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

FERTILIDAD DEL SUELO: ACIDEZ Y COMPLEJO DE CAMBIO

Lur baten emankortasuna da lur horrek, elementuen kontzentrazio toxikorik erakutsi gabe, landareen hazkuntzarako oinarrizko diren elementuak emateko duen gaitasuna. Artikulu hau "Lurra nekazaritzan eta ingurugiroan" gaiari buruzko sailaren zati bat da, eta SUSTRAI aldizkariaren aurreko zenbakian iragarri zenez esandako gaia hainbat zatitan aztertuko du egileak.

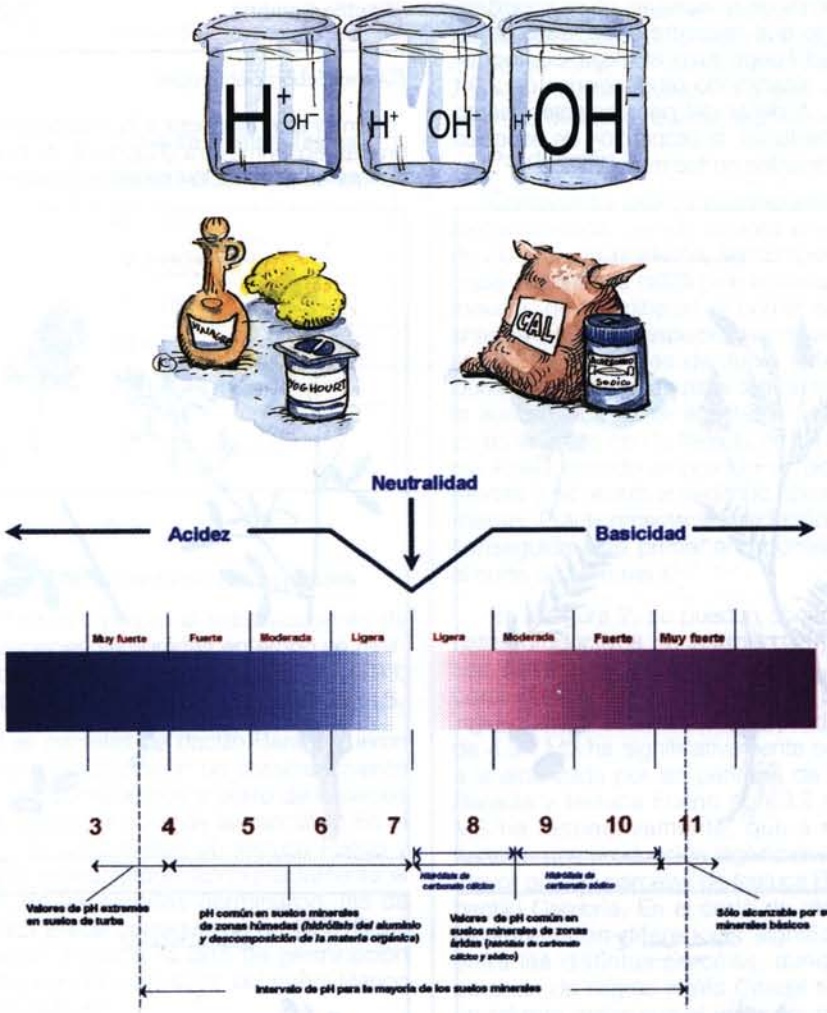
La fertilidad de un suelo se define como su estado en relación a la capacidad que posee de suministrar elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, sin presentar concentraciones tóxicas de ningún elemento. Tanto las necesidades de elementos esenciales como la tolerancia a elementos tóxicos varían con el tipo de planta, por lo que el nivel de fertilidad no puede expresarse solamente en relación al suelo, sino que debe referirse también al cultivo. Es decir, suelos aparentemente infértiles para un determinado cultivo pueden resultar muy productivos cuando se cultiva otro tipo de plantas.

La productividad del suelo incluye, además de la fertilidad, otros factores ambientales y de manejo. Todos los suelos productivos son fértiles para las plantas que se cultivan, pero muchos suelos fértiles son improductivos por falta de agua, aire, luz, o porque presentan limitaciones en sus propiedades físicas, tales como la compactación.

