

**INFLUENCIA DEL ÁMBITO GEOGRÁFICO  
EN LA REGULACIÓN NORMATIVA SOBRE METALES  
TRAZAS EN LOS SUELOS. APLICACIÓN  
EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID**

POR

GABRIEL GASCÓ GUERRERO\*  
MARÍA ASUNCIÓN MARTÍN LOU\*\*  
FRANCISCA GUERRERO LÓPEZ\*  
DOMINGO GÓMEZ OREA\*

*Introducción*

La contraposición de conceptos integrados y duales, como los de Geografía Física y Humana, Naturaleza y Sociedad, o Ecología y Economía, ha sido muy fértil históricamente por cuanto ha permitido el análisis sincrónico de dos procesos temporales: la evolución y el progreso del hombre en su ambiente. El hombre y su ambiente definen hoy lo que antaño expresaba el concepto unitario y esencial del hombre y su entorno o el hombre y su circunstancia. La actitud a adoptar por el hombre respecto a su ambiente, en tanto parte de su esencia, obedece a la ética de la salvación, de manera que si su ambiente no se salva tampoco se salva el hombre (Ortega, 1914; Marías, 1980).

Las regulaciones normativas sobre metales trazas en los suelos expresan un mandamiento ético para la salvación del hombre y su ambiente, y en consecuencia se enuncia en negativo diciendo que los contenidos en metales trazas contaminantes no deben superar determinados niveles considerados críticos. Los suelos son en sí mismos comparti-

---

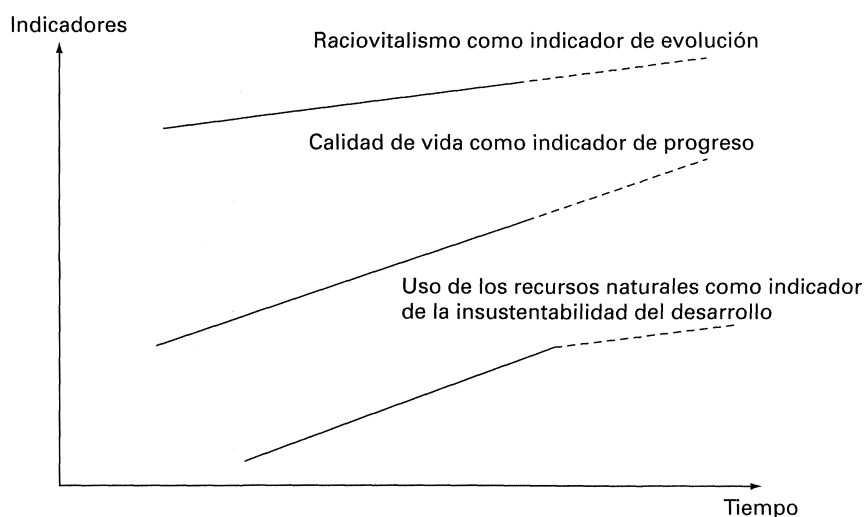
\* G. Gascó Guerrero, F. Guerrero López, D. Gómez Orea. ETSI Agrónomos UPM.

\*\* M.<sup>a</sup> A. Martín Lou. Inst. de Economía y Geografía. CSIC.

mentos ambientales, pero también forman parte de ambientes más complejos que se suceden conteniendo una cadena de negantropía creciente llamada cadena trófica o que se pueden adicionar en yuxtaposición hasta alcanzar la escala planetaria. El hombre y el suelo quedan conectados por la cadena trófica, que incluye lo extraído por los diferentes organismos desde los eslabones que se suceden en cuanto a su alimentación. Las organizaciones mundiales consideran que el ambiente del biosistema global es responsabilidad de todos. Sin embargo no existe un valor crítico válido para todos los sitios porque los biosistemas son más o menos vulnerables en función de su capacidad de absorción de impactos contaminantes. Por el contrario, los niveles críticos incluidos en las regulaciones normativas tienen valores diferentes según las características ambientales que determinan en cada país su acumulación o concentración en el suelo. Por otro lado, el nivel científico y técnico requerido para analizar la pequeña concentración ( $< 100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) de metales trazas en los suelos sólo se ha alcanzado en algunos países económicamente desarrollados. El estudio de la vinculación entre los niveles críticos de metales trazas en los suelos de los países desarrollados de Europa y Norteamérica y los parámetros de cada ámbito geográfico es el objetivo que se plantea aquí con la finalidad de encontrar relaciones que puedan ser útiles para las necesidades de generalización normativa.

La evolución natural y el progreso histórico son procesos espontáneos que tienen que obedecer a la ley universal del aumento de entropía. La entropía es una función, independiente del camino seguido por el sistema, que permite registrar en gran medida su cambio de estado, siendo aplicable no sólo a cualquier sistema conteniendo la vida, desde el más pequeño hasta el biosistema global, sino también a cualquier otro sistema del Universo. A la escala de cualquier biosistema en evolución y progreso el proceso es negantrópico, pero a la escala universal el proceso es necesariamente entrópico. El proceso espontáneo seguido por el sistema histórico-natural en conjunción con su universo ambiente es degradativo, lo que supone un aumento de entropía; por lo que el proceso externo tiene que ser necesariamente entrópico y negativo, ya que tanto la evolución como el progreso, que son ambos positivos, siguen un proceso interno negantrópico. El conjunto que integra el proceso interno con el externo tienen que sumar más que cero porque todo proceso histórico-natural es irreversible. Al día de hoy, las

regulaciones normativas obedecen a las premisas de este razonamiento y por consiguiente no pretenden el cambio de signo del proceso asociado a la evolución o el progreso, lo cual sería imposible a largo plazo, sino que sólo procuran desvincular las pendientes de las curvas que registran los cambios de estado de los biosistemas en función del tiempo (Jiménez-Beltrán, 2000). Reduciendo la externalidad que define la degradación entrópica se puede conseguir que la desvinculación de ambas pendientes dé lugar a un desarrollo que sea menos insustentable, según se expone en la Figura 1, donde la producción científico-técnica puede ser en cierto modo una expresión del raciovitalismo en tanto indicador de la evolución natural, lo mismo que la calidad de vida se puede considerar como un indicador de progreso. Dado que en la insustentabilidad de un biosistema, además del crecimiento sostenido, influye la vulnerabilidad del ambiente en tanto incapacidad para absorber impactos de cierta intensidad, como en el caso de la aportación de contaminantes por encima de los niveles críticos de concentración, las regulaciones normativas han de adecuarse a las condiciones geográficas que determinan la vulnerabilidad del ambiente en cada lugar. El objeto formal del presente trabajo es encontrar la expresión sintética y el



Modificado de Jiménez-Beltrán, 2000. IEA. Estadística y Medio Ambiente.

