El suelo en la agricultura y el medio ambiente (I)

COMPOSICION Y PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

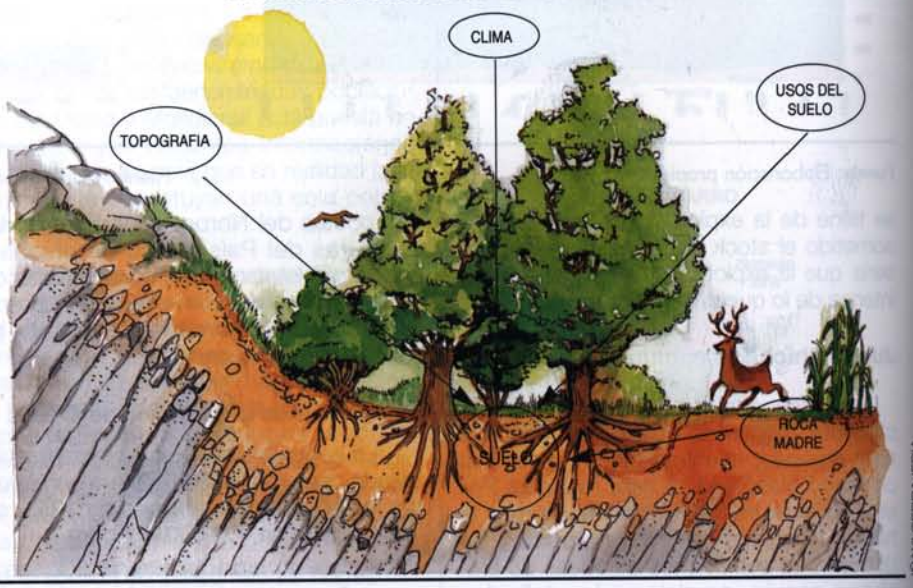
Klimak eta izaki bizidunek hasierako materiale geologiko batean urteen poderioz duten eraginaren ondorioa dugu Lurra. Baso eta elikagaien produkzioan betetzen duen funtsezko eginkizuna betidanik onartu bazaio ere, kutsaduraren iturri eta helburu gisa eta urari eta elikagaiei kutsatzaileak transmitzeko duen garrantzia onartzen hasi berri diote. Artikulu hau bere egileak SUSTRAI aldizkarian "Lurra nekazaritzan eta ingurugiroan" izeneko gaiaz argitaratuko duen sail bateko lehena da.

El suelo es el resultado de la acción del clima y los organismos vivos sobre un material geológico original, a lo largo del tiempo (figura 1). Aunque el papel clave que desempeña en la producción forestal y de alimentos ha sido tradicionalmente reconocido, su importancia como foco y destino de contaminación y en la transmisión de contaminantes a las aguas y alimentos está siendo apreciado y comprendido más recientemente.

Como puede apreciarse al observar un corte del terreno o una zanja, la sección vertical del suelo está formada por varias capas diferenciadas, que constituyen el perfil del suelo (figura 2). La capa superior suele ser más oscura que las inferiores, a causa de la acumulación de materia orgánica descompuesta, y se denomina horizonte A o suelo propiamente dicho. La capa inferior es más clara, posee mayor cantidad de arcilla, y se denomina horizonte B o subsuelo. Por debajo de esta última se encuentra el horizonte C o material original del suelo, que se extiende hasta la roca madre a partir de la cual se ha originado el suelo.

Aunque con fines de producción agrícola sólo suelen considerarse habitualmente el suelo y subsuelo en que se desarrollan las raíces de las plantas, desde el punto de vista medioambiental los horizontes inferiores y la composición de las rocas subyacentes presentan también una gran importancia en la transmisión de contaminantes a las aguas subterráneas.

