

MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO: PAPEL DE LAS ENMIENDAS ORGÁNICAS

*Por el Dr. Francisco Cabrera Capitán,
Profesor de Investigación del CSIC, Instituto de
Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS).
Conferencia correspondiente al Ciclo sobre
"Componentes del suelo: estructuras y funciones
en la agricultura y medio ambiente",
pronunciada el 14 de mayo de 2007*

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es una mezcla de sólidos orgánicos e inorgánicos, de aire, de agua y de microorganismos. Estas cuatro fases están interrelacionadas entre sí, de forma que: 1) las reacciones entre los componentes de la fase sólida afectan a la composición del agua y del aire del suelo; 2) el aire y el agua del suelo meteorizan los componentes de la fase sólida; 3) los microorganismos del suelo catalizan muchas de las reacciones que tienen lugar en el suelo (Bohn et al. 1979).

La composición volumétrica de un suelo mineral de textura franca es: 50% de materiales sólidos y 50% de espacios libres (poros). Estos últimos están ocupados por aire y agua, en una proporción dependiente del grado de humedad. En condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas, los poros están ocupados a partes iguales por aire y agua. La materia orgánica (MO) constituye el 5% del volumen de la fase sólida y está constituida por organismos (10%), raíces (10%) y humus (80%). A pesar de que la materia orgánica constituye sólo el 2-6% del peso de la fase sólida, tiene gran influencia en las propiedades del suelo: 1) propiedades físicas (formación de estructuras, retención de agua, etc.); 2) propiedades químicas (es la única fuente de N y la principal fuente de S y P); 3) propiedades biológicas (es la principal fuente de energía para los organismos del suelo responsables de la actividad bioquímica) (Brady y Weil, 2002).

La fase sólida orgánica está formada por: 1) tejidos animales y vegetales parcialmente descompuestos, que están sujetos a una continua descomposición, y 2) el humus, que es el producto más resistente de la descomposición de los tejidos o de los compuestos orgánicos sintetizados por los microorganismos. El humus tiene generalmente color negro o marrón oscuro, naturaleza coloidal y una capacidad de retención de agua y de nutrientes mucho mayor que los componentes sólidos inorgánicos del suelo. Su

presencia en el suelo aumenta, por tanto, la actividad química, bioquímica y biológica de los mismos (Brady y Weil 2002; Wild 1988).

La gran variedad de organismos vivos que existen en el suelo tiene una importancia singular. En el suelo conviven organismos de muchos tamaños; desde grandes roedores, lombrices, insectos, hasta bacterias, que determinan la actividad del mismo. Muchos de ellos se incluyen en la denominada materia orgánica del suelo, ya que cuando se lleva a cabo la determinación química o física de este parámetro, no pueden separarse de los restantes componentes sólidos inorgánicos.

El número y el peso de organismos existentes en el suelo es muy variable. Por ejemplo, en 1 g de suelo, hay entre 10^8 y 10^9 bacterias. En la capa arable (15 cm) de una ha de suelo pueden encontrarse: 400-5000 kg de bacterias, 400-5000 kg de actinomicetos, 1000-15000 kg de hongos, 10-500 kg de algas, 20-200 kg de protozoos, 10-150 kg de nematodos, 5-150 kg de ácaros, 5-150 kg de colémbolos, 100-1500 kg de lombrices y 10-100 kg de otros tipos de fauna (Brady y Weil 2002).

La cantidad de materia orgánica viva existente en los suelos (incluidas las raíces de las plantas) es suficiente para ejercer una profunda influencia en los cambios físicos y químicos que tienen lugar en el suelo. Virtualmente, todas las reacciones naturales que ocurren en el suelo tienen una naturaleza directa o indirectamente bioquímica.

La actividad de los organismos del suelo comprende, desde la desintegración de los residuos de plantas por los insectos y lombrices, hasta la completa descomposición de estos residuos por bacterias, hongos y actinomicetos. En estos procesos se libera CO_2 y nutrientes para las plantas (N, P, S) en forma mineral y se sintetiza humus. Los nutrientes son necesarios para el crecimiento de los propios organismos, por lo que son tomados y convertidos por ellos en formas orgánicas no-disponibles para las plantas. El proceso global que tiene lugar es un ciclo biológico, por el cual los residuos se incorporan al suelo, se desintegran y se descomponen, produciendo compuestos que pueden ser asimilados por las plantas, estimulando así la producción de biomasa y de humus en el suelo (Figura 1). El balance global anual del proceso se resume en un 70% pérdidas en forma de CO_2 , permaneciendo en el suelo un 5% en forma de biomasa microbiana y un 25% en forma de humus (5% en forma de compuestos no-húmicos y 25% en forma de compuestos húmicos complejos).

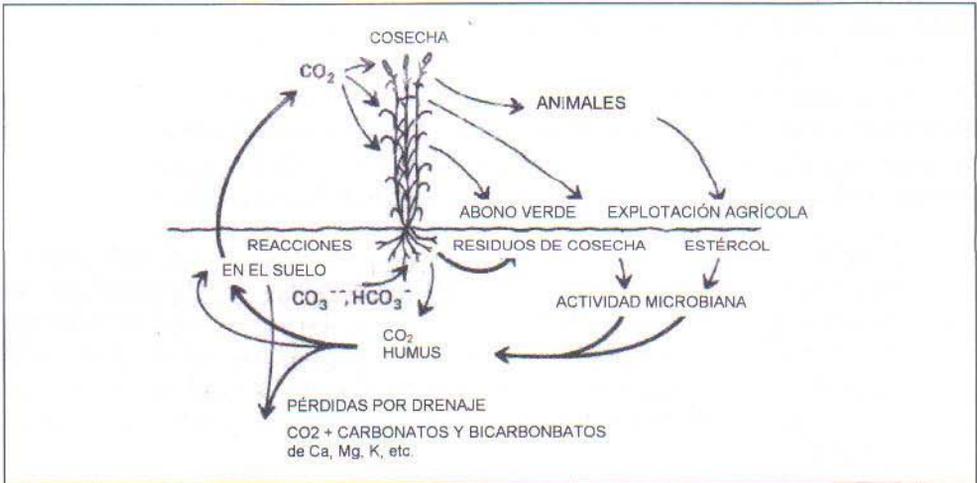
La síntesis de humus, es un proceso exclusivamente bioquímico que resulta de la actividad de los organismos del suelo (Brady y Weil 2002; Wild 1988).

2. DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

La materia orgánica del suelo es un componente dinámico que en parte se pierde por descomposición, pero puede ser repuesta mediante la aplicación de restos de plantas o de otros residuos orgánicos.

