

MUNIBE (Ciencias Naturales. Natur zientziak)	Nº48	21-38	SANSEBASTIAN	1996	ISSN 0214-7688
--	------	-------	--------------	------	----------------

Relación del contenido de boro soluble con distintos parámetros edáficos y ambientales en suelos de Navarra

Relationship between soluble boron content and some soil properties and environmental factors in soils of Navarre (Spain)

PALABRAS CLAVE: Boro soluble, Suelos, Navarra, Análisis estadístico.

KEY WORDS: Soluble boron. Soils, Navarre (Spain), Statistical analysis.

GAKO-HITZAK: Disolbagarria den boroa, Lurra. Nafarroa, Análisi estadistikoa.

Ana J. DONCEL UNANUA*

Jaime IÑIGUEZ HERRERO*

Rosa M. VAL LEGAZ*

RESUMEN

Se determinó el contenido de boro soluble en 246 muestras correspondientes a horizontes A y C de 135 suelos de Navarra. Dichos suelos estaban desarrollados sobre materiales de partida muy diversos (rocas ígneas, metamórficas, areniscas del Triásico, materiales ricos en sales, materiales ricos en CaCO_3) y con vegetación natural. El contenido medio de boro fue de 0,10 mg kg^{-1} . El 91,1 % de las muestras era muy deficiente en boro ($< 0,25$ mg kg^{-1}). Se obtuvieron coeficientes de correlación significativos positivos entre el boro y las variables pH, Ca, Na y Mg de cambio, y negativo con precipitación. El resto de las variables consideradas, K de cambio, materia orgánica, arcilla, carbonatos y conductividad eléctrica, no mostraron relación significativa con el boro. Los resultados obtenidos en el análisis estadístico indicaron que la precipitación era el factor que determinaba principalmente el contenido de boro.

SUMMARY

The soluble boron content in 246 samples of A and C horizons of 135 soils of Navarre (Spain), was determined. These soils were formed from a variety of parent materials (igneous rocks, metamorphic rocks, Triassic sandstone, rich in shales materials, rich in CaCO_3 materials) and with natural vegetation. The average boron content was 0,10 mg kg^{-1} . 91,1 per cent of the total samples were severely deficient in boron ($< 0,25$ mg kg^{-1}). Soluble boron was positively correlated with soil pH and exchangeable Ca, Na and Mg, and negatively correlated with rainfall. The other variables considered, exchangeable K, organic matter, clay, carbonates and electric conductivity did not show significant relations with boron. The statistical analysis results revealed that the rainfall was the most important factor affecting the boron content.

LABURPENA

Nafarroako 135 lurretako A eta C horizonteei dagokien 246 laginetan disolbagarria den boro kopurua neurtu zen. Lurrok oso jatorri ezberdinak (harkaitz igneoak, metamorfikoak, Triasikoko areharriak, gatzetan aberatsak ziren materialeak, CaCO_3 -tan aberatsak ziren materialeak) eta landaretza naturala zuten jatorrizko materialetan garatutakoak ziren. Boro kopuru medioa 0,10 mg kg^{-1} -takoa zen. Laginen ehuneko 91,1-a oso eskasa zen boro kopuruan (0,25 mg kg^{-1} baino gutxiago). Koerlazio koefiziente sinifikatibo positiboak lortu ziren boroaren eta ondorengo aldagaien artean: pH-a, aldakuntzazko Ca, Na eta Mg-a, eta negatiboa prezipitazioarekin. Kontutan harturiko beste aldagaiek, hots, aldakuntzazko K-ak, materia organikoak, lokatzak, karbonatoek eta iragankortasun elektrikoak, ez zuten boroarekin erlazio sinifikatiborik agertu izan. Análisi estadistikokoaren bidez lorturiko emaitzek boro kopurua determinatzen duen faktorea bereziki prezipitazioa dela adierazi zuten.

