

*Excmo. Sr. Presidente,*

*Excmo. Sr. Secretario de Estado de Educación y Universidades,*

*Excmas. y Excmos. Sras. y Srs. Académicos,*

*Señoras y Señores:*

Es ésta la primera apertura de Curso que tiene lugar con los nuevos Estatutos de la Corporación aprobados en el 2003, y con las nuevas Secciones constituidas y en funcionamiento; a esta circunstancia, y a la benevolencia de los dos Presidentes —al de la Real Academia y al de su Sección 1.<sup>a</sup>— debo el alto honor de ocupar hoy esta tribuna.

Siguiendo la tradición, correspondía a la Sección 1.<sup>a</sup> hacerse cargo del Discurso, para en años sucesivos continuar correlativamente con las siguientes. La designación personal, la hizo el Presidente de la Sección de la manera más objetiva a su alcance y, tras cambiar impresiones con algunos compañeros, se la encargó al Académico de la Sección más antiguo, que no hubiera pronunciado ya otro Discurso de apertura.

Ésta fue la causa de que hasta los primeros días de septiembre yo no tuviera conocimiento de tan noble misión. Parece evidente que el azar me ha privilegiado al no existir más que una sola Sesión anual de esta naturaleza y ser 50 los Académicos de Número. Sirvan estos comentarios para justificar premuras, y quizá omisiones, pero también para hacer público reconocimiento del alto grado en que me honra la intervención de hoy.

## **1. LA ELECCIÓN DEL TEMA**

---

No creo que fuera imprescindible justificar la elección del tema en una Sesión como ésta, siempre que sea de interés general para la Real Academia Nacional de Farmacia y esté dentro de sus fines estatutarios. Pero en esta ocasión, y ante la cercanía de ciertas conmemoraciones académicas, estimo que es aconsejable pues se convierte en un eslabón de la serie de trabajos con los que nuestra Corporación puede ejercer su proyección social.

Prescindo, por obvio, de mis antecedentes en el magisterio universitario, porque esto sólo lo justificaría en el plano personal.

El tema es bien conocido en la Academia, por ello, como recuerdo y homenaje a quienes nos precedieron en él y ya no están con nosotros, afluyen a mi memoria los nombres de Albareda, Gutiérrez Ríos, Hoyos de Castro, Carpena y, sin duda, alguno más, siempre asociados a un sentimiento de gratitud por sus aportaciones al conocimiento del mismo. Y todo ello porque el suelo es un sistema heterogéneo, complejo y abierto en el que, ininterrumpidamente, tienen lugar un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos cuyo equilibrio no sólo sostiene la biosfera si no que, además, es esencial para mantener y promocionar la salud de los seres vivos, y de manera muy singular la de la humanidad. Por ello, hace tiempo que la temática del suelo viene siendo objeto de estudio en nuestra R. Academia Nacional de Farmacia. Si a esto se le añade la vinculación que en la actualidad tiene la temática ambiental con la conservación del medio natural, la nómina de Académicos de Número fallecidos, pero cuya herencia científica sigue viva, se amplía con otra serie de nombres, entre los que no puedo omitir los de Hernández Pacheco, López Azcona y Vian Ortuño.

De otra parte, como antes anticipaba, es evidente que el tema surge al rebufo, y ruego me acepten la metáfora, de dos notorias celebraciones habidas en la Academia en los años 2002 y 2003. La primera se refiere al Centenario del nacimiento del ya citado Prof. Albareda, y la segunda, más reciente, dedicada al bicentenario del nacimiento del barón Justus von Liebig, autor de la obra «Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie» («La Química en sus aplicaciones a la Agricultura y a la Fisiología»), presidente de la Academia de Ciencias de Berlín y fundador de los Anales de Farmacia.

Y todavía hay otra circunstancia de máxima actualidad: La temática del desarrollo sostenible en Agricultura impone situar la conservación del suelo agrícola en el término de referencia de la misma, y esta Real Academia tiene bien acreditada su vocación de colaborar en la difusión social de cuantas facetas de su dedicación estén relacionadas con ese gran reto que la Ciencia, la Técnica, la Economía, la Administración y la Política del siglo XXI deben abordar con éxito: El desarrollo sostenible.

Concretado en buena parte en el VI Programa de Medio Ambiente de la Unión Europea, la Corporación le dedicó un Foro de Reflexión y Difusión a los pocos meses de haberse promulgado, por ocupar la Salud un especial protagonismo en los planteamientos que ofrecía.

Sobre el desarrollo sostenible, hablé de forma magistral en esta Academia hace pocos meses el Profesor Mayor Zaragoza, por lo que me limito a indicar sus principales hitos. Apuntado como idea muy vaga en la Conferencia de Estocolmo de 1972, inició su configuración en un Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas de 1987 en el que, no sin ambigüedad, se define como el «desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas»; es decir, búsqueda de una mejor calidad de vida para la humanidad actual y futura. Pero ¿cómo lograrlo?

El progreso de su concreción ha sido lento. La Cumbre de Río asumió la definición anterior, aunque le incorporó ciertos Principios que disminuían su ambigüedad, al tiempo que se le dotaba de una triple dimensión económica, social y ambiental, convergentes en la mejora de la calidad de vida. Pero la calidad de vida está integrada por una serie de factores entre los cuales la salud, la alimentación y la conservación del medio natural ocupan lugares destacados.

No creo que haya área científica, ni intelectual, que escape a la participación en los ambiciosos objetivos del, ya más concreto, desarrollo sostenible pero, sin duda alguna, nuestra Academia está plenamente implicada, incluso más allá de lo que puede ser el objetivo más inmediato de garantizar el suministro y la seguridad alimentaria.

Desde una perspectiva amplia, la cuestión nos afectará en todo aquello que se relacione con la sanidad ambiental y laboral, y con la evaluación, prevención y gestión de los riesgos para la salud derivados de la contaminación de cualquiera de los subsistemas naturales. Y el suelo es uno de ellos.

## **2. EL SUELO Y SUS USOS**

---

El medio físico, en artificiosa simplificación, se puede desglosar en los subsistemas aire, agua y suelo. La vida se desarrolla en los tres, pero los dos primeros tienen el soporte común del tercero. Si, continuando la simplificación, nos olvidamos de las interfases aire-suelo y agua-suelo, el suelo, en su percepción más inmediata, es la parte emergente de La Tierra o, si se quiere, de la litosfera, cuyo espesor alcanza en algunos puntos 60 Km. Pero también es suelo el sumergido en las zonas oceánicas, aunque aquí su espesor no suele pasar de 10 Km.

Superficialmente, e incluso volumétricamente, el suelo es el más pequeño de los tres subsistemas, pues, si se exceptúan las infraestructuras mineras y las de comunicaciones, en el mejor de los casos sólo se utiliza un espesor de unos cuantos metros y en la agricultura de unos cuantos centímetros. Sin embargo, soporta la casi totalidad de la actividad humana y buena parte de la actividad de la biosfera global.

El suelo es un recurso vital sometido a una presión de demanda creciente por el aumento demográfico, por su correlativa demanda de alimentos y por su proyección sobre la salud de la población.

Para garantizar el desarrollo sostenible, es necesario protegerle y resulta paradójico que sea el subsistema físico que más tardíamente ha recibido atención para conservarlo. Quizá porque parecía que las agresiones eran menos difusibles o que quedaban más localizadas que en el aire o en el agua, o porque la aparente inercia del sistema dio la falsa impresión de una mayor resistencia a los ataques.

No obstante, y haciendo honor a la realidad, hay que decir que desde hace tiempo el riesgo no había pasado inadvertido, pues en

1972 el Consejo de Europa promulgó la Carta Europea de Suelos en la que no sólo se reconoce que «el suelo es uno de los bienes más valiosos de la humanidad» y que «es un recurso limitado fácilmente destructible», sino que debe de ser protegido contra la erosión» y frente «a la contaminación». Un aviso en fecha tan remota se compadece mal con la escasa atención que hasta hace poco se le ha dedicado. Quizá por aquello que, en cierta ocasión, dijo Giscard d'Estaing de que «el uso repetido de las palabras conduce al desgaste de las ideas», o también, en frase de Aristóteles, porque «nada hay en la inteligencia que no haya estado antes en los sentidos».

A esta advertencia —aunque diez años más tarde— le sucedió la Carta Mundial de Suelos, formulada por la FAO en 1982, y el Documento sobre Política Mundial elaborado por el PNUMA, también el mismo año de 1982. En ambos trabajos se trata de fomentar la cooperación internacional para el uso racional de los recursos edáficos.

A pesar de todo, las carencias de planificación y gestión del suelo están a la vista y entre las cinco estrategias prioritarias propuestas en el VI Programa de Acción Medioambiental de la Comunidad Europea, siempre con un enfoque hacia la salud, hay una dedicada específicamente al suelo en la que se pone el énfasis en prevenir la erosión, el deterioro, la contaminación y la desertificación. Se trata de un abanico de decisiones que permitan identificar el carácter e intensidad de aquellas actividades y usos del suelo, que son responsables de los grandes impactos ambientales, directos o indirectos, como son la destrucción de habitats y paisajes, en el primer caso, o los incrementos del tráfico, de la contaminación atmosférica o de la emisión de gases invernadero, en el segundo.

En el citado documento del VI Plan se estima que la Política Agraria Común ha de brindar nuevas oportunidades para estimular una gestión más favorable del suelo; la implantación de la Red Natura 2000 puede ser un ejemplo bien representativo, pues gracias a ella se determinarán las zonas y ecosistemas naturales que deben de gestionarse y protegerse.

Las variadas características físicas, químicas y biológicas de los suelos, son las que determinan sus usos; por ello, hasta para definirle, coexisten criterios versátiles en los que concurren intereses económicos y sociales contrapuestos.

En principio, puede hablarse de tres tipos de suelos o de terrenos: El suelo pasivo, el productivo o agrario y el improductivo.

El primero es el que, sin intervenir de forma activa en un proceso productivo, sirve de soporte a actividades, tales como el urbanismo, las infraestructuras industriales, comerciales, de comunicaciones, de recreo, e incluso turísticas, como pueden ser determinadas áreas protegidas o parques naturales, donde lo que importa no es sólo conservar su diversidad sino su estructura geológica y panorámica. Por poner algún ejemplo, estos serían los casos de algunos parques volcánicos canarios como el Teide o Timanfaya.

El segundo es el dedicado a actividades agrícolas, forestales o de pastoreo y, por tanto, interviene directamente en la producción. No todos tienen que ser semejantes, aunque en términos cualitativos su composición ha de tener un mínimo de características comunes.

Y el tercero es el suelo improductivo, o de mínima producción, formado por los terrenos abandonados por su nula o baja rentabilidad, y por los espacios naturales que por sus características o su difícil acceso están prácticamente intocados.

Los suelos improductivos, pueden llegar a tener la consideración de recurso potencial, y en la medida en que se facilite su acceso o se remedien sus factores carenciales pueden llegar a utilizarse. Los otros dos, los productivos y los pasivos, son recursos reales y actuales de la humanidad, puesto que se trata de bienes de los que dispone el hombre para satisfacer sus necesidades.

Todos son recursos no renovables habida cuenta su finitud, y la extensión de su uso puede conducir a su agotamiento en un horizonte temporal más o menos largo, pero indudable. Pero los suelos agrícolas están sometidos también a un riesgo de agotamiento por destrucción, siendo este el problema más crítico y el que precisa de soluciones urgentes.

### **3. EL SUELO PASIVO Y SUS PROBLEMAS**

---

El suelo pasivo está creciendo lenta pero continuadamente. Es un fenómeno mundial que preocupa a los Organismos Internacionales, porque se produce a costa del suelo agrícola. En los últimos 10-15 años se estima que a escala mundial se han perdido unos 2 MM de Km<sup>2</sup> (unas cuatro veces la superficie de España).

Cuando el suelo está dedicado a edificaciones, urbanizaciones, carreteras y otros fines similares se denomina sellado del suelo, porque la superficie disminuye su capacidad para ciertas funciones como las de absorción e infiltración del agua de lluvia. Es claro que la extensión del suelo urbano disemina las áreas de contaminación e incorpora riesgos adicionales en supuestos como las inundaciones, puesto que en las zonas urbanizadas, más impermeables, se disminuye la infiltración y se aumenta la escorrentía, originando un mayor aporte de caudales a los cauces habituales.

Por otra parte las zonas selladas, si no se han elegido tras un meticuloso análisis de riesgos, pueden generar un gran impacto sobre el entorno dedicado a cultivos, a reserva forestal o a ganadería.

La participación del hombre en la degradación del suelo por el aumento de nuevas áreas urbanas es indudable, sobre todo si los nuevos emplazamientos no se han elegido con un análisis meticuloso de riesgos. Si las nuevas implantaciones se hacen en áreas montañosas las talas de árboles e incendios forestales son inmediatos. Las zonas boscosas desaparecen, los incendios modifican la textura del suelo, desaparece la materia orgánica, su fracción coloidal se coagula, y el deterioro se manifiesta. Los cultivos de los valles y vegas se desplazan hacia las laderas de los montes, sin una adecuada protección de bancales, a medida que su superficie va siendo ocupada por los nue-

vos emplazamientos urbanos. Se sobre-explotan los acuíferos, los pastos desaparecen, se favorece la erosión y se forman barrancos y cárcavas.

Este fenómeno tiene estrecha relación con las estrategias de ordenación territorial en las que, desgraciadamente, se tienen poco en cuenta las consecuencias que pueden derivarse de los incrementos de suelo sellado, que suponen pérdidas irremediabiles de suelo agrícola, con independencia de que no exista información previa sobre el tipo de suelos que se sellan.