Generalmente, la concentración de MO de los suelos depende de las condiciones edafoclimáticas de los mismos. Cada suelo tiene un valor de equilibrio que es controlado principalmente por la textura, la temperatura y la posición geográfica

FIGURA 1
CICLO DEL C EN EL SUELO. ADAPTADA EN BRADY (1974)



(altitud y latitud). El contenido en arcilla es un factor del que depende la concentración de MO en los suelos: 1) al aumentar el contenido en arcilla disminuye la aireación; 2) proporciona innumerables puntos químicamente activos en los que la MO se protege del ataque microbiano; 3) proporciona electrolitos (Ca^{2+}) que precipitan las moléculas de MO, protegiéndola del ataque microbiano y de las pérdidas por lixiviación. En zonas templadas, disminuciones de 10°C en la temperatura anual, duplica o triplica el contenido medio de MO de los suelos con igual precipitación y evaporación. En zonas frías la MO aumenta al hacerlo la temperatura hasta los 25°C .

En condiciones naturales, la parte aérea y las raíces de las plantas constituyen una fuente anual de materia orgánica para los suelos, reponiéndose así la que se descompone a lo largo del año. En los suelos cultivados la MO disminuye, ya que una gran proporción de las plantas se retiran anualmente del suelo (cosechas), y parte de la que es repuesta se pierde por mineralización, que se acelera por el laboreo (Wallace 1994a). Las prácticas agrícolas tales como la aplicación intensiva de fertilizantes minerales y pesticidas, el laboreo frecuente e inapropiado y la reducción de la rotación de cultivos con tendencia al monocultivo, pretenden conseguir mayores cosechas sin tener en cuenta la conservación del suelo. La especialización de las explotaciones agrícolas ha conducido a la separación de la ganadería y la agricultura, por lo que la reposición de la MO del suelo mediante el estiércol, se ha visto muy mermada (European Commission 2001).

La disminución de la materia orgánica de los suelos es especialmente preocupante en el área mediterránea. Según el European Soil Bureau, el 75% de los suelos del sur de Europa tienen contenidos bajos (3,4%) o muy bajos (1,7%) de materia orgánica (suelos con menos de un 1,7% de materia orgánica se consideran en estado predesértico). Desgraciadamente, el problema no se restringe al área mediterránea. Según la European

Comission (2001), durante el período 1980-1995, el porcentaje de suelos de Inglaterra y Gales con menos del 3,6% aumentó del 35 al 42%. Asimismo, según ese Organismo, en los suelos de la región de Beauce, al sur de Paris, la materia orgánica se redujo a la mitad en 16 años.

La velocidad a la que se descompone la MO de los suelos depende de la composición de la misma. En la MO, pueden diferenciarse cinco fracciones distintas; dos de ellas formadas por materiales poco descompuestos (detritus) y las tres restantes formadas por materiales realmente incorporados al suelo (humus) (Wallace 1994a):

- a) *Residuos sin metabolizar*. Están formados por paja, madera, tallos de plantas, así como por trozos de papel, carbón etc. Su tiempo medio de mineralización es de tres años y su razón C/N 150. La razón de esta lentitud en la mineralización reside en su naturaleza lignínica y su elevada relación C/N. En su descomposición se produce CO_2 y N, que es inmovilizado por los microorganismos, además de otros productos orgánicos que pasan a formar parte de la siguiente fracción con menor C/N.
- b) *Residuos parcialmente metabolizados*. Están constituidos por hojas, corcho, flores, frutos, estiércol. Tiene una C/N 10-25 y se descomponen en $\frac{1}{2}$ año con producción de CO_2 , N mineral y otros productos con menor C/N.
- c) *Fracción activa*. La constituyen cuerpos de microorganismos vivos o muertos y sus metabolitos. Es muy estable (tiempo medio de mineralización 1,5 años) y tiene una C/N 15-20. Produce o inmoviliza N en su mineralización.
- d) *Fracción descomponible*. Es similar al compost, tiene una C/N 10-20 y se transforma en 2,5 años. Se descompone con el cultivo del suelo y su N es utilizado por la plantas. Actúa como cementante de las partículas de suelo.
- e) *Fracción pasiva*. Es la fracción orgánica recalcitrante. Su tiempo de transformación es 1000 años y su C/N 7-9. Es la fracción que más contribuye a la cementación entre las partículas del suelo, mediante formación de puentes en los que interviene el Ca.

En condiciones naturales, los microorganismos del suelo mineralizan anualmente el 2% de la MO del mismo. Una ha de suelo (30 cm de espesor) pesa $4,5 \times 10^6$ kg. Si el suelo contiene un 3% de MO y un 0,17% de N, contendrá 135.000 kg de MO y 7.800 kg de N. Si en un año se mineraliza el 2% de la MO, se producirán 156 kg ha^{-1} de N mineral (NH_4^+ , NO_3^-) que estarían disponibles para las plantas o podrían perderse por lixiviado. Este N se produce a expensas de 2.700 kg ha^{-1} de MO. En 50 años se perdería completamente la MO del suelo si no se repusiera de alguna forma (Wallace 1994a).

3. REPOSICIÓN DE LOS NIVELES DE MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Los niveles de MO de los suelos pueden restablecerse de distintas formas: 1) dejando en el suelo la mayor cantidad posible de los residuos de las cosechas y

reduciendo el laboreo (laboreo de conservación); 2) devolviendo el estiércol animal al suelo; 3) compensando el material removido por las cosechas mediante la aplicación de materiales orgánicos exógenos (lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos, residuos de plantas, etc.) o practicando el abonado verde.

La aplicación a los suelos de materia orgánica exógena es una práctica tan antigua como la propia agricultura. En las antiguas civilizaciones de Grecia y Roma, la fertilidad de los suelos se consideraba más ligada a las propiedades físicas que a las químicas. Se creía que las plantas se nutrían preferentemente con materiales orgánicos derivados de la misma especie; por ejemplo, se añadían huesos de aceituna y alpechín a los olivos, o sarmientos a las vides. Estas creencias se mantuvieron hasta la Edad Media (Manlay et al. 2007). Desde muy antiguo se sabía que el estiércol, el compost, los animales muertos o parte de ellos, como la sangre, aumentaban la fertilidad de los suelos. Esta fue la base del antiguo dicho “*corruption is the mother of vegetation*” (la pudrición es la madre de la vegetación). De hecho, hasta finales del siglo XIX el estiércol era prácticamente el único abono que se aplicaba a los suelos. En los países asiáticos (China, Corea, Japón, etc.) la aplicación de abonos organógenos (aguas residuales y excreta) es tradición milenaria. En estos países, los excrementos humanos (*night soil*, eufemismo inglés para heces) son considerados un recurso natural en lugar de un residuo. Según se recoge en Jenkins (2005), a principios del siglo XX se podía observar que después de 4.000 años cultivando el suelo casi sin la aplicación de fertilizantes químicos, los agricultores asiáticos producían cosechas mayores que los occidentales, con la ventaja de que sus suelos no acusaban problemas de agotamiento ni erosión, en contraste con los de sus colegas occidentales.