FIGURA 1
Factores formadores de los suelos



Además de servir de soporte o anclaje a la planta, el suelo tiene que suministrar a las raíces unas cantidades equilibradas de aire, agua y nutrientes minerales (figura 3). Si la *disponibilidad* o proporción en que estos componentes se encuentran a disposición de las plantas no es adecuada, su crecimiento podrá verse afectado por:

- *asfixia* debida a falta de oxígeno, que impide la respiración de las raíces (y de los organismos vivos que habitan el suelo);
- *deshidratación* por falta de agua, que puede llegar a producir la muerte de la planta;
- *exceso o carencia de nutrientes minerales*, o desequilibrio entre sus concentraciones, que limita el crecimiento de las plantas.

El suelo se compone de tres fases: sólida, líquida y gaseosa (figura 4), cuya composición y proporciones dependen de la naturaleza del suelo y de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc). A su vez, las propiedades agronómicas y medioambientales del suelo variarán con la naturaleza y proporción de cada una de estas fases. Así, el volumen de fase sólida define la *porosidad* o porcentaje de poros y huecos ocupados por aire y agua; el reparto y disponibilidad de ambos para la planta, varía con el tamaño de partículas, es decir con la textura y estructura del suelo.

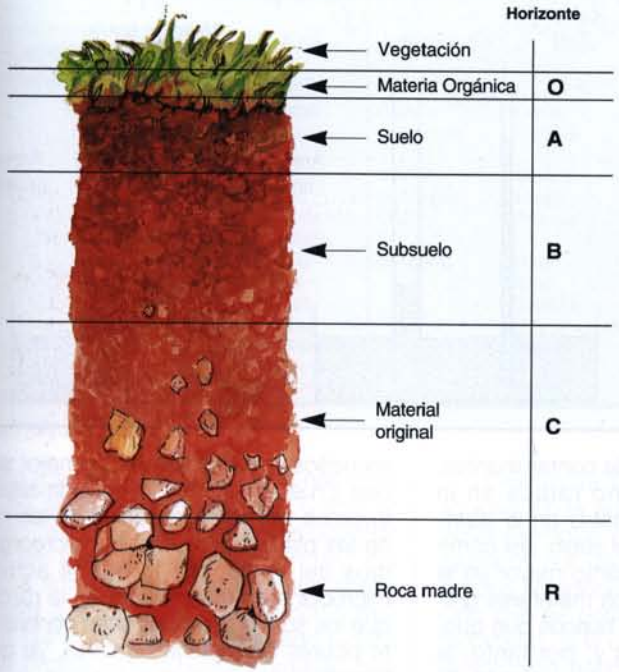
Fase sólida

La fase sólida de un suelo natural contiene proporciones variables de componente mineral y orgánico. La fracción mineral procede de la meteorización o descomposición de la roca madre por acción de los agentes climáticos, mientras que la materia orgánica está constituida principalmente por residuos de organismos vegetales y animales, en diferentes estados de descomposición.

Las proporciones de materia orgánica de un suelo son muy variables, pudiendo oscilar desde menos del uno por ciento en algunos suelos arenosos hasta más del 50% en las turberas. Por término medio, los suelos de cultivo suelen contener entre el 2 y el 10% de materia orgánica, que influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Además, la materia orgánica es una fuente de carbono y energía para los microorganismos, por lo que como veremos, ejerce un papel esencial en el bloqueo y degradación de los contaminantes del suelo.