En las regiones costeras del Mediterráneo, por ejemplo, la superficie construida no deja de crecer desde hace más de 20 años. La costa de Gerona está urbanizada en más de un 80% y en las costas italianas se acerca o supera el 50%. De este modo la presión poblacional sobre el medio natural se hace insufrible. Baste observar que siendo la densidad media de la población española es de 77 hab/Km<sup>2</sup>, frente a los 114 de media europea, en el área metropolitana de Madrid y en el litoral mediterráneo la densidad oscila entre 500 y 800 hab/Km<sup>2</sup>, mientras en el resto del territorio es de unos 25 hab/Km<sup>2</sup> y en una quinta parte del mismo no llega a los 5 hab/Km<sup>2</sup> (Estrategia Española de Desarrollo Sostenible).

Decía Unamuno, poniéndolo en boca de uno de los protagonistas de su novela «Amor y Pedagogía», que hay tres clases de hombres: Los prudentes, que primero piensan y después obran; los arrojados, que obran antes de pensar, y los que piensan lo que hacen y al mismo tiempo hacen lo que piensan, a los que el autor denomina fuertes. El vértigo del siglo XX superó rápidamente a los primeros pero no a los segundos. Hay que esperar, y desear, que en la humanidad del siglo XXI, sean los terceros los que inspiren los comportamientos equilibrados.

Una cierta disminución del suelo disponible tiene que ser compatible con el incremento del nivel de vida, pero si el suelo sellado merma la producción de alimentos o la conservación de la naturaleza, o incrementa el riesgo de inundaciones, es evidente que sus efectos son negativos para el desarrollo sostenible y que ese suelo no debe de ser sellado.

## **4. EL SUELO PRODUCTIVO: COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA**

---

En el suelo productivo o agrario es el de mayor extensión y en él se integran el agrícola, el ganadero y el forestal. Se forma con materiales procedentes de la disgregación física, química y biológica de las rocas sedimentarias a los que, tras un largo proceso, se asocian materia orgánica, aire y agua. Normalmente, cuando se alude al suelo sin adjetivación específica se está haciendo referencia al suelo agrícola.

Pero hablar del suelo en España exige hacer una primera y expresa referencia al Prof Albareda, gran impulsador en nuestro país de los estudios científicos sobre el mismo. En su libro «El Suelo», editado en 1940, afirma «que es un «cuerpo natural», un ente vivo, resultado de la interacción durante largos periodos de tiempo del clima, las rocas y los seres vivos». Nuestro compañero, Dr Gaspar González, lo glosó con maestría en la sesión de homenaje en el centenario de su nacimiento, antes citada.

Decía Hoyos en 1980, en sesión análoga a la que hoy nos congrega, que el suelo «es un sistema abierto porque pierde y recibe materiales y energía de su entorno y como la mayor parte de los sistemas abiertos es jerárquico»; y se subdivide en otros subsistemas de distinta complejidad, aunque interdependientes, que conforman un todo; sin embargo, para Hoyos, este dinamismo no impide que el suelo, en cuanto conjunto, deba considerarse como un sistema estacionario, pues aunque se modifica lo hace lentamente.

La realidad es que, la capacidad evolutiva de suelo le sitúa en un lugar intermedio, que permite calificarle como un semiestado en equilibrio que, aunque capaz de reaccionar homeostáticamente ante los cambios externos, lo hace dentro de intervalos relativamente estrechos

que no pueden rebasarse sin riesgo de degradación. El suelo es uno de los recursos más imprescindibles proporcionados por el medio natural; posee una multifuncionalidad que le permite regular los aportes y salidas de materia y energía, pero también es considerablemente sensible a las acciones contaminantes. Para mantener su productividad es necesario que las presiones a que se le somete, y que lo degradan, sean compensadas con acciones y sistemas de conservación.

Su estructura es conocida por lo que la breve referencia que se hace a ella, es para justificar sus funcionalidades: las antiguas y las que le son exigibles dentro de los objetivos de sostenibilidad.

Se integra por tres fases: sólida, líquida y gaseosa; y todas contienen sustancias químicas orgánicas e inorgánicas.

La fase sólida está constituida por una fracción mineral y otra orgánica, de distinto no sencillo. La fracción inorgánica está formada por arcilla y óxidos metálicos, ambos responsables de una parte del sustrato coloidal que aumenta su superficie específica y le proporcionan una cierta capacidad de cambio catiónico, aunque no sea de forma exclusiva.

En la orgánica hay una gran variedad de productos, que van desde seres vivos y restos vegetales hasta sustancias húmicas. La fracción viva, vegetal o animal, contiene lombrices, nematodos, protozoos y otros microorganismos, como bacterias, algas unicelulares, mixomicetos, etc. Todos ellos suponen entre el 2% y el 5% de la totalidad de la materia orgánica y hacen del suelo un «ente vivo». Su comportamiento en el suelo raya lo inteligente por su respetuosa y cuidada intervención en la vida del mismo. Baste decir que jamás consumen la totalidad de los restos vegetales, sino que guardan, al menos, un 30% para formar los ácidos húmicos. La segunda fracción está formada por materia orgánica fresca y son los restos vegetales que, en parte, alimentan a la materia viva. Otra tercera fracción es materia fresca, más o menos evolucionada, junto con los productos excretados por la biomasa viva o los exudados por las células epidérmicas de las zonas apicales de las raíces que se rompen durante su crecimiento; en su mayor parte son geles de carbohidratos y de otros productos químicos que también sirven de alimento a la biomasa viva y se incorporan a los procesos de humificación. Y por último está la llamada fracción húmica, integrada por materia orgánica en diferentes grados de evolución que van desde compuestos lignínicos poco modificados hasta diferentes formas de materias húmicas, como es la humina y los ácidos fúlvicos y húmicos.

Se ha puesto mucho empeño en dilucidar la estructura de la fracción húmica; pero el intento es vano ya que la gradación de estados evolutivos puede ser infinita. Las especies húmicas, globalmente consideradas, están formadas por una mezcla de productos poliméricos de variado tamaño molecular, amorfos, de gran superficie específica, que tienen un núcleo de compuestos aromáticos policondensados a los que se unen otras sustancias liberadas en los mecanismos degradativos, como son proteínas, péptidos, aminoácidos y polisacaridos.

El tamaño molecular, su grado de condensación, y la cuantía y situación de los grupos funcionales permite una primera diferenciación de los ácidos húmicos entre ácidos húmicos (propriadamente dichos) y fulvicos. Los húmicos tienen masas moleculares comprendidas entre  $10^3$  y  $10^7$  D, mientras los fúlvicos oscilan entre  $10^2$  y  $10^5$  D; es decir, los fúlvicos tienen un menor grado de condensación.

Los mecanismos para llegar a la fracción húmica son largos y complicados, aunque para hacer un mínimo seguimiento funcional a partir de la fracción orgánica verde se puede esquematizar en un triple proceso evolutivo de biodegradación, condensación y formación de ácidos húmicos.

En la primera fase los microorganismos edáficos degradan las paredes celulares y liberan polímeros polisacáridos, energéticamente útiles. Después, y con la intervención de hongos, se produce la rotura de la lignina que más tarde se desmetoxila y carboxila; se liberan así compuestos fenólicos y estructuras tridimensionales de mediana degradación, que juegan un papel importante en la reorganización y condensación previa que conduce a los ácidos húmicos y fulvicos. Y lo mismo se puede decir del mecanismo de degradación de los taninos que también conducen a formar humus.

En la figura 1a aparece una propuesta de estructura para los ácidos fúlvicos (Stevenson 1982), en la figura 1b para los húmicos y en la figura 2 un esquema de la degradación de materiales ligno-celulósicos (Labrador 1996).

Pero ni siquiera dentro de cada tipo de ácidos hay constancia de composición. En la Tabla I aparecen las composiciones elementales, en términos de intervalo, de unos y otros.

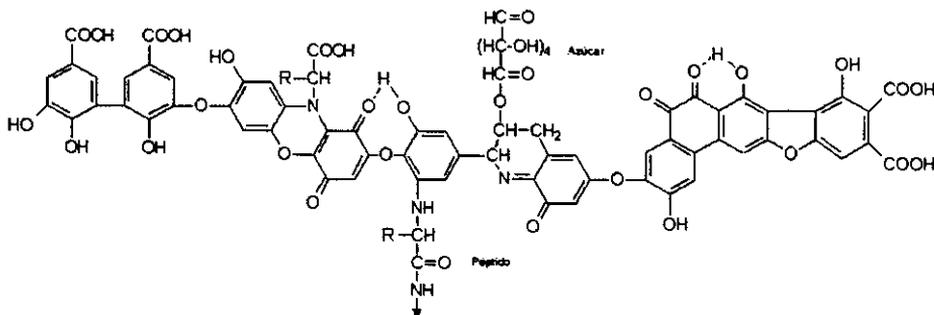


Fig. 1a. Propuesta de estructura química de los ácidos fúlvicos.

Fuente: Stevenson (1982)

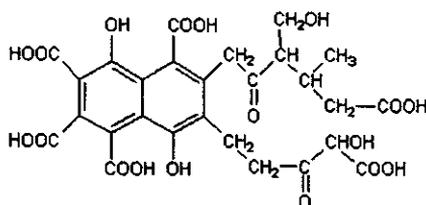


Fig. 1b. Propuesta de estructura para los ácidos húmicos.

Fuente: Fernández Domínguez (2003)

TABLA I

**Intervalos en la composición elemental de los ácidos húmicos y fúlvicos**

Elemento en %	Ácidos fúlvicos	Ácidos húmicos
Carbono	42-51	53-59
Hidrógeno	4-7	3-6
Nitrógeno	1-3,5	1-5
Azufre	0,1-4	0,1-1,5
Oxígeno	43-50	33-39

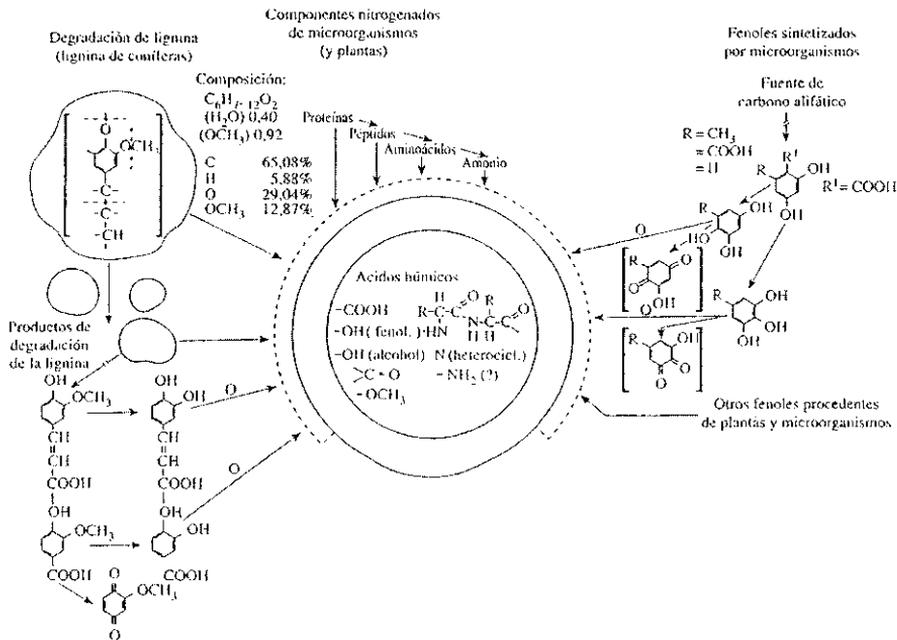


Fig. 2. Esquema de formación de sustancias húmicas.

Fuente: Labrador (1996)

La media de los valores más frecuentes de su composición elemental aparecen en la Tabla II.

TABLA II  
Medias de los valores más frecuentes en la composición elemental

Elemento en %	Ácidos fúlvicos	Ácidos húmicos
Carbono	46	56
Hidrógeno	5	5
Nitrógeno	2	3
Azufre	2	1
Oxígeno	45	35

Asimismo, los grupos funcionales más frecuentes en uno y otro tipo de ácidos húmicos son carboxilos, OH fenólicos y alcoholicos y carbonilos, junto con algunos grupos terminales aminos. En su conjunto atienden a reacciones de quelación, neutralización, amortiguación de pH, etc.

Aunque cualitativamente los grupos funcionales sean comunes varían cuantitativamente de los fúlvicos a los húmicos, en el sentido de disminuir su grado de oxidación y los grupos hidrófilos.

En la Tabla III se pueden observar las diferencias entre ambos.

**TABLA III**  
**Contenido de grupos funcionales (mg/g) en ácidos húmicos y fúlvicos**

<b>Grupo funcional</b>	<b>Ácidos fúlvicos</b>	<b>Ácidos húmicos</b>
<b>Acidez total</b>	<b>6-14</b>	<b>6-9</b>
<b>COOH</b>	<b>6-11</b>	<b>1-5</b>
<b>OH (fenólicos)</b>	<b>1-6</b>	<b>2-6</b>
<b>OH (alcohol)</b>	<b>2-10</b>	<b>0,2-5</b>
<b>C=O (Carbonilo)</b>	<b>1-3</b>	<b>0,2-2</b>
<b>OCH<sub>3</sub></b>	<b>0,3-1,5</b>	<b>0,3-1</b>

Con todo, quizá lo más importante es que los fúlvicos son más ricos en radicales libres, que son los responsables de los procesos de policondensación y polimerización, lo que justifica el mayor peso molecular y la mayor estabilidad de los húmicos.

Cuando la materia orgánica ha evolucionado hasta los ácidos húmicos, se la considera estabilizada, aunque la realidad es que en el suelo prosigue su mineralización hasta liberar las especies inorgánicas demandadas por las plantas para su crecimiento.

La fase acuosa del suelo es una disolución de sales minerales y de los compuestos orgánicos solubles formados al descomponerse y mineralizarse la materia orgánica, a cuyo través se inicia la nutrición vegetal.