INDICE

INTRODUCCIÓN

1. BORO EN SUELO

- 1.1. Importancia del boro
- 1.2. Origen y fuentes de boro
- 1.3. Equilibrio adsorción-desorción. Factores que influyen en la adsorción de boro
- 1.4. Deficiencia y toxicidad de boro
- 1.5. Factores que afectan a la disponibilidad de boro en los suelos

2. OBJETIVOS

MATERIAL Y METODOS (Tabla 1)

RESULTADOS Y DISCUSION

1. Contenido del boro (Tablas 2 y 3) (Mapas Nº 1 y Nº 2)
2. Relación del contenido de boro con parámetros edáficos y ambientales (Tablas 4 y 5) (Mapa Nº 3)
3. Contenido de boro en función del material de partida (Tabla 6) (Mapa Nº 4)

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

* Departamento de Química y Edafología. Facultad de Ciencias. Universidad de Navarra. Apartado 273. 31080 Pamplona.

INTRODUCCIÓN

Hasta el momento actual se han dedicado los esfuerzos de investigación y aplicación principalmente a los tres macronutrientes fundamentales: nitrógeno, fósforo y potasio, mientras que en Navarra no se ha realizado ningún estudio sistemático en lo que respecta a micronutrientes tales como boro. El hecho de no existir información acerca del contenido de boro en los suelos de Navarra, ha sido una de las razones que nos ha impulsado a la realización de este trabajo.

Dadas las peculiaridades que ofrece la geografía navarra, en un espacio relativamente pequeño podemos encontrar diferencias climáticas acusadas que van desde la zona norte con una precipitación superior a 2.000 mm al año, donde predominan suelos ácidos, lavados, hasta las regiones ribereñas con gran riqueza en suelos calizos, básicos, incluso alcalinos, acompañados de una precipitación anual que en algunas zonas no supera los 250 mm.

La selección del conjunto de suelos cuyo contenido de boro soluble se ha determinado se realizó teniendo en cuenta la distribución por toda la geografía navarra tratando, en lo posible, de reflejar la gran variabilidad de suelos y características edáficas y medioambientales que convergen en nuestro territorio.

1. BORO EN SUELO

1.1. Importancia del boro

El boro es uno de los micronutrientes esenciales para el normal desarrollo de los vegetales (GUPTA, 1979).

Puede decirse que el boro es el elemento que las plantas necesitan en menor cantidad, si exceptuamos el molibdeno y el cloro, pero presenta la particularidad de que concentraciones ligeramente superiores a las consideradas como óptimas, son tóxicas para muchas especies de plantas (BERGER, 1949; PHILIPSON, 1953; GUPTA, 1983; KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1984; CERDA et al., 1985). Como prácticamente todos los oligoelementos, el boro participa en el desarrollo de las actividades metabólicas de las plantas (MERRIEN, 1984) si bien su función no está claramente establecida.

La concentración de boro en el suelo es particularmente importante porque muchos cultivos son sensibles incluso para muy bajas concentraciones de este elemento. El rango entre deficiencia y toxicidad en los suelos parece ser más estre-

cho para el boro que para cualquier otro elemento mineral (REISENAUER et al., 1973; BOHN et al., 1979).

A pesar de su gran importancia, es un micronutriente poco estudiado en suelos y plantas debido a la dificultad que presenta su determinación analítica (BRUQUE et al., 1981; RATO DE MINGUEZ et al., 1984; MCGEEHAN et al., 1989).

1.2. Origen y fuentes de boro

El boro está universalmente distribuido en los suelos (EATON y WILCOX, 1939). Forma parte de la corteza terrestre en un 0,001 % (MIR, 1982), no encontrándose libre sino combinado con el oxígeno formando distintos minerales, principalmente hidróxidos y silicatos, de los que el grupo de la turmalina es el más frecuente en suelos (KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1984) y el más importante como fuente de boro (KRAUSKOPF, 1972).

El boro de los suelos procede de ciertas rocas en cuyos componentes minerales entra a formar parte este elemento (GUPTA et al., 1985). La concentración de boro en las rocas varía desde 10 mg kg⁻¹ (pg/g) en rocas ígneas hasta más de 1000 mg kg⁻¹ en algunas rocas metamórficas, siendo la concentración de boro en el suelo alrededor de 30 mg kg⁻¹ (ZARCINAS y CARTWRIGHT, 1987) del cual menos del 5 % es, generalmente, disponible para los cultivos (BERGER y TRUOG, 1945; WEAR, 1965; GUPTA, 1968).