Hasta finales del siglo XIX se creía que las plantas tomaban directamente el C del humus del suelo. Sin embargo, a medida que se fueron conociendo los principios de la nutrición de las plantas, para algunos científicos la materia orgánica del suelo fue perdiendo relevancia. Los entusiastas de la fertilización inorgánica pensaban que el estiércol era inútil para la producción de cosechas. Otros coetáneos, en cambio, consideraban que la materia orgánica del suelo era vital para el crecimiento de las plantas porque aumentaba la solubilización de los nutrientes minerales y por tanto su biodisponibilidad (Wild 1988; Manlay et al. 2007).

Hasta casi treinta años después de la segunda guerra mundial, siguió predominando la teoría mineralista del manejo del suelo para conseguir las máximas cosechas. Sin embargo, al mismo tiempo comienza la preocupación por la conservación del suelo. El suelo es un recurso no-renovable y la materia orgánica del mismo, es el componente vital en el equilibrio entre los procesos de degradación y las prácticas de conservación. La materia orgánica del suelo es un almacén de energía, carbono y nutrientes. Las cantidades almacenadas de energía, carbono y nutrientes son el resultado del equilibrio entre la descomposición y la síntesis bioquímica de la materia orgánica. Todos estos conceptos enlazan con el de sostenibilidad. Desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades de la presente generación, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Manlay et al. 2007). Para que un sistema agrícola sea sostenible debe evitarse la erosión, las pérdidas de nutrientes

y el agotamiento de la materia orgánica del suelo. La aplicación de materia orgánica exógena ofrece la mejor posibilidad para restaurar los suelos agrícolas erosionados y para recuperar los suelos marginales.

Según Wallace (1994b), existen dos razones para que la materia orgánica de los suelos deba restaurarse hasta sus valores originales. La primera es la mejora del suelo. No se conseguirá una agricultura sostenible hasta que se alcancen y mantengan los niveles más altos posibles de materia orgánica en el suelo. La segunda razón se funda, en que la restauración de los niveles de MO de los suelos podría ayudar a aliviar el problema del calentamiento global: cuando se pierde MO, el C pasa a la atmósfera en forma de CO₂; cuando se acumula MO en el suelo, el C queda fijado en forma de compuestos orgánicos más o menos estables (humus).

Habría también que añadir que cuando se restaura la MO del suelo mediante la aplicación de enmiendas, se contribuye a solucionar otro problema ambiental, no menos importante a corto plazo, como es la eliminación de residuos con alta carga orgánica que son muy contaminantes.

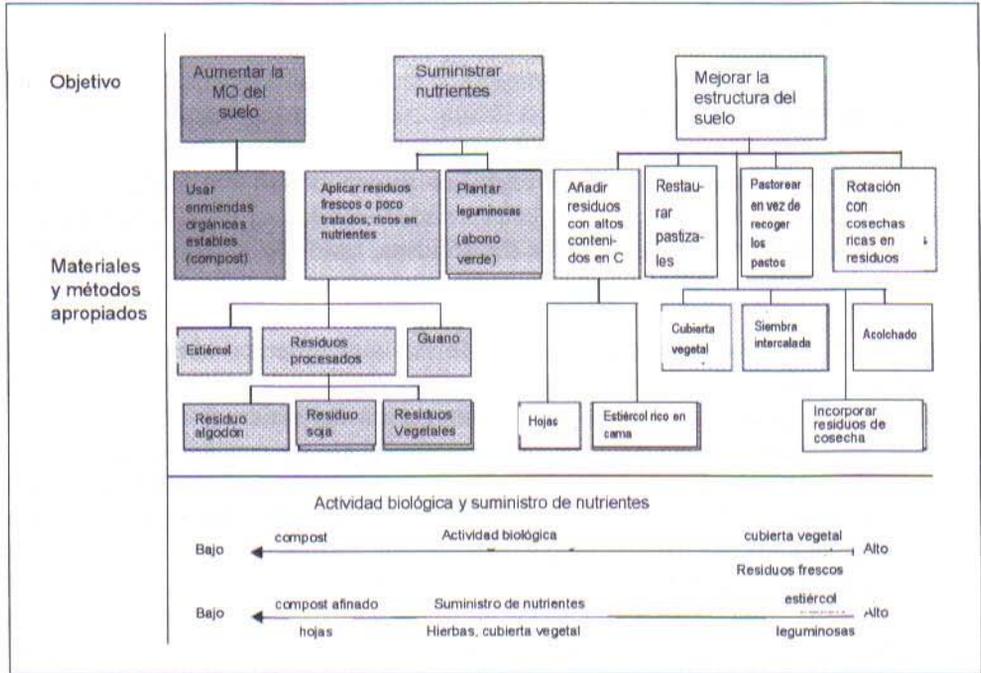
4. ENMIENDAS ORGÁNICAS

Cuando se trata de la aplicación de sustancias orgánicas a los suelos, hay que tener en cuenta tres términos distintos según el objetivo que se persiga: Fertilizantes orgánicos, enmiendas orgánicas y acondicionadores orgánicos. *Fertilizantes orgánicos* son productos derivados de sustancias orgánicas vegetales o animales que contienen materia orgánica y nutrientes. *Enmiendas orgánicas* son sustancias orgánicas que se aplican a los suelos con el principal objetivo de mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas. *Acondicionadores orgánicos* son sustancias orgánicas que mejoran las propiedades físicas de los suelos. Los objetivos de estos tres productos solapan en muchos casos (Wallace y Terry 1998). Dependiendo del objetivo que se persiga, se puede elegir el tipo de producto orgánico a añadir, así como su manejo en el suelo (Figura 2) (Cooperband (2002).

La aplicación directa de sustancias orgánicas frescas al suelo puede causar problemas. Su fermentación, puede producir metabolitos fitotóxicos, aumentar la temperatura del suelo, disminuir la concentración de N mineral disponible y producir malos olores. Por estas razones, es aconsejable tratar los residuos orgánicos antes de añadirlos al suelo, mediante algún proceso de estabilización; el compostaje es uno de los más eficaces y utilizados. El compostaje es un proceso bio-oxidativo controlado por microorganismos, en el que se estabiliza la materia orgánica transformándose en una sustancia similar al humus del suelo, libre de compuestos fitotóxicos, así como de organismos fitopatógenos (Cooperband 2002; Zucconi y de Bertoldi 1987).