Y por último, la fase gaseosa es aire enriquecido en dióxido de carbono y empobrecido en oxígeno, junto con compuestos orgánicos volátiles, como el etileno que puede actuar como estimulante o como tóxico, según sea su concentración. A concentración inferior a 0,4 ppm es un buen estimulante del crecimiento radicular, mientras por encima de este límite se comporta como inhibidor, hasta el punto de que con 10 ppm se paraliza el crecimiento longitudinal de la raíz.

El contenido biológico del suelo es lo que le capacita para sustentar la vegetación. Para Albareda la definición más clara de suelo es la que hace notar su cualidad de ser «la parte de la tierra en la que viven las plantas».

El suelo productivo tiene un espesor de poco más de 30 a 40 cm, siendo el recurso natural de más difícil reposición, pues se forma a un ritmo de 1 cm de espesor cada 100 a 400 años, y según la FAO se requieren de 3.000 a 12.000 años para que el suelo sea capaz de convertirse en tierras productivas. Es pues razonable calificarle como recurso no renovable.

## **5. FUNCIONALIDAD DEL SUELO AGRÍCOLA**

Hace un par de décadas, cuando aún no se había encontrado el significado y alcance de la sostenibilidad, el análisis de funciones del suelo agrícola se limitaba a la agricultura, ganadería, selvicultura y, eventualmente, la caza. Y esto es lógico, porque la producción vegetal se encuentra en la base de toda alimentación animal; incluso los omnívoros tienen en sus escalones tróficos precedentes especies que son sólo vegetarianas.

La mayoría de los primates son exclusivamente vegetarianos y únicamente de forma ocasional ingieren insectos o huevos de aves. La especie humana, omnívora, no es distinta en su comportamiento, e incluso los peces inician su cadena trófica en el fitoplancton. Por eso es difícil entender que la evolución de la Agricultura haya sido tan lenta y que se haya tardado tanto en prestar atención a los problemas derivados del deterioro del suelo.

Hoy la funcionalidad del suelo se ha ampliado considerablemente, aunque la más conocida continúe siendo la de producir biomasa vegetal de cultivos, pastos o árboles, mediante el suelo que además de soporte físico aporta nutrientes y agua. En este sentido, el soporte suelo se ha comportado siempre como un reactor bioquímico que autosumministra una parte de los reactantes.

Pero desde la perspectiva de la sostenibilidad, el suelo productivo realiza también otra serie de funciones básicas de carácter económico, ambiental, social y cultural.

Junto a la función agrícola, o agraria en términos más generales, el suelo realiza funciones de almacenaje, filtración y transformación. Por un lado almacena minerales, materia orgánica, agua y

diferentes sustancias químicas; todas ellas participan después en los mecanismos de transformación, de manera que pueden contribuir al mantenimiento de la salud al retener contaminantes del medio, o bien al contrario, como se dice expresamente en VI Programa de Acción Medioambiental, puede haber formas de contaminación inocuas en la atmósfera que dejan de serlo al ser absorbidas por el suelo.

Su capacidad de almacenaje y amortiguación se debe en gran parte a su materia orgánica. Es decir, hay capacidades subordinadas de manera que si la arcilla y óxidos metálicos dotan al suelo de capacidad para almacenar materia orgánica, ésta, a su vez, le proporciona la de acumular agua, sustancias minerales, gases, y un gran número de sustancias químicas. Incluso contaminantes, naturales o artificiales pueden acumularse en el suelo de forma temporal, aunque esta situación no debe superar un cierto límite, ni de concentración ni de tiempo, pues si se llega a superar la primera se pueden crear riesgos imprevistos e innecesarios.

En el sentido más tradicional, pero no por ello susceptible de olvido, el almacenaje de materia orgánica tiene un papel decisivo en la fertilidad del suelo, pues la mejora de su productividad se basa en modificar sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Una de las propiedades más afectadas es la estructura y estado de agregación del suelo, contribuyendo a que se mantenga en situación estable. En este sentido, la materia orgánica facilita el intercambio con las fases líquida y gaseosa, tanto porque su color negro contribuye a mantener una temperatura adecuada, como porque la capacidad de retención de agua puede llegar a ser de 20 veces el peso de ácidos húmicos, lo que asegura la conservación de la fase líquida y convierte al suelo en una reserva potencial para el mantenimiento de los acuíferos.

La función estabilizadora de la materia orgánica del suelo, unida a la de la arcilla, tiene especial relevancia para mantener su estado de agregación entre 1 y 5 mm y su tamaño de poro entre 50 y 500  $\mu\text{m}$ , lo que a su vez permite regular la velocidad de infiltración del agua y disminuir la de evapotranspiración.

La materia orgánica sola no proporcionaría al suelo una estructura esponjosa; es el complejo arcilloso-húmico quien se la da. La materia orgánica se une a la arcilla a través de los ácidos húmicos y

fúlvicos, con fuerzas de naturaleza física y química. Ambos, arcilla y humus, son coloidales y de carga negativa, unas veces por disociación iónica y otras por adsorción de iones o por rozamiento; la asociación se realiza a través de un puente catiónico, con frecuencia el  $\text{Ca}^{2+}$ , y su estabilidad es tanto mayor cuanto más ácido sea el catión. Esto explica que el sodio, catión neutro y monovalente, destruya el complejo arcillo-húmico y disminuya la capacidad de cambio.

La posibilidad de almacenar sustancias químicas, cationes pesados, e incluso contaminantes, está vinculada a su capacidad de intercambio iónico, fundamental en los mecanismos de nutrición vegetal, a la de adsorción y desorción, a la de complejación y quelación y a la de precipitación de sales inorgánicas, propiedades todas ellas derivadas del complejo arcilloso-húmico.

En varios de estos comportamientos se simultanea la doble facultad de almacenaje y filtración-eliminación de contaminantes. Los llamados filtros verdes son ejemplo de ello; se trata de terrenos agrícolas o forestales sobre los que se vierten las aguas residuales para su autodepuración, combinándose una macrofitodepuración con una edafodepuración. No es un sistema fácil porque, si el terreno no está bien elegido, entraña riesgos de plagas y enfermedades para el ganado y para la población; por ello, se trata más de un tratamiento para bosques que para pastizales y cultivos.

Otra de sus capacidades amortiguadoras es la ácido-base. El pH es un factor fundamental en la productividad de un suelo, que gracias al poder amortiguador del suelo no es demasiado lábil. Pero en este caso el poder amortiguador no se debe sólo a la materia orgánica sino también a la arcilla, los carbonatos y hasta determinados óxidos como los de hierro y aluminio. El problema está en que la materia orgánica es quien ofrece el mayor riesgo de carencia, mientras que los carbonatos son de reposición relativamente fácil.

Dentro de las nuevas perspectivas introducidas por el desarrollo sostenible se le reconoce al suelo la importante función de ser reserva de la biodiversidad biológica. La enorme cantidad de organismos y microorganismos que viven en el suelo, o sobre el suelo, hacen de él un recurso inestimable para la biodiversidad, y su mayor riesgo de pérdida se encuentra en los cambios de uso a que se le pueda destinar. La pérdida de biodiversidad es, como mínimo, un indicador de la inestabilidad del suelo.

En un pastizal por cada 1,5 toneladas de biomasa (pastos y ganado) que viven sobre la superficie de un suelo, hay unas 25 toneladas de biomasa que vive en los primeros 30 cm de la superficie del suelo. Los organismos de mayor tamaño, como los gusanos y pequeños artrópodos, inician la descomposición de la materia orgánica que se continúa después por las bacterias, hongos y demás microorganismos del suelo. Todos ellos garantizan la fertilidad del suelo, sirven de reserva de nutrientes y eliminan y descomponen sustancias contaminantes en otras más sencillas y menos nocivas.

A partir de los sucesivos descubrimientos de Darwin y Mendel, el siglo XX se inicia con un gran impulso en el conocimiento de la biodiversidad, apoyado más tarde por la Biología Molecular tras haberse establecido la estructura del DNA por Watson y Crick. La biodiversidad de especies, como recurso genético, ofrece grandes esperanzas hacia el futuro.

En la década de los años sesenta se hicieron las primeras denuncias sobre las amenazas de la contaminación sobre la biodiversidad debidas al deterioro del suelo por la lluvia ácida, a la erosión o a los cambios y ritmos de uso.

Se dan cifras espectaculares sobre el número de especies vivas. Se habla de 5 millones, pero hay quien llega hasta 30 millones en las selvas tropicales, lo que potencia con singular intensidad la diversidad biológica en los suelos de los bosques. Están descritas hasta 1,7 millones de especies, de las que aproximadamente 1 millón son insectos; sin embargo, es imprevisible la cifra a que pueda llegar el número de especies porque la información genética contenida en los ácidos nucleicos ofrece unas posibilidades insospechadas.

Un gramo de suelo bien conservado puede contener hasta 600 millones de bacterias pertenecientes a unas 15.000 a 20.000 especies distintas. Incluso en los suelos desertificados puede haber hasta un millón de bacterias por gramo y entre 5.000 y 8.000 especies.

Los bosques albergan el 50% de las especies vivas del planeta por lo que sus suelos contienen un sustrato orgánico y una biodiversidad biológica de singular riqueza: en la selva amazónica, en una sola hectárea de suelo boscoso de unos 30 cm de espesor, se han llegado a encontrar 80 Kg de biomasa animal.

Uno de los instrumentos empleados por la agricultura intensiva para aumentar los alimentos disponibles ha sido la selección genética. En buena parte del planeta el cultivo de variedades autóctonas se ha sustituido por un pequeño número de variedades de alto rendimiento y de mayor interés comercial. Por ejemplo, en Canadá la mayor parte del trigo producido (el 75%) corresponde a sólo cuatro variedades; incluso, más del 50% corresponde a una sola. En USA se cultivan únicamente cuatro variedades de patata y dos de guisantes. Esto ha permitido superar las crisis del hambre, pero también se ha producido la pérdida del potencial genético de las no cultivadas, cuya desaparición ha arrastrado a las silvestres que eran, precisamente, las más resistentes a plagas y enfermedades.

Tampoco se puede perder de vista que mientras que la alimentación humana de origen vegetal está formada por un reducido número de especies, y que, incluso, sólo cuatro: trigo, arroz, maíz y patata, cubren el 50% de nuestra dieta alimentaria, hay más de 70.000 especies vegetales susceptibles de consumo humano.

En la literatura especializada se dan una gran variedad de cifras sobre sus pérdidas, algunas claramente exageradas. En un Informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente de 1999, se habla de que unas 30.000 especies están amenazadas.

Todavía no se tiene una idea clara de la dinámica de la biodiversidad del suelo, aunque está comprobado que contribuye a estabilizar su estructura, a conservar su actividad biológica, a mantener su fertilidad, la eficacia de sus funciones y, en suma, su sostenibilidad. Las pérdidas de biodiversidad están en íntima correlación con el contenido de materia orgánica y sobre todo con su fase viva.

No se conoce con rigor en qué grado la biodiversidad contribuye a mantener la salud, ni los perjuicios que pueden sobrevenir por pequeñas pérdidas de la misma, pero los beneficios más tangibles están en el uso de plantas y animales, e incluso del conjunto de ecosistemas asociados a un suelo.

En el documento de «Estrategia Española de Desarrollo Sostenible» se propone proteger la diversidad incorporando a los sectores productivos los conocimientos complementarios necesarios para que sus actividades no impliquen la regresión de especies; es decir, se estimula a que cada sector productivo amplíe su campo de actuación

a todo aquello que contribuya a evitar la inestabilidad, mediante la valoración de su impacto. Se busca, por tanto, la interconexión entre los sistemas.

Sin ninguna pretensión justificativa y sólo con objeto de facilitar una información, los expertos utilizan la siguiente expresión para calcular el índice de biodiversidad:

$$\text{Índ. Biodivers.} = \text{N.º de Especies de un país} \times (\log \text{ de la superficie del país})^{-1}$$

## **6. EROSIÓN NATURAL DEL SUELO**

---

El suelo, como en parte le sucede a los otros dos subsistemas, además de sufrir agresiones antrópicas, las recibe también de los fenómenos naturales, aspecto que precisa algún comentario.

Los primeros grandes agresores del suelo, y quienes más modificaciones le han producido, han sido los agentes naturales tales como la sequía, el agua, el viento, las tormentas, los volcanes, los seísmos, etc, con la particularidad de que, al haber ocurrido desde el principio de los tiempos, el hombre se ha acostumbrado a padecerlos sintiéndose impotente para dominarlos.

Hace unos años, creo que fue a principios de 1988, pudimos admirar en Madrid una exposición de Leonardo de Vinci (1452-1519) sobre «Estudios de la Naturaleza» procedente de la Real Biblioteca del Castillo de Windsor, que me dejó una profunda huella. Se trataba de una espléndida colección de dibujos en la que el polifacético Leonardo, había plasmado todo el poder destructor de la Naturaleza, merced a la habilidad de su lápiz y a la posesión de uno de los saberes científicos más destacados de la época. Las erosiones en los llanos, en las colinas y en las montañas, las acciones del agua de los ríos y de los torrentes, la fuerza agresiva de las tormentas, huracanes, diluvios, aguaceros e incendios, todo ello está recogido por las manos del artista en un compendio de sensibilidad, realismo y simbolismo, que hizo patente su preocupación por el poder destructivo de la Naturaleza.

En un dibujo titulado «La destrucción abatiendo desde el cielo sobre la tierra», Leonardo lleva a sus trazos toda la fuerza con que la lluvia es capaz de dejar las rocas peladas. En otra, con el título de «Las rocas desnudas por las tormentas», se ofrece el grave estado de

erosión en que las fuerzas naturales dejan a las rocas, y aún recuerdo otra que representa «Una tormenta sobre un valle con ciudades». Tiene otro dibujo, titulado simplemente «Diluvio», sobre el que el autor escribió textualmente que para representar un diluvio «debes mostrar como unos fragmentos de montaña, que ya han sido arrastrados por los torrentes impetuosos, se precipitan dentro de esos mismos torrentes y obstruyen los valles, hasta que los ríos, encerrados, desbordan y cubren las anchas llanuras y sus habitantes». Leonardo pasa de lo bello a lo sublime cuando junto a una Naturaleza radiante dibuja otra recia, en la que las fuerzas naturales rompen con lo establecido.