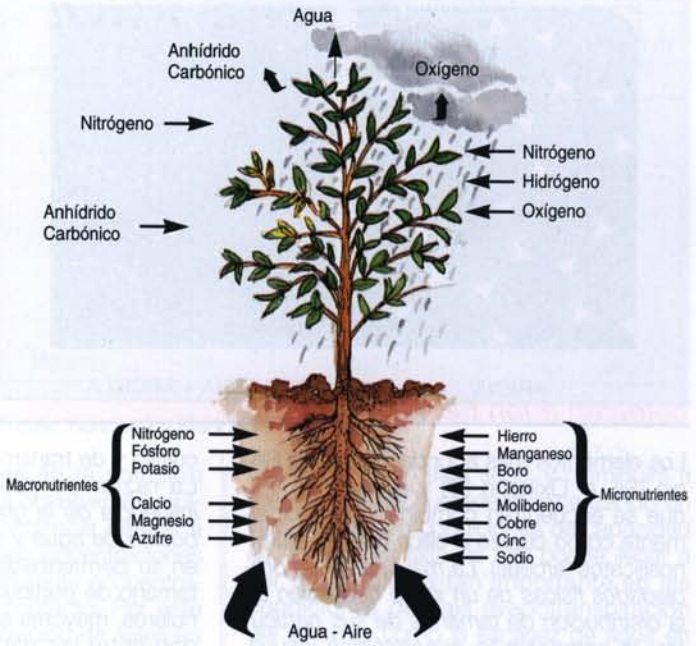
La descomposición de la materia orgánica del suelo se debe principalmente a la acción de los microorganismos; a medida que se alimentan y obtienen energía descomponiendo la materia orgánica, ésta se transforma en compuestos progresivamente más resistentes al ataque microbia-

FIGURA 2
Perfil y horizontes del suelo



IÑAKI CERRAJERIA

FIGURA 3
El medio de cultivo y la nutrición de la planta



IÑAKI CERRAJERIA

no. El humus es el residuo final resultante de la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos (algo así como sus excrementos) y es, por tanto, biológicamente estable. El humus da el color oscuro a los suelos, y tiene una influencia beneficiosa en muchas de sus propiedades, principalmente en la estructura, aireación y capacidad de retención de agua y nutrientes.

En el proceso de descomposición se produce la mineralización o transformación de los componentes inorgánicos presentes en la materia orgánica (nitrógeno, fósforo, etc.) en formas minerales solubles, que pueden ser absorbidas por las plantas. Así, el nitrógeno orgánico de aminoácidos y proteínas se transforma en amoniacal, que es oxidado con relativa rapidez a nitrato:

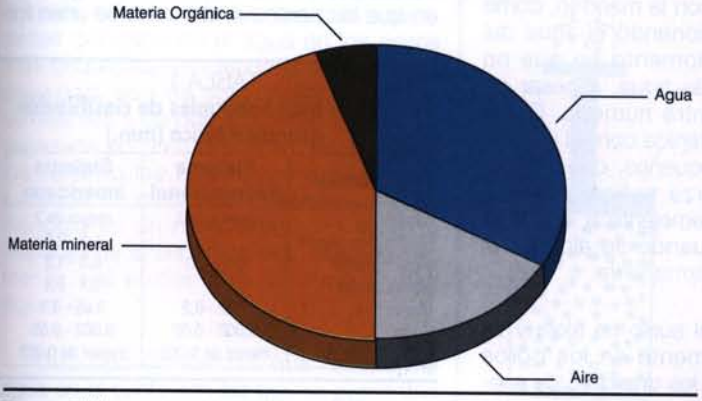
$N_{org} \rightarrow NH_4^+$ (amoniacal) $\rightarrow NO_3^-$ (nitrato)

La pérdida de carbono en forma gaseosa como anhídrido carbónico es muy superior a la de nitrógeno, por lo que el cociente C/N entre las cantidades de carbono y de nitrógeno inicialmente presentes en la materia orgánica disminuye a lo largo del proceso, y se hace tanto más pequeño cuanto mayor sea el grado de descomposición. Por este motivo, *la relación C/N se emplea como un índice del grado de descomposición o mineralización de la materia orgánica*, que en el humus estable del suelo alcanza generalmente valores próximos a 10. Cuanto menor sea el valor de la relación C/N, mayor será el grado de descomposición de la materia orgánica. Valores de C/N elevados son propios de materiales orgánicos frescos o de organismos vivos.