En general, las rocas sedimentarias contienen más boro que las rocas ígneas (WHITESTONE et al., 1942; VINOGRADOV, 1959; BINGHAM et al., 1970; LIU ZHENG et al., 1981; KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1984; MERRIEN, 1984); en estas últimas, el contenido de boro aumenta cuanto mayor es la acidez (KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1984).

Con respecto a las rocas sedimentarias, los depósitos marinos (evaporitas marinas y sedimentos arcillosos marinos) son los más ricos en boro (VINOGRADOV, 1959; LIU ZHENG et al., 1981; KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1984). Generalmente se consideran más ricos en boro los sedimentos marinos que los continentales (RANKAMA y SAHAMA, 1962) aunque esta opinión no la comparten todos los autores (BOHN et al., 1979).

El contenido de boro en las rocas metamórficas varía ampliamente según sea la roca a partir de la cual se han formado, y las condiciones e intensidad del proceso de metamorfismo (MAURICE, 1966; AUBERT y PINTA, 1971; LIU ZHENG et al., 1981). Dentro de las rocas metamórficas, las que presentan mayor contenido en boro son esquistos

y gneiss de turmalina (MARCONI *et al.*, 1980).

El boro procedente de las rocas, a lo largo del proceso de edafogénesis, pasa a la disolución del suelo formando varios aniones, tales como BO_2^- , $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$, BO_3^{3-} , H_2BO_3^- y $\text{B}(\text{OH})_4^-$. Parte del boro que se libera del material de partida puede quedar retenido por las arcillas (en especial por illita) o por sesquióxidos y sustancias orgánicas, de forma que, en la disolución, la concentración de boro que se puede alcanzar oscila entre 67 y 3.000 $\mu\text{g/l}$ ($6,7 \cdot 10^{-2}$ mg kg^{-1} ; según KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1984). Sin embargo, dependiendo del tipo de suelo de que se trate y de la técnica de extracción utilizada para la obtención de la fracción soluble, este rango de concentraciones de boro puede variar. KABATA-PENDIAS y PENDIAS (1984) indican que las formas de boro más frecuentes en la disolución edáfica son su ácido no disociado, H_3BO_3 , y $\text{B}(\text{OH})_4^-$. Solamente a pH superior a 7 están presentes otros aniones como H_2BO_3^- y $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$.

La cantidad de boro que presenta el suelo está relacionada primeramente con el contenido de este elemento en el material a partir del cual se ha originado (HADDAD, 1980; MARCONI *et al.*, 1980; LIU ZHENG *et al.*, 1981). GUPTA *et al.* (1985) señalan que la mayor parte del boro del suelo tiene un origen mineral. Sin embargo, el boro de las rocas no es muy accesible para las plantas ya que la liberación de este elemento a partir de los minerales es muy lenta, y la mayoría del boro disponible para los vegetales proviene de la descomposición de la materia orgánica del suelo (MERRIEN, 1984) y del boro adsorbido y precipitado en las superficies de las partículas del suelo (BINGHAM, 1973; RUSSELL, 1973; BOWEN, 1977).

Por lo tanto, se pueden distinguir dos fuentes de boro (GARATE y MEYER, 1983):

- boro de origen mineral o boro relacionado con coloides inorgánicos (arcillas e hidróxidos de Fe y Al)

- boro procedente de la alteración y descomposición de la materia orgánica, siendo ésta una importante fuente de boro sobre todo en suelos ácidos (OKAZAKI y CHAO, 1968).

Otras fuentes secundarias que introducen boro en el suelo son el agua de lluvia (MARCONI *et al.*, 1980), las aguas de irrigación (MERRIEN, 1984), el agua del mar (SALINAS FERNANDEZ, 1985) y los abonos (GUPTA *et al.*, 1985).

Otras vías de introducción de boro en el suelo, procedentes de la actividad humana y que pueden dar lugar a problemas de toxicidad, son la sobre-fertilización con boro (GUPTA *et al.*, 1985) y la utili-

zación de aguas residuales que son, a veces, ricas en este elemento (HUTCHINSON y VIETS, 1969; SALINAS FERNANDEZ, 1985). Este enriquecimiento de las aguas residuales es debido, principalmente, a la utilización de detergentes que incorporan en su composición sustancias que contienen boro como "agentes antiespuma" o blanqueadores (DE LE CHEVALLERIE-HAAF *et al.*, 1986).