Con la excepción de algunos aportes de nitrógeno y azufre procedentes de la atmósfera, la mayoría de nutrientes minerales necesarios para su crecimiento los toma la planta por las raíces, de la solución acuosa en que se hallan disueltos. Junto a unas propiedades físicas adecuadas, que aseguren el anclaje de la planta y el suministro de aire y agua, el suelo debe proporcionar los nutrientes minerales que, a través de las raíces, toma la planta de la solución del suelo.

La nutrición mineral de las plantas presenta algunas semejanzas con la alimentación humana. Los vegetales, como los lactantes, no pueden tomar alimentos sólidos, por lo que han de recibir los nutrientes minerales que necesitan disueltos en agua, en una solución acuosa; ésta es extraída del suelo por la succión que realizan las raíces, principalmente como consecuencia del efecto de vacío que produce la transpiración o evaporación de agua en la superficie de las hojas. También las plantas, como las personas, se ven afectadas por la acidez de la solución acuosa, y el exceso de sales o salinidad les produce sed, pudiendo llegar a deshidratarse en condiciones extremas; de ahí la importancia del control de ambos aspectos que, como veremos, se realiza a través de la medida del pH y la conductividad, respectivamente.

FIGURA 1
Acidez e intervalo de valores de pH en los suelos



Fuente: Elaboración propia

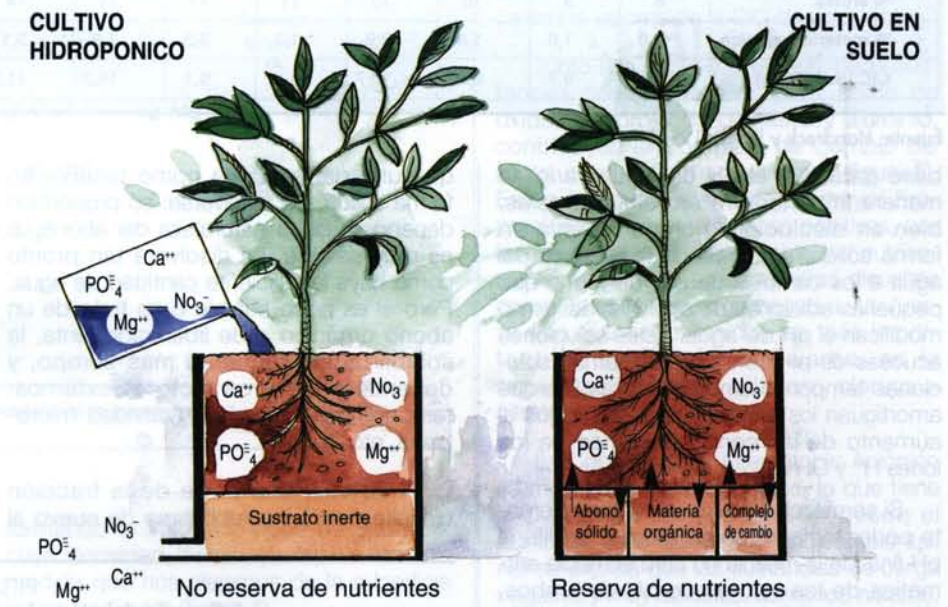
No todas las sales minerales se disuelven en agua en la misma medida; algunas, como la sal de cocina (cloruro sódico) se disuelven en gran proporción, de forma casi instantánea. También lo hacen el cloruro, el nitrato o el sulfato potásico, empleados como abonos. Pero si intentamos disolver en un recipiente que contenga agua otros materiales agrícolas como cal (carbonato cálcico), dolomita (carbonato magnésico), yeso (sulfato cálcico) o fosfato cálcico, observaremos que apenas se disuelven en el agua, depositándose la mayor parte en el fondo del recipiente en forma sólida insoluble. Si la concentración de sales disueltas es adecuada, podremos cultivar plantas en dicha solución acuosa,

como se hace en cultivos sin suelo (hidroponía); a medida que, como consecuencia de la absorción por la planta, disminuye la cantidad de sales en la disolución, se irán disolviendo las sales que permanecen en forma sólida en el fondo y que, en ausencia de suelo, actúan como única reserva de nutrientes.

