

LA ACIDIFICACION Y SU IMPACTO EN LA DEGRADACION DE LOS SUELOS

Ricardo Campillo R. Ingeniero Agrónomo M. S.
Centro Regional de Investigación Carillanca
E-mail: rcampill@carillanca.inia.cl

Angélica Sadzawka R. Química Farmacéutica
Centro Regional de Investigación La Platina
E-mail: asadzawk@platina.inia.cl

INTRODUCCION

La acidificación de los suelos es un proceso dinámico que engloba la acción de factores naturales (edáficos, climáticos y biológicos) y antropogénicos (derivados de la acción del hombre), que se traducen en un incremento de la acidez natural del suelo. Se ha establecido que los fenómenos naturales de declinación de la fertilidad y acidificación del suelo pueden ser acelerados con la práctica de la agricultura. Resulta así que el elemento predominante de este proceso de acidificación ha sido el hombre, quien en su accionar productivo no ha reparado en los impactos y costos ecológicos sobre el recurso suelo. Así, una agricultura intensiva, muy extractiva y sin reposición de bases o bien, con el empleo abusivo de fertilizantes de reacción ácida, ha potenciado y acelerado este fenómeno natural en los suelos.

Los suelos ácidos se generan por una pérdida de cationes básicos (calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na)) y una acumulación de cationes ácidos (aluminio (Al) e hidrógeno (H)). La acidez de los suelos limita el crecimiento de las plantas debido a una combinación de factores que incluyen la toxicidad de aluminio, manganeso e hidrógeno y la deficiencia de nutrientes esenciales, especialmente calcio, magnesio, fósforo y molibdeno. Pero, el factor limitante del crecimiento más importante en estos suelos ácidos, es el aluminio soluble o intercambiable.

CAUSAS DE LA ACIDIFICACION DE LOS SUELOS

Existen varios factores que condicionan la magnitud e intensidad del proceso de acidificación de los suelos (Sadzawka y Campillo, 1993):

- La alta caída pluviométrica que ocurre normalmente en la zona sur del país, provoca una lixiviación o arrastre hacia el interior del perfil del suelo de las bases de intercambio. Este proceso, que ocurre lenta pero sostenidamente en el tiempo, determina un reemplazo de estas bases por los cationes ácidos (hidrógeno y aluminio), en la capa arable del suelo.

- El laboreo de los suelos, propio de una agricultura de carácter intensivo, determina una agudización del proceso anteriormente descrito puesto que, al dejar temporalmente el suelo sin una cubierta vegetal protectora, facilita el proceso de lixiviación de bases de intercambio.
- Paralelamente, la preparación de suelos provoca un drástico incremento de la mineralización del nitrógeno (N) orgánico, principalmente de los residuos frescos. Ello se traduce en un aumento del catión hidrógeno y en una caída del pH natural del suelo.
- Sin duda que la causa más importante ha sido el uso cada vez más indiscriminado de fertilizantes de reacción ácida en el suelo, (que generan hidrógeno), especialmente los amoniacales, que afectan tanto el pH del suelo como la pérdida de cationes básicos.

Los fertilizantes amoniacales (nitrato de amonio, fosfatos de amonio) y los generadores de amonio (urea), liberan amonio a la solución del suelo el cual desplaza a los cationes de intercambio favoreciendo su posterior lavado del suelo. Luego, en la nitrificación, el amonio cambia a nitrato y se liberan iones hidrógeno que acidifican el suelo y son los responsables de la disminución del pH que se observa después del uso continuado de fertilizantes amoniacales.

Cabe señalar que los fertilizantes fosfatados del tipo monocálcico como el superfosfato triple, pueden acidificar, por algunos días, la zona de aplicación (en torno al gránulo de fertilizante) hasta valores de pH tan bajos como 1,5. Sin embargo, esta acidez localizada, es rápidamente neutralizada por los componentes del suelo, volviendo éste a recuperar el valor de pH original. Es por ello que, agronómicamente, se conocen como fertilizantes de reacción neutra (Sadzawka y Campillo, 1993).