FIG. 1.—*Desvinculación de la evolución y el progreso respecto al uso de los recursos naturales como indicador del desarrollo sustentable.*

grado de significación de la relación entre la vulnerabilidad de los biosistemas dependiente del edafoclima y los valores críticos de metales trazas contaminantes incluidos en las regulaciones normativas de diferentes países desarrollados. Un objetivo adicional es aplicar este estudio como caso práctico en la Comunidad Autónoma de Madrid; para dilucidar si la regulación normativa en vigor obedece al análisis pormenorizado de sus condiciones ambientales o ha sido adoptada sin más dentro de las acciones conducentes a la inmersión de España en Europa.

*El ciclo de la materia orgánica y la incorporación creciente de xenobióticos y metales trazas en los residuos orgánicos y los suelos*

Los suelos se encuentran en la intersección del ciclo de la materia orgánica con el ciclo del aire, el agua y los minerales sólidos de las rocas. Estos ciclos tienen un valor depurativo del ciclo vital en cuanto a su capacidad para diluir materias y energías inconvenientes. El ciclo del aire se caracteriza por la rapidez de dispersión de las sustancias gaseosas, las cuales tienen la propiedad de adoptar la forma del volumen recipiente en sus tres dimensiones; y teniendo en cuenta que la densidad del aire seco (densidad  $1,3 \text{ kg m}^{-3}$ ) es muy pequeña, el nivel crítico de contaminación se alcanza con concentraciones muy bajas, por ejemplo las del orden de magnitud de la parte por mil millones (ppb). El agua libre es un fluido que adopta la forma del volumen recipiente en dos dimensiones y su densidad ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ) es mucho mayor que la del aire, por lo que el nivel crítico de contaminación se alcanza con concentraciones mucho mayores, por ejemplo del orden de magnitud de la parte por millón (ppm). Los contaminantes se diluyen en ambos fluidos: el aire y el agua, con una velocidad de dilución que depende de la solubilidad del contaminante y la cinética de disolución; en los suelos, por el contrario, los contaminantes poco solubles se acumulan y se concentran sobre la superficie de las partículas sólidas que integran el complejo de materia orgánica (densidad seca  $1400 \text{ kg m}^{-3}$ ) y materia mineral (densidad seca  $2650 \text{ kg m}^{-3}$ ). En conjunto, la tierra o sustancia del suelo tiene una densidad seca total de unos  $1300 \text{ kg m}^{-3}$ , lo que supone una fracción de volumen poroso que ocupa la mitad del volumen total. Los contaminantes cierran su ciclo al incorporarse en el suelo tras ser extraídos

sucesivamente por los organismos que constituyen los eslabones de la cadena trófica. La dilución en el aire que sana el suelo y en el agua que filtra la tierra no compensa hoy la acumulación derivada de lo aportado al suelo principalmente en los residuos orgánicos que se añaden con fines de fertilización química y enmienda de las propiedades físicas de aireación y permeabilidad al agua.

Tradicionalmente los residuos agrarios y los urbanos poco contaminados se han venido añadiendo al suelo agrícola para actuar a la vez como enmienda orgánica y como fertilizante en prácticas como el majadeo, el redileo y sobre todo el estercolado (Garrabou y Naredo, 1996). El estiércol se ha venido haciendo con lo extraído de la cama del ganado estabulado, materia constituida por paja y hojarasca impregnadas por heces sólidas y líquidas y la fracción orgánica de la basura doméstica. Hoy en día, los residuos agrarios, urbanos e industriales incorporan xenobióticos (*xeno-* con la misma raíz que en xenofobia) y contaminantes como los metales trazas en concentración por debajo de los 100 mg kg<sup>-1</sup>. Los xenobióticos, por ejemplo los pesticidas y los hidrocarburos, son sustancias extrañas a los biosistemas, que se derivan en general de las actividades humanas y suelen ser resistentes o recalcitrantes respecto a su biodegradación o descomposición en los ambientes naturales. Los metales trazas contaminantes, por ejemplo el cromo (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), cadmio (Cd) y plomo (Pb), se encuentran en los suelos con concentración media por debajo de los 100 mg kg<sup>-1</sup>; por encima de un nivel crítico, estos metales trazas pueden resultar tóxicos para los organismos del suelo, las plantas y los animales. El total de residuos generados por la actividad humana agraria, urbana e industrial supera la capacidad ambiental de dilución y descomposición, por lo que se almacenan en vertederos más o menos controlados y cuya localización es cada vez más problemática. En muchos casos y dada su riqueza en materias orgánicas poco contaminadas, los residuos sólidos urbanos (RSU), una vez compostados, pueden aplicarse en el suelo en sustitución del estiércol, cuya escasez se ha acentuado a medida que las labores mecanizadas han desplazado a las labores de tracción animal. En el mundo desarrollado, la gran producción de RSU y también la de otros residuos ricos en materia orgánica y nutrientes para los vegetales, como son los lodos de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), han determinado el aumento de su aplicación como enmienda orgánica de los suelos, lo que

ha evitado su excesiva acumulación en vertederos más o menos controlados. Sin embargo, el balance de las materias orgánicas esparcidas sobre el suelo se desequilibra porque los xenobióticos y los metales trazas de los RSU y lodos de EDAR compostados retrasan la mineralización de las materias orgánicas (Hernández-Apaolaza, *et al.*, 2000; Logan, 2000). No es de extrañar que la preocupación por este desequilibrio en el balance de materias orgánicas haya sido objeto de estudio y regulación normativa en los distintos países desarrollados de Europa y en los EEUU de América. Estas regulaciones normativas presentan diferencias asociadas a la geografía física de cada país a causa de la influencia que los parámetros de clima y suelo ejercen sobre el balance de materias orgánicas. En estas regulaciones normativas parece tener menos influencia el aumento de xenobióticos y elementos, según el grado de desarrollo de los distintos países que, las condiciones naturales que determinan la vulnerabilidad de los recursos; principalmente porque las restricciones normativas aumentan con el grado de desarrollo, en paralelo con las preocupaciones ambientales y su incidencia en la sustentabilidad del crecimiento económico. Por consiguiente, no es aventurada la idea original del presente trabajo en cuanto a encontrar una expresión sintética con su grado de significación para la vinculación entre los parámetros que definen el ámbito geográfico de los países desarrollados y las regulaciones normativas sobre concentración de metales trazas en suelos.