Por otra parte, la aplicación de residuos orgánicos (tratados o no) puede producir cambios indeseables en el pH del suelo, aumentar su salinidad e introducir elementos y compuestos orgánicos tóxicos en el suelo. Cuando la concentración de estas sustancias (contaminantes) excede la capacidad de detoxificación del suelo, aparece el fenómeno de contaminación (Tan 1994).

FIGURA 2
UTILIZACIÓN Y MANEJO DE DISTINTOS PRODUCTOS ORGÁNICOS SEGÚN EL OBJETIVO QUE SE PERSIGA: AUMENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO, SUMINISTRO DE NUTRIENTES O MEJORA DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO. ADAPTADA DE COOPERBAND (2002)



4.1. Recuperación natural asistida

Otro uso de las enmiendas orgánicas es la recuperación y rehabilitación de suelos degradados y contaminados.

En el suelo tienen lugar una serie de procesos físicos, químicos y biológicos (biodegradación, transformación química, estabilización, volatilización), que tienden a descomponer, inmovilizar o/y disminuir la toxicidad de los contaminantes. El resultado es lo que se denomina Recuperación Natural o Atenuación Natural. Cuando dichos procesos pueden acelerarse mediante la aplicación a los suelos de enmiendas, establecimiento de plantas, etc., aparece el concepto de Recuperación Natural Asistida (Adriano et al. 2004), cuyo objetivo final es la disminución de la concentración, de la movilidad o/y de la biodisponibilidad de los contaminantes.

Las enmiendas orgánicas y en especial los composts de RSU y de biosólidos están siendo muy utilizados en la Recuperación Natural Asistida (USEPA 1997; Scopper 1993; Compton et al. 2001). Esta técnica de rehabilitación, se considera blanda o de bajo impacto, ya que la incorporación de enmiendas y el establecimiento de plantas,

constituyen un enfoque más natural y respetuoso con el medio natural que otros métodos clásicos de recuperación basados en tratamientos físico-químicos (Vangronsveld y Cunningham 1998). A su vez, tienen la ventaja de ser menos costosas y mucho más apropiadas para aplicarlas a grandes extensiones de suelos contaminados (Schnoor 1997; USEPA 2000).

4.2. Tipo de enmiendas. Ejemplos

Existe un gran número de residuos orgánicos susceptibles de ser empleados como enmiendas: Residuos de cosecha, estiércoles, residuos sólidos urbanos (RSU; basuras), residuos de depuradora: aguas y lodos (biosólidos), residuos orgánicos industriales (mataderos, lácteas, almazaras, bodegas, azucareras, etc.), etc.

Estiércol: El estiércol es una mezcla de las camas de los animales con sus deyecciones, que ha sufrido fermentaciones más o menos avanzadas, primero en el establo y luego en el estercolero. La composición del estiércol es muy variable dependiendo del tipo de animal y de su alimentación, de las condiciones de manejo y almacenamiento. Se caracteriza por un alto contenido en humedad 60-85% y bajos contenidos en nutrientes (2-5% N, 0,5-2% P y 1-3% K, referidos a peso seco) en comparación con los fertilizantes inorgánicos.

Dos toneladas de un estiércol con un contenido medio de 0,5% N; 0,25% P_2O_5 y 0,5% K_2O , sería equivalente a 100 Kg de un fertilizante mineral 10-5-10 N-P-K, por lo que 25-30 Tm ha^{-1} serían más que suficientes para muchos cultivos. Sin embargo, hay que tener en cuenta la disponibilidad de los nutrientes: en general, se sabe que durante la primera cosecha puede aprovecharse el 50% del N y del K, y el 20% del P. Un problema que plantea la aplicación de estiércol es el desequilibrio del contenido en P respecto al de N, que puede resolverse aportando P en la dosis necesaria, bien al propio estiércol o directamente en el campo.

La aplicación de los estiércoles se puede hacer en fresco o después de dejarlos fermentar, lo que da lugar a un producto más fácilmente aplicable. También pueden someterse a tratamiento aeróbico o anaeróbico, o a co-compostaje mezclados con otros subproductos agrícolas.

Los beneficios totales de la aplicación de estiércol no suelen manifestarse sobre las cosechas durante el primer, segundo, o incluso tercer año después de la aplicación, ya que la MO del estiércol se descompone paulatinamente: el primer año puede mineralizarse el 60-90% del N, el segundo el 7-10%, el tercero 5-7%, etc. Con cada aplicación va quedando una fracción que se descompone muy lentamente en el suelo, y éste se va enriqueciendo en compuestos similares al humus, que terminan formando parte del humus.

Compost de residuos sólidos urbanos (RSU): Según la Ley 42/1975 de 19 de noviembre (BOE núm. 280, 1975) y su modificación en el Real Decreto Legislativo

1163/86 de 13 de junio (BOE núm. 149, 1986) “un residuo es todo material resultante de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza, cuando su poseedor o productor lo destina al abandono”. Estos textos legales, no hacen una definición específica de residuo sólido urbano, pero establecen siete categorías de residuos que podrían considerarse dentro de este concepto. Estos son los generados por las actividades: a) domiciliarias; b) comerciales y de servicios; c) sanitarias en hospitales, clínicas y ambulatorios; d) limpieza viaria, zonas verdes y recreativas; e) abandono de animales muertos, muebles, enseres y vehículos; f) industriales, agrícolas, de construcción y obras menores de reparación domiciliaria; g) en general, todos aquellos residuos cuya recogida, transporte y almacenamiento o eliminación corresponda a los ayuntamientos (Madrid 1999).

La producción de RSU en España es del orden de $1 \text{ kg hab}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ($15 \times 10^6 \text{ Tm año}^{-1}$): En Andalucía la cifra por habitante es inferior ($0,86 \text{ kg hab}^{-1} \text{ día}^{-1}$) y el total anual es de $2,2 \times 10^6 \text{ Tm año}^{-1}$ (Madrid 1999).

Los RSU están constituidos por una fracción fermentable (45%), una combustible (37%) constituida por restos de papel, cartón, plásticos, gomas, cuero, madera, etc., y otra inerte (18%) constituida por metales, vidrio, escorias, cenizas, etc. La única que tiene valor agronómico es la primera, por lo que para su aprovechamiento como enmienda debe separarse de las otras. La separación se puede hacer durante la recogida de la basura (recogida selectiva) o en la propia planta de compostaje, ya que los RSU suelen compostarse para mejorar su calidad. El compost resultante tiene una composición muy variable: MO (20-60%); N (0,4-1,8%); P (0,15-0,50%); K (0,25-1%); además de concentraciones variables de metales pesados y de otros elementos traza. Entre los problemas que puede presentar este tipo de residuos está la alta salinidad, así como la presencia de materiales inertes indeseables, semillas y patógenos, estos últimos fruto de la falta de madurez. La inmadurez provoca además malos olores, elevación de la temperatura del suelo, disminución del oxígeno en el suelo, bloqueo del N, etc. Muchos de estos problemas son fruto de una mala gestión en las plantas de compostaje: períodos de compostaje cortos, falta de afino, etc., como se ha podido comprobar durante los estudios llevados a cabo en la planta de Villarrasa en Huelva (Madrid 1999; Madrid et al. 2001).