Así, los tejidos de los microorganismos que se alimentan de la materia orgánica del suelo tienen una relación C/N del orden de 30. Por lo tanto, si al alimentarse descomponen materiales con una relación C/N superior (restos de vegetales frescos, paja, etc.), es decir, que tienen mayor proporción de carbono que la de sus células, necesitarán para su crecimiento un aporte extra de nitrógeno, que tomarán del nitrógeno mineral soluble presente en el suelo, compitiendo con las plantas. Este hecho, que es sobradamente conocido por muchos agricultores (por ejemplo, el bloqueo de nitrógeno que se produce tras el enterrado de la paja), tiene una gran trascendencia agronómica, tanto desde el punto de vista de la producción agrícola como de la contaminación de los suelos y las aguas.

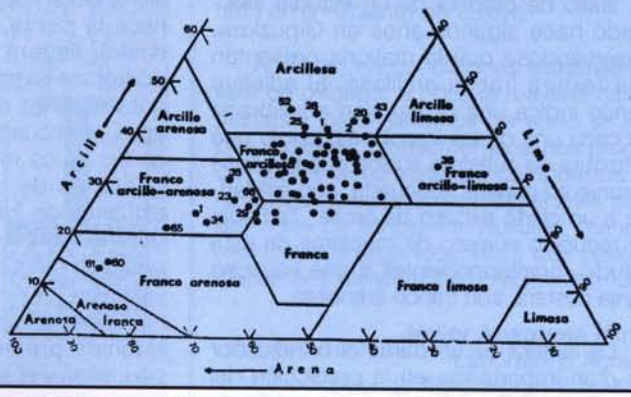
Los componentes inorgánicos o minerales del suelo están formados por partículas de diferentes tamaños y composición.

FIGURA 4
Composición media del suelo



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 5
Textura de los suelos de pradera de Gipuzkoa



Fuente: Ferrer y col. (1980)

FIGURA 6
Disminución de la porosidad de la arena con la adición de arcilla

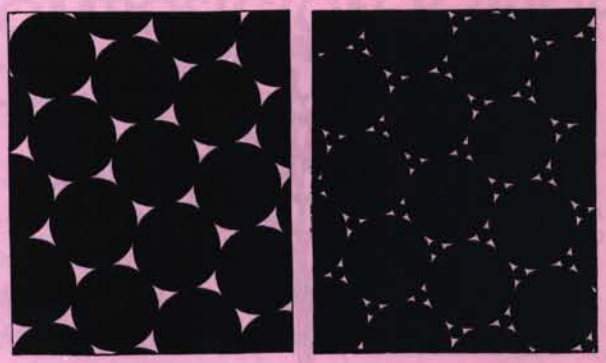
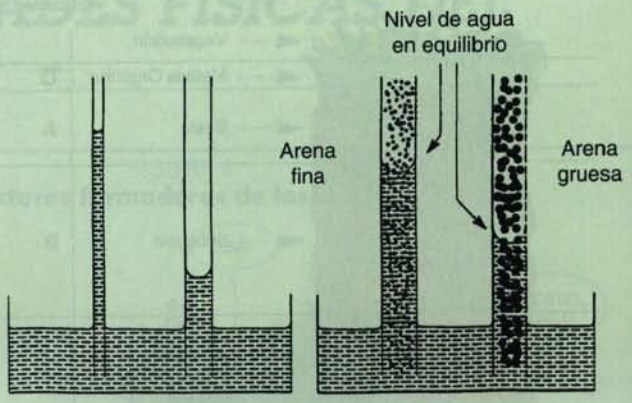


FIGURA 7
Influencia del tamaño de partícula en la retención de agua por fuerzas capilares



Los elementos más abundantes son el Silicio (Si), el Oxígeno (O) y el Aluminio (Al), que se encuentran combinados principalmente como cuarzo o sílice (SiO_2) y aluminosilicatos (arcillas). *La mayoría de las propiedades físicas de un suelo dependen de la distribución de tamaños de sus partículas;* la composición mineralógica influye, además, en la retención y suministro de nutrientes.