En cuanto al objetivo concreto de los metales trazas en los suelos, conviene recordar que la civilización moderna depende de muchos metales que se usan en la actividad diaria. El cobre (Cu) se viene usando desde el 8000 a.C., inicialmente obtenido como cobre nativo, pero desde el 6000 a.C. extraído de óxidos minerales. El plomo (Pb) data desde el 5000 a.C., el zinc (Zn) y el mercurio Hg desde el 500 a.C. y el níquel (Ni) y sus aleaciones desde el 200 a.C. El cadmio (Cd) se descubrió mucho más recientemente, en el año 1817 (Tiller, 1989) y el cromo (Cr) se utiliza desde 1877 en aleaciones metálicas (McGrath, 1995). La cronología histórica del impacto ambiental de los metales pesados ha sido determinada analizando muestras de sedimentos (Müller, 1981), hielos (Murozumi, *et al.*, 1969) y turbas (Chamberlain, 1983). Por ejemplo, en sedimentos del tiempo del Imperio Romano se ha podido detectar un pico de concentración que revela el incremento en el uso del plomo. El crecimiento del uso de los metales pesados se aceleró durante la Re-

volución Industrial del siglo XIX; y desde entonces los metales pesados han llegado a ser «esenciales para la sociedad moderna». La cantidad total acumulada de Cr, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb que ha sido consumida en el mundo hasta el momento actual se estima en unos 42, 17, 307, 250, 0,5 y 241 millones de toneladas, respectivamente. Su incidencia ambiental ha sido evaluada por Nriagu (1979) al analizar las emisiones de metales pesados a la atmósfera. De sus datos se puede deducir que las emisiones de origen humano superan con mucho a las de origen natural (Cuadro I). A

CUADRO 1

EMISIÓN A LA ATMÓSFERA DE METALES TRAZAS DE ORIGEN NATURAL Y ANTROPOGÉNICO

Metal traza	Uso total acumulado ( $\cdot 10^6$ t)	Emisión antropogénica acumulada ( $\cdot 10^3$ t)	Emisión antropogénica anual ( $\cdot 10^6$ t/año)	Emisión natural anual ( $\cdot 10^6$ t/año)	Coefficiente antropogénica/natural
Cr	42	1.560	58	36	1,6
Ni	17	1.000	47	26	1,8
Cu	307	2.180	56	18	3,1
Zn	250	14.000	310	44	7,0
Cd	0,5	316	7,3	0,83	8,8
Pb	241	19.600	450	24	18,8

Elaborado a partir de (1) Nriagu (1979), (2) Tiller (1989).

la dispersión a través de la atmósfera hay que añadir la de los efluentes líquidos que se vierten en las aguas y la de los residuos sólidos que se esparcen directamente sobre la tierra. El aumento de metales trazas en los residuos es consecuencia del aumento de su uso por las sociedad moderna (Cuadro II). Los metales trazas se vienen incorporando de manera creciente en las materias residuales de naturaleza orgánico-mineral de origen cada vez más urbano e industrial que agrario, lo cual plantea actualmente la contaminación del *sistema suelo-agua-planta-animal* dentro de una problemática ambiental con efectos tanto sobre los ecosistemas naturales como sobre la cadena trófica, pudiendo llegar a alcanzar hasta la salud humana.

## CUADRO II

EVOLUCIÓN DE LAS EXTRACCIONES MINERAS DE LOS METALES  
TRAZAS Cr, Ni, Cu, Zn, Cd Y Pb EN EL MUNDO

Elemento	Símbolo	Año 1975 (t/año)	Año 2000 (t/año)	Incremento anual (t/año)
Cromo	Cr	$2.250 \cdot 10^3$	$3.750 \cdot 10^3$	$60 \cdot 10^3$
Níquel	Ni	$740 \cdot 10^3$	$1.500 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$
Cobre	Cu	$7.470 \cdot 10^3$	$12.000 \cdot 10^3$	$180 \cdot 10^3$
Zinc	Zn	$6.190 \cdot 10^3$	$11.000 \cdot 10^3$	$190 \cdot 10^3$
Cadmio	Cd	$16 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$0,16 \cdot 10^3$
Plomo	Pb	$3.590 \cdot 10^3$	$5.000 \cdot 10^3$	$55 \cdot 10^3$

Elaborado a partir de (1) Kabata-Pendias y Pendias (1992), (2) Papp (1986).

*Metales trazas en los suelos y su efecto sobre las plantas  
y los animales*

Cada *elemento traza* (Mitchell, 1964; Kabata-Pendias y Pendias, 1992; Bohn, *et al.*, 1993) tiene por lo general una concentración individual menor que  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  en la corteza terrestre y en el suelo (Bear, 1964; Lindsay, 1979; Sposito, 1989), con promedio de concentración menor que  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  en el suelo (Logan, 2000). El conjunto de los elementos trazas representa menos del 1% de las rocas de la corteza terrestre, debiendo excluirse a los diez elementos que constituyen el 99% de las rocas: O, Al, Si, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti y P (Mitchell, 1964; SSSA, 1997). Algunos elementos trazas que se encuentran en el sistema suelo-agua-planta en pequeña cantidad han sido reconocidos como esenciales para el desarrollo saludable de las plantas, los animales o los microorganismos (B, F, S, Mn, Co, Cu, Zn, Se, Mo, I) por lo que se han incluido junto con el Fe y el Cl entre los *oligoelementos* (Branson, *et al.*, 1975; Ayers y Wescott, 1987; Urbano, 1991). La denominación de *micronutrientes* se viene aplicando a los nutrientes de los vegetales que se encuentran en pequeñas cantidades en las plantas ( $< 100 \text{ mg kg}^{-1}$ ), e.g. B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Co y Zn (SSSA, 1997). Algunos elementos trazas, sean o no esenciales, son nocivos por encima de un cierto nivel crítico. Estos elementos, que pueden ser extraídos de manera directa o indirecta



por los microorganismos, las plantas o los animales y que resultan ser tóxicos a baja concentración, han sido denominados *microelementos* (Urbano, 1991). En el Cuadro III se resumen los efectos de los *metales*

CUADRO III  
EFECTO DE LOS METALES TRAZAS Cr, Ni, Cu, Zn, Cd Y Pb  
SOBRE LOS ANIMALES Y LAS PLANTAS

Elemento	Símbolo	Especie dominante en el suelo	Efectos sobre los animales y plantas	
			Nutriente	Tóxico
Cromo	Cr	Cr <sup>3+</sup> , CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Animales	El Cr <sup>VI</sup> es carcinogénico
Níquel	Ni	Ni <sup>2+</sup>	Animales y plantas	Animales y plantas
Cobre	Cu	Cu <sup>2+</sup>	Animales y plantas	Animales y plantas
Zinc	Zn	Zn <sup>2+</sup>	Animales y plantas	Animales y plantas
Cadmio	Cd	Cd <sup>2+</sup>		Animales
Plomo	Pb	Pb <sup>2+</sup>		Animales y plantas

Fuente: Logan (2000).