Al disolverse en agua, las sales minerales se desdoblan en dos partes o iones con carga eléctrica opuesta, que reciben los nombres de anión (el de carga negativa: cloruro, nitrato, sulfato, carbonato, fosfato) y catión (el de carga positiva: sodio, potasio, calcio). Algunos aniones, como cloruros o nitratos, tienden a ser más solubles que otros, como los sulfatos o carbonatos. Lo mismo ocurre con los cationes, ya que las sales de sodio, potasio y amonio se disuelven más en agua que las de calcio o magnesio. La solubilidad de una sal dependerá de la solubilidad y proporción en que se encuentren los aniones y cationes que la componen (Tabla 1), aunque también influye en gran medida, como veremos posteriormente, el grado de acidez de la solución acuosa.

Además, el suelo no se comporta como inerte o inactivo en relación a las sales disueltas, sino que interacciona con la solución nutritiva, actuando también como reserva de nutrientes, a través de una propiedad denominada Capacidad de Intercambio Catiónico (figura 1). Esta última depende asimismo en gran medida de la acidez o pH del medio, por lo que dada la enorme importancia de ambos conceptos para comprender el comportamiento agrícola y medioambiental de los suelos, repasaremos brevemente su significado.

FIGURA 2
Componentes de la reserva de nutrientes en el suelo



Fuente: Elaboración propia

Acidez

El concepto de acidez en la nutrición mineral de las plantas presenta también algunas semejanzas con la idea que adquirimos en la vida diaria. Las características de acidez que transmiten algunas sustancias que se comportan como ácidos (cítricos, vinagre, yogur, etc.) desaparecen al añadirles cantidades equivalentes de otros compuestos de propiedades opuestas que denominamos bases o álcalis, tales como el bicarbonato sódico o la cal. El resultado de esta reacción entre un ácido y una base, en que se anula o neutraliza la acidez o la basicidad inicial, es una sustancia que se comporta como neutra.

pH y poder amortiguador

El agua está constituida por gran número de moléculas, cuya composición representamos como H_2O; con ello indicamos que cada molécula resulta de la unión de un átomo de Oxígeno (O) y dos de Hidrógeno (H). En la inmensa mayoría de las moléculas que componen una muestra de agua, cada átomo de Oxígeno está unido a dos átomos de Hidrógeno a través de uniones o enlaces sencillos: H-O-H. Pero en una insignificante fracción de las moléculas de agua (una por cada seiscientos millones), uno de los enlaces no existe, por lo que estas moléculas se encuentran desdobladas en dos partes o iones, con cargas eléctricas opuestas, de forma análoga a lo que ocurría con las sales:

$$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$$

Los iones H^+ dan carácter ácido al agua y los OH^- carácter básico, por lo que un ácido es una sustancia que libera iones H^+ en agua, y una base o álcali la que desprende iones OH^-. Algunas sustancias no tienen en su composición dicho tipo de iones, pero los liberan al hidrolizarse, es decir, al reaccionar con el agua. Por ejemplo, las sales de aluminio (Al^{3+}) actúan como ácidos:

$$Al^{3+} + H_2O \rightarrow Al(OH)^{2+} + H^+$$

Por el contrario, la caliza (CO_3Ca) reacciona con el agua liberando iones OH^-, y comportándose como una base:

$$CO_3Ca + 2H_2O \rightarrow CO_3H_2 + Ca^{2+} + 2OH^-$$

En el agua pura, el número de iones de uno y otro tipo es idéntico, ya que las pocas moléculas de agua que se ionizan proporcionan uno de cada clase; se dice entonces que el agua es neutra. Para evitar el manejo de cifras muy pequeñas, se introdujo el concepto de pH, que es una medida de la concentración de iones H^+ en solución acuosa, y por tanto de su carácter ácido o básico: en la escala de pH, se expresa la concentración de iones H^+ diciendo que el pH es 7 (neutro), 6 (ácido) u 8 (básico), respectivamente. Debe destacarse que una solución con un pH de 5 tiene 10 veces más iones hidrógeno que una de pH 6 y 100 veces más que otra con un pH de 7. Cuanto más ácida es una solución acuosa, menor es su pH y cuanto más básica o alcalina, mayor será el valor del pH. La solución acuosa de la mayoría de los suelos naturales tiene valores de pH comprendidos entre 3 y 10 (figura 2).