Textura y estructura

En la mayor parte de los suelos, las propiedades agronómicas dependen de las partículas de tamaño inferior a 2 mm. Por esta razón, la clasificación granulométrica o de tamaños de partícula de los suelos suele basarse en la fracción fina que atraviesa un tamiz de 2 mm. de apertura. Existen diferentes sistemas de clasificación granulométrica de los suelos (Tabla 1). Pero en general, las partículas del suelo se agrupan en *arena, limo y arcilla*. La composición granulométrica o *textura* del suelo se representa gráficamente por medio de diagramas triangulares. El *triángulo de textura* permite relacionar las propiedades de campo de un suelo con su distribución de tamaños de partícula, asignándole el nombre de una familia que refleja las fracciones que predominan: arenosa, arcillosa, arcillo limosa, etc.

En la figura 5, cada punto representa un suelo de pradera de un estudio efectuado hace algunos años en Gipuzkoa, observándose que la mayoría presentan una textura franco arcillosa. El adjetivo franco indica una proporción equilibrada de cada una de las fracciones, por lo que la textura de nuestros suelos puede considerarse en general adecuada, con tendencia a un cierto exceso de arcilla. Tan sólo un reducido número de muestras de este estudio, correspondientes a una estrecha franja costera, son franco arenosas.

La textura es un parámetro indicador de gran importancia en la predicción del comportamiento del suelo como medio de cultivo y de transmisión de contaminantes. La razón de este hecho radica en la *influencia de la granulometría en la distribución de agua y aire del suelo, así como en su permeabilidad.* Cuanto mayor es el tamaño de partícula de los materiales granulares, mayores son los huecos que quedan entre las partículas y, por tanto, la porosidad o porcentaje de volumen de poros del material. En un litro de arena, el volumen total de poros o huecos entre partículas (la porosidad) es muy superior al que posee un litro de arcilla. Pero es suficiente la presencia de una pequeña cantidad de partículas de arcilla para que la porosidad de la arena y el tamaño de los poros disminuyan de manera importante (figura 6), a la vez que aumenta la retención de agua y se reduce la aireación.

En relación a la retención de agua y aire, el suelo se comporta de forma muy semejante a como lo hace una esponja. Si saturamos una esponja con agua, inicialmente pierde una parte del agua absorbida; cuando deja de escurrir, la esponja contiene la máxima cantidad de agua que es capaz de retener, análogamente a como lo hace el suelo en las condiciones que se denominan de capacidad de campo. Observamos a simple vista que los poros más grandes se hallan vacíos (es decir, ocupados por aire), por lo que el agua se encontrará alojada en los poros más pequeños. Si extraemos el agua presionando la esponja con la mano (o, como hace la planta, succionando el agua del suelo), llegará un momento en que no podremos extraer más agua, a pesar de notar que se encuentra húmeda. Dicha agua se encuentra retenida con tal energía en los poros más pequeños, que no disponemos de la fuerza suficiente para extraerla, de forma semejante a lo que le ocurre a la planta cuando se alcanza el *punto de marchitez permanente.*

Como el agua del suelo se aloja y es retenida preferentemente en los poros pequeños y el aire en los grandes, los suelos arcillosos retienen más agua que los arenosos, que suelen estar mejor aireados. En estos últimos, la elevada aireación favorece tanto la respiración de las raíces de las plantas como de los microorganismos del suelo, por lo que la actividad microbiana es mayor. Esta es la razón de que los suelos arenosos sean generalmente pobres en materia orgánica, ya que la tasa de mineralización es elevada.

Por tanto, desde un punto de vista agronómico son ventajosos los suelos francos o equilibrados, que poseen suficiente capacidad de retención de agua, derivada de su contenido en arcilla, y están al mismo tiempo convenientemente aireados por su proporción de arena.

