

ACADEMIA DE CIENCIAS DE LA REGIÓN DE MURCIA

Enmiendas orgánicas para suelos basadas en residuos orgánicos

Discurso de ingreso leído por el Académico electo
Ilmo. Sr. D. Carlos García Izquierdo
en el acto de la Sesión Solemne de su toma de posesión
como Académico de Número,
celebrada el día 30 de octubre de 2008 y
Discurso de contestación del Académico de Número
Ilmo. Sr. D. Antonio Cerdá Cerdá





ACADEMIA DE CIENCIAS DE LA REGION DE MURCIA

ENMIENDAS ORGÁNICAS PARA SUELOS BASADAS EN RESIDUOS ORGÁNICOS

Discurso de ingreso leído por el Académico electo

Ilmo. Sr. D. Carlos García Izquierdo

en el acto de la Sesión Solemne de su Toma de Posesión como
Académico de Número, celebrada el día 30 de octubre de 2008

y

discurso de contestación del Académico de Número

Ilmo. Sr. D. Antonio Cerdá Cerdá

Murcia, 2008

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y ss. del Código Penal).

Con el patrocinio de la Dirección General de Universidades.

© Academia de Ciencias de la Región de Murcia, 2008

© Carlos García Izquierdo

I.S.B.N.: 978-84-612-6537-4

Depósito Legal: MU-2213-2008

Imprime: Compobell S.L., Murcia

Índice

	<u>Página</u>
El suelo y su importancia	5
Calidad y salud del suelo	7
Materia orgánica del suelo como parte “viva”: naturaleza y función	11
Actividad metabólica del suelo y su relación con la calidad	18
Aplicaciones biotecnológicas para recuperación de suelos degradados en ambientes mediterráneos: incorporación de enmiendas orgánicas	27
Residuos y su problemática	33
Impacto ambiental derivado del reciclaje en el suelo de los residuos orgánicos como enmienda	42
Efectos de los residuos orgánicos sobre los suelos	53
Conclusiones generales sobre la problemática del binomio suelo-residuo orgánico	61
Bibliografía	69
Discurso de contestación	79

ENMIENDAS ORGÁNICAS PARA SUELOS BASADAS EN RESIDUOS ORGÁNICOS

EL SUELO Y SU IMPORTANCIA

El suelo es un recurso vivo, dinámico y no renovable, el cual está necesitado de unas condiciones mínimas y adecuadas que le permitan llevar a cabo sin problemas aquellas funciones suficientes para su mantenimiento y conservación, así como para la producción de alimentos, y para el mantenimiento de la calidad ambiental local, regional y global (Doran *et al.*, 1999). Los procesos de descomposición y respiración que suceden en él, fundamentalmente derivados de las acciones sobre su parte viva u orgánica, tienen un papel importante para el mantenimiento del balance entre la producción y el consumo del CO₂ de la biosfera, tanto para el reciclaje del C atmosférico que está en forma de CO₂ como para la formación de la materia orgánica, la cual es una reserva no solo del C atmosférico sino de otros elementos. Las etapas esenciales de los ciclos globales de elementos claves para la vida del suelo como son, además del agua, el C, N, P y S se suceden en el suelo con una cierta velocidad de reciclaje de los

mencionados elementos, y es por ello que su disponibilidad se puede ver claramente alterada por las diferentes formas de vida y por la constante búsqueda de fuentes de alimento y energía (Doran *et al.*, 1999). Así, el suelo no solo es la base para la agricultura y para los diferentes ecosistemas, sino que además de él depende toda la vida del planeta. Las prácticas de manejo convencionales como el arado, los patrones de cultivo y el uso de plaguicidas y fertilizantes no sólo han tenido influencia en el suelo donde se aplican dichas prácticas, sino sobre la calidad del agua y de la atmósfera, ya que han generado cambios en la capacidad del mencionado suelo para producir y consumir gases como CO₂, óxido nitroso y metano (Doran y Zeiss, 2000).

Como señalan Doran y Safley (1997), el reto para poder conseguir una vida sostenible requiere una nueva visión, aproximaciones holísticas para el manejo de ecosistemas y renovación de la relación entre ciencia y sociedad. El mencionado reto se plantea frente a la creciente demanda de alimentos, fibras, protección ambiental y al empobrecimiento de recursos energéticos no renovables, en una sociedad urbanizada y en constante expansión. Para definir y asumir esa sostenibilidad surgen como herramientas los conceptos de salud y calidad, que se basan en las propiedades inherentes y dinámicas de los procesos del suelo. A este recurso no pueden ser asignados estándares de calidad amplios, como sí sucede con el agua y el aire, ya que existen varios factores que dificultan definir, medir y

regular su calidad, debido a que el suelo es inherentemente variable (Bandick y Dick, 1999).

CALIDAD Y SALUD DEL SUELO

Dentro de los estudios más avanzados de la Ciencia del Suelo, aquellos encaminados a conocer su calidad y salud son hoy en día prioritarios. Las propiedades de los suelos varían naturalmente a través del tiempo por factores que determinan su formación como la precipitación, el material de origen, los organismos que lo habitan, la actividad antropogénica, etc. Dichos cambios sobre el suelo se producen de forma prácticamente continuada, y a lo largo del tiempo de manera imparable. Todo ello hace que todos los estudios que se llevan a cabo sobre los suelos sean en exceso complicados, debido a que estamos hablando de una matriz sumamente compleja formada por una parte viva en constante movimiento, y otra parte más mineral que se mueve mucho más lentamente; pero ambas partes tienen su función de manera inequívoca. En consecuencia resultará muy complicado que exista una sola medida ya sea biológica, física o química que sea útil para determinar el estatus de un suelo, pudiendo a partir de dicha medida decidir cual sería su salud y calidad (Doran, 2002).

Se puede señalar que la calidad del suelo abarca tres componentes básicos: las características biológicas, las físicas y las químicas; mientras que la salud está

determinada principalmente por sus características ecológicas. Un ecosistema saludable está definido por la integración de los ciclos de los nutrientes y flujos de energía, y por la estabilidad y elasticidad frente a una alteración o estrés. Sin embargo, las propiedades que se utilizan como indicadores de calidad no necesariamente están directamente relacionadas con la salud (van Bruggen y Semenov, 2000). En general la respuesta de los suelos y de los ecosistemas a una alteración tiene dos componentes: resistencia y resiliencia. La resistencia, es la capacidad inherente del sistema para tolerar la alteración; y la resiliencia, es la capacidad amortiguadora y la habilidad para regenerarse. Por otro lado, la biodiversidad es una propiedad que condiciona la capacidad de recuperación del sistema edáfico ante una alteración y de mantener su estabilidad funcional (Griffiths *et al.*, 2001), hay evidencias de la relación que existe entre los organismos que habitan en el ecosistema (diversidad, estructura de la cadena trófica, estabilidad de las comunidades) y la elasticidad de un salud (van Bruggen y Semenov, 2000), pero se conoce muy poco acerca de cómo la biodiversidad asegura la continuidad de funciones específicas (Griffiths *et al.*, 2001).

La calidad del suelo está determinada por funciones simultáneas tales como sostener la productividad de los cultivos, el mantener la calidad del agua y del aire, y el proporcionar condiciones saludables para plantas, animales y el hombre dentro de los límites de un ecosistema. Por consiguiente, la calidad y salud de

este recurso determina la sostenibilidad de la agricultura, la calidad ambiental y como consecuencia la salud de plantas, animales y del hombre (Doran y Safley, 1997). Al utilizar la salud y la calidad como herramientas para evaluar la sostenibilidad es necesario tener en cuenta las escalas espacio temporales, las cuales dependen de las propiedades inherentes (asociadas con los factores formadores) y de las propiedades dinámicas (que pueden ser afectadas por acciones humanas), ya que el recurso suelo y los ecosistemas que soporta son dinámicos en el espacio y el tiempo, lo cual acarrea limitaciones e incertidumbres acerca del conocimiento que de éstos suelos (Bastida *et. al.*, 2008). Además, el manejo está dirigido por metas explícitas ejecutado por políticas y protocolos, aspectos que hay que ajustar para el seguimiento y búsqueda de un mejor entendimiento de las interacciones y procesos que sostienen la composición, estructura y función de los ecosistemas.

La sostenibilidad en este contexto responde a seis de las funciones del suelo (Doran y Safley, 1997), tres de tipo ecológico:

- (i) la producción de biomasa (comida, fibra, energía)
- (ii) la capacidad de filtrar, amortiguar y transformar la materia, para proteger el ambiente y los nacimientos de agua de la contaminación,
- (iii) el proporcionar hábitat y ser reservorio genético para plantas, animales y organismos que deben ser protegidos de la extinción.

Otras tres funciones del suelo pueden relacionarse con las actividades humanas:

- (i) como medio físico que sirve de base espacial para estructuras técnicas e industriales y actividades socioeconómicas
- (ii) ser fuente de materia prima y suplemento de agua, arcilla, arena, grava, minerales, entre otros
- (iii) como parte de la herencia cultural al contener tesoros arqueológicos y paleontológicos importantes para preservar la historia de la tierra y de la humanidad.

La calidad del suelo no es fácil de definir, pues depende del uso que se le vaya a dar a dicho suelo (agrícola, forestal, urbano, industrial). Una de las opciones posibles es la que ofrecieron Doran y Parkin en 1994, definiendo la calidad de un suelo como su capacidad para mantener su productividad biológica, su calidad ambiental, promoviendo además la salud de animales, plantas y el propio ser humano. Todos los estudios recientes referidos a la calidad del suelo y su salud indican que la temática es sumamente complicada, ya que se necesita de la integración de propiedades del suelo muy diversas: físicas, químicas, biológicas y bioquímicas para establecer dicha calidad (Papendick y Parr, 1992; Garcia *et al.*, 1994). Sin embargo, para poder cuantificar en lo posible la calidad de un suelo, es necesario disponer de una serie de parámetros que puedan reflejar los problemas de producción en las diferentes áreas existentes, además de

ser capaces de monitorizar cambios en la calidad sostenible y ambiental relacionados con el manejo del suelo.

MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO COMO PARTE “VIVA”: NATURALEZA Y FUNCIÓN.

Debemos de tener muy claro lo siguiente: suelo y materia orgánica constituyen un binomio que siempre debe de ir unido, cuando se habla de calidad, salud o sostenibilidad de un suelo. Si cuando se habla del “suelo” no se incluye como parte esencial del mismo a su componente “viva”, como es la materia orgánica, sólo estaríamos tratando del sustrato litológico por ejemplo, pero nunca del propio suelo. Y precisamente para mantener esa “vida” del suelo, y que le dará lo necesario para constituir a su fertilidad y productividad, hemos de ser conscientes de que el suelo necesita fuentes de donde obtener su energía, ya que su poder de capacidad autófrica es muy limitado (sólo algunas algas, una pocas bacterias y ciertas especies de protozoos pueden obtener energía de forma autóctona). La materia orgánica que se aporte al suelo es de donde todos los microorganismos del suelo obtendrán sus fuentes energéticas, y dichos microorganismos organizaran toda la vida del suelo. La materia orgánica que se incorpora al suelo procederá de plantas, animales muertos o incluso restos de microorganismos, y su composición será muy variada: almidón, celulosa, hemicelulosa, lignina, quitina, pectina, exopolisacáridos, proteínas, péptidos, lípidos, etc. Este tipo

de “necromasa” constituye aproximadamente el 90-95% del total de materia orgánica.

Ya hemos señalado que la materia orgánica del suelo procede fundamentalmente de los restos de plantas, animales y microorganismos. De todos ellos, los restos vegetales son la principal fuente de materia orgánica de un suelo natural. Otras fuentes de materia orgánica, frecuentemente obviadas, pero que pueden tener una importancia clave sobre las propiedades del suelo incluyen:

- los compuestos orgánicos solubles en agua y los mucílagos exudados o excretados por la raíz, que pueden llegar a ser del 18 al 25 % del peso total de la planta
- los compuestos orgánicos desprendidos de la raíz en forma volátil
- los microorganismos del suelo.

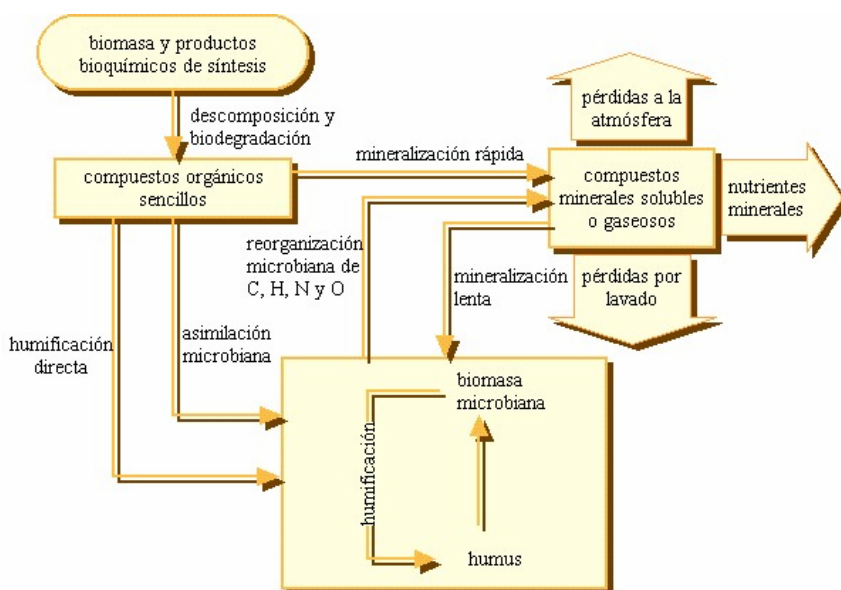
Por tanto, y teniendo en cuenta su diversa procedencia, se puede definir la materia orgánica del suelo como un complejo sistema de sustancias en un estado dinámico permanente, producido por la incorporación al mismo de residuos orgánicos, principalmente de origen vegetal, y en menor cuantía animal, en diferentes estados de descomposición y evolución (Moreno *et al.*, 2007).

La materia orgánica del suelo se suele dividir en dos grupos: la fracción no húmica y el humus (Allison, 1973). La fracción no húmica está constituida por residuos de

plantas y animales más o menos alterados, la biomasa del suelo y sustancias orgánicas de composición definida tales como proteínas, glúcidos, aminoácidos, grasas, ceras y ácidos orgánicos de bajo peso molecular. El humus es una mezcla de sustancias orgánicas muy complejas y sin composición definida, estable a la degradación y que tiene una naturaleza coloidal. Dicha mezcla se puede dividir a su vez, en función de su solubilidad en álcalis y ácidos, en otras tres fracciones: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y la humina (Tate III, 1987).