Bastan pequeñas adiciones de iones H^+ u OH^- por medio de un ácido o una

TABLA 1
Solubilidad de algunos abonos, en función de la composición

Solubilidad decreciente →

Anión/Catión	Amonio (NH_4^+)	Potasio (K^+)	Calcio (Ca^{2+})
Cloruro (Cl^-)	Muy alta	Muy alta	Muy alta
Nitrato (NO_3^-)	Muy alta	Muy alta	Muy alta
Fosfato (PO_4^{3-})	Muy alta	Muy alta	Muy baja
Sulfato (SO_4^{2-})	Muy alta	Baja	Muy baja

Fuente: Elaboración propia

TABLA 2
Relación entre la CIC y los contenidos en materia orgánica y arcilla de algunos suelos

% arcilla	8	9	10	10	11	11	11	14	16	18	20	23	23
% materia orgánica	1,9	1,6	1,8	2,9	1,3	3,3	7,9	3,1	4,2	4,2	3,6	7,3	5,8
CIC (meq/100g)	9,6	8,7	8,6	10,7	8,1	9,1	16,3	11,8	15,8	15,3	15,3	22,5	26,5

Fuente: Handreck y Black (1991)

base para que el pH del agua varíe de manera importante. Pero algunas sales, bien en disolución o como reserva en forma sólida, aumentan la resistencia del agua a los cambios de pH, de forma que pequeñas adiciones de ácidos o bases no modifican el pH del agua. Estas soluciones acuosas de pH constante se llaman soluciones tampón o amortiguadoras, porque amortiguan los cambios de pH debidos al aumento de las concentraciones de los iones H^+ y OH^-.

Si se mezclan dos medios con diferente poder tampón, como arena y arcilla, el pH final de la mezcla no será la media aritmética de los valores de pH de ambos, sino que vendrá dominado por el de la arcilla, que tiene mayor capacidad de amortiguación. La arcilla y el humus del suelo poseen poder tampón para la acidez, que amortigua los cambios en la solución acuosa en que se encuentran disueltos los nutrientes minerales, influyendo de manera decisiva en la nutrición de las plantas.

Solubilidad y pH

La gran importancia de la acidez del suelo, expresada a través del valor de pH, radica en que puede reflejar la presencia de compuestos tóxicos (manganeso, aluminio) para las raíces de las plantas y, sobre todo, en que regula la solubilidad y, por tanto, la disponibilidad o asimilabilidad de los nutrientes minerales, así como la capacidad del suelo para almacenarlos.

Hemos visto que no todos los nutrientes añadidos con el abono sólido pasan directamente a la solución del suelo, ya que una parte queda como reserva en forma sólida, sin disolverse; su proporción dependerá de la naturaleza del abono: si es muy soluble, se disolverá tan pronto como haya la suficiente cantidad de agua. Pero si es poco soluble o se trata de un abono orgánico o de liberación lenta, la solubilización requerirá más tiempo, y dependerá de otros factores externos: temperatura, humedad, actividad microbiana, etc.

A su vez, una parte de la fracción disuelta podrá insolubilizarse de nuevo al reaccionar con otros compuestos del suelo, formando un precipitado sólido de sales insolubles. El caso del fósforo es típico de este fenómeno: dependiendo del pH del suelo, una parte del fósforo disuelto reaccionará con hierro y aluminio (en medio ácido) o con calcio (medio básico), formando fosfatos insolubles, por lo que sólo una pequeña fracción del total añadido quedará disponible de forma inmediata para la planta. El restante fósforo que se encuentra en forma sólida se irá solubilizando con el tiempo, a medida que disminuye la concentración de fósforo disuelto.

TABLA 3
Valores de la CIC de algunos componentes del suelo

Coloide	CIC, meq/100 g
Arena y limo	3
Arcillas:	
Caolinita	5
Illita, Clorita	30
Montmorillonita	100
Oxidos de hierro:	
pH 6	0
pH 9	un poco
Humus:	
pH 5	120
pH 7	160
pH 8	210