En el Cuadro 1 se muestran los efectos de los fertilizantes nitrogenados en el suelo y las dosis de carbonato de calcio (CaCO_3 , en adelante cal) para compensar la acidez generada (reacción ácida), o las cantidades de cal equivalente a que dan lugar los fertilizantes de reacción básica. Así, por ejemplo, la aplicación de urea provoca una reacción ácida en el suelo, que requiere ser neutralizada con 1,8 kg de cal por cada kg de nitrógeno. En otras palabras, por cada 100 kg de urea se deben aplicar 83 kg de cal para neutralizar la acidez de este fertilizante. Del mismo modo, se muestra los efectos de otros tipos de fertilizantes al reaccionar en el suelo (Cuadro 2).

Existen por supuesto otros agentes causales de acidez de los suelos, pero que no tienen la importancia de los anteriormente analizados. Es el caso de la pérdida de las bases de intercambio absorbidas por las plantas cultivadas, que no se reciclan nuevamente al suelo y que se pierden del ecosistema a través de las cosechas de grano o forraje.

Otra fuente de acidez de los suelos es la materia orgánica. El humus contiene grupos activos que se comportan como ácidos débiles liberando iones hidrógeno. La descomposición de los residuos orgánicos produce dióxido de carbono (CO₂), el cual

Cuadro 1. Productos fertilizantes nitrogenados. Características y efectos acidificantes o alcalinizantes.

PRODUCTOS	CaCO ₃ equivalente en exceso (E) o déficit (D)	
	kg CaCO ₃ /kg N	kg CaCO ₃ /100 kg fertilizante
Salitre Mg (SQMC) (15%N - 5.5%MgO)	2.72 (E)	40.80 (E)
Salitre Na (SQMC) (16%N)	1.80 (E)	28.80 (E)
Nitrocal (CARGILL) (15.5%N)	1.57 (E)	24.30 (E)
Supernitro Mg (SQMC) (25%N - 4%MgO)	0.17 (E)	4.20 (E)
Urea + Cal (3.6 kg CaCO ₃ /kg N)	1.8 (E)	82.80 (E)
Nitroplus (CARGILL) (22%N - 7.5%MgO - 12%CaO)	0.0 (Neutro)	0.0 (Neutro)
Nitroneutro (HYDRO) (22%N - 7%MgO - 11%CaO)	0.0 (Neutro)	0.0 (Neutro)
Urea + Cal (1.8 kg CaCO ₃ /kg N)	0.0 (Neutro)	0.0 (Neutro)
Nitronagra A (ANAGRA) (29.7%N)	0.0 (Neutro)	0.0 (Neutro)
Supernitro (SQMC) (25% N)	0.14 (D)	3.50 (D)
Nitronagra B (ANAGRA) (28%N)	0.19 (D)	4.68 (D)
Nitronagra C (ANAGRA) (26.2%N)	0.35 (D)	9.14 (D)
Nitronagra D (ANAGRA) (27%N)	0.45 (D)	12.13 (D)
Nitromag (CARGILL) (27%N - 5%MgO - 7%CaO)	0.87 (D)	23.60 (D)
Nitrodoble (HYDRO) (27%N - 4%MgO - 6%CaO)	0.87 (D)	23.60 (D)
Nitrato Calcáreo (ANAGRA) (27%N - 11%CaO)	1.07 (D)	28.90 (D)
Hydro Sulfan (24%N - 14%SO ₄ - 11.6%CaO - 1.3%MgO)	1.17 (D)	28.08 (D)
Urea (46%N)	1.80 (D)	82.80 (D)

Fuente : Adaptado de Suárez (1996).

Cuadro 2. Índices de acidez o alcalinidad de productos fertilizantes fosforados, potásicos y azufrados.

Fertilizante	Tipo de reacción	kg CaCO ₃ /kg N	Kg CaCO ₃ /100 kg fertilizante
Fosfato monoamónico	Acida	5,00	55
Fosfato diamónico	Acida	3,89	70
Sulfato de amonio	Acida	5,35	110
Yeso agrícola	Neutra	0	0
Superfosfato triple	Neutra	0	0
Muriato de potasio	Neutra	0	0
Rocas fosfóricas	Levemente alcalizante		10

Fuente: Adaptado de Tisdale, Nelson y Beaton, (1985).

se combina con agua para formar ácido carbónico. La disociación de este ácido débil proporciona otra fuente de acidificación del suelo. También las leguminosas, mediante el mecanismo de fijación simbiótica de nitrógeno, liberan hidrógeno a la solución del suelo, contribuyendo así a la acidificación gradual de los suelos.