CUADRO IV  
CONCENTRACIÓN NORMAL Y CRÍTICA DE METALES TRAZAS  
EN SUELOS Y PLANTAS

Elemento	Concentración en suelo (mg/kg)		Concentración en planta (mg/kg)		
	Normal	Crítica (1)	Normal	Crítica	
				(2)	(3)
Cr	5-1500	75-100	0,03-14	5-30	2-18
Ni	2-750	100	0,02-5	10-100	8-220
Cu	2-250	60-125	5-20	20-100	5-64
Zn	1-900	70-400	1-400	100-400	100-900
Cd	0,01-2,0	3-8	0,1-2.4	5-30	4-200
Pb	2-300	100-400	0,2-20	30-300	—

(1) La concentración crítica en el suelo, aún pudiendo ser una concentración normal, es aquella concentración a partir de la cual se pueden producir efectos tóxicos en las plantas. (2) Concentración crítica que produce efectos tóxicos evidentes en las plantas. (3) Concentración que causa un 10% de disminución en el crecimiento de las plantas.

Fuentes: (1) Bowen (1979), (2) Kabata-Pendias y Pendias (1992), (3) De Vries y Bakker (1996).

trazas Cr, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb que son objeto de este estudio sobre los animales y las plantas. Los metales trazas no son degradables, por lo que se van concentrando en el sistema suelo-agua-planta y pueden llegar a afectar a la fertilidad del suelo o a la calidad de los cultivos durante largo tiempo. El contenido de metales trazas puede variar varios órdenes de magnitud en los suelos naturales, cuyos límites son rebasados en el caso de los suelos contaminados (Cuadro IV). En este caso, sobre todo en condiciones favorables de pH, aunque la solubilidad de los metales pesados es muy baja (actividad en solución  $< 10^{-6} M$ ), las plantas pueden extraerlos en cantidad suficiente para causar fitotoxicidad (Ni, Cu, Zn, Pb) o para contaminar algunos eslabones de la cadena trófica (Cr y Cd, además de los anteriores). Todo ello, ha llevado a que se establezcan normativas que regulen la utilización de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR).

CUADRO V  
CONCENTRACIÓN MÁXIMA PERMITIDA (MG/KG) DE METALES TRAZAS  
EN LOS SUELOS TRATADOS CON LODOS DE ESTACIONES  
DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES (EDAR)

País	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
<b>Unión Europea</b>	<b>100-150*</b>	<b>30-75</b>	<b>50-140</b>	<b>150-300</b>	<b>1-3</b>	<b>50-300</b>
Alemania	100	50	60	200	1,5	100
Dinamarca	30	15	30	100	0,5	40
<b>España</b>	<b>100-150*</b>	<b>30-112</b>	<b>50-210</b>	<b>150-450</b>	<b>1-3</b>	<b>50-300</b>
Finlandia	200	60	100	150	0,5	60
Francia	150	50	100	300	2,0	100
Italia	150	50	100	300	3,0	100
Noruega	100	30	50	150	1,0	50
Reino Unido	400	75	135	300	3,0	300
Suecia	30	15	40	100	0,5	40
<b>Estados Unidos</b>	<b>1.500</b>	<b>210</b>	<b>750</b>	<b>1.400</b>	<b>20</b>	<b>150</b>

\* El valor menor corresponde a los suelos de pH < 7 y el valor mayor a los de pH > 7.

Fuentes: (1) CEC (1986), (2) MAPA-España (1990), (3) Alloway (1995), (4) USEPA-503 Regulations, (5) CEE-CM (1998).

*Regulaciones normativas sobre metales trazas en los suelos y su relación con el ambiente geográfico dependiente del clima*

Las regulaciones normativas existentes en diferentes países de Europa y en Estados Unidos sobre la utilización de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales reflejan las concentraciones máximas permitidas (Cuadro V) de metales pesados que se pueden alcanzar en los suelos tratados con lodos de EDAR. Las diferentes normativas en vigor tanto en la Unión Europea (CEC, 1986), España (MAPA-España, 1990; CEE-CM, 1998) como en los Estados Unidos de América (USEPA-503 Regulations, 1997) sobre el uso agrario de los lodos de EDAR parten del *contenido total* de metales trazas, i.e. el total de cada metal traza extraído con un ácido fuerte, determinado por espectroscopia de absorción atómica como método de referencia y con un límite de detección para

CUADRO VI

TOXICIDAD MÁXIMA PERMITIDA PARA LOS METALES TRAZAS EN LOS SUELOS TRATADOS CON LODOS Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA EN EL ENTORNO DE LA CAPITAL DE DIFERENTES PAÍSES

País	Suma <sup>(i)</sup> (mg/kg)	TEZ <sup>(ii)</sup> (mg/kg)	FEZ <sup>(iii)</sup> (mg/kg)	P <sup>(iv)</sup> (mm)	t <sup>(v)</sup> (°C)	t reducida <sup>(vi)</sup> (°C)
<b>Unión Europea</b>	<b>968</b>	<b>2.450</b>	<b>1.180</b>	<b>670</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
Alemania	512	1245	720	650	9	9,5
Dinamarca	216	474	280	750	10	7,5
<b>España</b>	<b>1.225</b>	<b>2.960</b>	<b>1.766</b>	<b>400</b>	<b>14</b>	<b>18</b>
Finlandia	571	1293	830	850	5	4,5
Francia	702	1615	900	600	11	11
Italia	703	1765	900	750	15	16
Noruega	381	880	490	840	6	7
Reino Unido	1213	2913	1170	600	8	11,5
Suecia	226	499	300	600	7	8
<b>Estados Unidos</b>	<b>4.030</b>	<b>10.520</b>	<b>4.580</b>	<b>1.034</b>	<b>12,5</b>	<b>12</b>

<sup>(i)</sup> Suma = Cr + Ni + Cu + Zn + Cd + Pb, <sup>(ii)</sup> TEZ = Toxicidad equivalente a la del zinc (ver Cuadro 8). TEZ = 1,9 · Cr + 5,0 · Ni + 2,5 · Cu + 1,0 · Zn + 150 · Cd + 2,3 · Pb, <sup>(iii)</sup> FEZ = Factor equivalente de zinc FEZ = 8,0 · Ni + 2,0 · Cu + 1,0 · Zn, <sup>(iv)</sup> P: precipitación media anual, <sup>(v)</sup> t: temperatura media anual, <sup>(vi)</sup> t reducida: temperatura reducida al nivel del mar.