No cabe duda: Fue la Naturaleza, el clima, quien con más intensidad que el hombre destruyó o modificó el suelo; lo cual no quiere decir que la especie humana haya de ser exculpada, pues tiene su parte de responsabilidad, por no haber corregido los deterioros a tiempo, o por no haber adaptado las prácticas agrarias a modelos climáticos distintos. El problema de la contaminación ha sobrevenido después.

La consecuencia inmediata de la acción de los agentes naturales sobre el suelo es su erosión y desertificación, que es la disgregación, segregación y arrastre de la superficie del suelo, con pérdidas físicas de una buena parte del mismo; siendo ésta, precisamente, la que contiene los elementos indispensables para el crecimiento de los cultivos.

Los agentes físicos más erosivos son el viento y el agua, líquida o como nieve, aunque hay otros de carácter pasivo, como son la orografía con grandes pendientes, el clima mediterráneo y, en general, el muy seco, o el alto contenido en arcilla de los suelos que los hace de difícil drenaje.

El viento levanta del suelo materiales sólidos que al caer pulverizan los aglomerados y facilitan su arrastre. Los obstáculos relativamente permeables, como los árboles, disminuyen su velocidad y amortiguan sus efectos. Sin embargo, los obstáculos impermeables producen remolinos y sólo se consigue una pequeña disminución de velocidad. Un área deforestada tiene, por ello, un gran riesgo de erosión, que se incrementa si las lluvias son escasas.

Una hectárea de terreno sometida a una fuerte acción eólica puede perder hasta 150 toneladas de suelo en una hora. En los años 30 del pasado siglo, las grandes llanuras de USA sufrieron una dura ac-

ción eólica, hasta el punto de que en mayo de 1934 una tormenta que duró cuatro días transportó 300 millones de toneladas de tierras a 2.500 km de distancia. Según datos de la FAO el 22% de la superficie del norte de África hasta el círculo del ecuador, y el 35% del Cercano Oriente, sufren una erosión eólica grave. En la UE un millón de hectáreas están afectadas por erosión eólica.

En condiciones de extrema aridez, asociadas a grandes periodos de sequía o casi permanentes carencias de agua, se superan los límites de tolerancia de su estabilidad y se llega a situaciones de desertificación. En estos casos, es frecuente que las acciones naturales se acompañen de comportamientos antrópicos como pueden ser los incendios, unas malas prácticas agrícolas, el excesivo pastoreo, la sobreexplotación de recursos hídricos o el abandono de tierras.

La erosión hídrica se produce por la lluvia, en especial por las tormentas. Cuando la vegetación es escasa y el suelo carece de la acción fijadora de las raíces y raicillas, las gotas de agua golpean y movilizan el suelo, y arrastran su capa más fértil y de mayor contenido de humus.

Las fracciones más finas, limo, arcilla y materia orgánica, se depositan en remansos y embalses, y disminuyen su aforo. Las partículas coloidales se mantienen en suspensión, y sólo se depositan cuando aumenta la concentración de sales —caso de las plataformas continentales— o por un cambio repentino y brusco de la temperatura.

Otros aspectos de la erosión hídrica son las inundaciones y avenidas, responsables de modificaciones geomorfológicas, como deslizamientos en las laderas, formación de regueros y cárcavas, depósitos de materiales sobre las llanuras etc, con pérdidas de suelo superiores a las más graves originadas por la lluvia.

Todo esto explica que las zonas mundiales de erosión hídrica sean muy extensas y que, según estimaciones de la FAO, las aguas arrastren cada año 25.000 MM de toneladas de tierra, primero a los ríos y luego a los mares. En la UE 26 millones de hectáreas están afectadas por erosión hídrica.

El potencial erosivo de los fenómenos naturales puede corregirse mediante tratamientos adecuados de los terrenos afectados, como son

los cultivos en bancales de las zonas escarpadas, colocación de presas de contención y de árboles donde haya riesgo de formación de cárcavas, evitar los monocultivos y mantener los policultivos en la mayor extensión posible, o fijar los terraplenes para impedir arrastres, etc.

Considerada globalmente, la erosión ha sido la causa de que en los últimos diez años se haya perdido más de un 15% de la superficie total cultivable del planeta. En lo que a España se refiere en el Documento sobre «Estrategia Española de Desarrollo Sostenible», aparecido en el segundo semestre del 2001, se dice «que la intensidad del proceso de erosión es superior a los umbrales críticos en cerca del 42% del territorio nacional (21 millones de hectáreas), estando casi un 12 % del mismo (6 MM de ha) sometido a una erosión muy severa, con pérdidas de suelo de 50 toneladas/Ha-año», cantidades decisivas supuesto que la tasa de formación anual de suelo es de 2 a 12 toneladas/ hectárea-año. En las zonas de clima mediterráneo llega a estar afectada más del 90% de la superficie, y las pérdidas de suelo superan la 15 toneladas/Ha-año; es decir, superiores al límite más alto de la tasa de formación.

Aunque la zona mediterránea es la más afectada por la erosión, y el fenómeno se conoce desde hace tres milenios, el proceso afecta ya a Austria, Chequia, norte de Francia, Bélgica y a algunos países más. Son todos, pues, datos y cifras sobre los que se debe de reflexionar a la vista de la funcionalidad exigible al suelo para lograr su sostenibilidad.

Los suelos forestales, tanto por su diversidad biológica como por su contenido de materia orgánica, están mucho más protegidos contra la erosión; por ello la reforestación ocupa un lugar destacado entre las medidas agroambientales previstas por la PAC para luchar contra la erosión. Sin embargo, lo reforestado en España hasta fin de siglo se limita a unas 41.000 hectareas, superficie muy inferior a la proyectada.

## 7. **CONTRIBUCIÓN DEL ANTROPOCENO A LA DEGRADACIÓN DEL SUELO**

---

A los fenómenos naturales que erosionan el suelo, se ha unido la colaboración indolente de la especie humana. La situación no es nueva; data de milenios, aunque ahora preocupe con especial gravedad. Las primeras observaciones sobre la acción antropogénica se formularon en el primer tercio del siglo XX, al percibirse al hombre como autor y protagonista de un nuevo periodo geológico que se llegó a denominar «era antropológica del planeta», caracterizada porque la humanidad, consciente o inconscientemente, estaba modificando su estructura externa. Siguiendo aquella idea, en los últimos años se le ha dado el nombre de **Antropoceno**, quizá porque a pesar de ser conocido desde hace milenios es ahora cuando se manifiesta masivamente.

En todo caso es necesario diferenciar los impactos sobre el suelo de los fenómenos contaminantes que tienen su origen en sectores económicos ajenos a los suelos productivos, con las malas prácticas agrarias u otras actividades directamente unidas a la producción agrícola.

Dentro de éstas últimas, hay que incluir desde la búsqueda de nuevos suelos de cultivo y la conservación de la materia orgánica, hasta ese notable conjunto de secuelas incorporadas por la agricultura intensiva.

## **8. IMPACTOS DE LA AGRICULTURA EN LA CONSERVACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DEL SUELO**

---

El impacto de la Agricultura sobre el suelo se inició con la roturación de montes, el abandono de los terrenos poco productivos y la desecación de zonas húmedas. Pero la Agricultura intensiva ha introducido en los últimos 50 años otros factores distorsionantes con el uso de agroquímicos y la generación de residuos por las propias actividades agrícolas.

### **8.1. Búsqueda de nuevos suelos**

La transformación agrícola de terrenos forestales ha sido el recurso más inmediato para buscar tierras de cultivo. Tovar y Blázquez, en su Historia de la Hispania Romana, señalan que los romanos pusieron en cultivo grandes extensiones forestales colindantes con los asentamientos agrícolas de la Bética y con parte del litoral mediterráneo. Siglos después la decadencia del feudalismo también contribuyó a ello, a causa de la pérdida de interés por la caza en los extensos bosques. Asimismo, el apogeo de la Mesta, en el siglo XIII, produjo efectos análogos ante la necesidad de incrementar las áreas de pastos; y más tarde, tras el descubrimiento de América, la gran demanda de madera para construir barcos fue un nuevo motivo. Así fue posible pasar de la leyenda de la ardilla de Estrabón (Geógrafo e historiador griego, 63 a.C. a 19 d.C.), según la cual la ardilla podía atravesar la Península saltando de árbol en árbol sin pisar el suelo, a la situación actual, con amplias superficies desforestadas.

Pero la transformación de bosques en tierras de cultivo continúa. El PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), ha estimado que para el 2050 las superficies dedicadas a cul-

tivos en África y Asia Occidental podrían duplicarse respecto de las actuales, aunque en términos globales los incrementos serán mucho más reducidos. Esta conversión de los suelos está teniendo un gran impacto en la pérdida de biodiversidad y en la difusión de enfermedades infecciosas, entre ellas la malaria, ante la preferencia del transmisor *Anopheles* por los espacios más abiertos.

La sobre-explotación de pastos también esquilma el suelo si no se hace dentro de sus justos términos, sin que tampoco la infra-explotación sea muy aconsejable al favorecer el desequilibrio entre las especies vegetales que crecen, por la opción selectiva que se ofrece a los animales que las consumen.

Añádase a todo esto el problema de los incendios forestales y de sus motivaciones, en ocasiones perversas. Las estadísticas demuestran que la mayoría son de origen humano, unas veces delictivas y otras por negligencia. Un suelo quemado se altera radicalmente, disminuye su fertilidad, se coagulan los coloides, se destruye el complejo arcilla-humus, se volatilizan nutrientes, etc.

Se ha avanzado mucho en los medios y estrategias para la prevención y lucha contra los incendios forestales, pero en España el problema sigue siendo grave. Desde hace veinte años, referencia que se toma por tratarse de un espacio de tiempo suficientemente largo, sólo en tres de ellos la superficie quemada no superó las 100.000 hectáreas; pero en desgraciada compensación también en otros tres—1985, 1989 y 1994— se superaron las 400.000 hectáreas. En los restantes la superficie quemada anualmente se ha mantenido entre las 100.000 y las 300.000 hectáreas. En los últimos 40 años, la superficie española afectada por incendios ha superado los 6 millones de hectáreas. Las cifras son expresivas y graves y los incendios, año tras año, desertizan el suelo y amenazan la diversidad.

Pero no siempre la responsabilidad recae sobre la perversidad o la negligencia, a veces ha bastado la falta previsión sobre el desencadenamiento de fenómenos correlacionados. Hace unos 20 años, concretamente en la zona de Daimiel, ardieron espontáneamente unas turberas de más de 10.000 años de antigüedad al descender el nivel freático del acuífero inferior, a causa de su sobreexplotación. Las turba tenía dispersas sustancias pirofóricas que entraron en combustión espontánea al secarse por la bajada del nivel freático. Tenía razón Carracido cuando decía en su libro sobre «La evolución de la

Química» que «jamás se debe de prescindir de aquellos conocimientos que preparan el de los actuales para mejor justificar el valor de estos y vivir advertidos de los errores a que puedan conducirnos». La turba almacenada y conservada durante milenios desapareció, en buena parte, sin beneficio para nadie en muy pocos años.

## **8.2. Conservación de la Materia orgánica**

Ya hubo oportunidad de comentar que la materia orgánica, tanto de forma directa como subordinada, ejerce un conjunto de funciones de las que depende su conservación y el mantenimiento de su fertilidad. Sin embargo, la materia orgánica es de fácil deterioro y no se repone lo bastante con la biomasa residual que queda en los pastizales y cultivos. La pérdida de materia orgánica es más rápida que su autorreposición. El suelo y su fracción orgánica almacenan cerca del 75% del carbono terrestre. La mayoría del carbono liberado a la atmósfera en los últimos dos siglos, procede de suelos de pradera y bosques reconvertidos a cultivos.

La disminución de materia orgánica en los suelos es preocupante en las áreas mediterráneas y en el sur de Europa, donde cerca del 75% de los suelos de cultivo tienen un contenido bajo (3,4%) o muy bajo (1,7%); y en Inglaterra y Gales los suelos con menos del 3,6 % se acercan al 50% de las superficies de cultivo.

La cantidad aconsejable de materia orgánica para un suelo es de 4% a 5%. Cuando se trata de disminuir las 3 Gt de excedentes anuales de carbono eliminados a la atmósfera como CO<sub>2</sub> y se buscan con empeño sumideros naturales, hay que detenerse a considerar la capacidad de almacenaje del suelo que, además, contribuirá a mantenerle estabilizado, a retener agua y mejorar los acuíferos, a conservar su fertilidad y a amortiguar el cambio climático. La capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo es muy superior a la que tiene la vegetación, siendo un instrumento que la humanidad habrá de manejar con beneficios múltiples.

La práctica de fertilizar con estiércol supone aportar también materia orgánica. El agricultor conocía bien que antes de añadirle al terreno tenía que hacerle «madurar», operación empírica de la que se sabía bien poco, quizá sólo que era una fermentación. El uso posterior de todo tipo de biomasa residual bajo la forma de compost, o

composto, fracasó en un principio por la mala calidad del producto, al desconocerse el proceso de compostado o por las impurezas de material no orgánico contenidas en la biomasa residual de partida. Felizmente, todo esto se ha superado: Se conocen las cuatro etapas del proceso: una primera mesófila hasta 40° C, una segunda termófila (entre 60° C a 70° C), se continúa por otra de enfriamiento y se termina con otra de maduración. Asimismo, se conoce la evolución de la población microbiana dentro de cada una, se han identificado las especies que se degradan y las que se forman, el óptimo de humedad y el tiempo de residencia en cada fase. Además, ya no se hace en pilas al aire libre sino en reactores industriales de funcionamiento continuo. Existe, pues, una tecnología de vanguardia.