1.3. Equilibrio adsorción-desorción. Factores que influyen en la adsorción de boro

Cuando el boro procedente de las rocas, descomposición de la materia orgánica, lluvia, aguas de irrigación, etc., se incorpora al suelo, parte quedará retenido por los distintos constituyentes tanto orgánicos como inorgánicos del suelo, parte pasará a la disolución edáfica (GUPTA *et al.*, 1985). La cantidad de boro en la disolución del suelo (boro disponible para los cultivos) depende de este equilibrio (EATON y WILCOX, 1939; RHOADES *et al.*, 1970; BINGHAM, 1973; RUSSELL, 1973).

Se han realizado numerosos experimentos en distintas partes del mundo para conocer qué parámetros edáficos son importantes en la retención de boro. Los resultados de estos estudios han sido reunidos por EVANS y SPARKS (1983) y KEREN y BINGHAM (1985). La retención de boro por los suelos se puede producir por uno o varios de los siguientes procesos:

- adsorción de $\text{B}(\text{OH})_3$ molecular, en minerales y/o superficies orgánicas

- adsorción aniónica de $\text{B}(\text{OH})_4^-$ en superficies minerales o a través de procesos de intercambio de ligandos (MOTT, 1981)

- formación de complejos con compuestos orgánicos que poseen grupos diol en posición cis 1,2 y 1,3 (PARKS y WHITE, 1952)

- precipitación como fases inorgánicas minerales (PARKS y SHAW, 1941).

Las plantas sólo adsorben la fracción de boro que está disuelta (HATCHER y BOWER, 1958; HATCHER *et al.*, 1959; RYAN *et al.*, 1977) de ahí la importancia de conocer su contenido en la disolución del suelo. La reserva de boro adsorbido se comporta como un amortiguador que estabiliza los cambios en la concentración de boro en la disolución (HATCHER *et al.*, 1962; RHOADES *et al.*, 1970). Generalmente, hay mayor cantidad de boro adsorbido que en la disolución del suelo (HATCHER *et al.*, 1962; JAME *et al.*, 1982).

Según BINGHAM y PAGE (1971) la adsorción de boro ocurre más lentamente que la de otros anio-

nes tales como cloruro, nitrato, sulfato y fosfato. Según ELLIS y KNEZEK (1972) el boro es retenido más fuertemente por los suelos que otros aniones (Cl^- , NO_3^-) y la forma de adsorción de boro en la superficie de las arcillas es en cierto modo similar a la de cationes más que a la de aniones.

JIN *et al.* (1987) realizaron estudios de distribución de boro entre las distintas fracciones que constituyen el suelo y la disponibilidad para las plantas de cada fracción. Según estos autores, una parte del boro se encuentra en la disolución del suelo o débilmente adsorbido por los componentes edáficos. Esta fracción de boro es fácilmente disponible para la absorción de las plantas. Otra parte del boro se asocia de forma más específica con distintos constituyentes (arcillas, materia orgánica, hidróxidos de Mn, hidróxidos de Fe). Esta fracción es menos disponible para las plantas ya que se va liberando más lentamente durante el periodo de crecimiento de las mismas; la cantidad de boro presente en esta fracción es un factor cuantitativo del poder de suministro de boro de los suelos. Otra parte del boro está ocluida en hidróxidos de Al y Fe (cristalinos y amorfos) y silicatos, formando la fracción de boro relativamente no disponible para los vegetales.

En la mayoría de los suelos la adsorción de boro es un proceso reversible (SHORROCKS, 1991). Debido a que las plantas toman boro únicamente de la fracción que se encuentra en la disolución del suelo y no del adsorbido (HATCHER *et al.*, 1959), cuando existen plantas en periodo de crecimiento, el equilibrio se desplaza a favor de la desorción para compensar las pérdidas de boro en la disolución. Este abastecimiento de boro se produce gracias a la reversibilidad del equilibrio adsorción-desorción (HATCHER y BOWER, 1958).