ACIDEZ Y CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LOS SUELOS

Para entender cabalmente el proceso de acidificación de los suelos de nuestra Región, es importante conocer también algunas características químicas de estos suelos derivados de cenizas volcánicas, puesto que van a condicionar la magnitud e intensidad que alcance este problema.

SUELOS DE CARGA VARIABLE

Es común referirse a los suelos volcánicos chilenos como suelos de carga variable. Esto significa que son suelos en los cuales una proporción significativa de la carga eléctrica de la superficie de las partículas o coloides, que es responsable de la retención de los cationes, es dependiente del pH. Por ello, cuando disminuye el pH, también se produce una disminución de la capacidad del suelo para atraer cationes, los cuales al estar presentes en la solución, podrán perderse fácilmente por el arrastre de las aguas lluvia. A la inversa, cuando aumenta el pH de la solución de suelo, éste puede atraer una mayor cantidad de cationes que estarán disponibles para las plantas.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES EFECTIVA

Cationes son los iones cargados positivamente de los elementos calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrógeno y aluminio. Las partículas de arcillas en los suelos generalmente están cargadas negativamente y atraen, retienen y liberan los cationes. Las partículas de materia orgánica también tienen una carga negativa para atraer cationes. Los cationes intercambiables de los suelos pueden dividirse en:

- Cationes ácidos o acidez intercambiable; caso del hidrógeno y aluminio.
- Los mal llamados cationes básicos o bases de intercambio; caso del calcio, magnesio, potasio y sodio.

Los cationes ácidos, cuando son liberados a la solución de suelo, producen un aumento de la concentración de hidrógeno y, por lo tanto, una disminución del pH. En el caso del aluminio, ello ocurre porque el aluminio (Al^{+3}) en solución acuosa tiende a hidrolizarse, es decir, a combinarse con agua liberando hidrógenos.

Los cationes básicos o bases de intercambio no producen cambios de pH en la solución de suelo y su nombre probablemente proviene del hecho que, si aumenta su proporción en el complejo coloidal del suelo, disminuye la de cationes ácidos y, consecuentemente, el pH será mayor.

El intercambio de cationes es el sistema natural mediante el cual las raíces de las plantas obtienen los elementos nutritivos como el calcio, el cual se encuentra atraído por las superficies cargadas negativamente de los coloides del suelo. El mecanismo consiste en la liberación de iones hidrógeno a la solución del suelo por parte de las raíces, los cuales se intercambian con iones calcio presentes en torno a los coloides del suelo. De esta manera, los iones calcio quedan en la solución de suelo de donde pueden ser absorbidos por las raíces.

Si la solución de suelo pierde cationes básicos por lixiviación o por absorción vía las raíces, se liberan bases de intercambio desde los coloides del suelo para mantener el equilibrio y los sitios negativos correspondientes se neutralizan con cationes ácidos. De esta manera, el suelo se va acidificando, la carga variable negativa va disminuyendo, el suelo se va empobreciendo en su fertilidad y aparecen problemas graves de toxicidad, principalmente de aluminio (Sadzawka y Campillo, 1993).

Es conveniente estimar la carga negativa desarrollada por el suelo al pH que existe en condiciones naturales. Ello se denomina "CIC efectiva" (CICE), que es la capacidad del suelo para retener e intercambiar cationes y corresponde a la suma de los cationes intercambiables. Generalmente, los cationes ácidos, o acidez intercambiable, están constituidos principalmente por aluminio intercambiable,

siendo el hidrógeno intercambiable proporcionalmente mucho menor, por lo que la CICE puede estimarse según la ecuación:

$$\text{CICE} = [\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na} + \text{Al}], \text{ expresados en centimoles de carga positiva por kg de suelo (cmol+ /kg).}$$

La determinación de la CIC Efectiva y la estimación de la saturación de aluminio (contribución del aluminio en la CIC Efectiva) dan una buena estimación de la toxicidad de aluminio en suelos del mismo tipo y sometidos a condiciones agroclimáticas similares, pero no son indicadores adecuados para un amplio rango de tipos de suelos.

pH DEL SUELO

El pH es un valor que expresa la concentración de iones hidrógeno en la solución del suelo. Aunque la cantidad de hidrógeno en los suelos normalmente es pequeña, la actividad de estos hidrógenos es extremadamente importante.