En la actualidad, la materia orgánica no tiene por qué ser un factor condicionante, pues se dispone de la materia prima, biomasa residual, y de tecnología suficiente para elaborarla. De esta manera se consigue el triple objetivo de conservar el suelo, eliminar residuos orgánicos por reciclado y evitar patógenos que pueden alterar el estado sanitario en una zona determinada.

Se trabaja, también muy intensamente, en el compostado de residuos ganaderos, pues su vertido directo al suelo, tal como se generan, es notablemente peligroso por la carga patógena que comportan para humanos y animales. La ganadería intensiva en España genera del orden de 100 millones de toneladas, de las que sólo la mitad reciben tratamiento adecuado. Es de esperar que en poco tiempo se alcance un conocimiento del compostado de estos residuos semejante al de los vegetales y se convierta en una fuente más de suministro de materia orgánica.

Hasta en el ámbito de lo doméstico se están realizando notorios esfuerzos en el compostado de residuos, en combinación con el ahorro de agua. En tal sentido, al menos como curiosidad, merece citarse el Congreso celebrado en Tampere (Finlandia) (Primer Congreso Dry Toilets) entre el 20 y 23 de agosto del 2003.

### **8.3. Impacto de la Agricultura intensiva sobre el suelo**

La Agricultura intensiva, caracterizada por un alto consumo energético, se ha basado en la mecanización, en la selección genética, en incrementar los regadíos en la medida de lo posible y en el uso masivo de fertilizantes y fitosanitarios. Es verdad que los resultados ob-

tenidos han sido excelentes, porque la población infra-alimentada no llega hoy al 3% del total; pero no es menos cierto que el sistema el sistema comienza a dar muestras de insostenibilidad.

La mecanización ha contribuido a la **compactación** de los suelos en especial si están húmedos. La causa está en la presión a que se somete el suelo por el peso de la maquinaria; presión que le compacta, le hace perder porosidad y aireamiento, disminuye o pierde la microflora, la microfauna y en general la población microbiana, limita el crecimiento de las raíces, disminuye el agua retenida, se pierde materia orgánica, con el correlativo aumento de la proporción de arcilla, con el resultado final de perder fertilidad.

El problema se puede aliviar manteniendo siempre un alto contenido en materia orgánica, procedente de estiércol, compost, lodos de depuradoras, astillas de madera, etc.,. Pero, en todo caso es difícil solución y requiere una constante vigilancia, hasta el punto de que se están proponiendo agriculturas alternativas en las que se suprime la labranza.

El siglo XX ha sido testigo del desarrollo de una poderosa industria de **fertilizantes** de síntesis, que suministra al agricultor los productos químicos con los que se repone al suelo los nutrientes que las plantas toman y exportan del mismo. Las considerables mejoras de producción obtenidas, la relativa baratura de los mismos y el desconocimiento de las auténticas necesidades de los cultivos, ha sido determinante para pasar del uso al abuso, dando origen a que se mineralice el suelo, se modifique su pHa, se movilicen iones tóxicos para el suelo y los seres vivos, y se disminuya la materia orgánica, ya que la comodidad de aplicación del fertilizante ha motivado que, simultáneamente, perdiera vigencia la aplicación del estiércol.

Pero como las plantas sólo aprovechan una fracción relativamente reducida de los nutrientes añadidos, se pierde buena parte de ellos, en especial el nitrógeno, del que se ha cuantificado que las pérdidas son del orden del 40% al 60% del aplicado. Estas pérdidas se deben a fijación, volatilización o lixiviación. Por fijación se contamina el suelo, por volatilización el aire y por lixiviación el agua.

Los fertilizantes nitrogenados, amoniacales o uréicos, liberan amoniaco en presencia de suelos cálcicos o ligeramente alcalinos. Es un fenómeno meramente químico y las pérdidas por esta causa son del orden del 10% de lo aportado.

Pero por otra parte, los iones amonio, con su carga positiva, pueden fijarse temporalmente al complejo de cambio, donde las bacterias nitrificantes los transforman primero en nitritos y luego en nitratos, y más tarde las desnitrificantes los pasan a  $N_2$  y  $N_2O$ . Este último contamina el aire hasta el punto de que la mayor fuente de  $N_2O$  en la atmósfera tiene su origen en el nitrógeno agrícola, y aunque su agresividad para la salud del hombre es menor que la de los  $NO_x$  generados en las combustiones, participa activamente en el efecto invernadero.

También es significativa la transferencia de nitratos fertilizantes del suelo al agua, superficial o subterránea. Los iones nitrato, tanto por su carga negativa como por su movilidad, no se retienen en el complejo arcillo-húmico, sino que se desplazan hacia las corrientes superficiales o emigran en vertical hasta alcanzar las capas freáticas. La OMS y la Reglamentación Técnico Sanitaria Española tienen fijado el límite de tolerancia para los nitratos en aguas potables en 50 mg/L, pero son muchas las aguas subterráneas que le superan. En el Maresme se llega a 500 mg/L y en el Júcar próximo a su desembocadura se alcanzan los 100 mg/L. Los problemas sanitarios derivados de los nitratos son bien conocidos: Aparte de la disminución de Vitamina A y de la formación en la flora intestinal de nitrosaminas cancerígenas, no son menos graves las situaciones letales de anoxia provocadas en los niños por la oxidación del hierro ferroso a férrico y la formación de metahemoglobina.

La roca fosfórica y los minerales de potasio, a partir de los cuales se obtienen los fertilizantes, pueden contener elementos extraños, como el cadmio, el cobre, el cinc, el mercurio, e incluso determinados radionúclidos, que son transferidos al suelo y, desde allí, a las plantas y a los alimentos. Los elementos de mínima tolerancia son cadmio, mercurio, molibdeno y selenio; los de máxima son cromo, cobre plomo y cinc, situándose el níquel en posición intermedia. Hay otras fuentes de origen no agrícola a las que se hará breve mención más adelante.

La influencia sobre el suelo y las repercusiones sobre la salud de las especies metálicas pueden ser muy diversas. En líneas generales, disminuyen la fertilidad del suelo al bloquear, al menos alguna parte, de la superficie de las fracciones activas del mismo, y modificar el pH del medio al tratarse de cationes ácidos. Del cadmio se conocen muchas más cosas que han despertado no poca preocupación.

El cadmio, por su similitud con el cinc, experimenta en la nutrición vegetal comportamientos análogos a éste, tanto en su fijación como en su metabolismo, pero mientras la toxicidad del cinc se debe a interacciones con otros elementos, como el fósforo y el hierro, y se manifiesta por la aparición de clorosis y pigmentaciones rojas en peciolo y nerviaciones, la toxicidad del cadmio incide, además, sobre la actividad enzimática debido a su alta afinidad por los grupos asociados a enzimas y proteínas. El efecto más claro es la disminución del crecimiento de los vegetales, perfectamente valorados en muchas especies. Por ejemplo, bastan contenidos de 0,2 ppm en la fase líquida del suelo para que las habas y la remolacha disminuyan su crecimiento en un 60% y el maíz lo haga en un 20%, y concentraciones de cadmio superiores incrementan la disminución hasta el 80% en los dos primeros casos y el 40% en el último.

En el hombre y en los animales el cadmio se acumula en el riñón, el hígado y el bazo. Después, por una parte, modifica el metabolismo del calcio y del fósforo dando lugar a una desmineralización ósea y, por otra, se alteran los mecanismos hepáticos y se promueve la enfermedad Itai-Itai que apareció en Toyama (Japón). También en alguna ocasión se le ha hecho responsable de desórdenes neurológicos, pero no están suficientemente confirmados.

Siendo muchos los beneficios de los fertilizantes no se puede silenciar que también crean problemas, por lo que continuar su uso sin introducir modificaciones, equivale a olvidarse de la sostenibilidad del suelo y de los riesgos sanitarios que ello implica. Se busca la solución en el desarrollo de un cierto tipo de fertilizantes, que se denominan de **liberación lenta** porque su comportamiento se corresponde con unas tecnologías que, con el nombre general de «controlled release», tienen por objeto liberar poco a poco una determinada sustancia activa, en este caso los nutrientes vegetales, tratando de que la liberación se haga a un ritmo cercano al de la demanda.

La tecnología tiene multitud de aplicaciones y formas muy diversas de conseguirla. La Industria Farmacéutica hace buen uso de ella para preparar medicamentos que tengan la virtud de mantener en el organismo unos niveles eficientes de sustancia activa durante un determinado tiempo. Otra aplicación, que nada tiene que ver con los fertilizantes o con los fármacos, es en las pinturas marinas anti-incrustantes, con la que se trata de impedir el depósito de los organis-

mos marinos en la superficie sumergida de los barcos, para evitar así rugosidades que aumenten el frotamiento.

Los fertilizantes convencionales liberan todo su potencial fertilizante en un tiempo relativamente corto, mientras que los de liberación lenta se pretende que lo hagan poco a poco, con resultados semejantes a los que podrían conseguirse mediante una liberación múltiple y fraccionada de los nutrientes, pero sin los riesgos y costes que ésta supone.

Con ello se consigue:

- a) Reducir los riesgos de fitotoxicidad por exceso de sales, incluso aplicando dosis superiores a las normales.
- b) Reducir el número de aplicaciones, al tener el fertilizante una mayor duración a niveles efectivos, lo que, además, equivale a disminuir los costes de aplicación.
- c) Minimizar los riesgos de lixiviación de nutrientes, reducir la contaminación del aire, agua y suelo, y ahorrar unidades fertilizantes.
- d) Garantizar un aporte de nutrientes constante en todas las fases del cultivo, aunque este objetivo ha de ser superado en el futuro, pues las necesidades cualitativas y cuantitativas de nutrientes no tienen porqué ser constantes a lo largo del desarrollo vegetativo de la planta.

Estos productos son de gran interés en cultivos sensibles a la salinidad, como el fresón, las judías verdes, los garbanzos, etc. También en cultivos acolchados, en semilleros y viveros durante la germinación y enraizamiento, en cultivos de regadío, en espacios verdes y terrenos deportivos y, como es lógico, siempre que las áreas de cultivo estén situadas sobre cubetas de aguas subterráneas.

Los ácidos húmicos son un buen ejemplo de fertilizantes naturales de liberación lenta, pues mediante sus grupos quelantes se liberarán los nutrientes regidos por las respectivas constantes de inestabilidad.

Las tecnologías usadas para su fabricación industrial se resumen en: preparar productos recubiertos con un material insoluble a par-

tir de fertilizantes convencionales, obtener productos orgánicos o inorgánicos que directamente sean de baja solubilidad, búsqueda e incorporación de productos que controlen la población microbiana responsable de la nitrificación y desnitrificación y asociación de sustancias nitrogenadas inorgánicas y sustratos soporte, como ligninas, carbón, silicatos, vermiculita, etc, que se comportan como intercambiadores de iones.

Su empleo y difusión ha sido muy limitado por su mayor coste y difícil competencia con los convencionales, pero los problemas ambientales han obligado a abrir nuevos caminos e intensificado su uso. En todas las opciones seguidas para obtenerlos hay investigaciones esperanzadoras.

En la línea de los productos recubiertos hay mil posibilidades de barreras físicas, como son las ligninas residuales, productos naturales como colofonias, colágeno, gelatina o almidón, o bien polímeros biomédicos de síntesis, en forma de películas biodegradables. Los progresos alcanzados en «ingeniería tisular» pueden ser enriquecedores de esta técnica, con el uso de polímeros de ácido láctico o glicólico, o los más modernos de polietilenglicol y alcohol polivinílico.

Entre los productos de baja solubilidad han destacado los condensados de urea con algún tipo de aldehído, en especial formaldehído. Aquí las novedades pueden estar en modificar los grados de condensación o el aldehído, o alterar la velocidad de los mecanismos hidrolíticos, oxidantes o nitrificantes en función de la mayor rapidez de demanda de nutrientes.

Sobre el uso de sustratos que, sin ser recubrimientos, se comporten parcialmente como tales, hay que señalar investigaciones muy recientes en las que se aplican residuos de la industria alimentaria de remolacha azucarera, o subproductos de la obtención de zumos y concentrados de manzana y zanahoria, en las que se aprovechan como soporte los espacios intra e intercelulares que conforman el sistema poroso-capilar de las células vegetales. Estos huecos, cuyo diámetro varía desde micrómetros hasta décimas de milímetro, constituyen los alojamientos de los fertilizantes, que después quedan sellados por deposición de lignina o por desarrollo de pectinas y hemicelulosas.

Pero cada día se vislumbra la solución más radical de sustituir los fertilizantes nitrogenados de síntesis por una fijación simbiótica to-

tal del nitrógeno. Casi el 50% del nitrógeno total aportado al suelo procede de fijación simbiótica entre alguna leguminosa y algún tipo de bacteria, dependiendo la eficiencia de la fijación de la leguminosa y de la bacteria. La asociación simbiótica de la alfalfa y cierta especie de *Rhizobium* (*Sinorhizobium melilote*), llega a fijar hasta 250 kg/Ha-año. Asimismo, se trabaja con la bacteria *Azotobacter*, que está en el aire y es aplicable a ciclos de producción cortos. Hace pocos meses la Dra de Felipe presentó en esta Academia un excelente trabajo que recopilaba las estructuras simbióticas leguminosas-bacterias más eficaces para la fijación biológica del nitrógeno.

La Biología Molecular, materia en la que soy prácticamente lego, está aportando algunas respuestas a las situaciones desfavorables del suelo y del clima. Por ejemplo, la liberación de aluminio de los suelos por la acción de la lluvia ácida es un factor de fitotoxicidad para muchas plantas, que se aminora elevándoles sus niveles de tolerancia; por vía transgénica se dota a las plantas de capacidad para liberar ácidos orgánicos débiles, que se combinan o secuestran al aluminio, o simplemente crean un sistema amortiguador de pH que inhibe o aminora la toxicidad.