Como queda reflejado en el Esquema 1, la materia orgánica que se incorpora a los suelos sufre una serie de transformaciones en las que intervienen formas vivas y no vivas (Doran, 2002).

Esquema 1. Transformaciones de la materia orgánica en el suelo.



En primer lugar, la materia orgánica sufre un proceso de descomposición hasta la formación de compuestos orgánicos sencillos, que posteriormente se mineralizan de forma más o menos rápida. Durante el proceso de mineralización, la sustancia se transforma desde una forma orgánica a una inorgánica, como resultado de la acción de los microorganismos. El carbono orgánico no mineralizado de forma rápida, sigue un proceso de mineralización más lento y tras profundas transformaciones, pasa a formar parte de la biomasa microbiana o queda estabilizado como sustancia húmica. La masa microbiana hace referencia a la masa de los

microorganismos y la microfauna. Constituyen un agente de la humificación, directamente o a través de la actividad enzimática.

El proceso de humificación implica cambios en la complejidad de la materia orgánica que hace aumentar su resistencia a la biodegradación. Existen procesos de humificación directa de compuestos orgánicos sencillos a sustancias húmicas. El producto final, en ambos casos, son los ácidos fúlvicos (solubles a pH ácido y básico), ácidos húmicos (precipitables a pH ácido) y humina (insolubles a pH ácido y básico).

Debido a la incidencia que la materia orgánica puede tener en la actividad microbiana del suelo, podemos clasificar a la materia orgánica como lábil y estable. La materia orgánica lábil incluye el pool más fácilmente mineralizable de materia orgánica, rápidamente disponible como sustrato para el metabolismo microbiano. Este componente de la materia orgánica está constituido principalmente por ácidos orgánicos alifáticos, carbohidratos, aminoácidos (y sus derivados poliméricos como proteínas y polipéptidos), polisacáridos, lípidos y otros compuestos orgánicos de bajo peso molecular (Schnitzer, 1991). El beneficio de la materia orgánica lábil del suelo tiene su origen especialmente en las fracciones lábiles, como el C hidrosoluble o los carbohidratos hidrosolubles, que pueden constituir una reserva energética en el suelo y son muy utilizadas como indicadores de calidad de suelos.

La materia orgánica estable recibe el nombre, más comúnmente, de humus, jugando los microorganismos un papel clave en su formación. El humus puede definirse como una fracción de materia orgánica heterogénea, de alto peso molecular, coloreada desde marrón a negro, y formada a través de una serie de reacciones secundarias de síntesis (Stevenson, 1982). Dicha materia orgánica es el producto de la descomposición de residuos de origen animal o vegetal (Bastida *et al.*, 2008), y puede encontrarse en todos los ambientes, ya sean acuáticos o terrestres. El humus es considerado como una de las más abundantes formas de materia orgánica presente sobre la superficie terrestre y constituye una mezcla compleja de una extensa variedad de compuestos de difícil definición, caracterizados por unos pesos moleculares que oscilan entre 700 y 300000 daltons. Está representado en su mayor parte por sustancias polimerizadas tales como compuestos aromáticos, polisacáridos, polímeros del ácido urónico y compuestos fosforados. Químicamente está constituido por un núcleo estable, con cadenas laterales cortas o largas, de naturaleza polifenólica, formando diferentes tipos de compuestos húmicos: huminas, ácidos fúlvicos y ácidos húmicos. Se piensa que la estructura más polimerizada es la de las huminas, seguida por la de los ácidos húmicos (gran núcleo aromático estable y pequeñas cadenas laterales), y por último la de los ácidos fúlvicos, con un pequeño núcleo condensado y grandes cadenas laterales.

La materia orgánica ejerce una serie de acciones de tipo físico, físico-químico, químico, y biológico sobre el suelo, así como otras de naturaleza fisiológica sobre la planta. La materia orgánica del suelo tiene un papel fundamental en el desarrollo y funcionamiento de los ecosistemas terrestres, determinando su productividad potencial, de manera que el mantenimiento de un nivel adecuado de materia orgánica en el suelo tiene una incidencia directa sobre el desarrollo y el crecimiento vegetal y microbiano. Las sustancias húmicas ejercen una serie de efectos positivos sobre la germinación de las semillas, así como sobre el sistema radicular y las partes aéreas de las plantas, incrementando la producción vegetal (Ayuso, 1995). El humus además produce una serie de efectos fisiológicos en la planta, entre los que podemos citar los siguientes: un incremento en la absorción de agua, la estimulación de la respiración y permeabilidad de las raíces, y la inducción del proceso de fotosíntesis. Esta estimulación fisiológica puede proteger a las plantas de enfermedades y plagas (Bernal-Vicente *et al.*, 2008).

Vista la importancia que tiene la materia orgánica en un suelo para la funcionalidad del mismo, deberíamos saber que es importante tanto su calidad como su cantidad. Su calidad va a depender de los procesos que conlleva su formación (humificación) en los suelos, y la materia de origen que al final genera esa materia orgánica de calidad. En lo que respecta a su cantidad, en teoría, la materia orgánica en un suelo debería ser prácticamente

constante, con entradas (materia orgánica procedente de restos vegetales y animales) generando humus por una parte (humificación), y CO_2 (mineralización). Cuando este equilibrio se rompe por actuaciones negativas sobre el suelo se produce una pérdida de materia orgánica, y por consiguiente, pérdida de fertilidad y productividad. Hoy en día, y con connotaciones claras sobre el cambio global y climático que se está dando, debemos de dar una importancia máxima al hecho de que exista materia orgánica en los suelos, y que los procesos de humificación se desarrollen priorizados frente a los de mineralización. Disponer de C fijado en un suelo, es decir, convertir el suelo en un verdadero sumidero de C es básico para conseguir así a un buen equilibrio, evitando desprendimiento de CO_2 a la atmósfera y mitigando en parte el efecto invernadero.

ACTIVIDAD METABÓLICA DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD

De todos los parámetros que pueden contribuir a aportar información sobre aspectos de la calidad de los suelos, aquellos relativos a su actividad metabólica son los que mantienen una mayor sensibilidad frente a procesos no deseables tales como contaminación, degradación diversa, e incluso desertificación (García *et al.*, 1994). La componente física y química del suelo puede considerarse muy estable en lo que a su medida se refiere; podemos decir que son bastante “estables” en su

valor absoluto, haciendo falta tiempo para que cambien de forma apreciable. Por ello, pensamos que la flexibilidad del ecosistema suelo puede ser detectado en primer lugar por la componente biológica existente en dicho suelo; dicha componente biológica es sin duda altamente sensible a degradaciones incipientes. Debido a ello un cambio en la componente biológica del suelo puede ser considerado como una “alerta” ante un posible colapso ambiental, permitiéndonos entonces reaccionar a tiempo antes de que pueda ocurrir un daño irreversible en el suelo. Sin embargo, hay que señalar que medidas como las propuestas no resultan sencillas debido a lo complicado que es el estudio de los microorganismos y de sus reacciones a nivel del microhabitat, y que la medida de un solo parámetro es difícil que pueda resultar útil y satisfactoria como reflejo de la calidad biológica del suelo (Nannipieri *et al.*, 1990; Gil-Sotres *et al.*, 1992). Indicamos a continuación algunos aspectos implicados en la actividad microbiana del suelo, así como sobre algunos de los parámetros que nos permiten medir dicha actividad y a los que nos hemos referido anteriormente, dada su importancia en los conceptos actuales de la ciencia del suelo.

La verdadera importancia de los microorganismos en cuanto a su relación con la calidad de un suelo, o con procesos de degradación o recuperación del mismo, no es tanto conocer los tipos de microorganismos que llevan a cabo funciones concretas, sino la actividad microbiana en ese determinado ambiente. Para ello, parámetros de tipo

bioquímico pueden constituir un excelente punto de partida. A continuación ofrecemos un comentario general sobre este tipo de parámetros, comenzando por las acciones de las enzimas del suelo y su actividad las cuales tienen una importancia capital en todos los estudios de actividad metabólica de suelos.

Sobre parámetros indicativos de actividad microbiana

La importancia que hoy en día está adquiriendo la determinación de parámetros bioquímicos tales como las actividades enzimáticas de suelos, así como de aquellos relacionados con la biomasa microbiana, es cada vez mayor en los estudios avanzados de la Ciencia del Suelo; sin su ayuda sería imposible llegar a entender la funcionalidad de dicho suelo. Su medida dará idea de la actividad metabólica de ese suelo, y esto es esencial para que sus funciones de manera correcta (Burns, 1982; Garcia *et al.*, 1997). La actividad metabólica es la responsable en un suelo de procesos tan importantes como los de mineralización y humificación de su materia orgánica, los cuales incidirán a su vez sobre otra serie de procesos donde intervienen algunos elementos fundamentales en el suelo (C, N, P y S), así como todas las transformaciones en que interviene la propia biomasa microbiana de dicho suelo. Su determinación puede ser útil en estudios que se lleven a cabo sobre suelos naturales, donde los procesos microbianos, claves para su conservación o su posible degradación ambiental, pueden monitorizarse a través de parámetros de la

actividad metabólica de dicho suelo (Garcia y Hernandez, 2003; Trasar-Cepeda *et al.*, 2000). También dichos parámetros pueden resultar apropiados para estudios relativos a sistemas agrícolas modernos, en particular cuando en dichos sistemas impera un manejo ecológico y sostenible del suelo (Canet *et al.*, 2000). Además de lo expuesto, la actividad metabólica que muestre un suelo se verá afectada por problemas de contaminación y descontaminación, pudiendo ser la mencionada actividad un reflejo de la posibilidad de degradación de compuestos tóxicos para ese suelo, y que pueden haber sido adicionados al mismo antropogénicamente (Lobo *et al.*, 2000). En los últimos años, la incidencia que en este tipo de parámetros tiene la adición a los suelos de gran cantidad de materiales orgánicos de diverso origen (desde estiércoles hasta otros materiales orgánicos considerados de nueva generación como los lodos de depuradora), con las connotaciones tan particulares de este tipo de enmiendas (aporte y generación de biomasa microbiana al suelo, contenidos a veces no deseables de contaminantes como metales pesados, etc...), hace también muy apetecible la determinación en esos suelos enmendados de los mencionados parámetros, los cuales ayudarán de forma útil a conocer el efecto que dichos materiales orgánicos provocarán en el suelo sobre los procesos metabólicos y su actividad microbiana en particular (Pascual *et al.*, 2000; Bonmati *et al.*, 2000; Canet *et al.*, 2000).

Técnicas sobre la cantidad de microorganismos del suelo (bacterias, hongos, actinomicetos, algas) pueden responder a cambios en el mismo que sean de interés, pero sin embargo, problemas derivados de su propio cultivo, su dificultad como técnica analítica en sí misma, y su enorme variabilidad espacial y temporal aconseja precaución a la hora de su empleo. Otro tipo de técnicas también muy interesantes ligadas al conocimiento de grupos de microorganismos funcionales específicos (bacterias fijadoras de nitrógeno, u hongos micorrícicos) hay que tenerlas también presentes, si bien y como ya se ha especificado, interesa asimismo acentuar el criterio sobre medida de “actividad microbiana” y no sólo en las de “cantidad microbiana”. Otras técnicas nuevas capaces de medir la estructura y la diversidad funcional de comunidades microbianas del suelo, tales como BIOLOG, determinación de ADN, y por supuesto, la incorporación a este tipo de estudios de la proteómica de suelos y la metabolómica, consideramos por supuesto que ofrecen nuevas e inexploradas dimensiones en el campo que aquí se está considerando, y deberán sin duda ser tenidas en cuenta en un futuro cercano (Ros *et al.*, 2008). A continuación se establece un comentario algo más extenso sobre alguno de los parámetros de actividad microbiana de suelos que han sido pioneros en estudios de ciencia del suelo desde una perspectiva de conocer su funcionalidad por encima de otras cosas (actividad enzimática de suelos y el conocimiento de la biomasa

microbiana del mismo), y que han demostrado su utilidad y eficacia en este sentido (Klammer *et al.*, 2008)

Generalidades sobre las enzimas del suelo.

Las actividades enzimáticas en suelos han sido ampliamente estudiadas en los últimos 50 años, como así lo reflejó Skujins en 1978. Su importancia fundamental radica en que el funcionamiento de los ecosistemas no se puede entender correctamente sin la participación de los procesos enzimáticos (Overbeck, 1991), ya que las enzimas determinan el “pattern” de gran parte de las transformaciones químicas que se producen en el suelo. Durante los últimos 30 años, muchos investigadores han revisado el interés de las enzimas del suelo (Burns, 1982; Nannipieri, 1994). Un libro clave para el estudio de la Enzimología del Suelo fue publicado por Skujins en 1978, en el que se recoge el origen, rango, cinética e historia de las enzimas del suelo, e incluye temas tan actuales como la interacción de las enzimas y diversos agroquímicos, su significado, y aspectos metodológicos de dichas enzimas del suelo. Con las enzimas del suelo se puede establecer categorías según su función: hidrolasas, oxidoreductasas, liasas y transferasas (Skijins, 1978; Gianfreda y Bollag, 1996). Las enzimas del suelo más estudiadas son las oxidoreductasas (en particular, deshidrogenasas, catalasas y peroxidasas), y las hidrolasas (sobre todo invertasas, proteinasas y ureasas); menos estudios se han llevado a cabo sobre otras enzimas del tipo transferasas o liasas. Una parte de las enzimas del suelo

son sin duda extracelulares siendo liberadas durante el metabolismo y muerte celular; otras son intracelulares, formando parte de la biomasa microbiana. Por ultimo, existen las enzimas inmovilizadas que son las que pueden mantener un nivel constante y estable de actividad enzimática en el suelo, independiente de la proliferación microbiana y de las formas usuales de regulación de la síntesis y secreción de enzimas. Este tipo de enzimas inmovilizadas pueden permanecer unidas a coloides minerales (como la arcilla) u orgánicos (como las sustancias húmicas), siendo muy resistentes a procesos de desnaturalización (Ladd, 1978). Todo ello indica que es difícil extraer las enzimas del suelo y es por ello que se estudian indirectamente midiendo su actividad.