Pero las partículas que componen el suelo no se encuentran normalmente presentes de forma individual o aislada, sino agrupadas en agregados formados por un cierto número de partículas, lo que constituye la estructura del suelo. Esta depende en gran medida de la textura y del contenido en materia orgánica, que actúa como cemento de unión de las partículas; así, los suelos de tamaño de partícula gruesa y pobres en materia orgánica como las dunas de arena, no poseen estructura, mientras que en los suelos muy arcillosos las partículas se hallan unidas, formando una estructura compacta.

La estructura más habitual en los horizontes superiores del suelo es la granular, en que las partículas del suelo se unen for-

TABLA 1
Sistemas más habituales de clasificación granulométrica (mm.)

Partícula	Sistema internacional	Sistema americano
Grava	mayor de 2	mayor de 2
Arena muy gruesa	–	1,0 - 2,0
Arena gruesa	0,2 - 2,0	0,5 - 1,0
Arena media	–	0,1 - 0,5
Arena fina	0,02 - 0,2	0,05 - 0,1
Limo	0,002 - 0,02	0,002 - 0,05
Arcilla	menor de 0,002	menor de 0,002

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 2
Necesidades de aireación de las raíces de diferentes plantas ornamentales

Necesidades de aireación	Muy alta	Alta	Intermedia	Baja
Porosidad (%)	20	20-10	10-5	5-2
	Azalea Orquídea (epífita)	Antirrhinum Begonia Daphne Ericácea Plantas de hoja decorativa Gardenia Gloxinia Orquídea (terrestre) Podocarpus Rhododendron Saintpaulia	Camelia Crisantemo Gladiolo Hydrangea Lilium Poinsettia	Clavel Conífera Geranio Hiedra Palmera Rosa Alhelí Strelitzia (Ave del paraíso) Césped

Fuente: Johnson (1968)

TABLA 3
Influencia de la compactación del suelo en la aireación y retención de agua

Nivel de compactación	Porosidad total (%)	Densidad aparente (g/ml.)	Porosidad de aire (%)	Retención de agua (%)
Nulo	58	1,13	42	16
	54	1,23	37	17
	50	1,33	30	20
	46	1,43	28	18
	42	1,54	24	18
	38	1,64	19	19
Máximo	34	1,74	9	25

Fuente: Handreck y Black (1991)

mando aglomerados, cuya forma recuerda a la de las migas o terrones. Como el tamaño de estos aglomerados es superior al de las partículas que los forman, los huecos entre agregados también serán mayores que los huecos entre partículas. Por lo tanto, un suelo estructurado tendrá mayor proporción de huecos grandes que un suelo que contenga las mismas partículas sin estructura.

En resumen, de la textura y la estructura del suelo dependen el tamaño y la cantidad de poros o *porosidad total* p_t, que se define como el porcentaje del volumen de suelo ocupado por huecos o poros entre partículas y agregados. La proporción relativa de poros grandes y pequeños, ocupados por aire y agua, respectivamente, determinará el porcentaje de la porosidad que se halla ocupada por aire, o porosidad de aire p_a. Los suelos arenosos sueltos, no estructurados, poseen una elevada porosidad total, que prácticamente coincide con la *porosidad* de aire; en los suelos arcillosos ocurre todo lo contrario, aunque su porosidad y aireación aumentan mucho con el grado de estructura.

La solución acuosa

La fase líquida del suelo no es agua pura, sino que contiene gases y sólidos disueltos, por lo que se conoce como solución acuosa. Las fuerzas más importantes que retienen el agua en los poros más pequeños, venciendo la acción de la gravedad, son de tipo capilar; es decir, semejantes a las que actúan sobre el agua contenida en un tubo capilar de pequeño diámetro (o las que hacen que el agua ascienda en materiales porosos), manteniéndola en un nivel tanto más elevado respecto de la superficie del agua, cuanto menor sea el diámetro del tubo capilar (figura 7).