Y en relación con el clima se ha comprobado, igualmente, que la planta tiene algunos mecanismos que disminuyen los impactos de los cambios bruscos de temperatura, aunque son de respuesta lenta, lo que muchas veces disminuye su eficacia. Si se llega a un buen conocimiento de los mismos, pueden activarse aumentando la rapidez de respuesta.

La **salinización** del suelo es otro de los riesgos añadidos por la agricultura intensiva. Los fertilizantes han contribuido algo al problema, pero la causa más importante ha sido la expansión de los regadíos durante los últimos 40 años. En todo el mundo la superficie agrícola afectada por contenidos elevados de sales es del orden de unos 950 millones de hectáreas. En algunos casos obedece a causas naturales y, felizmente, no toda esa extensión está en situación crítica, pero al menos 60 millones de hectáreas sufren salinización por prácticas de riego inadecuadas o con agua no apropiada. Las estimaciones más fiables apuntan a que 24 millones de hectáreas han sufrido graves pérdidas de suelo y de productividad.

En los países de la actual UE la salinización afecta a un millón de hectáreas, situadas principalmente en los países mediterráneos,

siendo una de las causas principales de la desertización que padecen. En España hay unas 150.000 hectáreas gravemente afectadas.

Los **fitosanitarios** o plaguicidas, han desempeñado un papel tan dominante como los fertilizantes en la agricultura intensiva, aunque su influencia sobre el deterioro del suelo y de la salud de los seres vivos haya sido más importante. La lucha química contra las enfermedades de los cultivos y contra las plagas y depredadores de las cosechas ha demostrado tres cosas: Una alta eficacia en sus objetivos, una fuerte toxicidad para los seres vivos, en especial hombres y animales, y un fuerte impacto contaminante sobre el medio.

Al menos desde el siglo XVII, se conoce el uso de insecticidas naturales. El primero utilizado fue, posiblemente, el aceite de ballena, empleado en el cultivo del arroz; más tarde se sustituyó por el de foca, después por aceites vegetales, y a finales del siglo XIX se comprobó que los aceites minerales de antraceno y keroseno tenían un poder insecticida superior al de los vegetales, aunque ya entonces se usaban fitosanitarios inorgánicos como el azufre elemental y compuestos de mercurio, arsénico, cobre, plomo y cinc. Durante el primer tercio del siglo XX aún se han usado con cierta profusión sustancias orgánicas naturales como la rotenona, la nicotina y el pelitre.

Pero como, a pesar de todo, las pérdidas de la producción agrícola por plagas y depredadores eran del orden del 40% al 60%, se desarrollaron, y usaron con amplitud, un buen número de sustancias organomercuriales, carbamatos, organoclorados, organofosforicos, etc, de toxicidad variable, pero siempre elevada, y algunos de mayor peligrosidad porque su estabilidad favorece la persistencia en el medio.

Prácticamente todos los fitosanitarios se acumulan en el suelo, aunque puedan tener una cierta movilidad en el mismo, adsorbidos en partículas de suelo erosionadas, lo que permite su desplazamiento reversible entre el agua y el suelo. En general producen los mismos efectos que los fertilizantes, aunque más acusados en lo relativo a la biodiversidad, cuyas pérdidas son ahora selectivas y desequilibrantes de la microflora y microfauna, pues el plaguicida destruye primero a las más sensibles, y convierte en dominantes a las más resistentes. Sucede con frecuencia con determinados hongos del suelo.

Los insecticidas son más tóxicos que los herbicidas, siendo aquellos, además, los más usados en los países en vías de desarrollo, lo que supone un incremento del riesgo sobre los desarrollados, a pesar de que en éstos el uso está mucho más extendido, pues llegan a consumir el 75% de la producción mundial.

En la actualidad hay muchos plaguicidas prohibidos en diferentes países, entre los que figuran los más persistentes que desde el aire se depositan sobre el suelo, además, de los aportados para la defensa de los cultivos. La autorización de plaguicidas en la UE está regida por la Directiva 91/414/ CEE, en la que, entre otras cuestiones, se obliga a evaluar los riesgos medioambientales para el suelo de los distintos productos.

Los riesgos para la salud de los fitosanitarios acumulados en el suelo son similares a los de su diseminación en cualquier otro medio natural, aunque disminuidos en cuanto a sus efectos agudos, puesto que la cesión y captación desde el suelo es lenta, fuera de los momentos específicos de su aplicación. Entre los riesgos más difundidos están algunos tipos de cáncer, como mama y próstata, pero sin olvidar que en su desarrollo interviene el tiempo de exposición y la dosis captada o ingerida. Su acción como disruptores endocrinos también está bien confirmada, al igual que la dermatitis crónica, ciertas inhibiciones del sistema inmunológico, dolencias neurológicas, escalofríos, parálisis en las piernas, pérdidas de sensibilidad de algunas terminaciones nerviosas, pérdida de memoria, etc. Hace unos años los pájaros, los peces, los mamíferos y hasta la leche materna estaban contaminados.

La Agricultura es el sector de mayor consumo, pero no es el único: los insecticidas domésticos, todos los servicios de desinfección e higiene y sectores industriales como el textil, tienen algún grado de responsabilidad. ¿Quién ignora al estrenar una prenda de vestir que ha sido tratada en origen con algún tipo de insecticida para protegerla contra la polilla?

La solución a los problemas que crean es difícil. Se ha avanzado mucho en mejorar la seguridad de los sistemas de aplicación y en disminuir el riesgo de toxicidad dérmica y oral. A tal fin su presentación se hace en forma de emulsiones, suspensiones concentradas o encapsuladas, geles, gránulos dispersables e, incluso, monodosis envasadas en bolsas de alcohol polivinílico, solubles en agua, que per-

miten al operador liberarse de todo riesgo de contacto con el producto activo.

También se intentan fitosanitarios de liberación lenta encapsulados en aluminosilicatos artificiales, de gran homogeneidad en el tamaño y distribución de poros. Es conocido el caso de la faujasita, constituida por unidades de óxidos de silicio y de aluminio, estructuradas en forma de prismas hexagonales, que alojan las unidades moleculares de la sustancia activa a liberar.

Todas estas innovaciones disminuyen el riesgo en la manipulación, pero no la toxicidad. En este sentido lo más positivo ha sido el diseño de estrategias basadas en usar el fitosanitario sólo hasta que la población patógena disminuya por debajo del umbral de daño para el cultivo.

Las verdaderas alternativas son las que permitan suprimir el fitosanitario. Entre ellas parece adquirir cierta fuerza la biofumigación, consistente en aprovechar la actividad plaguicida de los gases resultantes de la biodescomposición de materia orgánica, con una relación C/N preferente de 8 a 20, producidos por una fermentación muy anaerobia de la biomasa.

Hay otras alternativas físicas, como es el uso de vapor de agua para esterilizar los sustratos, sistema muy caro en cuanto se trate de una superficie de mediana extensión, o bien la termoterapia, que consiste en el tratamiento del suelo con agua a 40° C-50° C, durante un tiempo pequeño, y que adolece de la misma dificultad de su carestía.

Sin embargo en las zonas de alta radiación solar, como son las áreas mediterráneas, la termoterapia puede ser sustituida por la solarización del suelo, que es un proceso hidrotérmico en el que el suelo húmedo, recubierto de un plástico para evitar pérdidas de agua y de calor, se calienta por la radiación solar en sus capas más someras (hasta los 30 cm de profundidad), con lo que inactivan parte de los microorganismos patógenos, en tanto que sobreviven y se incrementa la colonización de los que le vitalizan.

Otro sistema, conocido ya a principios del pasado siglo, es el control biológico, basado en dispersar depredadores de los depredadores, como son determinadas hormigas (*Pheidole megacephala*) frente al gorgojo de la patata, o bacterias (*Pasteuria penetrans*), que controlan

y reducen las poblaciones de fitoparásitos. A escala de laboratorio se han obtenido resultados atractivos, pero mucho más dudosos en la práctica agrícola ordinaria. Y en la misma línea de lucha biológica está el uso de bacterias, hongos y virus depredadores de plagas pero sin toxicidad para el hombre. El *Bacillus thuringiensis* es una bacteria formadora de esporas descubierta a principios del siglo XX, a la que sólo se le prestó atención como plaguicida 50 ó 60 años después. Hoy se usa y comercializa ampliamente y constituye un porcentaje del orden del 30% del mercado de insecticidas.

La actividad radica en una serie de variantes de una proteína, *Bt*, que se usan mucho en el control de plagas en pastizales y en los cultivos de tabaco, maíz, tomates, arroz, etc. ya que son tóxicas frente a larvas de lepidópteros —orugas—, de dípteros —moscas negras y mosquitos—, coleópteros —escarabajos de la patata y del olmo—, protozoarios, ácaros y otros. Los diferentes tipos de proteínas *Bt* tienen pesos moleculares entre 70 kD y 130 kD. Las correspondientes a éstos últimos al ser ingeridas por el insecto experimentan una proteólisis y se rompen en fragmentos tóxicos activos.

Antes se indicaba que la Biología Molecular permite conocer los mecanismos de reacción de las plantas frente a determinados agentes climáticos o variaciones del estado del suelo; pero no es sólo esto, sino que también hace posible identificar los sistemas de defensa de las plantas frente a las diferentes plagas y caracterizar los genes implicados en ellos. De este modo la expresión en la planta de un determinado gen de un cierto virus, inhibe su posible propagación y le protege frente a la enfermedad.

La Ingeniería Genética puede informar también sobre los medios para alterar los periodos de uso del fitosanitario en las diferentes fases del cultivo, unas veces introduciendo en la planta genes capaces de degradar el fitosanitario y otras insensibilizando la proteína de la planta que es la diana de la acción de aquel. Pero esto nos sitúa ante el debate de los organismos genéticamente modificados (OGM) o de los organismos vivos modificados (OVM), denominación que el Convenio sobre Diversidad Biológica reserva para aquellos que «resultan de la biotecnología y pudieran tener un efecto adverso sobre la conservación y uso sostenible de la diversidad biológica».

## **9. SUELOS CONTAMINADOS: CONTAMINANTES**

---

### **9.1. Consideraciones generales**

Aunque la degradación del suelo por actividades agrícolas es una clara contaminación del suelo, conviene diferenciarla de aquellas agresiones que tienen su origen en actividades urbanas, domésticas, comerciales, industriales o mineras. Tal es el caso de las lluvias ácidas, derivadas de los procesos de combustión, o de la diseminación de metales, o del depósito de compuestos orgánicos volátiles y persistentes, como dioxinas, policlorobifenilos, hidrocarburos aromáticos y alifáticos, del vertido de residuos, etc.

La Ley 10/1998, de 21 de abril de 1998 define los suelos contaminados como aquellos cuyas características físicas, químicas y biológicas han sido alteradas por la presencia de compuestos de origen antrópico que comportan algún riesgo para la salud humana o para el medio ambiente. La evaluación de los efectos sobre la salud humana de los contaminantes requiere tener en cuenta su concentración en el suelo y su comportamiento ante los mecanismos de exposición.

La misma Ley regula las acciones recuperadoras, que aunque iniciadas unos años antes, van muy lentas en su ejecución. La Directiva 96/61/CE sobre «Prevención y Control Integrado de la Contaminación» debiera haber tenido un efecto impulsor, ya que constituyó un paso adelante en el análisis de los impactos recíprocos entre los subsistemas y en la armonización operativa.

Según la Agencia Europea del Medio Ambiente el número de terrenos contaminados en la UE se sitúa entre 300.000 y 1.500.000. La oscilación de cifras se debe a la falta de acuerdo al establecer los cri-

terios sobre los niveles aceptables de riesgo y los objetivos de protección; esto indica que, sin perder de vista el objetivo futuro de prevenir, en el momento actual hay que dedicar un esfuerzo importante a descontaminar, sobre todo porque la contaminación difusa, vinculada a la deposición de contaminantes desde el aire y el agua, tardará tiempo en corregirse. Baste indicar que el exceso de nitratos en el agua potable o las emisiones de amoníaco y otros compuestos de nitrógeno de la agricultura, el tráfico o la industria, ha determinado que en algunos suelos forestales europeos se hayan registrado aportaciones de nitrógeno de hasta 60 kg anuales por hectárea, cuando antes de la industrialización masiva la cifra no alcanzaba a 5 kg.

La defensa del suelo frente a los agentes naturales se inicia con la correcta ordenación del territorio y la adecuada gestión de sus usos. La ordenación del territorio debiera tener como fin último el logro de su sostenibilidad y para ello ha de iniciarse por la valoración del impacto ambiental del desarrollo y de la extensión de las ciudades, para evitar la implantación de áreas urbanas difusas e incontroladas, tratando siempre de procurar la ocupación equilibrada del territorio y potenciar el uso de recursos endógenos. La correcta gestión de los usos del suelo, por su parte, es el punto de partida para conservarle, siempre que se acompañe de cuantas prácticas favorezcan su mantenimiento, como son los cultivos en curvas de nivel, los policultivos, la conservación de embalses, la forestación, etc.

Mayor dificultad presenta tener reparar, primero, para impedir después las acciones degradantes antrópicas, puesto que el suelo es receptor de contaminantes del resto de los subsistemas incluida la biosfera global.

La contaminación atmosférica está íntimamente vinculada a todas las actividades del hombre, y cuanto se haga por reducirla tendrá una valoración positiva y repercutirá en la conservación del suelo y en la salud de la biosfera. El aire se ha mejorado bastante y algo semejante ocurre con el agua, según expreso reconocimiento de la Agencia Europea del Medio Ambiente. Ambas mejoras contribuirán a paliar la situación del suelo.

El problema de los residuos no ofrece perspectivas tan favorables, y así lo reconocen los organismos europeos e internacionales. Disminuir la generación de residuos, y mejorar su gestión y tratamiento es un problema pendiente que, cuando se logre, repercutirá de forma notoria sobre el estado del suelo.