Las actividades enzimáticas del suelo se han sugerido como prioritarias dentro del conjunto de indicadores, debido a su relación con la biología del suelo ya que su presencia depende directamente de la continua liberación al ambiente llevada a cabo por los organismos que habitan en el ecosistema (Burns, 1982), y además están relacionadas con funciones ecológicas como la producción de biomasa, la remediación de contaminantes y la conservación de ecosistemas. Las actividades enzimáticas pueden ser usadas como parte del conjunto de herramientas necesarias para asignar sostenibilidad, son de fácil determinación (a pesar de la dificultad añadida de no existir métodos estándares) y responden rápidamente al manejo del recurso suelo (Pascual *et al.*, 2000).

Las enzimas del suelo pueden considerarse útiles para monitorizar cambios en las actividades microbianas (Sinsabaugh, 1994). Ofrecen información sobre la capacidad potencial del suelo para llevar a cabo reacciones específicas, las cuales son importantes en el ciclo de nutrientes (García y Hernández, 2003; Ros 2000; Leirós *et al.*, 2000.; Trasar-Cepeda *et al.*, 1999.). La importancia concreta que en todo este ámbito tienen las oxidorreductasas o las hidrolasas implicadas en el ciclo del C, N, P y S es de suma importancia en los suelos.

Generalidades sobre la biomasa microbiana de un suelo y su medida.

La primera característica que llamó la atención sobre la biomasa microbiana fue su relativo gran tamaño, comprendido entre el 1 y 3% de la materia orgánica total del suelo (Powlson *et al.*, 1987). A pesar de representar un pequeño porcentaje dentro del “pool” de la materia orgánica, son los componentes más activos del mismo. Por definición, son parte del carbono orgánico y del conjunto de nutrientes (Insam, 1990) e incluye microorganismos muy diferentes (bacterias, hongos, levaduras, algas, protozoos, etc.). El carbono y el nitrógeno de la biomasa microbiana puede utilizarse de forma más efectiva que la materia orgánica en general, o el carbono orgánico total en particular, como indicador de las variaciones sufridas en la calidad de un suelo, ya que responde de forma más rápida y sensible a los cambios que se puedan producir en el mismo (degradación,

contaminación, usos del suelo etc.). Así, las medidas a corto plazo de la biomasa microbiana pueden marcar la tendencia de la materia orgánica a largo plazo (Powlson *et al.*, 1987). También se ha empleado como índice de comparación entre sistemas naturales y degradados (Ross *et al.*, 1982).

Dentro de las medidas de parámetros relacionados con la biomasa microbiana del suelo, la medida del adenosin-5-trifosfato (ATP) también constituye es un método útil para estimar la cantidad de biomasa microbiana. El ATP es un compuesto común en todos los seres vivos, su misión principal es la de actuar como molécula energética, utilizado en todos los procesos celulares bien como coenzima o como sustrato (Alef, 1991). Este parámetro se muestra correlacionado con otras estimaciones de biomasa microbiana, tanto en suelos sin enmendar (García *et al.*, 1997), como en suelos enmendados con sustratos no estabilizados (Ocio y Brookes, 1990).

Con relación asimismo a la biomasa microbiana de un suelo, un parámetro ampliamente utilizado para medir la actividad microbiológica en dicho suelo es la respiración microbiana, la cual puede ser determinada mediante el desprendimiento de CO₂ o el consumo de O₂. La degradación de materia orgánica es una propiedad de todos los microorganismos heterótrofos y el comportamiento de dicha descomposición se ha utilizado comúnmente para indicar el estado biológico de los suelos (Nannipieri *et al.*, 1990). La medida del desprendimiento

de CO₂ se ha empleado para estimar la biomasa microbiana del suelo que realmente es activa (West *et al.*,1987). La medida de respiración del suelo en presencia de productos potencialmente tóxicos empleados en agricultura, puede permitir evaluar los daños causados por estos productos sobre las funciones fisiológicas de los suelos (Nannipieri *et al.*,1990). La determinación del desprendimiento de CO₂ también es útil para conocer el efecto de determinadas variables sobre la oxidación de la materia orgánica in situ, pero en ningún momento puede indicar qué sustrato orgánico en particular está siendo catabolizado.

APLICACIONES BIOTECNOLÓGICAS PARA RECUPERACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS EN AMBIENTES MEDITERRÁNEOS: INCORPORACIÓN DE ENMIENDAS ORGÁNICAS

En condiciones naturales, el suelo tiende a un estado de equilibrio tras un lento proceso de formación denominado edafogénesis. El suelo en estas condiciones de máxima evolución se encuentra más o menos cubierto por una vegetación que le aporta una cantidad progresiva de materia orgánica y nutrientes contribuyendo a mantener e incluso mejorar su estructura, al tiempo que le sirve de protección frente a procesos degradativos de erosión. Puede decirse entonces que los suelos mantienen una calidad adecuada, y realizan todas sus funciones de manera correcta.

El equilibrio que alcanzan los suelos puede verse perturbado por diversas acciones, entre las que indudablemente merece la pena destacar las antrópicas. La agricultura en concreto, puede (cuando se producen usos indebidos o abusivos de los suelos) perjudicar enormemente la calidad de los mismos, provocando que el suelo alcance niveles de dicha calidad mucho menor que los que mantienen los suelos naturales. En suelos del área mediterránea sometidos a clima semiárido, los efectos negativos que el manejo agrícola inadecuado puede causar sobre su calidad se ven agravados por factores ambientales propios de esta región, tales como el sustrato litológico o el clima (Díaz, 1992). Otro aspecto a destacar, y que incide en los procesos de degradación de un suelo, es la introducción de un determinado contaminante en el mismo, bien de forma accidental, bien por abusos de agroquímicos (pesticidas, Bernal-Vicente *et al.*, 2008).

Podemos resumir diciendo que tanto la agricultura intensiva realizada en gran parte de los suelos del área mediterránea, como el empleo agrícola de terrenos marginales propensos a la degradación ambiental y poco aptos para el cultivo, así como los fenómenos de contaminación de suelos que por desgracia son bastante frecuentes, están forzando al empleo de técnicas inadecuadas de manejo para poder mantener la producción, dando lugar a una pérdida de la calidad y por tanto de la fertilidad de estos suelos; esta pérdida de productividad puede desembocar en el abandono de los

suelos al no ser rentables económicamente. Como resultado, nos encontramos con extensas áreas de terreno que presentan síntomas severos de degradación mostrando una reducción de su cubierta vegetal, lo cual está estrechamente relacionado con la escasez de materia orgánica de estos suelos (Garcia *et al.*, 1996).

En zonas como la del sudeste español, con un régimen climático semiárido, la progresiva degradación que sufre afectará de forma primordial a la vegetación que soporta, estos suelos, es decir, a la autóctona del lugar de que se trate. Si dicha vegetación desaparece, los suelos quedan entonces desprovistos de su principal barrera contra la degradación y erosión, y dichos procesos comenzarán a instalarse de forma predominante. Como parece lógico, la pérdida de cubierta vegetal conllevará una pérdida de materia orgánica en el suelo al no existir entradas de carbono por vía natural (aportes vegetales), y también se producirá la pérdida de nutrientes como el N y el P. Todo ello dificultará sin duda el establecimiento de los ciclos biogeoquímico de los elementos en el suelo, incidiendo negativamente sobre las condiciones biológicas del mismo. Si hemos señalado en el apartado anterior la enorme importancia que para el equilibrio natural de un suelo tiene el contenido en el mismo de la materia orgánica, hemos de decir que muchos de los suelos mediterráneos como los situados en el levante español carecen de la suficiente materia orgánica para mantener su fertilidad y productividad, y conseguir que dichos suelos aumenten su contenido para que sean un soporte

idóneo para una vegetación estable, es una necesidad. De ahí nuestro interés en incrementar dicho contenido de materia orgánica en los suelos, manteniendo como estrategia la adición a dichos suelos de materia orgánica exógena (basada en enmiendas generadas con residuos orgánicos, en muchos casos).

Podemos aprovechar el hecho de tener que introducir materia orgánica en el suelo, con la necesidad de incorporar biomasa microbiana a los suelos degradados, tan necesitados de ella; el objetivo será reactivar todos los procesos llevados a cabo por los microorganismos. Deberíamos pues de buscar biotecnologías que permitan adicionar al suelo “bioenmiendas”, capaces de aportar los beneficios de la materia orgánica, además de servir como inóculo de biomasa microbiana al suelo. Hasta ahora, el aporte de materia orgánica a los suelos sometidos a cultivo se venía realizando por medio de los estiércoles y las turbas. Pero tanto una como las otras, cada vez son más escasas y costosas, lo que ha hecho necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de materia orgánica para los suelos, a poder ser de bajo costo y fácil acceso (Banegas *et al.*, 2007).

Un modo de mejorar la fertilidad de los suelos degradados, y en concreto de mejorar su actividad microbiana, es como se ha indicado con anterioridad, aportar a dichos suelos materia orgánica exógena, pero siempre que dicha materia orgánica pueda ser considerada “JOVEN” (Díaz, 1992; García y Hernández,

2003). Con ello queremos decir que debe de contribuir a aportar materia orgánica lábil en cantidad suficiente como para activar el desarrollo de las poblaciones microbianas existentes en el suelo, sin llegar a producir efectos adversos en el mismo. Los residuos urbanos de origen orgánico son muy apropiados para llevar a cabo la mencionada labor. Sus características determinan que se comporte bien desde un punto de vista físico (aumenta la porosidad del suelo), que contribuya a mejorar el aspecto nutricional del suelo, y en particular, su materia orgánica lábil es sumamente beneficiosa al actuar como un catalizador para los microorganismos, consiguiendo así mejorar claramente la fertilidad potencial del suelo, y con ello los ciclos biogeoquímicos de los elementos más importantes.

Hasta hace pocos años, el empleo de turbas y estiércoles eran las fuentes naturales para introducir materia orgánica en el suelo (enmiendas orgánicas), y mantener con ello un adecuado equilibrio que permitiese conservar así mismo su fertilidad. Sin embargo, debido a la mecanización del ganado de una parte, y a la escasez de turbas por otra, ya no es factible en zonas como el sudeste español recurrir a las fuentes de materia orgánica tradicionales.

Teniendo en cuenta lo anterior, y con ánimo de buscar una alternativa eficaz a la búsqueda de nuevas fuentes de materia orgánica para ser adicionadas a los suelos, se puede hoy en día proponer diversos residuos orgánicos entre los que podemos citar a algunos de

origen animal como los estiércoles, así como de origen urbano y entre ellos los lodos EDAR (lodos generados en el tratamiento de aguas residuales urbanas) o incluso la fracción orgánica de residuos domésticos, junto a otros residuos orgánicos procedentes de la agricultura o de la industria agroalimentaria, pueden constituir una adecuada fuente de materia orgánica para suelos (Banegas *et al.*, 2007). Pero como ahora se indicará, este empleo no debe ser en ningún caso aleatorio, sino que se debe realizar conociendo claramente qué material orgánico es el que tenemos, y en qué condiciones debe ser usado para no originar problemas en lugar de beneficios.

Si conseguimos poder reciclar con éxito algunos residuos orgánicos en el suelo (siempre que dicho reciclaje se desarrolle de forma adecuada, sin riesgo alguno para nuestros suelos), estaremos consiguiendo un doble objetivo: Por una parte, se consigue una eliminación racional de materiales como los residuos, los cuales pueden ser muy problemáticos de no conseguir esa eliminación; Por otra, si en el suelo actúan como una adecuada fuente de materia orgánica, podremos recuperar la fertilidad perdida en suelos sometidos a procesos de degradación. Indudablemente, también existen desventajas derivadas fundamentalmente de su mal uso y de algunos contaminantes que pueden incorporar, lo que podría conducir de no tener precaución y control, a impactos negativos sobre el suelo donde se propone reciclar estos materiales.

RESIDUOS Y SU PROBLEMÁTICA

Dentro del contexto anterior y como parte integrante de los ecosistemas, se encuentran, como hemos comentado, todos los residuos generados. Dichos residuos constituyen un elemento básico de nuestra sociedad al que no podemos, por ahora, renunciar ya que toda actividad humana o industrial los está generando. No decimos con ello que deba de existir un conformismo sobre la propia generación de residuos, ya que debe ser prioritario para las sociedades del futuro conseguir su reducción en lo posible. Pero sí hemos de ser conscientes de que hoy por hoy, hay que convivir con ellos, y por tanto todos estamos obligados desde una perspectiva social a darles la salida más adecuada posible. Se trata pues de considerar a los residuos que generamos como un constituyente de nuestra propia actividad, y asumir nuestra responsabilidad sobre los mismos.

El gobierno español, para determinar las prioridades y criterios para la gestión de residuos en España, promulgó la Ley 10/98 de 21 de abril, de Residuos. Consecuentemente, estas prioridades y criterios están derivados de la política de la Unión Europea en materia de residuos y, en particular, de lo contenido en la Directiva 91/156/CEE, relativa a Residuos.

El Programa de Acción de la Unión Europea “Hacia un Desarrollo Sostenible”, establece la estrategia de gestión de residuos, señalando una jerarquía de opciones de gestión, de acuerdo al siguiente orden de prioridad:

- 1 Reducción.
- 2 Reutilización.
- 3 Recuperación de materiales.
- 4 Valorización energética.
- 5 Eliminación cuando las anteriores no son posibles.

Residuos y Subproductos, según Ley 10/98

El concepto de producto está íntimamente asociado a los bienes o servicios cuya producción, puesta en el mercado y venta es uno de los principales objetivos de una actividad económica dada. En función de este objetivo la empresa organiza su estructura productiva, comercial, etc. Identificar aquellos materiales que tienen la consideración de productos es relativamente fácil en cualquier sector del sistema económico en general y, por supuesto, en el sector agrario en particular. No ocurre igual cuando se intenta identificar materiales calificables como subproductos o residuos, pese a que las definiciones de ambos términos son bastantes precisas.

Así, subproducto se puede considerar como aquel bien o servicio (en definitiva “producto”), cuya producción y comercialización no es el principal objetivo de la empresa donde se “produce”. Este concepto unido a la consulta del término utilizado en inglés, by-product, establece como más correcto y clarificador el término “producto secundario”, para identificar dicho tipo de materiales (Loehr, 1977).