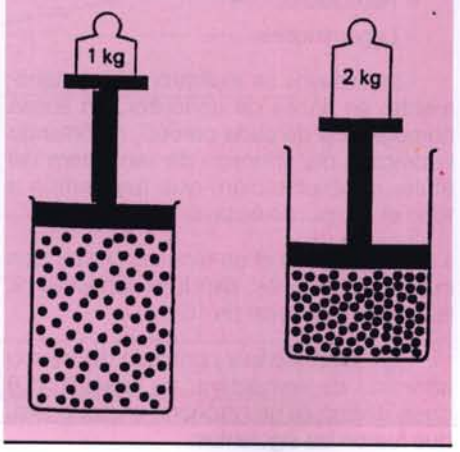
Otro tipo de fuerzas que retienen el agua en el suelo son las que se presentan en condiciones de *salinidad*, o concentración excesiva de sales en la solución acuosa. En la vida diaria observamos múltiples ejemplos de la tendencia natural a igualarse por difusión las concentraciones de dos soluciones de diferente concentración que se ponen en contacto. Por este fenómeno, si la concentración de sales en la solución acuosa es superior a la que existe en el interior de las raíces de la planta, se producirá un flujo de agua hacia el exterior para igualar las concentraciones de sales, lo que equivale a unas condiciones de deshidratación o sequía.

En consecuencia, tan importante como la cantidad de agua retenida por el suelo es la *disponibilidad* de dicha agua para la planta, que dependerá de la fuerza con que esté retenida y, por tanto, del tamaño de los poros del suelo.

El aire

Las necesidades de aireación de las plantas varían con la especie vegetal (Tabla 2). El volumen de fase gaseosa o porosidad de aire de un suelo dependerá de la cantidad de agua presente y de la textura y estructura del suelo. Para un suelo dado, su aireación será máxima cuando el suelo está seco, y disminuirá a medida que se humedece, alcanzando un valor mínimo en condiciones de capacidad de campo. La falta de aire puede llegar a ser un problema tan importante en las condiciones de baja evapotranspiración del invierno, como la escasez de agua en verano, ya que por falta de aire durante unos pocos días, puede llegar a producirse la muerte de algunas raíces.

FIGURA 8
Efecto de la presión en la densidad aparente y la porosidad



Otro factor que tiene una gran influencia en la porosidad y aireación del suelo es la *compactación*, que se produce como consecuencia de la presión ejercida por el pisoteo (campos deportivos, praderas pastadas) o el tráfico de vehículos (maquinaria pesada en suelos agrícolas). Al aplicar una presión creciente al suelo, disminuye el tamaño de los poros y el volumen total que ocupan (figura 8), por lo que se reduce la aireación y la porosidad total, a la vez que aumentan la densidad del suelo y su capacidad de retención de agua (Tabla 3). Al mismo tiempo, crece la fuerza con que el agua es retenida en los pequeños poros, por lo que disminuye su disponibilidad para la planta, como ocurría en el ejemplo de la esponja.

Cuanto mayor sea la cantidad de agua retenida por el suelo, menor será el volumen de aire disponible para la respiración de las raíces, pudiendo llegar a ser tan baja la porosidad de aire, que se vea limitado el rendimiento del cultivo.

Además, en condiciones extremas de falta de oxígeno, en que la mayoría de las plantas y los organismos del suelo se ven perjudicados, los microorganismos producen gases como metano y compuestos de nitrógeno, o sustancias perjudiciales para las raíces de las plantas (sulfuros, manganeso, ácidos orgánicos, etc.), que pueden afectar severamente a su crecimiento. ❑

Javier Ansorena Miner
Laboratorio Agrario
Dep. de Agricultura y Esp. Nat.
Diputación Foral de Gipuzkoa