \text{Granollers} - 77,14788 * \text{La Llagosta}$$

Ecuación 9 (Modelo 6 - Ni)

$$\ln \text{Lodos tratados} = 4,102983 + 1,130590 * \text{Entrada planta} + 0,181406 * \text{Lodos a entrada del digestor}$$

TABLA 12

PARÁMETROS ESTIMADOS EN LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE REFERENTE AL MODELO 6 - NI.

Metal	Coefficiente	Error estándar	T estadístico	Valor P
C	4,102983	0,07	54,79	<0,05
Entrada planta	1,130590	0,49	2,29	0,02
Lodos a la entrada del digestor	0,181406	0,02	8,92	<0,05
Resumen estadístico				
Observaciones	78			
R ²	0,60			
F estadístico	56,48			
Prob. (F estadístico)	<0,05			
Durbin-Watson (DW)	0,84			

sms). Esta variable fue analizada en función de la concentración de Ni en la entrada de las plantas (en mg/L) y dos variables *dummy* que categorizan las plantas analizadas. Los resultados indican que, en promedio y para el conjunto de las plantas, para cada incremento unitario de la concentración de Ni en la entrada de las plantas, la concentración de Ni en los lodos tratados aumentaría 63,5 mg/kg sms. Los parámetros estimados asociados a las variables *dummy* indican que para una concentración de Ni de 1 mg/L en la entrada de las plantas, la concentración de este metal en mg/kg sms en los lodos tratados sería de 289,98, 106,13 y 183,275 para las plantas de Granollers, La Llagosta y Montornès del Vallès, respectivamente.

- Modelo 6 - Ni. Este modelo, indicado en la **Ecuación 9** y la **Tabla 12**, pretende explicar la concentración de Ni en los lodos tratados (expresada en logaritmo natural) en función de la concentración de este metal en la entrada de las plantas y en los lodos a la entrada del digestor. Los resultados indican que, en promedio y manteniendo el nivel de la variable 'lodos a la entrada del digestor' constante, para cada incremento unitario de la concentración de Ni en la entrada de las plantas, la concentración de este metal en los lodos tratados aumentaría $e^{1,130590}$, o sea, aproximadamente 3,1 mg/kg sms. Además, para cada incremento unitario de la concentración de Ni en la entrada al digestor, manteniendo la otra variable constante, la concentración en los lodos tratados aumentaría $e^{0,181406}$, esto es, cerca de 1,2 mg/kg sms.

- **Modelo 7 - Zn.** Este modelo, indicado en la **Ecuación 10** y la **Ta-**

bla 13, analiza la concentración de Zn en los lodos tratados (en mg/kg sms). Esta variable fue analizada en función de la concentración de Zn en los lodos biológicos y de dos variables *dummy* que categorizan las plantas analizadas. Los resultados indican que, en promedio y para el conjunto de las plantas, para cada incremento unitario de la concentración de Zn en los lodos biológicos, la concentración en los lodos tratados aumentaría 58,4 mg/kg sms. Los parámetros estimados asociados a las variables *dummy* indican que, en promedio, para una concentración de Zn de 1 mg/L en los lodos biológicos, la concentración de este metal en los lodos tratados sería de 1.262,7, 1.541,4 y 2.444,2 mg/kg sms para las plantas de Granollers, La Llagosta y Montornès del Vallès, respectivamente.

3.2.2. Modelo de regresión logística

Este modelo de regresión logística (modelo 8) cuenta con una variable dependiente categórica binaria, que toma el valor 0 cuando el nivel de concentración de Zn en los lodos tratados es inferior a 2.500 mg/kg sms, o sea, el límite definido en el RD 1310/1990 para el uso agrícola en suelos con pH inferior a 7, y el valor 1 cuando es igual o superior a dicho nivel. Como variable independiente se incluyó el nivel de concentración de este metal en la entrada de las plantas (en mg/L).

La **Ecuación 11** y la **Tabla 14** presentan los parámetros estimados para este modelo. El coeficiente asociado a la variable explicativa, o sea, 1,472623, indica el cambio esperado en el logaritmo de *odds* (posibilidades) para un incremento unitario de la concentración de Zn en la entrada de las plantas.

TABLA 13

PARÁMETROS ESTIMADOS EN LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE REFERENTE AL MODELO 7 - ZN.

Metal	Coficiente	Error estándar	T estadístico	Valor P
C	2.387,816	115,34	20,70	<0,05
Lodos biológicos	58,40084	17,05	3,43	<0,05
Granollers ¹	-1.183,542	92,62	-12,78	<0,05
La Llagosta ¹	-904,8185	117,41	-7,71	<0,05
Resumen estadístico				
Observaciones	77			
R ²	0,79			
F estadístico	92,54			
Prob. (F estadístico)	<0,05			
Durbin-Watson (DW)	0,73			

Nota: ¹ Representan variables *dummy* respecto de la variable de referencia que representa la planta de Montornès del Vallès.