Por su parte, la definición de residuo cada vez es más precisa en su contenido u ámbito de aplicación. La larga experiencia derivada de la aplicación de la terminología contenida en la política y la normativa de la UE en materia de residuos, unida a la promulgación de la Ley 10/1998, aconseja la utilización de la definición de residuos establecida en el apartado “a” del artículo 3 de dicha Ley para identificar ese tipo de materiales. Dicha definición es la siguiente:

Residuo: *“Cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la obligación de desprenderse, en virtud de las disposiciones vigentes”.*

Tipos de Residuos

Podemos clasificar los diversos residuos existentes (Tabla 1) en los siguientes grandes grupos: agrícolas, forestales, ganaderos, industriales y residuos urbanos, considerando dentro de estos últimos a los residuos sólidos urbanos (basuras urbanas domésticas) y lodos de depuradora. Algunas de las características de los residuos son:

- *Residuos agrícolas:* tienen un uso sumamente válido, siendo lo más destacable su utilización en alimentación animal, producción de alcoholes y aceites, su empleo como cama para el ganado y como materia prima en las industrias papeleras.
- *Residuos forestales:* han constituido durante años la fuente energética más importante. Los principales residuos proceden de la elaboración de la madera

(corteza, serrín y viruta). El principal uso que se le daba era como combustible. Actualmente, un considerable porcentaje se dedica a la fabricación de conglomerados.

- *Residuos ganaderos*: están formados por una gran variedad de materias orgánicas sólidas y líquidas, en las que se incluyen compuestos procedentes de la digestión y actividad biológica del animal, restos de su alimentación y otros materiales arrastrados por las aguas de lavado.
- *Residuos industriales*: tanto por su heterogeneidad en los procesos de generación como por las dificultades para su clasificación y valoración, constituyen de todos los tipos de residuos el más incontrolado (Lobo, 1985). Se define como residuo industrial cualquier material pastoso, sólido o líquido, resultante de un proceso de fabricación, transformación, consumo o limpieza, que no se aprovecha. Estos residuos se podrían clasificar en inorgánicos y orgánicos. Estos últimos son muy interesantes desde el punto de vista de su aplicación agrícola. Engloban fundamentalmente, materias procedentes de industrias agroalimentarias.

Tabla 1. Cuantificación de los distintos tipos de residuos.

Tipo de Residuos	Mill. Tm/año	% Total
Domésticos.	12,80	4,70
Lodos de Depuradora.	10,00	3,67
Escombros de derribos	22,00	8,07
Total de Residuos Urbanos y similares	44,80	16,43
Residuos Inertes o asimilables a urbanos.	12,00	4,40
Residuos tóxicos y peligrosos.	1,80	0,66
Total de Residuos Industriales.	13,80	5,06
	70,00	25,68
Residuos de minería y cantería	17,00	6,24
Residuos Forestales.	35,00	12,84
Residuos Agrícolas.	62,00	22,74
	30,00	11,01
Residuos de la actividad de cría.	92,00	33,75
Residuos de mataderos.	272,60	100,00
Total Residuos Ganaderos.		
TOTAL		

Problemática de los residuos orgánicos

La evolución de la sociedad ha llegado, en el momento actual, a un modelo de vida basado en un constante

incremento del consumo. La consecuencia inmediata es hacer frente a una serie de subproductos derivados de su propio comportamiento que ponen en entredicho la continuidad de dicho modelo. Todo quehacer humano, todos los procesos industriales, tienen una gran influencia sobre el medio ambiente. Evitar esta incidencia es realmente difícil, ya que esto equivaldría a renunciar a toda actividad, tanto humana como industrial (Costa *et al.*, 1991; Garcia *et al.*, 1997). Por tanto, es necesario tomar conciencia de esta situación y actuar en consecuencia, tratando de poner en práctica las medidas necesarias para evitar su empeoramiento.

La preocupación por la protección del medio ambiente en los países occidentales figuró entre las más importantes inquietudes hasta hace pocos años. Pero en la década de los 80, problemas tan graves para la sociedad en desarrollo como el paro y la inflación y, en general, crisis económicas, desbancan a la anterior. Lo que resulta paradójico es que cuando se ha llegado a tomar conciencia verdadera del problema que pueden suponer los residuos y se empiezan a vislumbrar soluciones técnicas adecuadas, es cuando más impotentes se encuentran las economías.

La generación de residuos ha existido desde siempre. Los desechos de animales y plantas contribuyeron al sostenimiento de la vida de los ecosistemas desde un principio y el hombre, por su actividad, continuamente los está produciendo. Sin embargo, el constante incremento de las tasas de

generación de los mismos ha originado en muchos casos la ruptura del equilibrio entre la biosfera y las actividades humanas (Costa *et al.*, 1991).

Son varias las circunstancias que han contribuido a que el problema se haya tratado de resolver de forma inmediata y con resultado positivo. Entre éstas podemos citar las siguientes:

- a) La protección ambiental, una de las tareas en que está comprometida la sociedad actual. Su objetivo es detener el progresivo deterioro del medio en que vivimos, fruto de un desarrollo desordenado, egoísta y de una explotación totalmente incontrolada de los recursos ambientales y naturales. Los depósitos incontrolados de los residuos urbanos, debido a su alto contenido en sustancias putrescibles, producen olores molestos al fermentar. Además, producen humos nocivos y son fácilmente autoinflamables. Existe el riesgo de contaminación de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, con el consiguiente peligro para la salud. Todo esto lo podemos considerar como "un verdadero impacto negativo sobre el medio ambiente".
- b) Otro aspecto a tener en cuenta es el agotamiento de los recursos naturales no renovables que, junto al elevado nivel de consumo en los países desarrollados, puede conducir a una gran escasez de los mismos a medio o corto plazo.

c) También hay que señalar que, debido a los cultivos intensivos, al incremento del número de las cosechas y al uso, a veces abusivo, de los fertilizantes minerales, se está provocando un notable desequilibrio entre los componentes de los suelos agrícolas, lo cual requiere para su normalización de nuevos aportes de materia orgánica. En este aspecto, los residuos orgánicos desde el punto de vista de su aprovechamiento agrícola, pueden desempeñar un papel muy importante (García *et al.*, 1992).

Es evidente por tanto que, mediante el reciclaje de residuos a través del aprovechamiento de sustancias contenidas en ellos, o bien de su transformación en otras, se puede contribuir a aliviar los problemas planteados, disminuyendo las dificultades de su eliminación, y facilitando un mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

De entre todos los tipos de residuos orgánicos que hoy en día se generan, los residuos de origen urbano presentan una de las incidencias más significativas. Se producen diariamente, y de forma puntual, lo cual es una particularidad que les hace merecedores de un tratamiento especial entre todo el conjunto de residuos existentes (García, 1990). Además, su vertido incontrolado da lugar a un tipo de contaminación que difiere de la generada por emisiones gaseosas o líquidas. Su principal característica es la agresión a la estética del entorno y la ocupación desordenada del terreno, inutilizándolo para otros usos. Además, presentan una

característica particular y es su facilidad para transferir al medio otras formas de contaminación. Aun cuando el residuo que más problemas parece plantear es el de origen doméstico, conviene indicar que, en volumen, su cantidad es similar al de los residuos industriales, pero con la salvedad de que para estos últimos es obligación de las empresas que los generan el retirarlos de forma adecuada, mientras que para los primeros esta obligación recae en los municipios.

De los residuos que se producen, son los urbanos los que hoy en día interesan más de manera particular. Generalmente, se entiende por *residuos urbanos* los generados por cualquier actividad en los núcleos de población o en sus zonas de influencia. La naturaleza de dichos residuos es muy variada debido a la diversidad tecnológica e industrial que se centra en torno a las ciudades. En la ciudad de Murcia, y para hacernos una idea del problema que estamos tratando, se generaron alrededor 1,45 Kg/habitante día de este tipo de residuos durante el año 2006.

Se pueden citar como residuos urbanos los siguientes:

- ✓ *Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de origen doméstico*: en este grupo también se pueden incluir los procedentes de mataderos, mercados de alimentación, comercios, centros sanitarios, obras, etc. La fracción orgánica de estos residuos puede ser reciclada para su uso como enmienda orgánica de suelos, tanto frescos como compostados.

- ✓ *Lodos de depuradora generados en plantas de tratamiento de aguas fundamentalmente urbanas:* son subproductos generados durante el mencionado tratamiento, de aspecto pastoso y con elevado contenido en materia orgánica.

IMPACTO AMBIENTAL DERIVADO DEL RECICLAJE EN EL SUELO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS COMO ENMIENDA

La utilización de la fracción orgánica de los residuos, tanto en agricultura como en programas de recuperación de suelos degradados, puede ser de interés debido, por una parte, a que es un modo de aprovechar la elevada proporción de materia orgánica, rica en macro y micronutrientes que contiene; por otra, supone una vía racional de eliminación de dichos residuos, con el consiguiente beneficio medioambiental, siempre que dicho uso se realice de forma eficaz y controlada. Como característica principal está la liberación de nutrientes de forma gradual en función de la progresiva mineralización de la materia orgánica presente en los residuos, manteniendo así la fertilidad del suelo (Ayuso *et al.*, 1996).

Sin embargo, el reciclado de estos materiales en el suelo puede provocar un impacto ambiental negativo si no se emplean de manera adecuada, debido a la presencia en ellos de compuestos tóxicos. Principalmente cabe destacar el mal olor, aporte de metales pesados,

microorganismos patógenos, exceso de nutrientes y deficiencia o demanda de los mismos y salinidad.

- *Metales Pesados*. Los metales pesados pueden formar parte de la composición de los residuos urbanos, principalmente en los lodos, en función, sobre todo, de la procedencia y origen de los mismos. La importancia de éstos a la hora de evaluar las posibilidades de utilización de estos residuos viene dada por su posible acumulación en el suelo y su absorción y almacenamiento en los tejidos de las plantas, quedando así incluidos en la cadena alimentaria de los animales y del ser humano. El grado de peligrosidad de los metales pesados va ligado a dos propiedades principales como son su toxicidad y su persistencia (Moreno *et al.*, 2007; 2008).

La incidencia contaminante de los metales pesados, existentes o incorporados al suelo, depende en gran medida de la movilidad que presentan en el mismo. El pH es uno de los factores primordiales en este sentido ya que la movilidad de los metales aumenta en general, a medida que el pH disminuye. Los valores límites de metales pesados en suelos enmendados con lodos o composts, así como en los propios residuos, están en proceso de revisión por la Unión Europea, y serán cada vez menores, lo que puede hacer más restrictivo el uso como enmiendas de materiales orgánicos con contenido metálico fuera de norma. En la Tabla 2 se indican algunos rangos de metales pesados encontrados en uno de los residuos orgánicos de origen urbano que se pueden reciclar en los suelos como enmienda orgánica (lodos de

depuración de aguas urbanas), y que son de los residuos más propensos a contener dichos metales pesados.

Tabla 2 . Rango de los metales pesados presentes en los lodos de depuradora.

Metales pesados (mg/kg)	Rango	Media
Cadmio	1.0-34	4.3
Cobalto	11- 2490	14
Cromo	10- 90000	785
Cobre	48- 17000	909
Manganeso	18- 7100	909
Níquel	2-5300	217
Plomo	13- 26000	520
Zinc	101- 49000	2194

Fuente: Zufiaurre et al., 1998

- *Microorganismos Patógenos.* Desde el punto de vista agrícola es un factor importante a tener en cuenta, puesto que es interesante conocer la cantidad de microorganismos y su capacidad de supervivencia, con el

fin de prever las posibles contaminaciones por ingestión de partes comestibles de plantas que hayan podido estar en contacto con los lodos (Wong y Lai, 1996). La supervivencia en el suelo de patógenos es muy variable, puesto que va desde pocos días a varios años. Los principales tipos de patógenos presentes en residuos orgánicos, en particular en los urbanos y en aquellos de origen animal, son:

1. Virus de diferentes tipos (Hepatitis, Adenovirus y Enterovirus). Estos pueden llegar a ser muy peligrosos, aunque se presentan en número más bien reducido.
2. Bacterias pertenecientes a distintos géneros (*Salmonella*, *Shigella*, *Mycrobacterium*, *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Klebsiella* y *Escherichia*), tomada esta última, por convenio, como organismo indicador.
3. Protozoos.
4. Hongos.
5. Nematelmintos y platelmintos.

La presencia de patógenos en ciertos residuos condiciona su aplicación. Por ello, es necesario realizar procesos de acondicionamiento que permitan controlar y eliminar este riesgo de contaminación por patógenos (Tabla 3). Existen diversas metodologías para sanear desde este punto de vista los residuos orgánicos: secado térmico, estabilización con cal, otros procesos de estabilización como el compostaje etc.

De todos modos, la supervivencia va a depender de distintos factores como son la temperatura, humedad, cantidad de materia orgánica del suelo, luz, así como del tipo de suelo, puesto que la movilidad de bacterias, parásitos y virus a través del suelo, depende de su textura y del grado de saturación. Sin embargo, las partículas del suelo disminuyen la movilidad, puesto que retienen bacterias por filtración y los virus pueden quedar adsorbidos por los coloides del suelo, aumentando su tiempo de supervivencia.

- *Sustancias tóxicas.* Consideramos sustancias tóxicas a aquellos compuestos orgánicos tales como hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH_s), bifenilos policlorados (PCB_s), pesticidas fosforados, fenoles y otros compuestos orgánicos que deban ser considerados como tóxicos. La legislación Española no incluye limitaciones específicas con respecto a este tipo de sustancias presentes en los lodos, aunque si existe la legislación que regula el vertido al suelo de sustancias consideradas peligrosas (Ley 10/1998 de residuos). Los materiales originales de origen urbano cuentan también con sustancias tóxicas o fitotóxicas más lábiles que las aquí indicadas; este tipo de sustancias deben desaparecer del producto con los sistemas de estabilización que pueden ser aplicados.

Tabla 3. Condiciones de operación para una efectiva reducción de patógenos.

Proceso de estabilización	Condiciones de operación
Pasteurización	Mínimo de 30 minutos a más de 70°C.
Compostaje	-
Tratamiento Térmico	Al Menos 30 minutos a mas de 180°C.
Digestión anaerobia mesófila	Mínimo de 12 días a 35±3°C
Digestión anaerobia termófila	Al menos 10 días a una temperatura entre 55-60°C.
Estabilización química	Adición de cal hasta pH>12, suficiente para que no disminuya durante 2 h.
Radiación β	Más de 1Mrad.