Fuente: Elaboración propia

FIGURA 3
Influencia del pH en la asimilabilidad de nutrientes

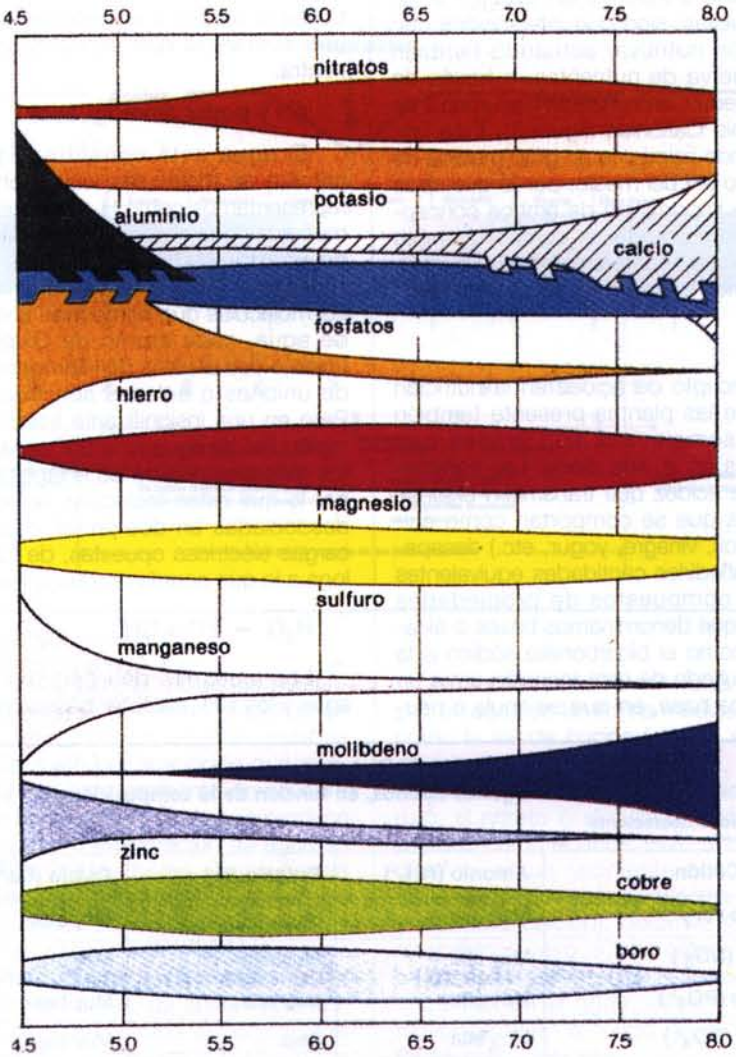
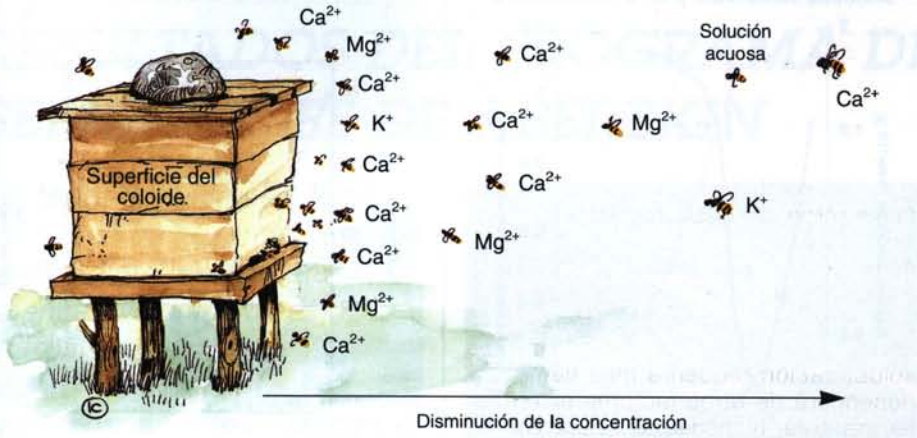


FIGURA 4
Complejo de Cambio del suelo



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3 se observa la influencia del pH en la disponibilidad de cada nutriente, que viene dada por la anchura de la banda correspondiente. En el caso del nitrato, que no forma sales insolubles, el efecto del pH es debido a la influencia de la acidez en los microorganismos del suelo que descomponen la materia orgánica liberando nitratos, cuya actividad disminuye a valores bajos de pH; también se reduce la disponibilidad de molibdeno, que puede llegar a presentar síntomas de carencia, y aumentan hasta niveles tóxicos las concentraciones de aluminio y manganeso. Las carencias de micronutrientes (boro, cobre, zinc, manganeso y hierro) son frecuentes a valores de pH extremadamente altos.