La escala de pH se extiende de 1 a 14, siendo el pH 7 neutro, donde las concentraciones de iones hidrógeno y de iones hidroxilos (OH^-) son iguales (Cuadro 2). Cuando aumenta la concentración de hidrógeno, disminuye la de hidroxilos y el pH baja de 7 y viceversa. Cuando el pH de la solución de suelo baja, por ejemplo, de 6 a 5, ello significa un aumento de 10 veces en la concentración de iones hidrógenos y, también, una disminución equivalente de iones hidroxilos (Sadzawka y Campillo, 1999):

Cuadro 3. Categorías descriptivas para rangos de pH del suelo (Soil Science Society of América, 1987).

Categoría descriptiva	Rango pH en agua
Extremadamente ácido	< 4,5
Muy fuertemente ácido	4,5 – 5,0
Fuertemente ácido	5,1 – 5,5
Moderadamente ácido	5,6 – 6,0
Débilmente ácido	6,1 – 6,5
Neutro	6,6 – 7,3
Débilmente alcalino	7,4 – 7,8
Moderadamente alcalino	7,9 – 8,4
Fuertemente alcalino	8,5 – 9,0
Muy fuertemente alcalino	> 9,0

La química de muchos iones y los microorganismos del suelo están tan estrechamente ligados al pH que no existe otra medida del suelo que integre tanta información química. Sin embargo, el significado del pH de un suelo tiene limitaciones porque varios factores afectan su medición (Sadzawka y Carrasco, 1985). Entre ellos, el más importantes es la concentración salina. Las soluciones más usadas para determinar el pH de un suelo son agua destilada, CaCl_2 0,01 M y KCl 1 M. Al aumentar la concentración salina en la solución se produce una disminución en el pH medido.

Una de las ventajas que tiene la determinación del pH suspendiendo el suelo en una solución salina es que el valor obtenido es más real, ya que la concentración de H^+ en la superficie de las partículas del suelo puede ser 100 a 1000 veces mayor que la de la solución que las rodea (Bohn et al., 1979; Foth y Ellis, 1988). La solución de CaCl_2 0,01 M se seleccionó asumiendo que tiene una fuerza iónica y una concentración de Ca^{+2} semejantes a la de la solución de suelo aunque no siempre se cumple en un gran número de suelos (Bache, 1988). La solución de KCl 1 M posee una actividad de K^+ lo suficientemente alta como para liberar a la solución el aluminio intercambiable. Otra ventaja importante que tiene el uso de soluciones salinas en la determinación del pH del suelo es que los valores obtenidos son menos susceptibles a las variaciones experimentales (Sadzawka y Flores, 1996).

Las plantas normalmente no son afectadas directamente por valores de pH relativamente alejados del neutro. Sin embargo, el efecto indirecto puede ser drástico. Esto puede deberse a diversas razones tales como: deficiencia de algún nutriente, disminución de la actividad de microorganismos beneficiosos y abundancia de iones tóxicos para las plantas, como aluminio y manganeso.

Se ha establecido que la medición del pH del suelo puede utilizarse como un índice de la toxicidad por aluminio. Generalmente, cuando el pH del suelo es inferior a 5,5, se encuentran niveles de aluminio en la solución que pueden ser tóxicos para las plantas. Sin embargo, dicha toxicidad será relativa, dependiendo de la tolerancia o sensibilidad del cultivo.