Lodos de depuradoras (biosólidos): Como se ha comentado anteriormente, en los países asiáticos (China, India; Japón) durante siglos, se han estado vertiendo al suelo las heces. Esta práctica ayudó a mantener la fertilidad del suelo cerrando el ciclo de los nutrientes. En las casas de familias españolas (lo mismo que en las francesas, inglesas, etc.), el problema se resolvía arrojando desde las ventanas el contenido de las bacinillas (comúnmente llamadas hoy “escupideras”), aunque teniendo la precaución de advertir a los posibles transeúntes del peligro inminente, para lo cual exclamaban a viva voz: “¡Agua va...!”.

Con el progreso se introduce el inodoro con cisterna en los cuartos de baño. Antes de existir el alcantarillado, en China y en muchos países occidentales, los residuos se recogían en fosas sépticas que periódicamente se vaciaban por las noches, de

lo que se encargaban los *night soil men*. Los “nutrientes” eran exportados de las explotaciones agrícolas a las ciudades y devueltos a las explotaciones agrícolas en los residuos municipales. El sistema era ideal porque resolvía dos problemas al mismo tiempo: el mantenimiento de la fertilidad del suelo y el tratamiento de una fuente de contaminación. En las grandes ciudades la recogida era un gran negocio; en 1908 en Shanghai el concesionario pagaba 31.000 \$ oro por 78.000 Tm (Jenkins 2005).

Teniendo en cuenta que la excreta humana diaria es de unos 1100 g, en una ciudad media como Sevilla (800.000 habitantes) se podrían producir $2,1 \times 10^6$ kg de N, $0,66 \times 10^6$ kg de K y $0,26 \times 10^6$ kg de P. Con esa cantidad de N se podrían fertilizar 10.000 ha, a razón de unos 200 kg ha⁻¹.

En EE.UU. hay una corriente que promueve la utilización de los excretas humanos compostados o “humanure” (Jenkins 2005).

El siguiente paso, fue la conexión de los efluentes a las redes de alcantarillado y su vertido sin tratamiento al mar o a los ríos, lo que originó graves problemas de contaminación en éstos. Quizás el ejemplo paradigmático es el del río Támesis. En 1805 había en Londres sólo 150.000 fosas sépticas para una población un millón de habitantes, por lo que se hicieron multitud de conexiones ilegales a la red de alcantarillado. El Támesis, que hasta ese momento había estado relativamente limpio, permitiendo la pesca incluso de langostas y salmones, y era la principal fuente de agua para la población, comenzó a tener altos niveles de contaminación, causando malos olores y varios brotes de cólera. En 1858, el hedor era tal que era imposible abrir las ventanas del Parlamento y desarrollar las tareas propias de la institución, por lo que se tomaron medidas para recolectar las aguas residuales y verterlas aguas abajo de la ciudad, donde la contaminación se diluiría con la subida de la marea. Años más tarde se empezó a tratar químicamente el agua residual mediante precipitación, lo que dio lugar a una cantidad de lodos, que superaba incluso lo que las explotaciones agrícolas eran capaces de usar como fertilizante (Cooper 2001). Este problema fue común a otras muchas ciudades de Europa. Hasta 1998 la solución fue verter los lodos en alta mar; el nombre del barco británico en el que se transportaban era Gardylo, un anglicismo del francés “gardez l’eau”, nuestro “¡Agua va...!” (Bouer 1993).

En la actualidad, en las plantas de depuración de aguas residuales, las aguas reciben tratamiento físico, químico y biológico. En la mayoría de los casos se tratan mediante digestión aerobia o anaerobia, produciéndose agua regenerada y lodo. Este lodo contiene 70-95% de agua y es difícil de deshidratar. Deshidratado contiene 50-60% de MO, 3-6% N, 1-4% P, 0,2-1% K, además de Ca, Mg, Na; K, elementos traza y patógenos. La concentración de elementos traza depende de los tipos de vertido que llegan a las alcantarillas; en ciudades muy industriales en las que no hay separación de vertidos, el contenido en elementos traza, algunos de ellos tóxicos, es un factor limitante del uso de este producto como enmienda. Existe una legislación europea y nacional a este respecto, que considera el pH del suelo y limita las dosis máximas de lodo aplicable al suelo a las concentraciones de dichos elementos en el lodo y en el suelo. Otro problema hasta ahora poco estudiado, es el de la presencia de productos orgánicos potencialmente tóxicos. Se está trabajando para identificarlos tanto en los propios lodos como en los

suelos a los que fueron aplicados. El autor y los miembros del grupo de investigación AGR108, al que pertenece, han participado en el proyecto "Horizontal Standards on Organic Micro-pollutants for Implementation of EU Directives on Sludge, Soil and Treated Bio-waste" (SSP1-CT-2003-502411; octubre 2003 - marzo 2007) cuyo objetivo era la puesta a punto de métodos de muestreo de residuos (lodos de depuradora de aguas residuales, bioresiduos tratados, etc.) y suelos, de métodos de manejo de dichas muestras y de métodos de análisis de distintos compuestos orgánicos, para facilitar la regulación de las diversas aplicaciones y opciones de eliminación de dichos residuos contempladas en las directivas de la EU.

Una solución a los problemas de los lodos de depuradora es su co-compostaje con otros residuos como los restos de poda, lo que da lugar a un biosólido de calidad. El grupo de investigación AGR108 participó (2001-2003) en el proyecto LIFE demostrativo (LIFE00 ENV/E/000543) "Procesos de co-compostaje y aplicación de sus productos en paisajismo, reforestación, cultivos forestales y agrícolas en Andalucía", cuyo objetivo era el empleo de composts de calidad de biosólidos y de RSU, como enmienda orgánica en horticultura, paisajismo y reforestación, como abono orgánico en cultivos agrícolas y forestales, y como sustrato en viveros forestales, ornamentales y agrícolas.

Los biosólidos se están empleando en la actualidad en programas de recuperación de suelos contaminados mediante la técnica de recuperación natural asistida (USEPA 1997; Scopper 1993; Compton et al. 2001; Pérez de Mora et al. 2006abc; Madejón & al. 2006).