Pero la formación y solubilización de precipitados sólidos no es el único ni el principal mecanismo por el que los nutrientes en exceso quedan retenidos en forma de reserva y son liberados a medida que la planta los necesita. Como la capacidad de absorción de agua de la planta no es ilimitada, una parte importante de los nutrientes aportados se perdería por lavado o lixiviación hacia capas más profundas, si no fuesen retenidos por el suelo.

El Complejo de Cambio

Las arcillas y la materia orgánica descompuesta del suelo (humus) tienen la propiedad de adsorber e intercambiar con la solución acuosa los nutrientes minerales que se encuentran disueltos en forma iónica. Esta propiedad, conocida como Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), es consecuencia de la carga eléctrica existente en la superficie de las partículas más pequeñas del suelo, las de arcilla y humus. Una característica común a estas partículas o coloides es la presencia de cargas eléctricas negativas en su superficie. Estas cargas eléctricas atraen los iones de carga positiva presentes en la solución del suelo, formando una capa o nube de cationes, cuya densidad disminuye rápidamente a medida que nos alejamos de la superficie de las partículas (figura 4).

Los cationes son atraídos hacia la superficie del humus y la arcilla por fuerzas eléctricas débiles, por lo que pueden pasar de nuevo a la solución acuosa a medida que la planta los necesita. Por esta razón se llaman cationes intercambiables, y el conjunto de sustancias que, como la arcilla y el humus, retienen los cationes y los intercambian con los de la solución acuosa del suelo, se denomina Complejo de Cambio. El Complejo de Cambio es una auténtica reserva de nutrientes, ya que éstos son retenidos, evitándose su pérdida por arrastre hacia capas más profundas, y pasando a la solución acuosa a medida que, como consecuencia de la absorción por la planta, disminuye su concentración.

La capacidad de un suelo para retener cationes nutrientes e intercambiarlos con la solución acuosa, que es la causa del poder amortiguador de los suelos, se denomina Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Su valor es una medida de la carga negativa total del suelo, y depende principalmente de la cantidad y tipo de arcilla y materia orgánica presentes. La Tabla 2 muestra la influencia de las cantidades relativas de arcilla y materia orgánica en los valores de la CIC de un suelo.

Junto a la arcilla y el humus, otras sustancias presentes en el suelo, como los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, contribuyen al Complejo de Cambio del suelo, aunque en menor medida (figura 5). Estos compuestos presentan mayor proporción de cargas eléctricas positivas, por lo que retienen principalmente los nutrientes minerales que se encuentran disueltos como aniones de carga negativa. La fuerza con que son retenidos los más importantes, en orden decreciente, es la siguiente: fosfato > sulfato > cloruro > nitrato.

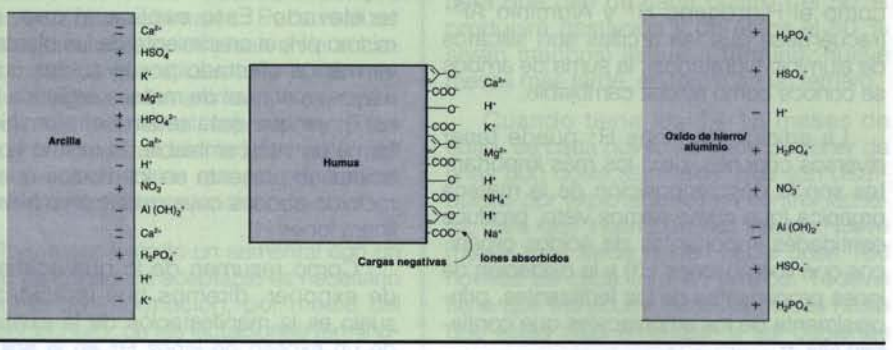
La Capacidad de Intercambio Aniónico es muy inferior a la Catiónica, lo que tiene importantes consecuencias desde el punto de vista agrícola y medioambiental. Así se explica que las sustancias de carga negativa y muy solubles, como los nitratos, apenas sean retenidas por el Complejo de Cambio, siendo arrastradas por lavado hacia capas más profundas, contaminando las aguas subterráneas.