DIAGNÓSTICO DE LA TOXICIDAD DE ALUMINIO EN SUELOS

Un buen método de diagnóstico de la toxicidad de aluminio en suelos debe ser capaz de distinguir entre las formas tóxicas y no tóxicas de Al, debe determinar cuando la toxicidad de aluminio limitará el crecimiento de la planta y debe reflejar la capacidad del suelo para mantener el suministro (Sadzawka y Campillo, 1999). Esta tarea es complicada debido a múltiple factores, entre los cuales destacan: el aluminio existe en distintas formas, la tolerancia de las plantas varía entre y dentro de las especies, la presencia de componentes orgánicos e inorgánicos modifica la expresión de la toxicidad, las condiciones humedad y temperatura influyen la toxicidad, existe variabilidad espacial y temporal dentro del suelo. Dadas las

dificultades involucradas no es sorprendente que los intentos para desarrollar métodos de diagnóstico de la toxicidad aluminio en suelos han tenido un éxito limitado (Wright, 1989).

La determinación de la CIC efectiva, esto es, la suma de calcio, magnesio, potasio, sodio y aluminio intercambiables, y la estimación de la saturación de aluminio (contribución del aluminio en la CIC efectiva) dan una buena estimación de la toxicidad de aluminio en suelos del mismo tipo y sometidos a condiciones agroclimáticas similares, pero no son indicadores adecuados para un amplio rango de tipos de suelos. En suelos con predominio de minerales con carga variable, el aluminio intercambiable no es extraído cuantitativamente con la solución de KCl que normalmente se emplea. En estos suelos dominados por minerales tipo alofán, el método estándar para determinar el Al intercambiable puede subestimar el aluminio potencialmente tóxico para las plantas (Sadzawka y Campillo, 1999).

El pH en agua o el pH en soluciones salinas pueden usarse para estimar el grado de saturación de aluminio del complejo de intercambio siempre que se conozca la relación entre ellos para cada tipo de suelos (Suárez, 1990, 1991, 1994; Campillo y Sadzawka, 1993; Rodríguez, 1993).

Hasta el momento, la técnica más promisoría para identificar los suelos de diferente tipo que tienen problemas de toxicidad de aluminio es una técnica biológica que mide el desarrollo radicular de semillas germinadas en suelos. La semilla suministra los nutrientes y solamente la toxicidad de aluminio y las deficiencias de calcio y de boro limitan la elongación radicular. El método se ha usado exitosamente para detectar toxicidad de aluminio en un gran número de suelos y para evaluar la tolerancia a Al de diferentes genotipos dentro de una especie, usando un suelo con una toxicidad de aluminio conocida.

FITOTOXICIDAD DEL ALUMINIO

El principal efecto de la toxicidad por aluminio es la restricción del desarrollo radicular, por lo cual, las raíces reducen el volumen de suelo que pueden explorar y son ineficientes en la absorción de nutrientes y de agua. Además, un exceso de aluminio en la solución de suelo interfiere en el transporte y utilización de los nutrientes esenciales (calcio, magnesio, potasio y fósforo) y puede inhibir los procesos microbianos que suministran nutrientes a las plantas. A nivel celular, la toxicidad por aluminio afecta la estructura y el funcionamiento de la membrana, la síntesis de DNA y la mitosis, la elongación de la célula y la nutrición mineral y el metabolismo.

Las distintas especies de aluminio existente en el suelo tienen diferente fitotoxicidad. Los estudios realizados indican que el aluminio (Al^{+3}) es la principal especie mononuclear tóxica para las plantas. Sin embargo, la presencia de concentraciones adecuadas de potasio, calcio y magnesio elimina la toxicidad.

Las especies de plantas, y las variedades dentro de las especies, muestran grandes diferencias en la susceptibilidad a la toxicidad de aluminio. Así, por ejemplo, las leguminosas que dependen de la fijación simbiótica de nitrógeno aparentemente son más susceptibles a la toxicidad de aluminio que las leguminosas suministradas con nitrógeno inorgánico. Esto se debe a que la toxicidad por aluminio tiene un efecto detrimental sobre la simbiosis leguminosa-rizobio causado principalmente por una reducción en el proceso de nodulación (Sadzawka y Campillo, 1993).