Elaborado a partir de: (1) Chumbley (1971), (2) CEC (1986), (3) MAPA-España (1990), (4) Alloway (1995), (5) USEPA-503 Regulations (1997), (6) CEE-CM (1998).

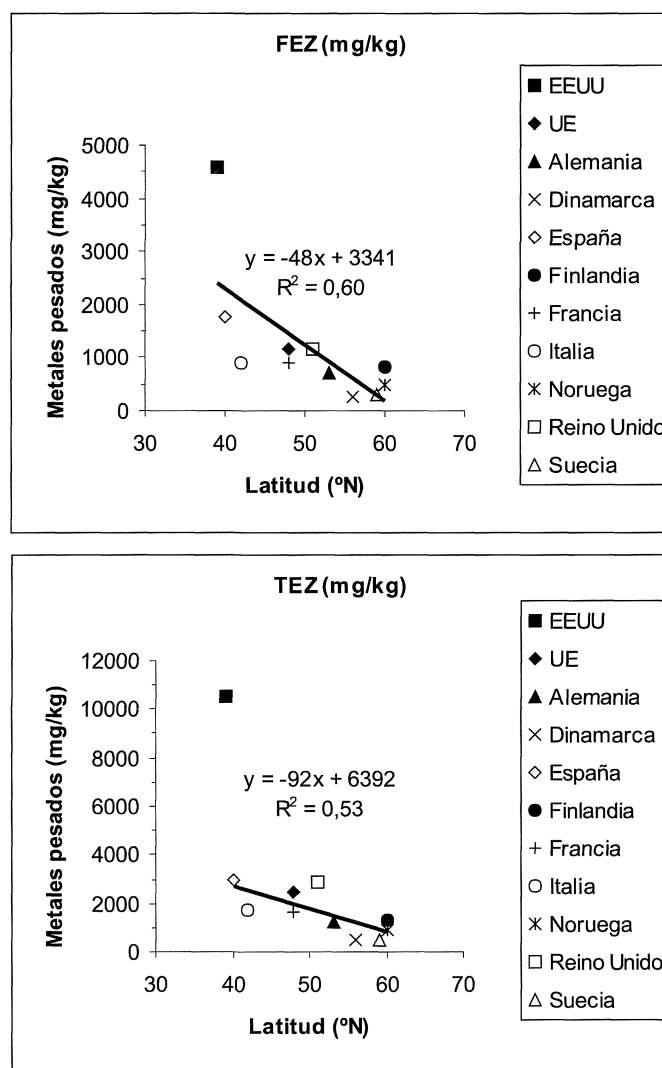
cada metal que no debe superar el 10 por 100 del valor límite correspondiente. La definición de *suelo contaminado* se basa en el *contenido total de cada metal traza*, con un valor de la concentración que varía según su *toxicidad relativa* (Cuadros VI y VII), la cual depende de las condiciones climático-ambientales asociadas a la latitud (Fig. 2). Estas normativas reflejan claramente la dependencia de las condiciones ambientales zonales o climáticas, principalmente por la influencia de la temperatura en el edafoclima (Cuadro VI). La evapotranspiración disminuye con la reducción de la temperatura y el régimen de humedad resulta más favorable para la lixiviación a medida que la latitud aumenta (Fig. 3). El agua filtrada desplaza los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  presentes en la solución del suelo, la cual está en equilibrio de reparto con el complejo de intercambio catiónico. Este desplazamiento catiónico causa la desmineralización y la acidificación del complejo orgánico-mineral del suelo al intercambiar los cationes alcalinos,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , y alcalinotérreos,  $\text{Ca}^{2+}$  y

CUADRO VII

TOXICIDAD RELATIVA A LA DEL ZINC (TEZ) PARA LOS METALES TRAZAS EN SUELOS TRATADOS CON LODOS DE EDAR SEGÚN LAS REGULACIONES NORMATIVAS DE DIFERENTES PAÍSES

País	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Unión Europea	1,5-2,0*	5,0-4,0	3,0-2,1	1,0-1,0	150-100	3,0-1,0
Alemania	2,0	4,0	3,3	1,0	133	2,0
Dinamarca	3,3	6,7	3,3	1,0	200	2,5
España	1,5-3,0*	5,0-4,0	3,0-2,1	1,0-1,0	150-150	3,0-1,5
Finlandia	0,75	2,5	1,5	1,0	300	2,5
Francia	2,0	6,0	3,0	1,0	150	3,0
Italia	2,0	6,0	3,0	1,0	100	3,0
Noruega	1,5	5,0	3,0	1,0	150	3,0
Reino Unido	0,75	4,0	2,2	1,0	100	1,0
Suecia	3,3	6,7	2,5	1,0	200	2,5
Estados Unidos	0,9	6,7	1,9	1,0	70	9,3
<b>Promedio</b>	<b>1,8-1,9</b>	<b>5,2-5,0</b>	<b>2,7-2,5</b>	<b>1,0</b>	<b>155-150</b>	<b>2,7-2,3</b>
<b>Max-mín</b>	<b>3,3-0,75</b>	<b>6,7-2,5</b>	<b>3,3-1,5</b>	<b>1,0-1,0</b>	<b>300-70</b>	<b>9,3-1,0</b>
<b>Según el contenido crítico (Cuadro 5)</b>	<b>0,9-4,0</b>	<b>0,7-4,0</b>	<b>1,2-3,2</b>	<b>1,0-1,0</b>	<b>23-50</b>	<b>0,7-1,0</b>

\* El valor menor corresponde a los suelos de pH < 7 y el valor mayor a los de pH > 7. Elaborado a partir de (1) CEC (1986), (2) MAPA-España (1990), (3) Alloway (1995), (4) USEPA-503 Regulations (1997), (5) CEE-CM (1998).



Factor equivalente de zinc:  $FEZ = 8,0 \cdot Ni + 2,0 \cdot Cu + 1,0 \cdot Zn$

Toxicidad equivalente a la de zinc:  $TEZ = 1,9 \cdot Cr + 5,0 \cdot Ni + 2,5 \cdot Cu + 1,0 \cdot Zn + 150 \cdot Cd + 2,3 \cdot Pb$

FIG. 2.—Regulaciones normativas sobre metales trazas en suelos de diferentes países.