El pH y la Capacidad de Intercambio Catiónico

El valor de la CIC de un suelo no sólo depende de las cantidades de arcilla y humus; también influyen en gran medida el tipo de arcilla presente y la acidez o pH del medio (Tabla 3). La dependencia de la CIC con la acidez se explica porque a medida que aumenta el pH del suelo se generan nuevas cargas eléctricas negativas en el Complejo de Cambio. Por esta razón, la CIC suele desdoblarse en sus dos componentes: permanente y variable o dependiente del pH, siendo esta última muy superior en el humus que en las arcillas (figura 6).

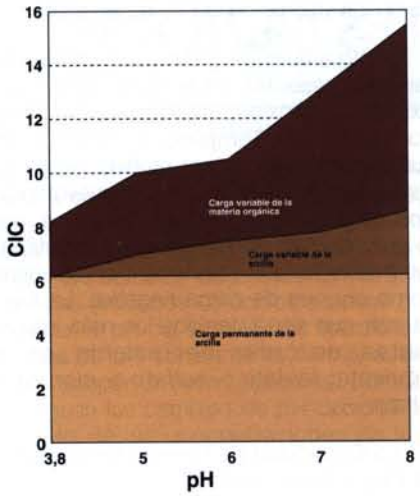
Se observa en la figura que la carga eléctrica negativa de la arcilla es principalmente permanente, es decir, constante e independiente del pH del suelo. Pero algu-

FIGURA 5
Constituyentes del Complejo de Cambio



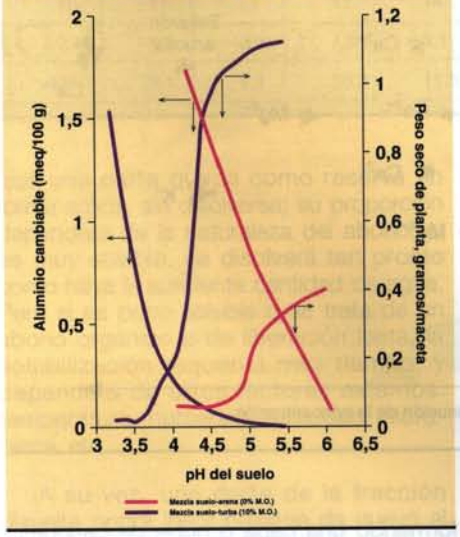
Fuente: Elaboración propia

FIGURA 6
Componentes de la CIC de los suelos



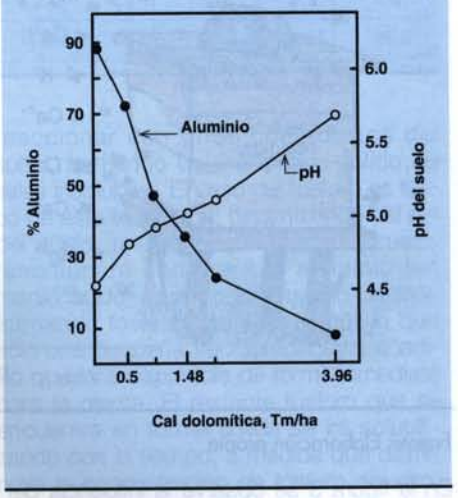
Fuente: Foth y Ellis (1988)

FIGURA 7
Influencia de la materia orgánica en el aluminio cambiable y en el rendimiento



Fuente: Hargrove and Thomas (1981)

FIGURA 8
Variación del pH y contenido en aluminio con la dosis de cal



Fuente: Foth y Ellis (1988)

nos compuestos minerales y, sobre todo, los ácidos orgánicos del humus, pierden iones H^+ al elevar el pH, dando lugar a un aumento de la carga eléctrica negativa a medida que crece el pH; es decir, se produce una carga variable o dependiente del pH. En consecuencia, la CIC de un suelo no es un valor único, sino que depende de la acidez del medio, aumentando con el pH y, por tanto, con la dosis de cal aplicada para corregir la acidez. En suelos minerales con bajo contenido en materia orgánica la CIC apenas variará con el pH, mientras que en suelos orgánicos de turbera, la variación será máxima.