La acidificación de los suelos generalmente se ha abordado desde una doble perspectiva: por un lado, utilizando variedades de plantas tolerantes y, por otro, corrigiendo la acidez mediante la aplicación de materiales encalantes. El uso de plantas tolerantes al aluminio ofrece una solución parcial a los problemas de toxicidad por aluminio en los suelos donde la adición de enmiendas no es económicamente posible o no es efectiva, como es el caso de acidez en el subsuelo. Sin embargo, esta vía conlleva un riesgo latente de incrementar la acidificación del suelo, en el corto o mediano plazo, sin apuntar al fondo del problema, con la consiguiente degradación del recurso suelo, impacto negativo en la productividad agrícola y peligro de la sustentabilidad del medio ambiente.

LITERATURA CITADA

- BOHN, H.L., MCNEAL, B.L. and O'CONNOR, G.A. 1979. Soil chemistry. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, USA, 329p.
- CAMPILLO R., RICARDO Y SADZAWKA R., ANGÉLICA, 1993. Problemática de la acidez de los suelos de la IX Región. II. Manejo del encalado y sus implicancias. In: CAMPILLO R., R. (ed.) Acidez de los suelos de la Araucanía. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile), Est. Exp. Carillanca (Temuco), Serie Carillanca N°38. p. 9-17.
- FOTH, H.D and ELLIS, B.G. 1988. Soil fertility. John Wiley & Sons, New York, USA. 212p.
- RODRÍGUEZ S., JOSÉ, 1993. Manual de fertilización. Colección en Agricultura, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago (Chile), 362p.
- SADZAWKA R., ANGÉLICA y CAMPILLO R., RICARDO. 1993. Problemática de la acidez de los suelos de la IX Región. I. Génesis y características del proceso. Investigación y Progreso Agropecuario, Carillanca (Chile) 12(3), 3-7.
- SADZAWKA R., A. y CARRASCO R., M.A. 1985. Química de los suelos volcánicos. En: Tosso. J. (Ed.) Suelos volcánicos de Chile. Santiago, Chile, Talleres Gráficos INIA. p. 337-434.
- SADZAWKA R., ANGÉLICA Y FLORES P., HUGO. 1996. Intercambio de muestras y de análisis de laboratorio (INTERLAB). 1a. Jornada de estandarización de metodologías de análisis de suelos, INIA-CRI La Platina, Santiago, Chile, 10-11 julio 1996, 25 p.
- SADZAWKA R., ANGÉLICA y CAMPILLO R., RICARDO. 1999. Acidificación de los suelos y los procesos involucrados. En: Alfaro, M. (Ed.) Curso de capacitación para operadores del Programa de Recuperación de Suelos Degradados Zona Sur (Regiones IX y X). Serie Remehue N° 71, Centro Regional de Investigación Remehue (INIA), Osorno, Chile, p.:93- 103.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA .1987. Glossary of soil science terms. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, USA, 44p.
- SUÁREZ F., DOMINGO 1990. Estimación de las necesidades de encalado. In: VI Congreso Nacional de Ciencia del Suelo, Universidad de la Frontera, Facultad de Ciencias Agropecuarias, p. 153-160.

- SUÁREZ F., DOMINGO. 1991. Diagnóstico de las necesidades de encalado. *In*: Acidez y encalado de suelos en la Región de Los Lagos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile), Est. Exp. Remehue (Osorno), Serie Remehue N°15. p. 77-94.
- SUÁREZ F., DOMINGO. 1994. Uso de cales y fertilizantes en praderas de la zona sur. *In*: LATRILLE, L. (ed.) Producción animal. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Instituto de Producción Animal, Valdivia (Chile), Serie B-18, p. 39-65.
- SUÁREZ F., DOMINGO. 1996. Acidificación de suelos y uso de fertilizantes nitrogenados. *In*: LATRILLE, L. (ed.) Producción animal. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Instituto de Producción Animal, Valdivia (Chile), Serie B-20, p.: 145-161
- TISDALE, S.L., NELSON, W.L. and BEATON, J.D. 1985. Soil fertility and fertilizers. 4 ed. New York, USA, Macmillan.
- WRIGHT, R.J. 1989. Soil aluminum toxicity and plant growth. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20, 1479-1497.