$Mg^{2+}$ , por iones hidronio  $H_3O^+$ . Esta desmineralización y acidificación del suelo induce la adaptación de los ecosistemas a condiciones oligotróficas y ácidas. Una característica bastante general de estos ecosistemas

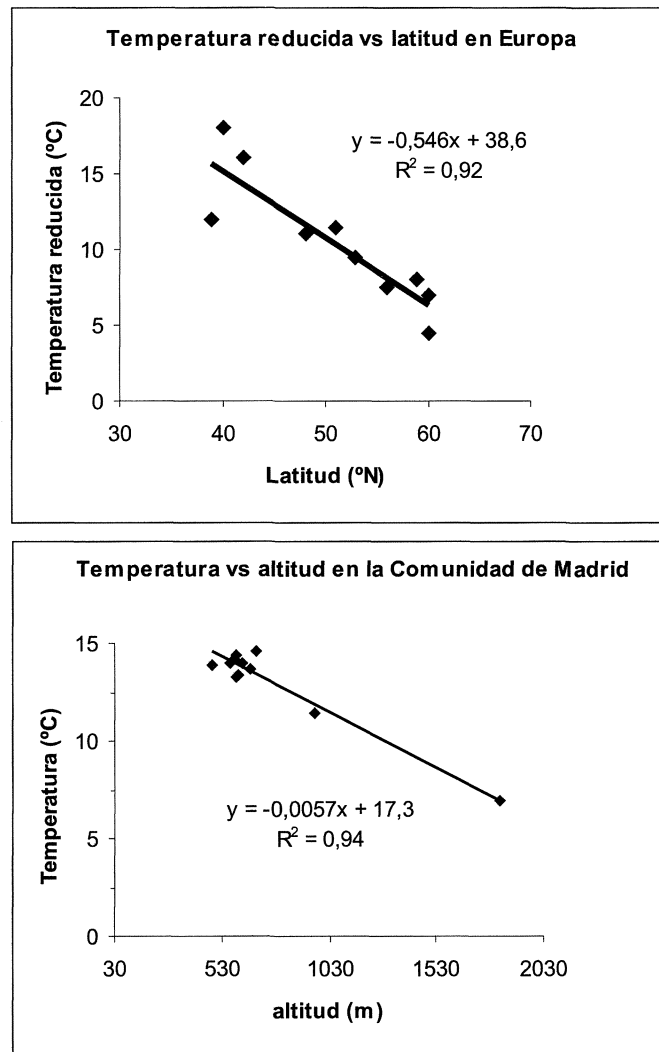


FIG. 3.—*Temperatura vs latitud en Europa y temperatura vs altitud en la Comunidad de Madrid.*

es la pobreza en cenizas de su vegetación. La vegetación oligotrófica y acidófila es sensible al incremento relativo de los iones de metales trazas potencialmente tóxicos, lo que se refleja en los límites establecidos en las regulaciones normativas de diferentes países (Fig. 2). La tolerancia

en EEUU parece mucho mayor, lo que puede repercutir en ventajas económicas para las empresas. Sin embargo hay que resaltar que estos límites se establecen para suelos sometidos a planes ambientales, por ejemplo los que se encuentran en espacios degradados donde las enmiendas orgánicas pueden ser más beneficiosas.

La toxicidad relativa a la del zinc para los metales trazas contenidos en los suelos tratados con lodos de EDAR según las regulaciones normativas de diferentes países revela que el *factor equivalente de zinc FEZ*, calculado por la ecuación [1]

$$FEZ = 1 \cdot Zn + 2 \cdot Cu + 8 \cdot Ni \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} \quad [1]$$

propuesta por Chumbley (1971) en su intento de evaluar la toxicidad del conjunto de los metales trazas, es una buena aproximación y se puede usar para los lodos de EDAR en su aplicación al suelo, aunque parece sobrevalorar ligeramente la toxicidad relativa del Ni, según se deduce de las regulaciones normativas (Cuadros VI y VII). En cualquier caso hay que tener en cuenta que la toxicidad relativa y la tolerancia dependen de las condiciones ambientales que determinan la biodisponibilidad del Cu y el Ni frente a la del Zn, e.g. el pH, la materia orgánica y el nivel de fósforo (Lundblad, *et al.*, 1949; De Haan and Zwerman, 1976). La relación Zn/Cd se recomienda que se aproxime a 1000 y que en cualquier caso supere el valor 200 (Polo, *et al.*, 1995). El FEZ indica la toxicidad para el sistema suelo-planta, aunque debiera incluir también el Pb, por ser tóxico aunque no esencial para las plantas. Como el Cr y el Cd son tóxicos para los animales, se puede definir un factor de toxicidad total equivalente a la del zinc TEZ para el sistema suelo-planta-animal (Cuadro V) según la ecuación [2]

$$TEZ = 1,9 \cdot Cr + 5,0 \cdot Ni + 2,5 \cdot Cu + 1 \cdot Zn + 150 \cdot Cd + 2,3 \cdot Pb \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} \quad [2]$$

donde los coeficientes de Cr, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb se deducen de los valores máximos de toxicidad incluidos en las regulaciones normativas (Cuadros VI y VII).

*Aplicación de la normativa sobre metales trazas en los suelos de la Comunidad de Madrid*

La normativa sobre la utilización de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales en la Comunidad de Madrid (CEE-CM, 1998), es una trasposición de la Directiva Europea de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura (CEC, 1986). Los suelos de la Comunidad de Madrid destacan por su diversidad que es en gran parte causada por la influencia geomorfológica o del relieve, de forma que la Comunidad de Madrid equivale a un minicontinente donde la *altitud* del terreno repercute sobre el edafoclima de manera parecida a la de la latitud en el caso del continente europeo con valores del volumen de lixiviado que aumentan desde la Depresión del río Tajo hasta la Sierra de Guadarrama en concordancia con la disminución de la temperatura y el aumento de la precipitación (Fig. 3). El exceso de la precipitación sobre la evapotranspiración en los suelos de la Sierra, situados a más de 1000 metros de altitud, es en gran parte lixiviado (Fig. 4) causando sobre el suelo unas condiciones *oligotróficas y ácidas* que se ven favorecidas por la pobreza en cationes alcalinotérreos del material originario constituido por granitos y gneises, y la permeabilidad de los suelos de granulometría arenosa gruesa. Este carácter oligotrófico y ácido confiere al suelo una vulnerabilidad parecida a la determinada por las exigentes regulaciones normativas de los países del norte europeo. Por lo tanto, a medida que se va descendiendo, se reduce la vulnerabilidad del suelo y con ello la peligrosidad de la adición de metales trazas al suelo va disminuyendo.