Aunque son numerosos los compuestos orgánicos, potencialmente tóxicos, identificados en algunos de los residuos orgánicos aquí considerados, y en particular en los lodos derivados de la depuración de aguas urbanas, éstos se encuentran generalmente en pequeñas cantidades, siendo su persistencia, en determinados casos, bastante elevada. Los plaguicidas son los componentes más frecuentes. Una relación de sustancias tóxicas localizadas en residuos orgánicos se expone en la Tabla 4. Muchos de ellos se metabolizan en mayor o menor grado a su paso por el proceso de depuración y es

por ello que quedan muchas veces en los lodos.

Las principales razones por la que estos compuestos se consideran tóxicos son debidas a su baja solubilidad en agua, así como a que son poco biodegradables. Su bioacumulación dentro de la cadena alimentaria debida a su gran afinidad lipídica, podría causar efectos negativos en animales e incluso en el propio hombre. Estos compuestos tienen tres tipos de reacciones por las que pueden salir del medio: biodegradación, degradación química y fotoquímica. La biodegradación es bastante lenta y se produce muy a largo plazo. En el suelo, se puede llegar a producir una degradación química que implicaría procesos hidrolíticos y oxidativos (Moreno *et al.*, 2007).

Contaminante	Razón de Importancia
Plaguicidas	Generalmente hidrocarburos clorados. Se encuentran a través de la cadena alimentaria
Bifenilos policlorados	Usados en transformadores eléctricos, pinturas, plásticos, insecticidas y otros productos industriales. Solubles en grasas y sujetos a biomagnificación.
Alifáticos halogenados	Usados en extintores de incendios, refrigerantes, plaguicidas y en propulsores de sprays. Pueden dañar el sistema nervioso central y el hígado.
Éteres	Usados principalmente como disolventes de polímeros plásticos. Cancerígenos potentes.
Esteres de ftalato	Usados en la producción del PVC y termoplásticos. Pueden ser teratogénicos y mutagénicos en concentraciones bajas.

Aromáticos monocíclicos (exceptuando fenoles, cresoles y ftalatos)	Usados en la manufactura de productos químicos, explosivos, tintes y pigmentos, así como disolventes fungicidas y herbicidas. Depredadores del sistema nervioso central y pueden dañar los riñones y el hígado.
Fenoles	Usados principalmente como intermediarios en la producción de polímeros sintéticos, materiales colorantes, pigmentos y en disolventes fungicidas y herbicidas. La toxicidad aumenta con el grado de cloración
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Usados como materiales colorantes, intermedios químicos, plaguicidas, herbicidas, fuel y gasolinas. Cancerígenos.
Nitrosaminas	Usadas en la producción de compuestos químicos orgánicos y caucho. Cancerígeno potente en animales.

Tabla 4. Principales contaminantes orgánicos presentes en los lodos.
Fuente: Nayler y Loehr, 1984

Además, estos compuestos orgánicos pueden fijarse a componentes del suelo, pudiendo temporalmente quedar inactivos, ello podría repercutir en la propia degradación de la estructura del suelo, por alteración de sus componentes fijadores (arcillas y materia orgánica).

- *Demanda o Exceso de Nutrientes.* La aplicación de algunos residuos orgánicos al suelo puede producir una competencia por determinados nutrientes entre los microorganismos y las plantas, además de una posible lixiviación de los nitratos hacia los acuíferos.

- *Salinidad.* Los residuos urbanos, especialmente si han sido compostados, pueden presentar un elevado contenido de sales, lo que puede influir negativamente sobre el sistema suelo-planta al ser utilizadas como enmiendas del suelo: disminuye la capacidad de germinación de las semillas, inhibe el crecimiento de las plantas y puede empeorar la estructura del suelo. Por ello, cuando estos productos se aplican al suelo, la problemática de la salinidad que introducen en el mismo debe ser considerada y tomada en cuenta para estimar la dosis de aplicación.

Saneamiento de residuos orgánicos mediante su estabilización (Compostaje).

Los materiales orgánicos como los residuos orgánicos contienen, como hemos indicado, sustancias fitotóxicas, y materia orgánica lábil a veces en exceso, capaz de provocar en ocasiones en el suelo un aumento exagerado de actividad microbiana que podrá derivar en una competencia entre los microorganismos y la planta por algún nutriente como el nitrógeno. Tampoco hay que olvidar que los residuos orgánicos de origen urbanos, en particular los lodos de depuración, también incorporan microorganismos patógenos no deseables. Todos estos aspectos, derivados de ser materiales orgánicos no estabilizados, son subsanables si se realizan adecuados procesos de estabilización de dichos materiales orgánicos. Los procesos de compostaje son, actualmente, los más empleados para conseguir la mencionada

estabilización. El paso del material por distintas fases: fase de mineralización (fase mesófila y fase termófila) y la fase de maduración, conseguirá, sin duda, destruir las sustancias fitotóxicas y los microorganismos patógenos, garantizando su saneamiento, y originando, a su vez, una materia orgánica más estable y humificada y útil para ser empleada como fertilizante orgánico en los suelos (García *et al.*,1992). El saneamiento aludido debe de considerarse prioritario e imprescindible cuando el uso del enmendante orgánico sea en agricultura.

Los procesos de compostaje son, actualmente, los más empleados para conseguir la mencionada estabilización. El compostaje se define como un proceso *biooxidativo controlado en el que intervienen numerosos y variados microorganismos, que requiere una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, implica el paso por una etapa termófila y una producción temporal de fitotoxinas, dando al final como productos de los procesos de degradación: agua, dióxido de carbono y una materia orgánica estabilizada, libre de sustancias fitotóxicas y dispuesta para ser usada*. El paso del material por distintas fases: fase de mineralización (fase mesófila y fase termófila) y la fase de maduración, consigue destruir las sustancias fitotóxicas y los microorganismos patógenos, garantizando su saneamiento, y originando, a su vez, una materia orgánica más estable y humificada útil para ser empleada como enmienda orgánica en los suelos (García *et al.*,1992).

En este proceso se distinguen por tanto dos fases: la primera de *mineralización* de la fracción orgánica, en la que la actividad microbiana es máxima debido a la abundancia de compuestos fácilmente biodegradables y en la que se destruye gran parte de la materia orgánica lábil. La segunda fase es de *maduración* o *estabilización* del material, en la que la actividad de los microorganismos es menor, predominando la humificación, con reacciones de policondensación y polimerización y en la que se forma un producto similar al humus que se conoce con el nombre de *compost*.

El compostaje precisa de un control para conseguir un producto final apto para su uso como enmendante orgánico. Los parámetros que se deben controlar durante el proceso son:

- *Humedad*: es uno de los principales factores a controlar ya que, si es excesiva, el agua desplazara al aire de los espacios intersticiales y se desencadenará una fermentación anaerobia. Si por el contrario la humedad es baja, cesa la actividad microbiana. Los niveles óptimos de humedad se sitúan entre el 40-60%.
- *Temperatura*: su variación controla la sucesión de distintas poblaciones microbianas. La temperatura máxima que se debe alcanzar son 70°C, temperatura a la que se destruyen los microorganismos patógenos y semillas de malas hierbas.
- *Aireación*: su importancia es clara por tratarse de un proceso de fermentación aerobia y se consigue mediante

el volteo periódico de las pilas o insunflando de aire forzado. En ausencia de aire se obtiene un material no aceptable y una liberación de malos olores.

EFFECTOS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS SOBRE LOS SUELOS

De forma general, la adición de enmiendas orgánicas puede influir positivamente en las propiedades físicas del suelo (Stevenson, 1982; Roldán *et al.*, 2003), mejorando su estructura, incrementando la formación y estabilidad de agregados, y la capacidad de retención hídrica del suelo. Este hecho disminuye la escorrentía, evitando el lavado de nutrientes, y mejora el desarrollo vegetal (Bastida *et al.*, 2007). La actividad microbiana se verá positivamente influenciada por el mayor contenido de fuentes de energía y nutrientes en el suelo, aumentando su desarrollo y actividad, lo que tendría efectos positivos sobre el crecimiento vegetal (Figura 2). De esta manera, se cierra un ciclo de fertilidad en el suelo.

La mejora en las propiedades físicas, incrementará el desarrollo vegetal (que a su vez aporta restos orgánicos), influyendo positivamente en la microbiología del suelo. A más largo plazo, el desarrollo vegetal afecta positivamente a la estructura del suelo: las hifas y mucílago de hongos son en gran parte responsables de la formación de microagregados. De manera más específica, algunas de las propiedades que pueden verse mejoradas con la aplicación a nuestros suelos de

enmiendas orgánicas de calidad, se exponen a continuación:

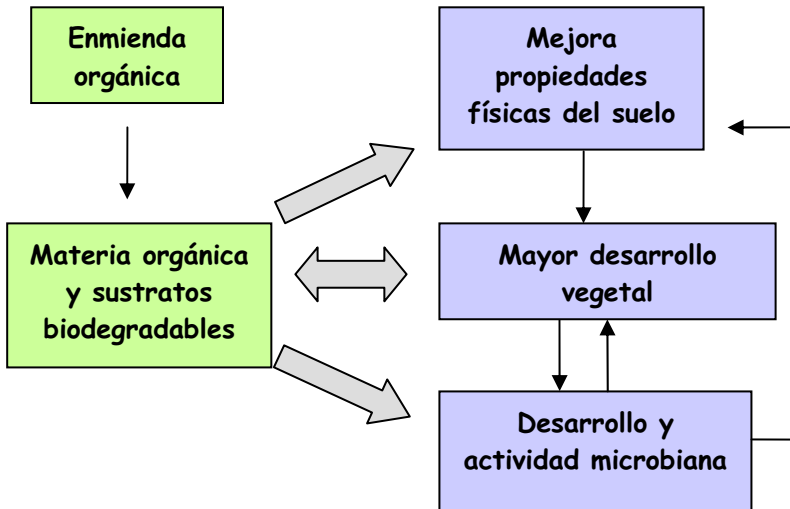


Figura 2. Efectos de la adición de materia orgánica en el suelo

a) Efecto sobre las propiedades físicas

Uno de los efectos más característicos que provoca la enmienda con este tipo de residuos es la mejora de las propiedades físicas del suelo. La materia orgánica de los residuos orgánicos considerados como enmiendas, cuenta con una densidad muy baja, y por tanto, cuando dichos residuos son incorporados a un suelo, se reduce su densidad aparente, lo cual puede ser atribuible tanto a la baja densidad de estos productos como a su tendencia a aumentar el espacio poroso. La adición de residuos

orgánicos influye positivamente sobre la formación y estabilidad de los agregados en el suelo (Lax *et al.*, 1994), aunque este efecto disminuye con el tiempo a medida que se mineraliza la materia orgánica incorporada. El aumento detectado en suelos enmendados sobre los agregados estables es fundamental para que mejore la productividad y fertilidad de suelos, en particular cuando éstos se encuentran sometidos a climas semiáridos, y severos procesos degradativos (Roldán *et al.*, 2003). La riqueza en materia orgánica de los residuos orgánicos y su carácter coloidal mejora el balance hídrico del suelo, al aumentar la capacidad de retención hídrica, lo que permite al suelo resistir mejor los períodos de sequía (Hortensine y Rothwell, 1972). Este hecho es particularmente de interés en zonas deficientes en agua, con escasez de lluvia, y que necesitan almacenar agua en el suelo para evitar sequías permanentes.

b) Efecto sobre las propiedades fisico-químicas

Los residuos orgánicos al ser incorporados al suelo ejercen un efecto tampón debido a la presencia de iones Ca^{+2} y de sales básicas (Hernando, 1988). La capacidad de cambio catiónica aumenta en suelos tratados con materiales orgánicos. Cualquier enmienda que potencie la formación de humus, producirá un aumento significativo de ésta ya que el humus posee una capacidad de cambio catiónica que es de 3 a 6 veces superior a la de las arcillas del suelo (Moreno *et al.*, 2008). Según Schnitzer (1978) del 20 al 70% de la capacidad de cambio catiónica de muchos suelos es causada por el humus. Díaz (1992)

observó que la capacidad del suelo para retener cationes aumentaba sensiblemente con la dosis de material orgánico adicionado. Sin embargo, otros autores (Hernando, 1988) observaron que al incorporar otro tipo de material como los compost de basuras el aumento era menor.

Consideración aparte merece la influencia que una enmienda orgánica tiene sobre la conductividad eléctrica de un suelo. Muchas de las enmiendas que proceden de residuos orgánicos contienen cantidades apreciables de sales, las cuales pueden repercutir negativamente en los suelos donde se adicionen, contribuyendo en algunos casos a su posible salinización. Estos efectos están teniendo cada vez más importancia

c) Efecto sobre las propiedades químicas

Con la adición de enmiendas orgánicas (fracción orgánica de residuos) al suelo se produce un incremento en el contenido de materia orgánica. Este incremento dependerá de las características del suelo, de la dosis de material orgánico y de la forma y frecuencia de aplicación (Hortensine y Rothwell, 1972; Moreno *et al.*, 2007). Respecto al efecto de estos materiales sobre el contenido y formas de sustancias húmicas del suelo, la información existente es escasa. Adani y Tambone, (2005) indicaron que la incorporación de compost de residuos sólidos urbanos tiende a aumentar ligeramente el contenido de huminas y de ácidos húmicos de un suelo pardo, disminuyendo el contenido de ácidos fúlvicos. Hernando (1988) observó que estos materiales, incorporados en el suelo,

incrementaban ligeramente los porcentajes de nitrógeno e hidrógeno de los ácidos húmicos, así como su relación E_4/E_6 , lo que implicaría su menor tamaño de partícula y de peso molecular. Los residuos orgánicos urbanos aumentan los contenidos en macro y micronutrientes del suelo, debido a que éstos se presentan en cantidades importantes en los citados residuos (Ayuso *et al.*, 1996). Estos materiales aportan el nitrógeno y fósforo mayoritariamente en forma orgánica mientras que el resto de macronutrientes son aportados en forma inorgánica. La eficacia de estos residuos como fertilizantes depende de diversos factores tales como el tipo de suelo y tipo de cultivo, existiendo una gran controversia respecto a esto (Gallardo-Lara y Nogales, 1987). A pesar de ello, estos autores mantienen que las enmiendas orgánicas supone una ventaja de los residuos orgánicos frente a los fertilizantes inorgánicos es el ser una fuente gradual de nutrientes.

d) Efectos sobre las propiedades microbiológicas y bioquímicas

El aporte de residuos orgánicos, como enmienda orgánica, al suelo favorece el incremento de la población microbiana, debido a la mejora de las propiedades físicas. Como se ha comentado anteriormente, la enmienda orgánica crea un microhábitat muy adecuado para el desarrollo de diversas poblaciones microbianas, y de su actividad (García *et al.*, 2005; Ros *et al.*, 2008), y a la disponibilidad de una fuente de carbono fácilmente biodegradable. Este aumento se traduce a su vez en un

incremento de las enzimas y metabolitos en el suelo. Una enmienda orgánica como las propuestas, aporta al suelo una enorme cantidad de sustratos, capaces de fomentar la síntesis de una gran diversidad de enzimas, fundamentalmente del tipo hidrolítico (Moreno *et al.*, 2007; Tejeda *et al.*, 2007). Las enzimas son responsables de la mayor parte de las reacciones que intervienen en los procesos de mineralización e inmovilización de los nutrientes en el suelo y por tanto están en relación con la disponibilidad de los mismos para la planta (Perucci, 1990). Algunos de los metabolitos liberados por los microorganismos (tipo vitaminas y/o aminoácidos, etc.) o moléculas de bajo peso molecular procedentes de la mineralización de la materia orgánica pueden influir de forma positiva y directa sobre el crecimiento vegetal. También es importante indicar que parte de estas enzimas quedarán protegidas de la degradación e inactivación, al quedar inmovilizadas por la fracción húmica de la materia orgánica incorporada, mediante formación de complejos tipo enzima-humus (Dick y Tabatabai, 1992; Ceccanti y Garcia, 1994).