Alpechín y alperujos: El alpechín es el efluente líquido que se produce en la obtención del aceite de oliva mediante el sistema de extracción en tres fases. Se caracteriza por su alta carga contaminante (DBO 53-100 g l⁻¹) lo que ha constituido hasta hace poco un grave problema medioambiental (Cabrera 1994, 1995). Su utilización directa como fertilizante, enmienda o acondicionador del suelo ha sido una alternativa muy estudiada, por su alto contenido en MO y K (1,2-3,6 mg l⁻¹) a pesar de su bajo contenido en N (0,5-2 mg l⁻¹) y P (0,1-0,5 mg l⁻¹) (Cabrera et al, 1996; García Ortiz et al 1994). En la actualidad, en España, con la implantación del sistema de extracción de dos fases, se ha conseguido casi la total desaparición de los alpechines. Sin embargo, los problemas de los residuos de la industria del aceite de oliva no han desaparecido, sino que se han transferido al orujo, ahora denominado alperujo (Cabrera et al. 1997).

Mediante el compostaje de los residuos generados en la industria oleícola (alpechín, lodo de alpechín, orujillo, alperujo, etc) con otros residuos, generalmente de origen vegetal (paja de cereales y leguminosas, restos de poda, orujo de uva, etc.), se obtienen abonos orgánicos (composts), cuyas características dependen de las de los propios componentes y de las proporciones en que éstos entren a formar parte en las mezclas iniciales. Los composts resultantes tienen alta calidad, carecen de fitotoxicidad y están compuestos por materia orgánica bien humificada y nutrientes, principalmente nitrógeno orgánico y potasio, y cantidades insignificantes de elementos traza. Su mineralización en el suelo es lenta, dando lugar a un importante efecto residual. Aplicados como abono de fondo producen resultados agronómicos algo inferiores a los obtenidos con una

fertilización mineral equivalente, pero no alteran la composición mineral de las plantas. La aplicación de estos composts produce efectos positivos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, entre los que cabe destacar el aumento del N fijado no-simbióticamente (Albuquerque et al. 2007; Cabrera et al. 1997; 2005; Cegarra et al. 1996; Tomati et al. 1995, 1996).

Vinaza de remolacha: Es el effluente resultante en la destilación de la melaza de remolacha para la obtención de alcohol. Se caracteriza por su alta carga orgánica (DBO 61-70 g l⁻¹). Su composición es muy variable y se caracteriza por su contenido en N y K, que en el caso de la vinazas concentradas es 2-3,5% N y 2-5% K. Su valor agronómico radica en su contenido en MO, N y K, por lo que se ha utilizado aplicándola directamente al suelo (López et al. 1993; Murillo et al., 1993, 1998). Su elevada salinidad (CE 1,4-3 g l⁻¹) y la dificultad que plantea a la hora de ser aplicada a los suelos, al tratarse de un líquido denso (1,3 g ml⁻¹), obligó a buscar otras alternativas al uso directo como fue el co-compostaje con otros subproductos agrícolas (Díaz et al. 2002ab, 2003; Madejón et al. 1995, 1996, 2001; Tejada et al. 2007).

5. SECUESTRO DE CARBONO EN EL SUELO

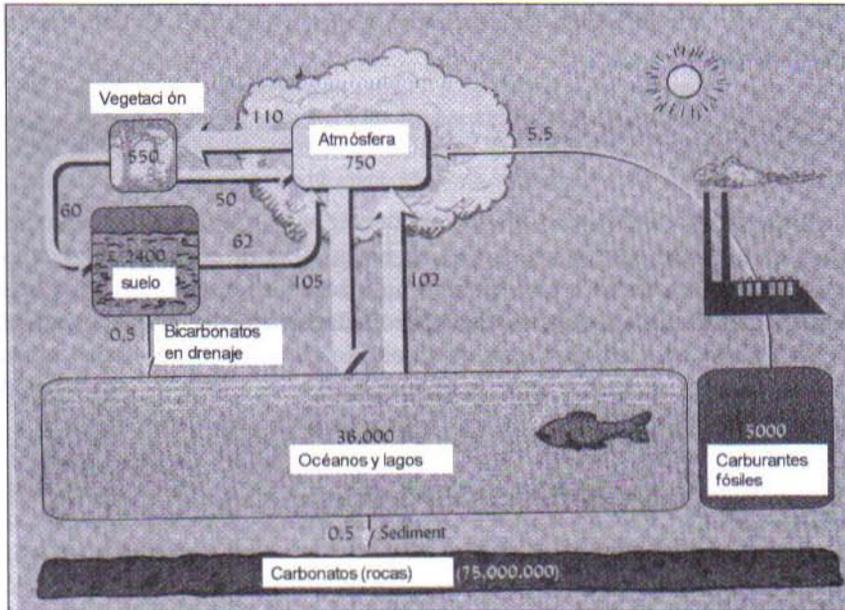
La segunda razón para restaurar la MO del suelo es su contribución a la disminución de los niveles de CO₂ en la atmósfera (Wallace 1994b). Como es sabido, en los últimos años la concentración de gases con efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O) ha aumentado espectacularmente. En concreto, la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado desde 280 ppmv (partes por millón en volumen) en la época de la revolución industrial, a 370 ppmv en el año 2000. Como consecuencia de esto, la temperatura media global aumentó 0,6 °C en el siglo XX y si la situación no cambia, se espera que la subida, tomando como referencia 1990, será de 1,4-5,8 °C en 2010 (Janzen 2004).

Los suelos del mundo contienen aproximadamente 2400 Pg (2400 × 10¹² kg) de C, de los que 1500-1600 Pg forman parte de la MO y el resto son carbonatos. La cantidad de C acumulada en el suelo, es 4 veces mayor que la contenida en la vegetación (540-610 Pg) y 2 veces mayor que la suma del C de la vegetación y la atmósfera (1200 Pg) (Brady y Weil 2002).

La actividad humana provoca un desequilibrio en el ciclo del C, debido a que la combustión de carburantes fósiles suministra 5,5 Pg anuales a la atmósfera y que del sistema suelo-planta, salen 62,5 Pg/año y entran 60 Pg/año. Como resultado, en la atmósfera se produce un aumento de 7,5 Pg/año. Parte de este CO₂ extra (3 Pg/año) es absorbido por los océanos, por lo que el total que entra en la atmósfera es 219, 5 Pg/año y el que sale es 215 Pg/año. El resultado es un aumento anual de 4,5 Pg/año de C en la atmósfera, de los que parte se deben a pérdidas de MO de los suelos (Figura 3).