Entre tanto, hay que atender sin demora a reparar los deterioros que sufre el suelo. Falta de la debida atención durante mucho tiempo, quizá, como reza el proverbio, porque «donde más hondo está el río es donde hace menos ruido», es necesario darle un impulso investigador al desarrollo de procesos descontaminantes y, de momento, emplear a fondo aquellos de que se dispone.

## **9.2. Contaminantes**

Los contaminantes del suelo, proceden básicamente del aire, y son metales, en general como óxidos y sales, junto con un variadísimo número de compuestos orgánicos, que se encuentran dispersos en la atmósfera como polvos, hollines, nieblas o aerosoles, formados en un variado número de actividades humanas.

El depósito de los metales puede suceder directamente sobre la fracción sólida, o desde la solución del suelo a la que previamente se incorporan. Se fijan al suelo por adsorción en posiciones de cambio o por reacciones de precipitación y complejación, en las que compiten la concentración metálica, los pK de las reacciones de fijación, y las variables que intervienen en ellas, de las que el pH suele tener notoria influencia.

Las preferencias de retención, establecidas para igualdad de concentración molar de metales, a pH de 2.4 son:



mientras que a pH cercano a 6 el orden de retención es:



La secuencia es perfectamente lógica porque a pH algo menores de 3 se inicia la precipitación como hidroxisales de los cationes más ácidos, a pH 6 han precipitado como hidróxidos la mayoría de ellos, y los que no lo hacen es porque se han estabilizado bajo una forma compleja. La actividad del complejo arcillo-húmico sobre los iones metálicos da lugar a que, a igualdad de carga, se adsorban más fácilmente los de mayor radio iónico, por su menor acidez.

De los compuestos orgánicos llegados al suelo desde el aire se tiene un conocimiento bastante completo, tanto de los volátiles (COV)

como de los que se encuentran en la atmósfera como partículas. La Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas definió a los primeros, en el año 1991, como «los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, de naturaleza antropogénica capaces de producir oxidantes fotoquímicos».

La EPA de USA, en la «Clear Air Act Amendments» (CAAA) de 1990 identifica como COV a 189 productos contaminantes, en los que se pueden distinguir dos grupos importantes: los hidrocarburos varios, con inclusión de especies oxigenadas como alcoholes, cetonas, etc, y los hidrocarburos halogenados de uno o dos átomos de carbono —C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>—, de los cuales del orden de cuarenta son organoclorados, y de ellos algo más de diez fitosanitarios. No son, por tanto, los fitosanitarios los predominantes, a pesar de la importancia que se les ha dado.

Entre los COVs más comunes están: tolueno, xilenos, isopropanol, esterés glicólicos, olefinas, naftas, destilados de petróleo, acetona, parafinas, metil-etil cetona, hidrocarburos aromáticos y tricloroetileno. Dentro de ellos hay algunos que también se enmarcan como Compuestos Orgánicos Persistentes (COP), caracterizados por su lipofilia, volatilidad y resistencia a la degradación.

Pero también a través de las partículas, se depositan Compuestos Orgánicos Persistentes, entre los que figuran los PCB (policlorobifenilos) y las conocidas dioxinas y furanos.

Los PCB se usan en transformadores eléctricos, en pinturas, plásticos, y en diferentes productos industriales. Son sustancias de difícil combustión por lo que su diseminación ambiental ocurre con facilidad, estando clasificados como posibles cancerígenos humanos, aunque sobre los animales se les reconocen también otros efectos adversos, como toxicidad reproductiva, inmunotoxicidad y carcinogenicidad.

Los problemas de dioxinas y furanos afloraron a causa de accidentes, como el de Seveso (Italia, 1976), por el uso bélico como desfoliantes de otras sustancias que los contenían, en la combustión de madera o al estudiar las emisiones gaseosas de las incineradoras de residuos. Sobre su toxicidad se mantienen grandes controversias con, relativamente, pocas evidencias sobre su alcance. Por ello han prevalecido las medidas precautorias, al mismo tiempo que se continúan las investigaciones sobre su toxicidad y los mecanismos de acción sobre el organismo humano.

Hay pocos productos químicos de los que se tengan tantos conocimientos como los que hoy se dispone sobre estos, tanto de sus propiedades químicas como físicas. Sus relativamente altos puntos de fusión (entre 129° C y 332° C) son determinantes para que se condensen al poco de ser emitidos, lo que explica la rapidez con que pasan del aire al suelo y desde allí a los alimentos, que son los responsables de más del 90% de la ingestión de dioxinas de los seres vivos.

La Comisión de las Comunidades Europeas en su Comunicación [COM (2001) 393 final], informó de su amplio espectro de incidencia sobre la salud, que alcanza al desarrollo neurológico, a modificaciones endocrinas y reproductivas, a la diabetes, a las enfermedades cardiovasculares, a la hormona tiroidea, a problemas de piel como el cloracné, pudiendo, incluso, provocar defectos en la mineralización, retrasos de desarrollo y alteraciones en la *ratio* entre hombres y mujeres a favor de éstas. Pero también se alude a algunos tipos de cáncer, sobre los que textualmente dice que «aunque la dioxina es conocida como cancerígeno humano no se considera que el cáncer sea el efecto crítico que haya que tener en cuenta para la fijación de la ingesta tolerable».

## **10. SISTEMAS FISICO-QUÍMICOS DE DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS**

---

El tradicional abandono del suelo durante no poco tiempo exige hoy potenciar las investigaciones para descontaminarle, ofrecer tecnologías diversas que se adapten a las necesidades de cada caso y minimizar los costes. La cuestión no es sencilla. El hecho de que en la actualidad se disponga de dos tipos de sistemas, in-situ y ex-situ, da idea de la complejidad y del coste.

Entre los sistemas in-situ están el lavado con agua, la extracción en fase de vapor y la extracción multifase. Entre los ex-situ, de muy limitada y costosa aplicación, está la desorción térmica a baja temperatura.

El lavado con agua depende de la solubilidad de los contaminantes y suele ir seguido de una depresión del nivel freático hasta lograr que los contaminantes sean eliminados por drenaje.

La extracción en fase de vapor se aplica cuando los contaminantes son volátiles, como gasolinas o kerosenos, y se basa en inyectar vapor y aire caliente a presión, mediante tubos que se introducen en el suelo, con objeto de volatilizar y arrastrar hacia la superficie las sustancias extrañas. El suelo a tratar requiere tener unas características de porosidad y permeabilidad adecuadas, para que se facilite la evacuación. Suelen necesitarse tratamientos prolongados y nunca se consigue una limpieza absoluta.

Los sistemas multifase son complementarios de los anteriores para intensificar la limpieza. Consisten en combinar la extracción en fase vapor con otra en fase líquida, que puede ser agua con algún extractante o con un disolvente no acuoso, que después se arrastra en

fase vapor. Tampoco es un método que se caracterice por su sencillez, y ambos tienen el inconveniente de que todo lo que eliminan del suelo vuelve a contaminar el aire. Aunque sólo fuera por esto su eficacia es muy dudosa, pues es principio básico de toda acción reparadora que no se limite a transferir los contaminantes de unos a otros subsistemas naturales.

Los procedimientos ex-situ se limitan a tratamientos de masas de suelo localizadas y relativamente pequeñas. Pueden reducirse a una aireación, a un lavado con agua o con disolventes, o a una desorción térmica en un horno a temperaturas que no superen los 350° C. Esta última tiene la ventaja de que los contaminantes pueden ser recuperados a la salida del horno o destruidos por combustión.

## **11. BIORREMEDIACIÓN Y FITORREMEDIACIÓN**

---

Mayores expectativas parecen ofrecen los métodos de biorremediación, que se valen de microorganismos, y los de fitorremediación, que emplean plantas.

Todos los seres vivos presentan alguna capacidad para metabolizar sustancias orgánicas, incluso aunque se trate de xenobióticos de origen antrópico. Los microorganismos, y dentro de estos las bacterias, son a los que se hace referencia de forma más habitual, pero también lo tienen la microflora del suelo y las plantas en general.

Los microorganismos son los seres más antiguos del planeta; en concreto las bacterias datan de hace 3.600 millones de años. En su capacidad para degradar de residuos se basan todos los ciclos biogeoquímicos naturales y de ellos depende la sostenibilidad de buena parte de nuestros recursos. Tienen unas cualidades que, bien usadas, pueden ser decisivas.

En primer lugar son muy abundantes, pues sólo nuestro intestino acoge a varios billones, quizá hasta decenas de trillones de microorganismos, y según los expertos más de la mitad de la biomasa existente en el planeta es microbiana, aunque se conozca sólo una parte muy pequeña de ella (0,01 a 1%).

Esta diversidad biológica tiene, además, la capacidad de evolucionar con rapidez para adaptarse a las condiciones ambientales con independencia de que pueda ser genéticamente manipulable; y ha sido esta evolución lo que ha permitido desarrollar organismos capaces de acumular metales, o de utilizar como alimento hidrocarburos del petróleo o diferentes xenobióticos, inicialmente considerados como no biodegradables. Cuando una población de microorganismos

convive con algún xenobiótico, al cabo de algún tiempo acaba surgiendo alguna mutación, que le permite utilizar como alimento al contaminante. Aunque la adaptación —mutación— también puede provocarse por modificación interna de su DNA o por transferencia de genes entre bacterias.

La biorremediación es una vía biológica a través de la cual los organismos vivos, en especial los microorganismos simplificadores, mineralizan las sustancias carbonadas —sintéticas o no— a su primitiva forma abiótica. Esto puede ocurrir bajo condiciones aerobias o anaeróbicas, pero siempre mediante mecanismos químicos de naturaleza redox.

Los contaminantes sirven de alimento y de soporte energético para que los microorganismos continúen su crecimiento, de manera que los contaminantes actúan como donadores de electrones (reductores). En medio aerobio es el oxígeno quien los capta, pero en medio anaerobio el aceptor es el  $\text{CO}_2$ , aunque también pueden serlo los nitratos y sulfatos presentes en el suelo de origen natural.

Las transferencias energéticas implicadas en el intercambio electrónico, se conservan mediante la síntesis de ATP, catalizada por la enzima ATP fosforilasa, que después se emplea en los procesos metabólicos.

La degradación de determinadas sustancias orgánicas, incorporadas por actividades antrópicas, se puede estimular introduciendo en origen pequeñas modificaciones estructurales sin que se altere su capacidad de actuación sobre el objetivo para el que se diseñaron. Un caso bien conocido es acelerar la degradación biológica aerobia de los anillos bencénicos por incorporación de un grupo OH. Es decir, se puede facilitar el trabajo bacteriano mediante una previa modificación del xenobiótico.

Otro sistema es la fitorremediación, procedimiento que se basa en emplear plantas para eliminar de los suelos, o de las aguas, sustancias contaminantes muy diseminadas, orgánicas o inorgánicas. El mecanismo es radicalmente distinto en cada caso, pues los metales no pueden ser degradados, sino simplemente captados, mientras que las sustancias orgánicas son metabolizadas, ya sea en la propia raíz —rizodegradación— o en los tallos y hojas de la planta —fitodegradación.

Allí donde se instala una gasolinera, por ejemplo, se contaminan severamente los suelos y su descontaminación puede hacerse plantando árboles de amplias y múltiples raíces, para que alcance a la mayor parte de la zona contaminada, a través de las cuales, e incluso mediante bacterias, la planta acaba metabolizando el hidrocarburo contaminante.

Más frecuentes son las plantas capaces de absorber y retener metales, que es una forma de reconcentración natural de los mismos. En este caso se usan plantas de crecimiento rápido, con alto contenido en biomasa y, sobre todo recolectables, pues si no se recogen la planta muerta devolvería los metales al suelo. Se pueden usar cereales silvestres de bajo o nulo valor, de los que después se pueda recuperar su contenido. De conocimiento más reciente es la rizofiltración, debida a que el aumento del tamaño de los iones metálicos, en forma de quelatos, impide su paso a través de las membranas celulares y se fijan sobre la raíz de la planta.

En la tragedia ecológica de Aznazcollar, los científicos han sido mucho más eficaces que los organismos de las Administraciones. Ignoro en que grado se han establecido las responsabilidades que procedan sobre aquel desastre. Sin embargo, los científicos han recogido más de 100 de especies de plantas, crecidas espontáneamente en la zona contaminada, que tienen capacidad para acumular metales pesados.

## 12. EPÍLOGO

---

Cuando se presenta un tema como éste puede tenerse la impresión de que las connotaciones negativas son de tal magnitud, que parecen insuperables. Sin embargo, ya se ha visto que no es así y por ello deseo llevar al ánimo de todos un mensaje de optimismo.

La creación de la FAO y el impulso que dio a la Agricultura intensiva ha permitido mejorar la disponibilidad alimentaria de forma espectacular durante la segunda parte del siglo XX, a pesar de que la población mundial se ha más que duplicado a lo largo del periodo. Pero es indudable que la degradación del suelo y la diseminación de productos químicos agrícolas, obliga a cambiar de directrices no sólo para mantener el nivel alimentario de los actuales habitantes del planeta, sino para atender a las necesidades de los 7.000 millones de habitantes que se prevén para el año 2010, o los 8.000 del año 2025, en el que se calcula que habrá que incrementar la producción de alimentos, al menos, un 50%, sin que las nuevas roturaciones de suelos aumenten más de un 5% sobre las actuales.

El progreso científico en las ciencias de la vida continúa su avance a un ritmo bastante acelerado. Día a día se aportan ideas y se incorporan modalidades operativas más compatibles con los objetivos de sostenibilidad que afectan al suelo, como son las agriculturas de conservación y de precisión.

La primera de ellas se basa en prácticas agronómicas que alteran lo menos posible la estructura, composición y biodiversidad del suelo, mediante un laboreo mínimo y el establecimiento de cultivos de cubiertas que le protegen de la erosión y escorrentías. Parece, en buena parte, una cierta vuelta hacia el pasado.