Además de lo señalado, interesa advertir que los aportes orgánicos al suelo conlleva la entrada en el mismo de una gran variedad de microorganismos, los cuales a la fuerza deben de incidir en la cantidad y actividad de las poblaciones microbianas. Sin embargo, un aspecto a tener presente es que dichos aportes no deben suponer desde ningún punto de vista, ni por supuesto, a lo largo del tiempo post-aplicación, un riesgo

para la biodiversidad microbiana del suelo (Klammer *et al.*, 2008; dicho riesgo podía venir motivado por las sustancias tóxicas que puedan incorporarse al suelo y que afecten negativamente a una serie determinada de microorganismos, o que alienten un desequilibrio microbiano debido al hecho de introducir ciertos sustratos implicados exclusivamente en un determinado proceso (Bastida *et al.*, 2007, 2008).

La capacidad que tienen las enmiendas orgánicas de aportar un cierto efecto biocontrol (o biopesticida), debido a que intervienen sobre algunos microorganismos patógenos del suelo (Bernal-Vicente *et al.*, 2008; Cayuela *et al.*, 2008), es hoy en día de gran interés, y es el resultado de un acción biológica directamente implicada con la mencionada enmienda.

EFFECTOS SOBRE LAS PLANTAS

Existen gran cantidad de trabajos de investigación, cuyos resultados demuestran que la aplicación de los lodos residuales urbanos produce una mejora en el rendimiento agrícola. Así se ha constatado que los suelos enmendados con lodos residuales y estiércol animal mejoran el crecimiento y producción de cultivos vegetales (Moreno *et al.*, 2008) y de plantas ornamentales. Este efecto positivo puede deberse tanto a la propia mejora física que se consigue sobre el suelo (mejora de su capacidad de retención hídrica, porosidad, estabilidad de agregados, etc.), como a ciertos compuestos que incorpora la enmienda, y que se encuentran en su parte orgánica (compuestos de tipo fitohormonal), los cuales

pueden actuar como promotores del crecimiento vegetal. En este sentido, las sustancias húmicas que se introducen en el suelo junto con la mencionada enmienda orgánica también pueden mostrar un efecto positivo frente a los rendimientos vegetales (Ayuso *et al.*, 1996).

Sin embargo, tampoco faltan las excepciones en este mismo sentido. De hecho, aplicaciones continuadas de lodos procedentes de depuradoras de aguas residuales urbanas, empleados como enmienda orgánica, sobre las tierras de cultivo pueden producir una acumulación de metales pesados a niveles tóxicos para las plantas (Moreno *et al.*, 2007). La acumulación de metales pesados en los cultivos puede suponer además, un riesgo para la salud humana. Este hecho ha llevado a imponer límites sobre la cantidad y frecuencia de la aplicación de los lodos sobre las tierras de cultivo, tal y como se describió en el apartado de riesgos del empleo de algunos residuos orgánicos sobre los suelos.

En general, el aumento de concentración de un elemento potencialmente tóxico en los tejidos de plantas que crecen en suelos donde se aportan algunas enmiendas como los lodos cargados de este elemento, no suele ser proporcional a la cantidad de elemento añadido. Las diferentes especies vegetales y aún sus distintas variedades difieren en la tolerancia a estos elementos. Suelen acumularse con preferencia en las hojas, tallos, raíces y más en los tejidos viejos que en los jóvenes. Por el contrario, las semillas los concentran en menor proporción (Costa *et al.*, 1991).

CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LA PROBLEMÁTICA DEL BINOMIO SUELO-RESIDUO ORGÁNICO

Premisas a tener en cuenta

La problemática que se plantea, en la actualidad en relación a los residuos urbanos de origen orgánico, principalmente a los residuos urbanos (basuras domésticas) y lodos de depuración urbana, pasa por dar a estos materiales la salida racional más coherente, conjugando tanto los aspectos técnicos, como el medio ambiental y el económico-social. De no hacerlo, la acumulación incontrolada de estos subproductos causaría focos de infestación no admisibles bajo ningún concepto (Costa et al., 1991).

Cuando una ciudad moderna trata de enfocar el problema de sus residuos de una manera racional debe plantearse varias soluciones: desde la incineración de los residuos orgánicos (con o sin recuperación de energía), pasando por su traslado a vertedero controlado (tema éste que dejará de tener validez para una gran parte de los residuos orgánicos en el futuro, debido a las legislaciones europeas que se avecinan), hasta el reciclado en el suelo de este tipo de materiales. Pero no es sólo la mencionada problemática creada en torno a los residuos orgánicos, fundamentalmente de origen urbano, animal, agrícola o agroindustrial lo que nos preocupa. Existe un problema añadido que afecta a gran parte de los

suelos del área mediterránea, y en particular a las zonas del sudeste español: la degradación y desertificación que existe en muchos de esos suelos, debido fundamentalmente a acciones antrópicas agresivas que se han producido durante años, y a la adversa climatología existente (clima semiárido) en estas zonas. Todo ello conduce a una paulatina disminución de la fertilidad natural de los suelos, siendo un factor clave en la degradación que se está produciendo en los mismos su escaso nivel de materia orgánica (García *et al.*, 1996; 1997). Puesto que en amplias zonas del sudeste español, escasean las fuentes de materia orgánica tradicional (turberas y estiércoles), interesa plantearse la posibilidad de aunar las dos problemáticas mencionadas (Residuos y Suelos), con la finalidad de intentar resolver ambas. *La solución pasaría por emplear como fuente de materia orgánica para los suelos aquella contenida en los residuos urbanos de origen orgánico, consiguiendo de este modo, por una parte, mejorar la fertilidad de estos suelos, y por otra, eliminar racionalmente los residuos mediante su reciclado en los mismos.*

Es por ello que cuando hace años se empezó a considerar todo el conjunto de alternativas existentes para dar salida a ciertos residuos orgánicos, su reciclado en el suelo se consideró como la más lógica “a priori”. Y en ello se volcaron nuestros esfuerzos: conseguir que esos residuos se convirtiesen en un **RECURSO** para mejorar la calidad de nuestros suelos.

Situación actual

Interesa hacer ahora una serie de advertencias que hay que tener presentes para poder establecer algunas conclusiones sobre la temática que aquí se está exponiendo. Cuando nosotros argumentamos que pretendemos emplear, como fuente de materia orgánica para los suelos, la contenida en los residuos urbanos como las basuras domésticas, nos estamos refiriendo a la fracción putrescible que queda después de eliminar, bien por recogida selectiva, bien en planta de tratamiento y reciclado, inertes como metales, plásticos, vidrio, papel, cartón, etc. En la misma línea, cuando hablamos de usar lodos de depuración urbana nos referimos a aquellos originados en las plantas de tratamiento de aguas de procedencia exclusivamente (o muy mayoritariamente) urbana, no industrial. Es fundamental por tanto eliminar inertes, los cuales no van a producir ningún efecto favorable en el suelo al no formar parte de materia orgánica putrescible, y por supuesto, evitar la problemática de compuestos indeseables que puedan ser incorporados a ciertos lodos industriales. Hay que indicar pues de manera inequívoca que los materiales de partida que pueden constituir una adecuada fuente de materia orgánica para los suelos, deben de ser materiales originales de calidad, y no un residuo orgánico obtenido de forma inadecuada.

Además de lo indicado, existen otros factores, capaces también de generar problemas en los suelos o cultivos cuando se adicionan enmiendas orgánicas

basadas en residuos orgánicos como los aquí mencionados, y son todos aquellos derivados de su elevado contenido en materia orgánica fresca (no estabilizada), con un exceso a veces de sustancias fitotóxicas y materia orgánica lábil, capaz de provocar en el suelo competencia entre microorganismos y planta por algún nutriente, como el nitrógeno, Tampoco hay que olvidar que pueden existir problemas de microorganismos patógenos no deseables, así como mal olor. Todos estos aspectos, derivados como hemos dicho de ser materiales orgánicos frescos, son subsanables si se realizan adecuados procesos de estabilización de dichos materiales orgánicos. Los procesos de compostaje son, actualmente, los más empleados para conseguir la mencionada estabilización. El paso del material por fases mesófila, termófila y de maduración consigue sin duda destruir sustancias fitotóxicas y microorganismos patógenos, garantizando su saneamiento y originando a su vez una materia orgánica más humificada y útil para ser empleada como fertilizante orgánico en los suelos (Banegas *et al.*, 2007). El saneamiento aludido debe de considerarse prioritario e imprescindible cuando el uso de una enmienda orgánica sea en agricultura.

Llegados a este punto deberíamos de decir con claridad lo siguiente: cuando los materiales orgánicos no resulten contaminados con inertes, o bien con otros contaminantes inorgánicos u orgánicos tipo metales pesados, PCB'S, etc., y sean sometidos a adecuados procesos de estabilización de su materia orgánica, podrán

ser empleados en agricultura o rehabilitación de suelos como enmendantes orgánicos sin ningún riesgo, y con los beneficios consabidos que reporta al suelo toda adición de materia orgánica:

- Mejora de las propiedades físicas del suelo.
- Aumento de los contenidos de materia orgánica y nutrientes.
- Clara mejora de su fertilidad biológica y bioquímica.
- Como consecuencia de su empleo se consigue una calidad del suelo adecuada para que éste sea un soporte de vegetación estable.

Consideramos básico, en primer lugar, ser conscientes de que las enmiendas orgánicas debe ir encaminadas a mejorar la calidad del suelo donde se adicionan, y nunca a ser un método encubierto de eliminación irracional de residuos. Es necesario partir de materiales de calidad. Es por ello que todas las políticas tendentes a mejorar recogida selectiva en basuras, con una buena separación de la fracción orgánica sin contaminantes, así como a la obtención de lodos de depuración urbana sin contenidos metálicos, hay necesariamente que apoyarlas e incentivarlas. De esta forma, no existirá conflicto alguno desde el punto de vista medioambiental para su empleo.

En segundo lugar, consideramos que las legislaciones deben de acometer con destreza las nuevas situaciones que se pueden originar de utilización masiva de enmiendas orgánicas no tradicionales, en concreto

sobre la base de residuos orgánicos de origen urbano. Dicha legislación ha de ser consciente de que el uso de estas enmiendas puede ser continuado, y que por tanto, debe considerarse de interés establecer la detección de contaminantes que no se habían tenido en cuenta hasta ahora, a fin de que se ponga coto a los mismos (residuos de plaguicidas, etc.). En la temática concreta de metales pesados, lo ideal sería que no existiesen dichos metales; pero si los hay, convendría quizás marcar valores más restrictivos en lo que respecta a su contenido total, y obligar, así mismo, a la determinación de fracciones extraíbles, más representativas de la potencial peligrosidad del paso a la planta de dichos elementos.

Además de existir una legislación sobre los residuos orgánicos que pueden ser reciclados en el suelo como enmiendas orgánicas, también existen normativas respecto a las dosis permitidas en función del nivel de metal pesado y tipo de suelo (Real Decreto 1310/1990 de 20 de Octubre). Y es aquí donde interesa hacer hincapié en el aspecto del control. Las administraciones correspondientes deben de tomar parte activa, y regular con exactitud los controles que sean precisos, y quién los debe de realizar, para que su empleo no suponga riesgo alguno en el tiempo.

Nuestra postura es totalmente abierta al **USO RACIONAL** (nunca un uso arbitrario) de nuevas fuentes de materia orgánica que puedan ser adicionadas a los suelos con garantía. En este sentido, aquellas de origen urbano, o las que sin serlo cumplan los condicionantes de

no contaminación expuestos con anterioridad, pueden constituir un conjunto de enmiendas orgánicas económicas, así como una base para:

- a) Una adecuada Agricultura Sostenible, donde el empleo de fertilizaciones orgánicas permita un menor consumo de fertilizantes minerales, así como de otros agroquímicos debido a su efecto como biocontrol.
- b) Estrategias contra la degradación y desertificación de suelos, permitiendo así la conservación de un recurso natural clave para el mantenimiento de la vida.

Como CONCLUSION de todo lo aquí se ha expuesto, queremos dar un SI CON CONDICIONES al reciclado en el suelo de materiales orgánicos diversos (como los de origen urbano). Su empleo nunca debe ofrecer problemas para los suelos donde se adiciona, y mucho menos constituir riesgo alguno para plantas, animales y hombre. Su uso debe por tanto ofrecer garantías suficientes en el sentido anteriormente mencionado. Por ello proponemos tener presentes las siguientes consideraciones para un adecuado empleo de este tipo de materiales orgánicos:

■ *Mejorar decididamente los procesos de generación de residuos orgánicos, en particular los de origen urbano, con el fin de procurarles la mejor calidad, y por tanto la menor contaminación posible en compuestos indeseables como inertes, metales pesados, etc. Políticas de recogidas selectivas para las basuras urbanas y de separación de efluentes (urbanos e industriales) en el*

caso de lodos en las plantas de depuración de aguas, así como la eliminación de riesgos en general para cualquier residuo orgánico que quiera ser reciclado en el suelo, deberían de ser mayoritariamente apoyadas.