La aplicación de MO, así como todas las medidas que contribuyan a aumentar la ya existente en los suelos, podrían mitigar estas pérdidas (Lal 2004). Sin embargo, si se tiene en cuenta que la MO del suelo es un sistema dinámico, que está en continuo

FIGURA 3
CICLO GLOBAL DEL C. LAS CANTIDADES ESTÁN EXPRESADAS EN PETAGRAMOS
 (Pg = 10^{12} kg). ADPATADA DE BRADY Y WEIL (2002)



proceso de descomposición y mineralización (ya que sirve de “combustible” para los microorganismos del suelo y como fuente de nutrientes), y que sólo el 15-35% de la MO aplicada se convierte en MO estable, no parece tan claro el papel del suelo para mitigar eficazmente el problema del aumento del CO_2 en la atmósfera.

Según Janzen (2006), la MO del suelo puede compararse a un pantano que puede utilizarse para acumular agua (secuestro de C) y para producir energía (mineralización de la MO); la cantidad de agua en el pantano se controla por las cantidades de agua que entran y salen. El dilema entre el secuestro de C y su descomposición, se puede resolver: 1) aumentando los aportes de C; 2) optimizando la descomposición; 3) regulando los flujos de C.

Los suelos no tienen una capacidad ilimitada de acumular MO, y dado que el nivel natural de ésta depende de las condiciones edafoclimáticas, la posibilidad de secuestro de C es más alta en los suelos degradados, que contienen sólo una pequeña proporción de la MO que contenían originalmente en condiciones naturales. El potencial de secuestro de C en los suelos sigue este orden: suelos degradados > suelos cultivados > suelos de pastos > suelos de bosques y cultivos permanentes (Brady y Weill 2002; Lal 2004).

Según Brady y Weil (2002) y Lal (2004) el potencial global de secuestro de C en forma de materia orgánica del suelo es solamente de $0,9 \pm 0,3$ Pg C/año, por lo que en los próximos 50 años se secuestrarían 30 – 60 Pg C, lo que supone una reducción

del 15% de las emisiones de CO₂. El secuestro del C en el suelo, permite sólo ganar tiempo hasta que se implementen otras soluciones al problema de la energía (cambio de los carburantes fósiles por energías renovables, aumento de la eficiencia de los carburantes, etc.) que reduzcan las emisiones hasta niveles que no comprometan la estabilidad del clima.

6. CONCLUSIONES

La materia orgánica del suelo es un componente vital y dinámico, cuyo contenido puede disminuir, pero que puede reponerse hasta el valor característico del suelo, mediante distintas medidas, entre ellas la aplicación de enmiendas orgánicas. La aplicación de enmiendas a los suelos, que debe realizarse con las debidas precauciones, contribuye a solucionar el problema de la eliminación de residuos con alta carga orgánica, así como al secuestro de C, coadyuvando de esta forma a la disminución del CO₂ atmosférico.

Agradecimientos

El autor agradece a los miembros del grupo AGR108 su colaboración a través de las tesis y publicaciones que han servido para la redacción de este manuscrito y en especial a la Dra. Dña. Engracia Madejón Rodríguez y la Lda. Dña. Rosario Cordón Puerto por sus ideas para la redacción y corrección del mismo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ADRIANO, D.C., WENZEL, W.W., VANGRONSVELD, J. & BOLAN, N.S. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma* 122, 121-142.
- ALBURQUERQUE, A., GONZÁLVEZ, J., GARCÍA, D. & CEGARRA, J. (2007). Effects of a compost made from the solid by-product ("alperujo") of the two-phase centrifugation system for olive oil extraction and cotton gin waste on growth and nutrient content of ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Bioresource Technology* 98: 940-945.
- BOE nº 280 (1975) 21 de Noviembre de 1975.
- BOE nº 149 (1986) 23 de Junio de 1986.
- BOHN, H.L., MCNEAL, B.L. & O'CONNOR, G.A. (1979). *Soil Chemistry*. John Wiley & So. Inc. Nueva York.
- BOUER, H. (1993). From sewage farm to zero discharge. *European Waste Pollution Control* 3: 9-16.
- BRADY, N.C. (1974). *The nature and properties of soils*. MacMillan, Pub. Co., Nueva York.
- BRADY, N.C. & WEIL, R.R. (2002). *The nature and properties of soils*. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- CABRERA, F. (1994). *Reutilización de residuos*. Olivicultura. Fundación La Caixa. Agro Latino S.L. Barcelona. pág. 121-127.

- CABRERA, F. (1995). El alpechín: un problema mediterráneo. En M. Álvarez Cobelas y F. Cabrera Capitán (eds.). *La Calidad de las aguas continentales españolas. Estado actual de la investigación: 141-154*. Geoformas Ediciones. Logroño.
- CABRERA, F., LÓPEZ, R., MARTÍNEZ-BORDIÚ, A., DUPUY DE LOME, E. & MURILLO, J.M. (1996) Land Treatment of Olive Oil Mill Wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation* 215-225.
- CABRERA, F., LÓPEZ, R., MARTÍN OLMEDO, P. & MURILLO, J.M. (1997). Aprovechamiento agronómico de composts de alpechín. *Olivicultura* 88: 94-105.
- CABRERA, F., MARTÍN OLMEDO, P., LÓPEZ, R. & MURILLO, J.M. (2005) Nitrogen mineralization in soils amended with composted mill sludge. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71: 249-258.
- CEGARRA, J., PARELAS, C., ROIG, A., BERNAL, M.P. & GARCÍA, D. (1996). Use of olive mill wastewater compost for crop production. *International Biodeterioration and Biodegradation* 38: 193-203.
- COMPTON, H., BROWN, S., HENRY, C. & SPRENGER, M. (2001). Use of Biosolids and Lime to Restore a Metal Affected Ecosystem in Leadville, *Proc. 6th Intern. Conf. on the Biogeochem. of Trace Elements; Guelph'01*.
- COOPER, P.F. (2001). Historical aspects of wastewater treatment. En: P. Lens, G. Zeeman & G. Lettinga (eds.) *Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, Systems and Implementation: 11-38*. IWA Publishing, Londres, Reino Unido.
- COOPERBAND, L. (2002). *Building Soil Organic Matter with Organic Amendments. A resource for urban and rural gardeners, small farmers, turfgrass managers and large-scale producers*. Center for Integrated Agricultural Systems. University of Wisconsin-Madison.
- DÍAZ, M.J., MADEJÓN, E., ARIZA, J., LÓPEZ, R. & CABRERA, F. (2002a). Cocomposting of beet vinasse and grape marc in windrows and static pile systems. *Compost Science & Utilization* 10: 258-269.
- DÍAZ, M.J., MADEJÓN, E., LÓPEZ, F., LÓPEZ, R. & CABRERA, F. (2002b). Composting of vinasse and cotton gin waste by using two different systems. *Resources Conservation and Recycling* 34: 235-248.
- DÍAZ, M.J., MADEJÓN, E., LÓPEZ, R. & CABRERA, F. (2003). Optimizing sugarbeet molasses distillery slops to olive mill husks ratio and incubation period for composting. *Journal of Environmental Engineering and Science* 2: 335-342.
- EUROPEAN COMMISSION. (2001). *The soil protection communication*. DG ENV Draft October 2001. Directorate-General Environment. Directorate B. Environmental quality of Natural resources. ENV.B1. Water, the Marine and Soil.
- GARCÍA ORTIZ A, FRÍAS RUIZ L. (1994). El alpechín y los orujos húmedos. Sus posibles usos. *Agricultura* 746: 815-819.
- JANZEN, H.H. (2004). Carbon cycling in earth systems--a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 104: 399-417.
- JANZEN, H.H. (2006). The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology and Biochemistry* 38: 419-424.
- JENKINS, J. (2005). *The Humanure Handbook. A guide to composting human manure*. Joseph Jenkins, Inc. Grove City, PA, USA.
- LAL, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123: 1-22.
- LÓPEZ, R., Cabrera, F. & Murillo, J.M. (1993). Effect of beet vinasse on radish seeding emergency and fresh weight production. *Acta Horticulturae* 335: 115-119.
- MADEJÓN, E., DÍAZ, M.J., LÓPEZ, R., MURILLO, J.M. & CABRERA, F. (1995). Corn Fertilization with 3 (Sugar-Beet) Vinasse Composts. *Fresenius Environmental Bulletin* 4: 232-237.
- MADEJÓN, E., DÍAZ, M.J., LÓPEZ, R., LOZANO, C. & CABRERA, F. (1996). Cotton fertilization with composts of (sugarbeet) vinasse and agricultural residues. *Fertilizer Research* 43: 179-182.