Composición del Complejo de Cambio de suelos ácidos

La acidez de un suelo refleja en último término la presencia de un exceso de iones H^+, que puede ser debido a dos tipos de procesos: pérdida de cationes básicos y adición de iones H^+.

La pérdida de bases (calcio y magnesio, principalmente) del Complejo de Cambio es consecuencia de fenómenos naturales, como el lavado por el agua de lluvia o la extracción por las plantas. Estos cationes son reemplazados por otros de naturaleza ácida presentes en el suelo, como el Hidrógeno H^+ y Aluminio Al^{3+} (recuérdese que las arcillas son silicatos de aluminio hidratados); la suma de ambos se conoce como acidez cambiable.

La adición de iones H^+ puede tener diversos orígenes, pero los más importantes son la descomposición de la materia orgánica (que como hemos visto, produce cantidades importantes de ácidos orgánicos que liberan iones H^+) y la oxidación de iones procedentes de los fertilizantes, principalmente de los amoniacales que contienen NH_4^+:

$$2\ NH_4^+ + 4\ O_2 \rightarrow 2\ NO_3^- + 2\ H_2O + 4\ H^+$$

Como el origen de la acidez puede ser mineral u orgánico, al estudiar la acidez de los suelos suele distinguirse entre suelos minerales y orgánicos. En los primeros, el aluminio puede llegar a ser el catión predominante en el Complejo de Cambio, si la pérdida de cationes básicos es tal que se alcanza un valor de pH inferior a 5,6. Como consecuencia de ello, a un pH de 5,5 la concentración de aluminio en la solución acuosa del suelo es aún baja, pero aumenta rápidamente a medida que disminuye el pH y se eleva el porcentaje de aluminio en el Complejo de Cambio (figura 7). Este aluminio en la solución del suelo es tóxico para las raíces de las plantas, y es la causa de la baja fertilidad de los suelos que presentan este tipo de acidez.

Como se observa en la figura 7, la situación en un suelo con alto contenido en materia orgánica es muy diferente de la de un suelo mineral, ya que para un mismo valor de pH la cantidad de aluminio presente es muy inferior; al mismo tiempo, aumenta la presencia de hidrógeno de cambio y en solución, que es la causa de los bajos valores de pH de estos suelos, cuyo contenido en calcio suele ser bastante elevado. Esto explica el que, a un mismo pH, el crecimiento de las plantas se ve menos afectado por la acidez cuanto mayor es el nivel de materia orgánica (figura 7), ya que ésta retiene el aluminio en forma no intercambiable. El mismo tipo de acidez se presenta en los suelos que han recibido abonos cuya oxidación o hidrólisis libera iones H^+.

Como resumen de lo que acabamos de exponer, diremos que la acidez del suelo es la manifestación de la existencia de un exceso de iones H^+ en la solución acuosa, que puede ser debido a dos causas principales:

– la presencia de iones aluminio en el Complejo de Cambio y en la solución acuosa del suelo, cuya hidrólisis produce iones H^+, que reducen el pH. Este tipo de acidez es propia de suelos minerales lavados, tales como los suelos de monte, y va asociada a una pérdida de cationes básicos. Su efecto negativo sobre los cultivos es consecuencia de la toxicidad del aluminio para las raíces de las plantas, que se manifiesta para valores superiores a un 10% en el Complejo de Cambio.

– el empleo de abonos acidificantes o la descomposición de la materia orgánica, que liberan iones H^+. Estos iones sólo son tóxicos para las plantas en concentraciones extremadamente altas, por lo que su efecto negativo es debido a la influencia del pH en la disponibilidad de los nutrientes minerales.

El resultado de neutralizar la acidez del suelo mediante el encalado o adición de cal es un aumento del pH y de la cantidad de calcio disponible en el suelo, y una reducción del porcentaje de aluminio en el Complejo de Cambio (figura 8). Cuanto mayor sea la cantidad de arcilla y humus del suelo, más cantidad de cal se necesitará para conseguir un determinado aumento del pH. Para reducir el pH del suelo suelen emplearse abonos acidificantes o, en casos extremos de plantas acidófilas, azufre y sulfato de alúmina, que por oxidación microbiana producen ácido sulfúrico.❑

Javier Ansorena Miner
Laboratorio Agrario.
Dpto. de Agricultura y Espacios Naturales.
Diputación Foral de Gipuzkoa