*Conclusiones*

Las regulaciones normativas de índole ambiental se plantean en el tiempo actual a caballo entre las Ciencias Históricas con su idea del progreso y las Ciencias Naturales con su idea de la evolución; encontrando acomodo bajo el paraguas de la antítesis entre el crecimiento económico sostenido y el grado de sustentabilidad del desarrollo por los recursos naturales, los cuales actúan a la vez como soporte de actividades y como objeto económico. Las diferencias que tienen los diferentes países



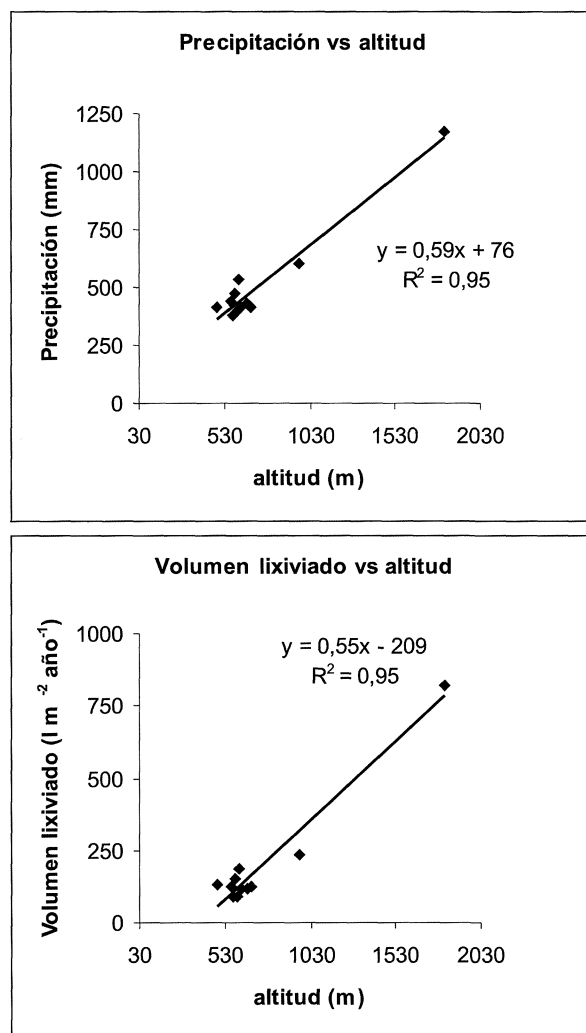


FIG. 4.—Precipitación y lixiviación en función de la altitud del terreno en la Comunidad de Madrid.

en cuanto a la vulnerabilidad de sus recursos naturales se posicionan en la actualidad ante el movimiento globalizador como antaño lo hacían las diferencias en cuanto a su fertilidad potencial. Precisamente estas diferencias de fertilidad y vulnerabilidad determinan que la productividad del hombre sea diferente en el sector primario de cada ámbito geográ-

fico, lo que sugiere matizaciones institucionales en cuanto a las modificaciones a introducir en operatividad de la demanda del mercado libre como mano invisible; ya que al día de hoy y, desde esta perspectiva de globalización y planetaria, parece poco aconsejable favorecer una crisis de carácter más o menos catastrófico en favor de una nueva dominación. Otra cosa es la expresión global de justicia y bienestar y la contribución que cada cual ha de aportar.

Una regulación normativa sobre contenido crítico de metales trazas en los suelos de diferentes ámbitos geográficos responde a lo sugerido por un binomio de uso común que contrapone conceptos integrados como los de Geografía Física y Geografía Humana, Naturaleza y Sociedad, o Ecología y Economía. La manifestación más general y actualizada de este binomio viene dada en esencia por el concepto unitario de hombre-ambiente, con antecedentes aspectuales como hombre y medio, hombre y entorno, hombre y circunstancia.

El paralelismo de condiciones ambientales entre la Comunidad de Madrid y los países de la Unión Europea y las diferencias en cuanto a la diversidad edafológica y climática aconsejan para la Comunidad de Madrid una diferenciación dentro de la regulación normativa sobre tratamiento de suelos con lodos de depuradoras de aguas residuales. Esta diferenciación, de manera similar a la que se aplica en los diferentes países de la Unión Europea, se puede establecer de acuerdo con las características del perfil biogeoquímico de los suelos llanos y con la pendiente del terreno, además de incluir otros considerandos integrables en una decisión multicriterio encaminada a resolver la problemática ambiental que se deriva de la carga de lodos de depuradoras de aguas residuales que son generados anualmente por la Comunidad. La Planificación Rural debe estar atenta a los resultados experimentales que sirven de apoyo a la determinación de la carga crítica, sabiendo que la progresiva acumulación de metales en el suelo tiene límites temporales en cuanto a la dosis a aplicar anualmente y la cantidad total de metales pesados que cada tipo de suelo puede acumular a largo plazo, por ejemplo después de 20 años de aplicación de la dosis anual de lodo.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLOWAY, B. J.: *Heavy metals in soils*, London, 1995, Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, 368 pp.
- AYERS, R. S., y WESCOTT, D. W.: *La calidad del agua en la agricultura*, Roma, 1987, Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1, 183 pp.
- BEAR, F. E.: *Chemistry of the soil*, 2<sup>nd</sup> ed., ACS Monograph No. 160, New York, 1964, Reinhold Publishing Corporation, 515 pp.
- BOHN, H. L.; MCNEAL, B. L., y O'CONNOR, G. A.: *Soil chemistry*, 3<sup>rd</sup> ed., New York, 1993, John Wiley and Sons, 370 pp.
- BOWEN, H. J. M.: «Environmental Chemistry of the Elements», en ALLOWAY, B. J., *Heavy metals in soils*, London, 1995, Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, pp. 354.
- BRANSON, R. L.; PRATT, P. F.; RHOADES, J. D., y OSTER, J. D.: «Water quality in irrigated watersheds», *J. Environ. Qual.*, n.º 4, 1975, pp. 33-40.
- CEC.: «Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/EEC)», *Official Journal of the European Communities*, n.º 181, 1986, pp. 6-12.
- CEE-CM.: «Decreto 193/1998, de 20 de noviembre, por el que se regula, en la Comunidad de Madrid, la utilización de lodos de depuradora en agricultura», *B.O.C.M.*, n.º 287, 1998, pp. 26-31.
- CHAMBERLAIN, A. C.: «Fallout of lead and uptake by crops», *Atmos. Environ.*, n.º 17, 1983, pp. 693-706.
- CHUMBLEY, G. C.: *Permissible levels of toxic metals in sewage used on agricultural land*, London, 1971, A.D.A.S. Advisory Paper No. 10, 12 pp.
- DE HAAN, F. A. M., y ZWERMAN, P. J. (1976): «Pollution of soil», en G. H. BOLT y M. G. M. BRUGGENWERT (eds.): *Soil chemistry. A. Basic elements*. Developments in Soil Science 5A, Elsevier, pp. 192-271.
- DE VRIES, W., y BAKKER, D. J.: *Manual for calculating critical loads of heavy metals for soils and surface waters. Preliminary guidelines for environmental quality criteria, calculation methods and input data*, Wageningen, 1997, Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, 176 pp.
- GARRABOU, R., y NAREDO, J. M.: «La fertilización en los sistemas agrarios. Una perspectiva histórica», Madrid, 1996, n.º 4 de la Serie de Economía y Naturaleza, Fundación Argenteria y Visor Dis., 275 pp.
- HERNÁNDEZ-APAOLAZA, L.; GASCÓ, J. M.<sup>a</sup>, y GUERRERO, F.: «Initial organic matter transformation of soil amended with composted sewage sludge», *Biol. Fertil. Soils*, n.º 32, 2000, pp. 421-426.
- JIMÉNEZ-BELTRÁN, D.: «Los indicadores ambientales como instrumentos al servicio de la política ambiental y para el desarrollo sostenible, y de participación y control público. Avances y perspectivas». En Sistema de Estadística de Andalucía SEA. *Estadística y Medio Ambiente*, Instituto de Estadística de Andalucía IEA, 2000, Sevilla, pp. 11-27.
- KABATA-PENDIAS, A., y PENDIAS, H.: *Trace elements in soils and plants*, 2<sup>nd</sup> ed., Boca Raton, 1992, CRC Press, 365 pp.
- LINDSAY, W. L.: *Chemical equilibria in soils*, New York, 1979, John Wiley and Sons, 449 pp.
- LOGAN, T. J.: «Soils and environmental quality», en M. E. SUMNER, *Handbook of soil science*, Boca Raton, CRC, pp. G155-G169.
- LUNDBLAD, K.; SVANBERG, O., y EKMAN, P.: «The availability and fixation of Cu in Swedish soils», *Plant Soil*, n.º 1, 1949, pp. 277-302.
- MAPA-ESPAÑA: «Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario», *BOE*, n.º 262, 1990, pp. 339-340.
- MARÍAS, J.: «Calidad de vida y medio ambiente: El hombre y su circunstancia», *Boletín Informativo del Medio Ambiente*, n.º 14, Abril-Junio 1980, Madrid, pp. 13-17.