La agricultura de precisión, tiene connotaciones de mayor actualidad. Fue definida en 1997 por el National Research Council de USA como un «conjunto de sistemas de cultivo que utiliza tecnologías de la información para ajustar el uso de semillas y de agroquímicos considerando la diversidad del medio físico y biológico». Es una Agricultura digitalizada que emplea sensores y métodos de teledetección para conocer las características del suelo y su contenido biológico, y sobre la base de esas observaciones se planifica el uso de plaguicidas en el límite estrictamente necesario, con lo que minimiza su consumo y su diseminación ambiental. No trata de rechazar ninguno de los conocimientos adquiridos en el último siglo sino de acotar los riesgos utilizando las tecnologías más actuales.

Sin embargo, posiblemente la de denominación más difundida sea la agricultura ecológica, concebida al principio en términos un tanto difusos, después ha sido objeto de notables esfuerzos para su definición y progresiva consolidación científica y técnica. Quizá sorprenda por tener un variado número de nombres y cualificarse mucho más por sus objetivos, y por lo que no debe de hacerse, que por su metodología.

El Reglamento y Normas Técnicas del Consejo Regulador de la Agricultura Ecológica (CRAE), aprobado en España por O.M. de 4 de octubre de 1989, en su Capítulo I, punto 2.º, dice: «Los términos de agricultura ecológica, biológica, orgánica, biodinámica o biológico-dinámica, definen un sistema agrario cuyo objetivo fundamental es la obtención de alimentos de máxima calidad, respetando el medio ambiente y conservando la fertilidad de la tierra, mediante la utilización optima de los recursos y sin el empleo de productos químicos de síntesis». Se puede observar que la definición atiende más a señalar lo que no hay que hacer, que a describir las prácticas sustitutorias. Sin embargo, sus promotores van perfilando poco a poco las bases científicas y sus modos de operar.

Conceptualmente se parte del hecho de que el suelo es un sistema vivo, lo que, no siendo novedad, merece la pena destacarse porque sitúa los fundamentos en la participación continuada de las micorrizas y bacterias responsables de la captación radicular de nutrientes, sin perder de vista que la mayoría de los organismos del suelo ejercen la doble función de consumidores y productores y que, aunque su principal consumo energético procede de los residuos, también las algas fotosintéticas del suelo captan directamente la energía solar. Es decir en el suelo hay una dinámica permanente de des-

composición, conformación y captación energética, que se traduce en un mecanismo de reacción química natural, en el que unas sustancias desaparecen y otras aparecen con intercambios energéticos.

Es evidente que si el elemento más diferencial de la agricultura ecológica es no usar productos agroquímicos de síntesis, estos deberán ser sustituidos por materia orgánica, policultivos, asociaciones y rotaciones de cultivos, enmiendas y activadores biológicos, sustratos y acondicionadores de suelos, insecticidas de origen vegetal o microbiano, feromonas y atrayentes sexuales, flora espontánea, abonos verdes y recursos fito y zoogenéticos. En una palabra, aprovechar la biodiversidad y los ecosistemas del suelo sin deterioro de los mismos. Pero a la nueva tecnología le queda camino por recorrer.

Y no se puede terminar sin unos breves comentarios sobre la agricultura transgénica, someramente citada antes a propósito de la modificación genética de la resistencia al estrés o de la degradación de fitosanitarios. Dicho en términos elementales los cultivos transgénicos se caracterizan por haberse modificado la dotación genética de las plantas, con la introducción de genes extraños procedentes de determinadas bacterias. De esa forma las plantas adquieren un nuevo patrimonio genético que aumenta sus defensas y modifica sus componentes bioquímicos y nutricionales, disminuyen sus necesidades de productos agroquímicos y se aproximan a una agricultura más sostenible y a una mejor conservación del suelo.

La transferencia genética se puede hacer mediante ciertas bacterias, como las *Agrobacterium* o por bombardeo con microproyectiles de metales nobles que soportan el ADN que contiene los genes que se desea incorporar.

Se cuentan por docenas los cultivos transgénicos con una o varias capacidades de resistencia a las heladas, a insectos, virus, hongos y enfermedades diversas, así como por prolongar la lozanía de los productos, por ser los causantes de cambios de color y sabor, por moderar o retardar la maduración de frutas, o por inducir cambios de composición que incrementan los componentes de propiedades más saludables o disminuyen otros, ocasionalmente menos aconsejables, como el café bajo en cafeína.

Siguiendo esta línea se ha llegado a la agricultura molecular, que es una biotecnología del ámbito de la Ingeniería genética, que puede

ser de enorme utilidad para obtener mediante plantas, y bajo parámetros de sostenibilidad, productos farmacéuticos, vacunas (contra el virus de la gastroenteritis, enfermedades diarreicas, sarampión, etc.) o anticuerpos. En el nivel de conocimientos actuales estas previsiones se sitúan en un horizonte próximo a los diez años, pero bueno es tener ya la perspectiva sobre sus posibilidades.

Sin embargo, es bien conocida la polémica surgida sobre el uso de los productos transgénicos, no porque haya dudas sobre sus beneficios, sino por las incógnitas que aún hay pendientes, puesto que al tiempo que se introduce un cierto gen, con unos fines concretos, se incorporan también otros cuyos efectos se desconocen. El Prof. Lacadena, en la Monografía VI editada por esta Real Academia, señala algún problema sanitario de resistencia a ciertos antibióticos y la aparición de alergias insospechadas, pero al mismo tiempo recoge la observación de Jones en el *British Medical Journal* de 27-2-99, de que en nuestra dieta diaria se consumen millones de genes funcionales, de los que en la mayoría de los casos no se conoce su función.

Según los expertos de la Comisión de las Comunidades Europeas, e incluso está recogido en Documentos de la misma, la Biotecnología y las Ciencias de la Vida serán, después de las tecnologías de la información, la base para una nueva economía, fundada en la mejora de la calidad de la vida y de la asistencia sanitaria, que aportará nuevas herramientas para proteger el medio ambiente.

Puede que sea prematuro sacar conclusiones sobre las ventajas e inconvenientes de la progresiva implantación de la agricultura transgénica, puesto que los consumidores exigen que los alimentos tengan cada día más alto valor nutritivo y se ajusten a unas normas de seguridad rigurosas. El desafío, como dice un informe de la OCDE del año 2000, consiste en responder a la demanda de los consumidores, asegurando que los alimentos se han cultivado mediante de prácticas agrícolas sostenibles, iniciadas sobre un suelo bien conservado.

La respuesta a este desafío está muy clara. Día a día, la innovación y la creatividad está multiplicándose; con sus luces y con sus sombras, es cierto, pero son éstas, precisamente, las que alumbran nuevas luces, ya que la creación científica lleva intrínseca la superación de objetivos en plazos reducidos.

Desde la época de Liebig la investigación científica del suelo ha proporcionado las directrices técnicas para su conservación y mejora de rendimientos, aunque en ocasiones, como en la actual, el progreso mismo obliga a rectificar los comportamientos que no contribuyan a su sostenibilidad. «La Técnica, decía Teilhard de Chardin, es el sistema nervioso de una humanidad cuyo cerebro es la investigación científica y cuyo corazón el amor universal». Hoy tenemos a nuestra disposición, y económicamente asequibles, una cantidad de energía y un conjunto de medios y de conocimientos con los que difícilmente se podía soñar hace 60 ó 70 años. Todo esto hay que valorarlo, salvaguardando la seguridad y la sostenibilidad, y sin perder de vista la referencia al corazón que hiciera Teilhard.

Muchas gracias, por su atención

## **BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

---

Agencia Europea del Medio Ambiente.(1999) Environment in the European Union at the turn of the Century.

Agencia Europea del Medio Ambiente. (1999) Management of contaminated sites Europe.

ALBAREDA, J.M. (1943) El suelo. Estudio fisico-químico biológico de su formación y constitución. Edi. SAETA. Madrid.

ALBAREDA, J.M., SANTOS RUIZ, A. Y ALBIÑANA, T. (1944) Materia orgánica en suelos españoles. I Carbono. *Anal. Fis. y Quim.* 39, 751-68.

ALBAREDA, J.M., SANTOS RUIZ, A. Y ALBIÑANA, T. (1944) Materia Orgánica en suelos españoles. II. Nitrógeno y razón C/N. *Anal. Fis. y Quim.* 40, 84-97.

ALBAREDA, J.M. Y GUTIERREZ RÍOS, E. (1942) Sobre el estado de los suelos españoles. *Rev. Univ. Madrid.* T.2; fas. V 3-21.

ANDRÉS, M.F. (2002) Estrategias en el control y manejo de nematodos fitoparásitos. En Ciencia y Medio Ambiente. Fernando Valladares (editor). Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC. Madrid.

Banco Mundial.(1992) Informe sobre el Desarrollo Mundial 1992. Desarrollo y Medio Ambiente.- Washington, D.C.

BELLO, A Y LÓPEZ PÉREZ, J.A.(2002) Alternativas agroecológicas a los productos fitosanitarios. En «Ciencia y Medio Ambiente». Fernando Valladares (editor). Centro de Ciencias medioambientales. CSIC. Madrid.

CALA RIVERO, V. (1998) Comportamiento de metales pesados en suelos. En Terceras Jornadas sobre Suelos Contaminados. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

- CALLABA, A. (1998) Criterios para la selección de técnicas de recuperación de suelos contaminados. En «Terceras Jornadas sobre suelos Contaminados». Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- CARLOS (DE) VILLETAS, M.P. (2003) Desarrollo de nuevos fertilizantes de liberación controlada a partir de productos vegetales. Trabajo de fin de carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid.
- Comisión de las Comunidades Europeas.(2001) Estrategia Comunitaria sobre las dioxinas, los furanos y los policlorobifenilos (2001/C 322/02) [COM(2001)393 final].
- Comisión de las Comunidades Europeas.(2001) Hacia una visión estratégica de las Ciencias de la vida y de la Biotecnología. [COM(2001) 454 final] Bruselas.
- Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa y Comisión Europea. (2000) Estado de los bosques en Europa. Executive Report.
- FELIPE (DE) R. (2003) Interacciones microorganismos-suelo-planta en la preservación del Medio Ambiente y la Salud. *Real Academia Nacional de Farmacia*. (en prensa).
- FERNÁNDEZ PASCUAL, M, DE MARÍA, N Y DE FELIPE, M.R.(2002) Fijación biológica del nitrógeno: factores limitantes. *Ciencia y Medio Ambiente*. Centro de Ciencias Medioambientales. Madrid.
- FERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ, E, y otros (2003) ADN antiguo: química y aplicaciones. *Anal Quim.* 99,3; 27-37 (2003).
- GARCÍA OLMEDO, F.(1998) La tercera revolución verde. Editorial Debate. Madrid.
- GONZÁLEZ, G. (2000) La producción agroalimentaria española. Situación actual y perspectivas futuras. En «Alimentos y Salud» *Monografía VI. Real Academia de Farmacia*. Coordinador Bernabé Sanz Pérez. Madrid.
- HOYOS DE CASTRO, A. (1980) La Edafología como Ciencia. El problema de las clasificaciones de suelos. Discurso leído en la Inauguración del Curso 1980. *Real Academia de Farmacia. Madrid*.
- Instituto de Recursos Mundiales (2002) Recursos Mundiales 2002. Ecoespaña. Madrid.
- JIMÉNEZ BALLESTA, R. (1998) Comportamiento del suelo ante procesos de contaminación. En Terceras Jornadas sobre Suelos contaminados. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

- JIMÉNEZ GÓMEZ, S.(1992) (Coordinador). Fertilizantes de liberación lenta. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- JIMÉNEZ GÓMEZ, S., Cartagena Causapé, M.C. y Mateo López, J.M.(1985) Estudio de diagramas de solubilidad como base para la preparación de fertilizantes de acción controlada. I. *Anales de Edafología y Agrobiología*. Tomo XLIII, pp. 1623-1631.
- JIMÉNEZ GÓMEZ, S., CARTAGENA CAUSAPÉ, M.C. Y MATEO LÓPEZ, J.M. (1985). Estudio de los diagramas de solubilidad como base para la preparación de fertilizantes de acción controlada. II. *Anales de Edafología y Agrobiología*. Tomo XLIII, pp. 1633-1499.
- JIMÉNEZ, S., CARTAGENA, M.C., VALLEJO, A. Y CASTAÑEDA, E. (1987) Study of the behaviour of the  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  rosin-coated fertilizer. I. *Agrochimica* vol. XXXI, n.º 1-2: pp. 12-17.
- JIMÉNEZ, S.(2002) Antecedentes y objetivos del Sexto Programa de Acción Ambiental de la Unión Europea. En «La Salud prioridad en el VI Programa de Medio Ambiente de la Unión Europea». *Monografía XI. Real Academia Nacional de Farmacia*. Madrid.
- LABRADOR, J.M (1996) La Materia orgánica en los agrosistemas. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- LACADENA, J.R.(2000) Alimentos transgénicos: Verdades y mentiras. En «Alimentos y Salud». *Monografía VI. Real Academia de Farmacia*. Madrid.
- LAMPKIN, N (1998). «Agricultura Ecológica». Ed. Mundi Prensa. Madrid.
- Ministerio Medio Ambiente (2002). Medio Ambiente en España 2001. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente (2001). Estrategia Española de Desarrollo Sostenible. Madrid.
- Oficina Europea del Suelo. Centro Común de Investigación (2000). Estimation of the erosion risk in Italy.
- Oficina Europea del Suelo. Centro Común de Investigación (2001). Soil erosion risk in Europe.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2000) Guidelines for erosion and desertification control management.
- SASSÓN, A.(2001) Cultivos transgénicos: hechos y desafíos. *Elfos Scientiae*. La Habana.

STEVENSON. F.J. (1982) *Humus Chemistry: Genesis, composition, reactions*. Wiley-Interscience. New-York.

TURNES PALOMINO, G. Y OTERO AREÁN, C.(2000). Sólidos periódicos: perspectivas. *Anales Química* 96, 3, 13-23,

World Resources Institute. (2000) *Recursos Mundiales*. Ecoespaña. Madrid.