■ *Necesidad de realizar análisis de control de calidad más exhaustivos que los que actualmente se exigen, para aquellos residuos orgánicos que vayan a ser reciclados en el suelo.*

■ *.Rechazo claro para ser reciclados en el suelo de todos aquellos residuos orgánicos que no generen un claro “beneficio” al suelo y a su funcionalidad, y por supuesto, rechazo de todos aquellos que puedan originar en los suelos donde se adicionan riesgos de contaminación a corto, medio y largo plazo.*

■ *Realización, en particular cuando su empleo sea en agricultura, de procesos de estabilización para el saneamiento de estos materiales orgánicos, bien ejecutados y controlados.*

■ *Necesidad de ofrecer información concisa, tanto sobre las características de los residuos que pueden ser empleados como enmendantes de suelos, como de sus formas de empleo.*

■ *Obligatoriedad de establecer controles de seguimiento coherentes, eficaces, y sobre todo reales, sobre aquellos suelos que son enmendados, ofreciendo las recomendaciones oportunas al usuario de este tipo de productos.*

BIBLIOGRAFIA

ADANI F. y TAMBONE F. 2005. Long-term effect of sewage sludge application on soil humic acids. *Chemosphaera*, 60, 1234-1245

ALEF, K. 1991. Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie. Ecomed Laudsberg/Lench. Germany.

ALLISON, LE. 1973. Oversaturation method for preparing saturation extracts for salinity appraisal. *Soil Science*, 116, 65-69

AYUSO, M. 1995. Utilización de residuos urbanos como enmiendas orgánicas sólidas y líquidas: valoración agronómica y efectividad frente a enmiendas tradicionales. *Tesis Doctoral. Universidad de Murcia*.

AYUSO, M., HERNÁNDEZ, T., GARCIA, C. y PASCUAL, J.A., 1996. A comparative study of the effect on barley growth of humic substance extracted from municipal wastes and from traditional organic materials. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 59, 313-319.

AYUSO, M., HERNÁNDEZ, T., GARCIA, C. y PASCUAL, JA., 1996. Evolution of urban wastes for agricultural use. *Soil Science and Plant Nutrion*, 42, 105-111.

BANDICK A.K. y DICK, RD. 1999. Field Management Effects on Soil Enzyme Activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 31, 1.471-1.479.

BANEGAS, V., MORENO, JI., LEÓN, G., GARCÍA, C. y HERNÁNDEZ, T. 2007 Differences between anaerobic and aerobic sewage sludges during composting. *Waste Management* , 1317-1327.

BASTIDA, F., MORENO, JL., HERNÁNDEZ, T. y GARCÍA, C. 2007. Microbial activity in non-agricultural degraded soil exposed to semiarid climate. *Science of Total Environment*. 378, 183-186

BASTIDA, F., MORENO, JL., GARCIA, C., y HERNANDEZ, T. 2007. addition of urban waste to semiarid degraded soil: long-term effect. *Pedosphere*, 17

BASTIDA, F., BARBERÁ, GG., GARCÍA, C., y HERNÁNDEZ, T. 2008. Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions. *Applied Soil Ecology*. , 38, 62-70.

BERNAL-VICENTE, A., ROS, M., TITTARELLI, F., INTRIGLIOLO, F., PASCUAL, J.A. 2008. citrus compost and its water extract for cultivation of melon plants in greenhouse nurseries. evaluation of nutriactive and biocontrol effects. *Bioresource Technology* doi:10.1016/j.biortech.2008.04.019

BONMATÍ, M., JIMÉNEZ, P., ALVAREZ, H., CALERO, E., JULÍA, M., MORILLO, M., y NUÑEZ, E., 2000. Evolución de actividades enzimáticas en el proceso restaurador de dos suelos procedentes de la explotación de canteras de Cataluña utilizando altas dosis de lodos de depuradora. En: García, C., Hernández, M.T. (Eds), Investigación y Perspectivas de la Enzimología de Suelos en España. CEBAS-CSIC, pp. 209-293.

BURNS R.G. 1982. Enzyme Activity in Soil: Location and a Possible Role in Microbial Ecology. *Soil Biology and Biochemistry*. 14: 423-427.

CANET, R., ALBIACH, R., y POMARES, F, 2000. Los índices de actividad biológica como herramienta de diagnóstico de la fertilidad del suelo en agricultura ecológica. En: García, C., Hernández, M.T. (Eds), Investigación y Perspectivas de la Enzimología de Suelos en España. CEBAS-CSIC, pp. 11-39.

CAYUELA, M.L., MILLNER, P.D., MEYER, S.L.F. y ROIG, A. 2008. A. potential of olive mill waste and compost as biobased pesticides against weeds, fungi, and nematodes. *Science of the Total Environment*, 399(1-3): 11-18. 2008.

CECCANTI, B. y GARCIA, C. 1994. Couple chemical and biochemical methodologies to characterize a composting process and the humic substance. *En: N. Senesi and T. M. Miano (Eds). Humic substance in the global Environmental and implications on human health. Elsevier. New York.*

COSTA, F., GARCIA, C., HERNADEZ M.T. y POLO, A. 1991. Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. *Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS), CSIC.*

DIAZ, E. 1992. Efecto de la adición de residuos urbanos en la regeneración de suelos degradados como medio de control de la desertificación. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.

DICK A. y TABATABAI, MA. 1992. Significance and Potential Use of Soil Enzymes. *En Meeting, FJB (Ed.). Soil Microbial Ecology: Applications in Agriculture and Environmental Management. Marcel Dekker, NY, USA, 95-127.*

DIRECTIVA DEL CONSEJO 91/156/CEE de 18 de marzo de 1991 relativa a residuos.

DORAN J.W. 2002. Soil Health and Global Sustainability Translating Science into Practice. *Agriculture Ecosystems Environment. 88: 119-127.*

DORAN, JW., JONES, AJ., ARSHAD, MA., y GILLEY, JE. 1999. Determinants of Soil Quality and Health. *En: Rattan Lat (Eds.). Soil Quality and Soil Erosion. CRC Press, Florida. 39-57.*

DORAN, J.W. y PARKIN, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Defining Soil Quality for sustainable Environmental. Doran, J.W., Coleman D.C., Beezdecek D.F. y Stewart B.A. (Eds) SSSA. Madison.

DORAN, JW. y SAFLEY, M. 1997. Defining and Assessing Soil Health and Sustainable Productivity. En Pankhurst, C. Doube, B.M. Gupta V.V.S.R. (Eds.). Biological Indicators of Soil Health. 1-22 CAB INTERNATIONAL, New York.

DORAN, JW. y ZEISS, MR. 2000. Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *Applied Soil Ecology*. 15, 3-11.

GALLARDO-LARA, F. y NOGALES, R. 1987. Effect of the application of town refuse compost on the soil-plant system. A review. *Biological Wastes*. 19: 35-62.

GARCIA, C. 1990. Estudio del compostaje de residuos orgánicos. Valoración agrícola. *Tesis Doctoral. Universidad de Murcia*.

GARCIA, C., HERNANDEZ, T., COSTA, F., CECCANTI, B. y CIARDI, C. 1992. Changes in ATP content, enzyme activity and inorganic nitrogen species during composting of organic wastes. *Canadian Journal of Soil Science*. 72, 243-253.

GARCIA, C., HERNANDEZ, T. y COSTA, F. 1994. Microbial activity in soils under mediterranean environmental conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 26, 1185-1191.

GARCIA, C. y HERNANDEZ, T. 1996 Influence of salinity on the biological and biochemical activity of calcciorthid soil. *Plant and Soil*, 178, 255-263.

GARCIA, C., ROLDAN, A. y HERNÁNDEZ, T., 1997. Changes in microbial activity after abandonment of cultivation in a semiarid Mediterranean Environmental. *Journal of Environmental Quality*. 26, 285-291.

GARCÍA, C. y HERNÁNDEZ, T. 2003. Microbial activity in degraded soils under semiarid climate. change with their rehabilitation. En: Preserving Soil Quality abd Soil Biodiversity. The role of surrogate indicators. M. C. Lobo and J.J. Ibañez (Eds), Sdad Coop. De Artes Gráficas, Zaragoza. ISBN:84-451-2434-X,.

GARCIA, C, ROLDAN, A. y HERNANDEZ, T. 2005. Ability of different plant species to promote microbiological processes in semiarid soil. *Geoderma*, 124, 193-202

GIANFREDI, L. y BOLLAG, JM., 1996. Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. En: Stotzky, G., Bollag, J.-M. (Eds.), Soil Biochemistry, Vol. 9. Marcel Dekker, New York, pp. 123-193.

GIL-SOTRES, F., TRASAR-CEPEDA, MC., CIARDI, C. y CECCANTI, B., 1992. Biochemical characterisation of biological activity in very young mine soils. *Biology and Fertility of Soils* 13, 25-30.

GOBERNA, M; PASCUAL, JA; GARCIA, C, SANCHEZ, J. 2007 do plant clumps constitute microbial hotspots in semiarid mediterranean patchy landscapes?. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, (5) 1047- 1054.

GRIFFITHS BS., BONKOWSKI, M., ROY, J. y RITZ, K. 2001. Functional Stability Substrate, Utilisation and Biological Indicators of Soil Following Environmental Impacts. *Applied Soil Ecology*. 16, 49-61.

HERNANDO, S. 1988. Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos como fuente de materia orgánica y sus efectos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. *Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid*.

HORTENSTINE, CC. y ROTHWELL, D.F. 1972. Pelletized municipal waste refuse compost as a soil amendmentand nutrient source for sorghum. *Journal Environmental Quality*., 2, 343-344.

INSAM, H. 1990. Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime? *Soil Biology & Biochemistry* 22, 525-532.

KLAMMER S., DELL'ABATE MT., ROS M., KNAPP B. y INSAM H. 2008. bacterial community patterns and thermal analyses of composts of various origins. *Waste Management & Research* 26, 1-15

LADD, JN. 1978. Origin and Range of Enzyme in Soil. En: Burns, R.G. (Ed.), *Soil Enzymes*. Academic Press, London, pp. 51-96.

LAX Y., RUBINSTEIN, S. y BREISBART, H., 1994. Epidermal growth factor induces acrosomal exocytosis in bovine sperm. *FEBS Letters* 339, 234-238.

LEIRÓS, MC, TRASAR-CEPEDA, C., SEOANE, S. y GIL-SOTRES, F., 2000. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperature-humid zone (Galicia, N.W. Spain): general parameters. *Soil Biology & Biochemistry* 32, 747-755.

LEY 10/1998, de 21 de abril de residuos. *BOE* 96.

LOBO, MC., SASTRE, I. y VICENTE, MA., 2000. Las enzimas como medida del impacto ambiental en los suelos. En: García, C., Hernández, M.T. (Eds), *Investigación y Perspectivas de la Enzimología de Suelos en España*. CEBAS-CSIC, pp. 297-352.

LOEHR, 1997. N.C. Dept Natural Resources and Community Development, División of Environmental Management, 1983a, 1982b.

MORENO, J.L., JINDO, K., HERNÁNDEZ, T. y GARCÍA C. 2007. Total and immobilized enzymatic activity of organic materials before and after composting. *Compost Science and Utility*. 15: 93-100.

MORENO, JL., ALIAGA, A., NAVARRO, S., HERNÁNDEZ, T. y GARCÍA, C. 2007. Effects of atrazine on microbial activity of semiarid soils. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35, 120-127

MORENO, JL., BASTIDA, F., GARCIA, C. y HERNÁNDEZ, T. 2008. Relationship between the agricultural management of a brócoli crop and the microbial activity of a semiarid soil. *Com Soil sc. Plant Anal.* 39, 421-439.

NANNIPIERI, P., CECCANTI, B. y GREGO, S. 1990. Ecological significance of the biological activity in soil. En: Bollag, J.-M., G. Stotzky, G. (Eds.), *Soil Biochemistry*, Vol 6. Marcel Dekker., New York, pp. 293-355.

NANNIPIERI, P., GRECO, S. y CECCANTI, B. 1990. Ecological significance of the biological activity in soil. En: *J.M. Bollag and G. Stozky (Eds). Soil Biochemistry, vol 6. Marcel Dekker. New York.*

NANNIPIERI, P. 1994. The potential use of soil enzyme as indicators of productivity, sustainability and pollution. En: Pankhurst, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R., P.R. Grace, P.R. (Eds.), *Soil Biota: Management in Sustainable Farming Systems*. CSIRO, Adelaide, pp. 238-244.

NAYLER, L M. y LOEHR, RC. 1982. Priority pollutants in municipal sewage sludge. *Part I. Biocycle*, July/August:18–27.

OCIO, JA. y BROOKES, PC. 1990. An evaluation of methods for measuring the microbial biomass in soils following the recent addition of wheat straw and characterisation of biomass the develops. *Soil Biology & Biochemistry* 22, 685-694.

OVERBECK, J. 1991. Early studies on ecto- and extracellular enzymes in aquatic environments. En: Chróst, R.J. (Ed.), *Microbial enzymes in aquatic environments*. Springer, New York, pp. 1-5.

PAPENDICK, IR. y PARR, JF. 1992. Soil quality: the key to a sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture* 7, 2-3.

PASCUAL, JA., NASEBY, DC. y LYNCH, JM. 2000. Effect of biocontrol strains of *Trichoderma* on plant growth, *Pythium Ultimum* population, soil microbial communities and soil enzyme activities. *Journal of Applied Microbiology*. 88, 161-169.

PERUCCI, P.1990. Effect of the addition of municipal solid-waste compost on microbial biomass and enzyme activities in soil. *Biology and Fertility Soils* 10.221–226

POWLSON, DS., BROOKES, PC. y CHISTENSEN, BT. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry* 19, 159-164.

ROLDÁN A., CARAVACA, F., HERNÁNDEZ, T., GARCÍA, C., SÁNCHEZ-BRITO, A., VELÁSQUEZ, C. y TISCAREÑO, M. 2003. No-Tillage, Crop Residue Additions, and Legume Cover Cropping Effects on Soil Quality Characteristics Under Maize in Patzcuaro Watershed (Mexico). *Soil and Tillage Research*. 1786, 1-9.

ROS M., GOBERNA M., PASCUAL, JA. y INSAM H. 2008. 16s rDNA analysis reveals low microbial diversity in community level physiological profiles. *Journal of Microbiological Methods* 72, 221-226

ROS, M. 2000. Recuperación de suelos agrícolas abandonados mediante el reciclaje en los mismos de residuos orgánicos de origen urbano. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.