Ecuación 10 (Modelo 7 - Zn)

$$\text{Lodos tratados} = 2.387,816 + 58,40084 * \text{Lodos biológicos} - 1.183,542 * \text{Granollers} - 904,8185 * \text{La Llagosta}$$

Ecuación 11 (Modelo 8 - Zn)

$$\log \frac{p}{(1-p)} = \log(\text{odds}) = -2,016496 + 1,472623 * \text{Entrada planta}$$

TABLA 14

PARÁMETROS ESTIMADOS EN LA REGRESIÓN LOGÍSTICA REFERENTE AL ZN.

Metal	Coficiente	Error estándar	Estadístico z	Valor P
C	-2,016496	0,40	-5,00	<0,05
Entrada planta	1,472623	0,56	2,64	<0,05
Resumen estadístico				
Observaciones	78			
Observaciones con Zn ≥ 2.500 mg/kg sms	18			
Observaciones con Zn < 2.500 mg/kg sms	60			
R ² McFadden	0,16			
Akaike info criterion	0,95			
Schwarz criterion	1,02			
LR estadístico	13,79			
Prob. (LR estadístico)	<0,05			



Ecuación 12 (Modelo 8 - Zn)

$$\text{Probabilidad de concentración de Zn en los lodos tratados de ser } \geq 2.500 \text{ mg/kg sms} = 1 - \frac{e^{(-(-2,016496 + 1,472623 \cdot \text{Entrada planta}))}}{1 + e^{(-(-2,016496 + 1,472623 \cdot \text{Entrada planta}))}}$$

A partir de los parámetros estimados se puede derivar la **Ecuación 12**, que permite analizar la probabilidad que las plantas presenten niveles de concentración del Zn en los lodos tratados iguales o superiores a 2.500 mg/kg sms, para diferentes valores de su concentración en la entrada. La **Figura 2** presenta esta análisis de probabilidad, considerando valores de concentración de Zn en la entrada de las plantas comprendidos entre 0 y 6 mg/L.

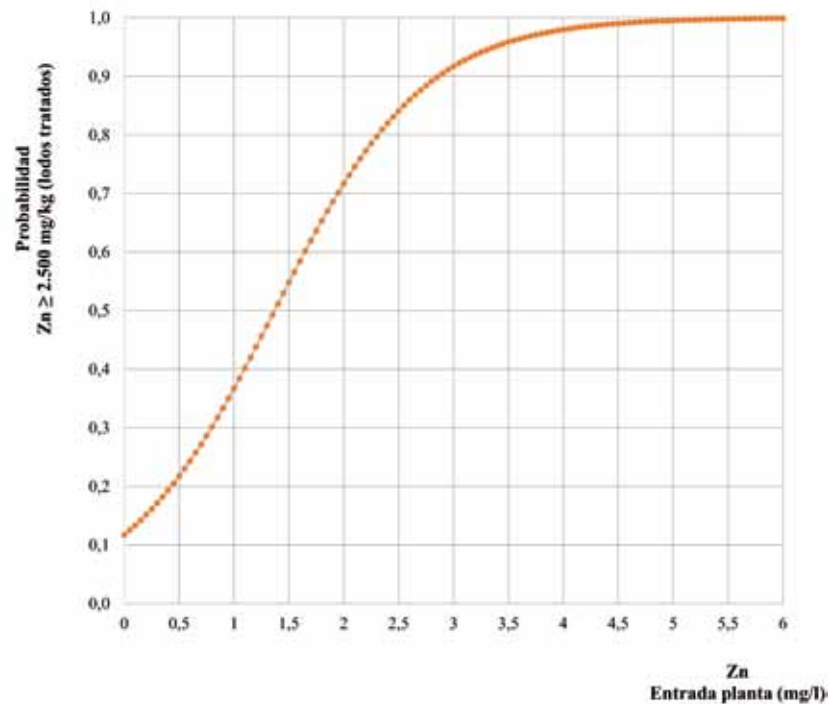
4. CONCLUSIONES

El análisis estadístico realizado permite extraer las siguientes conclusiones:

- Se ha observado una variabilidad considerable en la concentración de los metales pesados en las 3 EDAR a lo largo de las 26 semanas analizadas, sobre todo en el punto de muestreo 1 (entrada en la planta). Este hecho indicaría que a las EDAR llegan aguas con un considerable componente industrial. Si no existiera este componente de origen industrial, y solo se tratasen aguas domésticas o urbanas, la variabilidad de los metales debería ser mucho menor. Entre los diferentes metales pesados, el Cu ha registrado una menor variabilidad.