- MADEJÓN, E., LÓPEZ, R., MURILLO, J.M. & CABRERA, F. (2001). Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). *Agriculture Ecosystems & Environment* 84: 55-65.
- MADEJÓN, E., PÉREZ DE MORA, A., FELIPE, E., BURGOS, P. & CABRERA, F. (2006). Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation. *Environmental Pollution* 139: 40-52.
- MADRID, F. (1999). *Caracterización y utilización de los composts de residuos sólidos urbanos de la planta de Villarrasa*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- MADRID, F., LÓPEZ, R., CABRERA, F. & MURILLO J.M. (2001). Caracterización de los composts de residuos sólidos urbanos de la planta de Villarrasa (Huelva). *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.* 16, 106-117.
- MANLAY, R.J., FELLER, C. & SWIFT, M.J. (2007). Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 119: 217-233.
- MURILLO, J.M., CABRERA, F. & LÓPEZ, R. (1993). Effect of Beet Vinasse on Germination and Seedling Performance of Ryegrass (*Lolium-Multiflorum* Lam Cv Barwoltra). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 61: 155-160.
- MURILLO, J.M., CABRERA, F., LÓPEZ, R. & MARTÍN OLMEDO P. (1998). Sunflower response to the application of a concentrated beet vinasse. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29: 643-655.
- PÉREZ DE MORA, A., BURGOS, P., MADEJÓN, E., CABRERA, F., JAECKEL, P. & SCHLOTTER, M. (2006a). Microbial community structure and function in a soil contaminated by heavy metals: effects of plant growth and different amendments. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 327-341.
- PÉREZ DE MORA, A., MADEJÓN, E., BURGOS, P. & CABRERA F. (2006b). Trace element availability and plant growth in a mine-spill contaminated soil under assisted natural remediation I. Soils. *The Science of the Total Environment* 363: 28-37.
- PÉREZ DE MORA, A., MADEJÓN, E., BURGOS, P. & CABRERA F. (2006c). Trace element availability and plant growth in a mine spill-contaminated soil under assisted natural remediation II. Plants. *The Science of the Total Environment* 363: 38-45.
- SCHNOOR, J.L. (1997). *Phytoremediation*. Technology Evaluation Report. GWRTAC Series TE-98-01. Pittsburgh, PA.
- SOPPER W.E. (1993). *Municipal Sludge use for Land Reclamation*. Lewis Publishers, Ann Arbor, MI.
- TAN, K.H. (1994). *Environmental Science*. Marcel Dekker, Inc. Nueva York.
- TEJADA, M., MORENO, J.L., HERNÁNDEZ, M.T., GARCÍA, C. (2007). Application of two vinasse forms in soil restoration: Effects on soil properties in an arid environment in southern Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 289-298.
- TOMATI, U., GALLI, E., PASETTI, L. & VOLTERRA, E. (1995). Bioremediation of olive-mill wastewaters by composting. *Waste Management and Research* 13: 509-518.
- TOMATI, U., GALLI, E., FIORELLI, F. & PASETTI, L. (1996). Fertilizers from composting of olive-mill wastewater. *International Biodeterioration and Biodegradation* 38: 155-162.
- USEPA. (1997). *Innovative uses of compost*. Bioremediation and Pollution Prevention. Solid Waste and Emergency Response (5306W), EPA530-F-042.
- USEPA. (2000). *Introduction to phytoremediation*. EPA/600/H-99/107. National Risk Management Laboratory. Office of Research and Development. Cincinnati.
- VANGRONSVELD, J.C.H.M. & CUNNINGHAM, S.D. (1998). Introduction to the concepts. En J. Vangronsveld and S. D. Cunningham (eds.) *Metal-contaminated soils: In situ Inactivation and phytoremediation*: 1-15. R.G. Landes Co. Georgetown, TX.
- WALLACE, A. (1994a). Soil organic matter is essential to solving soil environmental problems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 25: 15-28.

- WALLACE, A. (1994b). Soil organic matter must be restored to near original levels. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*: 25, 29-35.
- WALLACE, A. & TERRY, R.E. (1998). Introduction: Soil Conditioners, soil quality and soil sustainability. En A. Wallace and R.E. Terry, *Handbook of Soil Conditioners*. Marcel Dekker, Inc. Nueva York.
- WILD A. (1988). *Russell's Soil Conditions & Plant Growth*. Longman Scientific & Technical. Essex. Inglaterra.
- ZUCCONI, F., & DE BERTOLDI, M. (1987). Compost specifications for production and characterization of compost from municipal solid waste. En M. Bertoldi, M.P. Ferranti, P. L'Hermite & F. Zucconi (eds.) *Compost: Production, Quality and Use*: 30-50. Elsevier Applied Science, Londres, Reino Unido.