ROSS, DJK., TATE, R., CAIRNS, A., MEYRICK, KF. y PARSIC, E.A. 1982. Restoration of pasture after topsoil removal: effect of soil carbon and nitrogen mineralization, microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biology & Biochemistry* 14, 575-581.

SARKAR J., LEONOWICZ, A. y BOLLAG, JM. 1989. Immobilization of Enzymes in Clays and Soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 21, 223-230.

SCHNITZER, M.1978 Humic substances and reactions. En: Soil Organic matter. M. Schnitzer, S.U. Khan (Ed). New York.

SINSABAUGH, RL. 1994. Enzymic analysis of microbial pattern and process. *Biology and Fertility of Soils* 17, 69-74.

SKUJINS, J. 1978. History of Abiotic Soils Enzyme Research. En: Burns, R.G. (Ed.), *Soil Enzymes*. Academic Press, London, pp. 1-49.

STEVENSON, FJ. 1982 Humus chemistry: Genesis, Composition, Reactions. Wiley InterScience Publications. John Wiley and Sons. New York.

TATE, R.L. III. 1987 Soil organic matter: Biological ecological effects. Wiley InterScience Publication (Ed.) John Wiley and Sons. New York.

TEJADA, M., MORENO, JL., HERNÁNDEZ, T. y GARCÍA, C. 2007. Application of two beet vinasse forms in soil reclamation: effects on soil properties in arid environment in southern Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 119, 289-298.

TRASAR-CEPEDA, C., LEIRÓS, MC., GIL-SOTRES, F. y SEOANE, S. 1999. Defining the validity of a biochemical index of soil quality. *Biology & Fertility of Soils*. 30, 140-146.

TRASAR-CEPEDA, C., LEIRÓS, MC., SEOANE, S. y GIL-SOTRES, F. 2000. Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution. *Soil Biology & Biochemistry* 28, 1867-1875.

VAN BRUGGEN AHC., y SEMENOV, AM. 2000. In Search of Biological Indicators for Soil Health and Disease Suppression. *Applied Soil Ecology*. 15, 13-24.

WEST, AW., SPARLING, GP. y GRANT, WP., 1987. Relationships between mycelium and bacterial populations in stored, air dried and glucose-amended arable and grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry* 19, 599-605.

WONG JWC. y LAI, KM. 1996. Effect of an artificial soil mux from coal fly and sewage sludge on soil microbial activity. *Biology Fertility Soils* 23: pp. 420–424.

ZUFIAURRE, R., OLIVAR, A., CHAMORRO, P., NERIN, C. y CALLIZO, A., 1998. Speciation of metals in sewage sludge for agricultural uses. *Analyst.*, 123, 255-259.

Discurso de contestación a cargo del
Académico de Número

Ilmo. Sr. D. Antonio Cerdá Cerdá

En primer lugar quiero expresar mi agradecimiento y satisfacción a la Academia de Ciencias de la Región de Murcia por tener la oportunidad de contestar y glosar los méritos científicos del Prof. García Izquierdo en su incorporación como miembro numerario a nuestra Academia de Ciencias. El Prof. García Izquierdo es un científico que, para mí, ha tenido un enorme mérito, por su gran vocación investigadora, por su entusiasta dedicación la seriedad de sus trabajos. Inicia su contacto con el mundo de la ciencia, ya licenciado en Ciencias Químicas, como ayudante de investigación en la Estación Experimental de Zonas Áridas de Almería (EEZA), perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), donde permanece dos años. Durante este tiempo entra en contacto con la problemática existente en muchos de nuestros suelos del Levante español: la falta de productividad relacionada con su baja fertilidad y contenido en materia orgánica, así como la necesidad de emprender acciones para protegerlos y conservarlos para futuras generaciones. Es aquí donde se inicia su interés por el conocimiento científico del suelo como microcosmos y como soporte y sustentador de la vegetación. Es este uno de los problemas de investigación fundamentales en un país como España,

donde la extrema aridez, la erosión y la falta de suelo de calidad son factores limitantes y, sin embargo, la agricultura no sólo es un sector económico importante, sino también estratégico para la producción de alimentos.

Su incorporación en el año 1984 al Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS), en el Departamento liderado por el Prof. Costa, supone la afirmación definitiva de su vocación investigadora. Desde mi punto de vista el Prof. Costa, ejemplo de humanidad, profesional cualificado y gran referencia científica, ha tenido un papel decisivo en la formación y aptitud del Prof. García Izquierdo por el conocimiento de la importancia de la materia orgánica en los suelos. En un suelo agrícola la proporción de materia orgánica es generalmente pequeña, aunque muy dinámica y necesaria para la génesis del mismo, ya que favorece su granulación, su capacidad de retención de agua y es fuente de energía y de vida para los seres vivos que pueblan el suelo (plantas, microorganismos, insectos, anélidos, etc., de manera que la mayor parte del S y N se encuentran en forma orgánica.

El Prof. Costa y su equipo de colaboradores estaban involucrados en la necesidad de acometer de forma decidida actuaciones sobre nuestros suelos, muchas veces sometidos a procesos de erosión,

degradación y desertificación, para lograr su protección como recurso natural. Las mencionadas acciones pasaban por incrementar los contenidos en materia orgánica de calidad para contrarrestar dichos procesos y mejorar su fertilidad y productividad. Sus objetivos de investigación se centraban en los procesos biotecnológicos de bajo coste, útiles para sanear enmiendas orgánicas no tradicionales, formadas a partir de residuos orgánicos de diferente origen, convirtiéndolas así en materia orgánica útil para esos suelos. Esto convertiría a los mismos en adecuados soportes de una vegetación estable, repercutiendo en una mejora en la producción y rendimientos de las plantas allí instaladas. Se vislumbraba ya en esa época la necesidad de abrir camino hacia lo que hoy llamamos SOSTENIBILIDAD.

La obtención de materia orgánica de calidad a base de “sanear” diversos residuos orgánicos (desde aquellos procedentes de residuos de ciudad, como lodos de depuración de aguas residuales o la fracción orgánica de basuras domésticas, hasta otros de origen animal o agroindustrial), y convertirlos, mediante adecuados procesos biotecnológicos de bajo coste (compostaje), en verdaderos “subproductos”, ya que dejan de ser residuos al adquirir un valor como enmienda de suelos. Con este trabajo se propuso considerar los beneficios de un

binomio: conseguir materia orgánica para mejorar la fertilidad de nuestros suelos y que dicha materia orgánica sea generada a partir de residuos orgánicos, con el beneficio ambiental que supone darles una salida racional, coherente y no contaminante. Todo este “macroobjetivo” de investigación se materializó en su Tesis Doctoral, leída en la Universidad de Murcia a finales de los 80.

Los resultados obtenidos, en los que se combina la investigación básica con la aplicada, sirvieron para tratar ciertos residuos orgánicos generados en nuestros sistemas de producción, previo saneamiento con biotecnologías siempre de bajo coste, convirtiendo dichos residuos en subproductos útiles como enmiendas orgánicas que pueden ser reciclados en los suelos sin riesgo para los mismos. Todo su trabajo aportó también información válida para las administraciones locales, regionales, estatales y europeas sobre la utilidad de estas acciones, fomentando la opción de reutilizar los residuos orgánicos de forma medioambientalmente correcta, para que después adicionándolos al suelo sirvieran para frenar los procesos degradativos y de desertificación.

El Prof. García Izquierdo, una vez realizada su Tesis Doctoral, en su afán de seguir profundizando en el conocimiento de cómo la vida que hay en el suelo influye

en los procesos beneficiosos de la materia orgánica, llevó a cabo una estancia posdoctoral de un año y medio de duración en el CNR de Pisa (Italia). Esta estancia le sirvió para especializarse en aspectos de ciencia básica encaminados a la enzimología de suelos, con el objetivo de explicar las ventajas de las acciones que entonces se proponían (adición a los suelos de enmiendas orgánicas de calidad, y los efectos que se derivan de esta estrategia). Ello le permitió estudiar y dar a conocer aspectos tan interesantes como el efecto de la adición de materia orgánica sobre la fijación de carbono en el suelo (y el resultado sobre la disminución de su salida a la atmósfera como CO_2 , mitigando así el efecto invernadero), o su efecto sobre los ciclos de nutrientes y la verdadera funcionalidad del suelo. Esta estancia le supuso también dominar tecnologías muy punteras dentro de la Ciencia del Suelo, tales como la genómica y la proteómica, así como la enzimología de suelos, capaces de dar respuesta a los efectos que se esperan cuando se realizan acciones como las propuestas, en el ámbito del conocimiento de la funcionalidad del suelo a través de su biodiversidad microbiana funcional, así como la interacción entre las poblaciones y sobre todo con las plantas que se cultivan sobre el mismo.

Después de su regreso al CEBAS-CSIC, el Prof. García comenzó a formar su propio grupo de investigación en **Enzimología y Biorremediación de Suelos y Residuos Orgánicos**, centrándose su actividad en profundizar en el conocimiento de la materia orgánica y en la búsqueda de nuevas fuentes, su tratamiento y reciclado en el suelo con fines agrícolas o de recuperación de suelos. El Grupo, compuesto por 18 personas, entre personal investigador, técnico, así como personal en formación pre y posdoctoral, tiene carácter pluridisciplinar (biólogos y químicos) e internacional, habiendo participado en proyectos de investigación en los diferentes Programas Marco de la UE en el área de Agricultura y Medio Estudio de la Materia Orgánica.

La producción científica del Grupo ha tenido desde sus comienzos un importante carácter cualitativo y cuantitativo, siendo un grupo pionero en España en esta línea de investigación, abordando también aspectos como el estudio de bioindicadores, de procesos de degradación, de contaminación (dosis ecológica) y biorremediación de suelos, así como uso de enzimas como indicadores de cambios de sustratos en la transformación de materiales orgánicos, en procesos de bioestabilización de materiales orgánicos de nueva generación (en particular aquellos de origen urbano), mediante tecnologías de bajo coste, en

bioquímica y microbiología de suelos y materiales orgánicos, en actividad microbiana como bioindicador de calidad de suelos, así como el uso de materiales orgánicos en agricultura orgánica y ecológica, con especial relación a sus efectos como biopesticida sobre ciertos microorganismos patógenos. También ha abordado estrategias para combatir procesos de degradación y desertificación del suelo mediante la adición de enmiendas orgánicas (materiales orgánicos de nueva generación) al mismo y estudio de los efectos sobre su calidad y productividad sostenible, así como sobre la fijación del C.

El trabajo y la trayectoria científica e investigadora del Prof. García Izquierdo ha permitido alcanzar grandes logros validando una brillante carrera profesional. Dentro del CSIC ha pasado por las escalas de Científico Titular e Investigador Científico, llegando en el año 2003 a Profesor de Investigación, máximo escalafón profesional dentro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

El componente aplicado de su investigación y su relación directa con los problemas reales le ha permitido realizar contratos de investigación, en los que desarrollado la transferencia tecnológica de su investigación a empresas de la importancia de REPSOL

PETROLEO, FERROVIAL-CESPA, EMUASA o FERTIBERIA.

Además de los mencionados Contratos con Empresa, ha captado fondos procedentes de proyectos de índole regional y estatal. Especial mención merecen los proyectos europeos que ha llevado a cabo el Dr. García Izquierdo, que ha sido y es en la actualidad responsable científico español de proyectos europeos encuadrados dentro del V, VI y VI Programa Marco de la UE, generando fondos, hasta el momento, por valor de 2,5 millones de euros para su grupo.

Es autor-coautor de más de 100 artículos científicos publicados en revistas con elevados índices de impacto dentro del SCI y dentro de su temática. La calidad de su investigación se refleja en su Índice H, indicativo de la validez internacional de dichos trabajos, el cual se sitúa en un valor de 25, muy elevado para científicos dentro de su área de investigación. Ha dirigido hasta el momento 7 Tesis Doctorales. Asimismo, ha colaborado en la dirección de 3 Tesis Di Laurea en la Universidad de Pisa (Italia), y en más de 10 Tesis de Licenciatura y trabajos fin de carrera.

La formación científica del Dr. García Izquierdo le ha capacitado para desempeñar labores dentro del ámbito de

la Gestión de la Investigación, y entre dichas labores merece la pena destacar las siguientes:

- Director del CEBAS-CSIC desde el año 2005 hasta la actualidad.
- Miembro de la Comisión de Área de Ciencias Agrarias del CSIC entre 2004-2008, y, en la actualidad, Coordinador Adjunto de la Comisión de Área de Ciencias Agrarias recientemente creada.
- Miembro de la CODIR, Comisión de Asesoramiento al Presidente del CSIC
- Miembro del Comité de Expertos del Ministerio de Desarrollo Rural y Marino, dentro de Fertilización Orgánica.
- Presidente y fundador del Grupo Nacional de Enzimología de Suelos desde 1997.
- Presidente de la Sección de Biología del suelo desde 2006, dentro de la Sociedad Nacional de la Ciencia del Suelo.
- Miembro de diferentes Comités Internacionales de Ciencia del Suelo, y revisor de numerosas revistas científicas integradas en el SCI.

- Participación en Cursos y Master universitarios, y en particular, su colaboración en Cursos de Doctorado del Tercer ciclo, tanto en la Universidad de Murcia como en la Universidad Politécnica de Cartagena, o en la Universidad Autónoma de Madrid. Desde el año 1998, el Dr. García viene ejerciendo como profesor del Tercer Ciclo de forma ininterrumpida.

- Ha impartido conferencias, dentro y fuera del ámbito de congresos nacionales e internacionales.

Su intensa y fructífera actividad investigadora a lo largo de su ya dilatada carrera le ha permitido relacionarse con los investigadores más prestigiosos a nivel mundial en su materia, así como participar en la edición de libros y en la organización de congresos relacionados con su temática de trabajo. La internacionalización de su trabajo científico le ha permitido adquirir contactos útiles para entrar en diversos consorcios europeos como partner, para la integración de su grupo de investigación en varios proyectos comunitarios.

El Prof. García Izquierdo futuro académico, tiene la ilusión, honradez y patriotismo necesarios, como dijo nuestro Nobel D. Santiago Ramón y Cajal, para realizar el trabajo vocacional de investigación.

En definitiva, creo que el Prof. García Izquierdo reúne méritos más que suficientes, tanto desde el punto de vista científico como de gestión de la actividad investigadora y de sus relaciones con los profesionales más prestigiosos de su materia de investigación a nivel mundial, para ser miembro de esta Academia de Ciencias. Por otra parte, su formación y especialidad contribuye a la de las disciplinas que conforman nuestra Academia.