- MCGRATH, S. P.: «Chromium and Nickel», en B. J. ALLOWAY, *Heavy metals in soils*, London, 1995, Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, pp. 152-174.
- MITCHELL, R. L.: «Trace elements in soils», en F. E. BEAR, *Chemistry of the soil*, New York, 1964, Reinhold, pp. 320-368.
- MÜLLER, G.: «Heavy metals and other pollutants in the environment: A chronology based on the analysis of dated sediments», *Heavy metals Environ. Int. Conf.*, n.º 3, 1981, pp. 12-17.
- MUROZUMI, M.; CHOW, T. J., y PATTERSON, C.: «Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata», *Geochim. Cosmochim.*, n.º 22, 1969, pp. 1247-1294.
- NRIAGU, J. O.: «Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace elements to the atmosphere», *Nature*, n.º 279, 1979, pp. 409-411.
- PAPP, J. F.: «Metals and minerals», en *US Bureau of mines minerals yearbook 1986*, Washington, 1986, US Dept. of Interior, pp. 225-244.
- ORTEGA, J.: «Meditaciones del Quijote (1914)», en *Obras Completas*, Madrid, 1966, Revista de Occidente, vol. I: 1902-1916, 7.ª ed., pp. 309-400.
- POLO, A.; GUMUZZIO, J., y DÍAZ, M. A.: *Utilización agrícola de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales. Aplicaciones en el territorio de la Comunidad de Madrid*, Madrid, 1995, Canal de Isabel II, 140 pp.
- SPOSITO, G. *The chemistry of soils*, New York, 1989, Oxford University Press, 277 pp.
- SSSA: *Glossary of soil science terms*, Madison, 1997, Soil Science Society of America Inc., 134 pp.
- TILLER, K. G.: «Heavy metals in soils and their environmental significance», en B. A. STEWART, *Advances in Soil Science n.º 9*, New York, 1989, Springer-Verlag New York Inc., pp. 113-142.
- URBANO, P.: *Tratado de Fitotecnia General*, Madrid, 1991, Ediciones Mundi Prensa, 836 pp.
- USEPA-503 REGULATIONS: «Standards for the use or disposal of sewage sludge», *U.S. Environmental Protection Agency EPA*, 1997, U.S. Government Printing Office, pp. 685-716.

RESUMEN: Las condiciones geográficas de los países desarrollados de Europa y los EEUU de América son estudiadas en relación con su influencia en las regulaciones normativas que determinan las concentraciones máximas de metales trazas en los suelos agrícolas receptores de lodos de estaciones depuradoras de aguas. Se ha encontrado una conexión significativa entre las regulaciones normativas y las características climatológicas y edáficas de cada lugar. El posterior análisis de las condiciones existentes en la Comunidad de Madrid revela su comportamiento como un minicontinente donde la altitud del terreno tiene una influencia parecida a la de la latitud en el continente europeo; así, el exceso de humedad que lava el suelo y causa su carácter oligotrófico y ácido se acentúa con la altitud, de manera que los suelos de la Sierra de Guadarrama tienen una vulnerabilidad respecto a la adición de metales trazas que es parecida a la de los suelos de los países del norte europeo.

PALABRAS CLAVE: Regulaciones normativas. Metales trazas en los suelos. Ámbito geográfico. Edafoclima. Comunidad de Madrid.

ABSTRACT: Relation between critical heavy metals concentration in soil, allowed by European and USA regulations of protection of the environment when sewage sludge is used in agriculture, and climate is discussed in this paper. Later, Madrid region case is studied.

*INFLUENCIA DEL ÁMBITO GEOGRÁFICO EN LA REGULACIÓN NORMATIVO...*

---

The altitude in Madrid region and the latitude in European continent have a similar influence over pedoclimate, increasing both oligotrophic and acid properties of soil when the altitude and latitude rise. Therefore, Guadarrama Mountains soils are as vulnerable to heavy metals application as North European soils.

KEY WORDS: Regulations on trace metals in soils. Environmental geography. Pedoclimate.

RÉSUMÉ: Les caractéristiques géographiques des pays de l'Europe, EEUU et la Communauté de Madrid ont été rapportées avec les ordonnances sur les polluants du sol et les teneurs extrêmes en métaux traces des boues de stations d'épuration des eaux. L'altitude du terrain en Madrid et la latitude en l'Europe ont une similaire influence sur le climat et l'évolution pédologique du sol. Le facteur eau exerce ses fonctions de façon prépondérante et similaire sur la migration des bases solubles et l'acidification du sol en la chaîne de montagnes de Guadarrama et dans l'Europe Central.

MOTS CLÉS: Ordonnances sur les métaux traces dans les sols. Environnement géographique. Pedoclimat.