- Considerando valores promedios para el total de las plantas analizadas, las tasas de reducción de metales entre el efluente de entrada y salida han sido superiores para el Cr (90,4%), seguido del Zn (82,9%), Cu (76,4%) y Ni (48,6%). Estos valores han sido superiores a los estimados en da Silva Oliveira *et al.* (2007)

FIGURA 2. Análisis de probabilidad de concentraciones de Zn en los lodos tratados ≥ 2.500 mg/kg sms a partir de la concentración de Zn en la entrada en las plantas.



y Chipasa (2003), con la excepción del Zn, que estuvo asociado a una tasa de reducción de 85% en el último estudio.

- De los modelos de regresión seleccionados, se puede extraer que presentan relaciones esperadas entre las variables independientes y la variable dependiente. En concreto, un incremento de los niveles de concentración de los metales en los puntos de muestreo correspondientes a la entrada de la planta, lodos biológicos y lodos a la entrada del digestor se traduce en el aumento de las concentraciones en los lodos tratados.

- Los modelos de regresión lineal con valores de R^2 (coeficiente de determinación) más cercanos a 1 son

los más ajustados, es decir, aquellos donde una mayor proporción de la variación de la variable dependiente se puede atribuir a los cambios de las variables independientes. El primer modelo de regresión lineal múltiple referente al Ni (modelo 5) ha sido el que ha presentado un R^2 más elevado (0,90). En cuanto al modelo de regresión logística asociado a la concentración de Zn, el valor de R^2 McFadden es satisfactorio ya que está próximo al rango comprendido entre 0,2 y 0,6.

- Aunque los modelos de regresión hacen un análisis simplificado de la realidad, se considera que pueden ser utilizados en protocolos de alerta temprana en el seguimiento de la

concentración de metales pesados en las EDAR. Poder utilizar modelos que estimen los valores finales de metales en los lodos a partir de los valores de concentración observados en la entrada de las plantas permitiría aumentar la capacidad de prevención y reacción de las EDAR y de las administraciones que hacen el seguimiento (por ejemplo, inspecciones a industrias, cambio de destino de los lodos tratados, etc.) cuando aparezcan valores anormales de metales pesados. La realización de este seguimiento y control anticipado puede derivar en una mejora de la calidad de los lodos de las depuradoras, así como de la confianza del sector agrícola.

- Se considera que hay diversas posibilidades de mejora de la investigación realizada, entre otras, el desarrollo de modelos de regresión con datos de otras EDAR y para bases de datos más extensas; la consideración

de otras variables independientes referentes a las características de las plantas (por ejemplo, tecnologías utilizadas, duración de los procesos de tratamiento); o el estudio de otros parámetros de calidad de las aguas residuales y lodos (por ejemplo, parámetros agronómicos como el nitrógeno o el fósforo).


- El estudio confirma la importancia de disponer de sistemas de trazabilidad y control de vertidos en la red de alcantarillado y colectores que llegan a las EDAR, especialmente en aquellas donde los lodos se destinan a valorización agrícola, para que estos sean de mejor calidad y más competitivos respecto a otros materiales orgánicos que se reciclan en el sector agrario.

5. AGRADECIMIENTOS

Este artículo presenta los principales resultados de la investigación desa-

rollada en el proyecto 'Anàlisi estadística sobre la presència de metalls pesants en fangs de depuradores del Consorci Besòs-Tordera'. Esta investigación fue encargada por la Agència de Residus de Catalunya (ARC) y el Consorci Besòs Tordera (CBT), y fue desarrollado por ENT Environment & Management. Se expresa igualmente el agradecimiento al personal técnico de los laboratorios de la ARC, la ACA y el CBT responsable por las analíticas realizadas.

Bibliografía

- [1] Chipasa, K.B. (2003). Accumulation and fate of selected heavy metals in a biological wastewater treatment system. *Waste Manag.*, núm. 23, págs. 135-143.
- [2] Da Silva Oliveira, A.; Bocio, A.; Trevilato, T.M.B.; Takayanagui, A.M.M.; Domingo, J.L.; Segura-Muñoz, S.I. (2007). Heavy metals in untreated/treated urban effluent and sludge from a biological wastewater treatment plant. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, núm. 14, pág. 483.
- [3] Sierra, J.P.R.; Agulló, J.M.; Garbayo, A.; Martos, P.A. (2013). Control y gestión de lodo en la EDAR de Sant Feliu de Llobregat en función de la concentración de Zn en el agua de entrada y en fangos antes de digestión. *Retema*, núm. 26, págs. 12-19. 

**PUEDE CONSULTAR MÁS
ARTÍCULOS TÉCNICOS,
REPORTAJES Y NOTICIAS
DEL SECTOR DEL AGUA EN:
WWW.TECNOAQUA.ES**