La existencia de este equilibrio también presenta otras implicaciones. Cuando en el suelo existen elevados niveles de boro que determinan condiciones de toxicidad, una forma de disminuir estas altas concentraciones hasta niveles moderados es por lavado del suelo con agua (EATON y WILCOX, 1939; PRATHER, 1977; LABORATORIO DE SALINIDAD DE U.S., 1982). Sin embargo, el exceso de este elemento no se elimina tan fácilmente como se puede conseguir para otras sales (Cl^- , SO_4^{2-}) ya que, debido al equilibrio que existe entre el boro adsorbido y el libre en la disolución del suelo, se produce un fenómeno de "regeneración" de ese boro eliminado (RHOADES *et al.*, 1970). Se cree que este boro restituido procede de reservas más insolubles: alteración de minerales que contienen boro, descomposición de la materia orgánica y disolución de sales de boro.

Los suelos difieren considerablemente en su capacidad para fijar boro. A mayor capacidad del suelo para adsorber boro, más bajo es el contenido de boro en la disolución. De ahí que el contenido de boro en la disolución del suelo dependa de las características de adsorción/desorción que posea ese suelo concreto (GUPTA *et al.*, 1985). Según YERMIYAHU *et al.* (1988) la cantidad de boro adsorbido por los suelos varía mucho en función de los constituyentes del suelo. REISENAUER *et al.* (1973) y MOYANO *et al.* (1989) indican que la disponibilidad de boro se ve afectada por varios factores simultáneamente.

La retención de boro en el suelo depende de diversas propiedades de éste, como pH (BARBIER y CHABANNES, 1953; BINGHAM y PAGE, 1971; RIBEIRO y BRAGA, 1974; GUPTA, 1979; KEREN *et al.*, 1981; KEREN y MEZUMAN, 1981) contenido en arcilla e illita, contenido en materia orgánica (PARKS y WHITE, 1952; KEREN y BINGHAM, 1985; GU y LOWE, 1990), hidratos de carbono solubles en agua, contenido de Fe y Al amorfos y Si (EVANS, 1987) y contenido de óxidos de Fe y Al (BINGHAM *et al.*, 1971; KEREN y BINGHAM, 1985).

Otros autores también incluyen otros factores como concentración de boro en la disolución, especialmente como borato, capacidad de intercambio iónico, composición de iones intercambiables, tipo de arcilla (HATCHER y BOWER, 1958; BIGGAR y FIREMAN, 1960) revestimientos minerales en las arcillas (HINGSTON, 1964; COUCH y GRIM, 1968; SIMS y BINGHAM, 1968; BINGHAM *et al.*, 1970; BINGHAM, 1973) y contenido de CaCO_3 (ICHIKUNI y KIKUCHI, 1972). El grado de fijación de boro está influenciado por la humedad (RIBEIRO y BRAGA, 1974), sequía y humedecimiento del suelo, temperatura, textura (EATON y WILCOX, 1939; PARKS y WHITE, 1952; BIGGAR y FIREMAN, 1960; SINGH, 1964; GUPTA, 1968; BINGHAM *et al.*, 1971) y prácticas agrícolas como el encalado (EVANS y SPARKS, 1983).

La naturaleza de la adsorción de boro por los distintos constituyentes edáficos no se conoce del todo y esto condiciona el que no exista acuerdo sobre el papel que desempeñan dichos constituyentes en el comportamiento del boro (MARZADORI *et al.*, 1991). Esta adsorción es dependiente del pH con el máximo siempre a pH superior a 7 (KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1984; PAVAN y CORREA, 1988).

1.4. Deficiencia y toxicidad de boro

El boro es uno de los micronutrientes cuyo número de casos de deficiencia en cultivos va au-

mentando cada día (PESSÔA DA CRUZ y FERREIRA, 1984).

La deficiencia en boro está más extendida que la de cualquier otro micronutriente (GUPTA, 1979; GUPTA *et al.*, 1985; PANJAB SINGH *et al.*, 1988) y ha sido descrita en distintas partes del mundo (KEREN y BINGHAM, 1985).

El rango de condiciones climáticas, tipos de suelos y cultivos donde se dan situaciones de deficiencia en boro es más amplio que para cualquier otro microelemento (WIKNER y UPPSTRÖM, 1980). La deficiencia en boro se ha encontrado en suelos formados a partir de distintos materiales parentales que difieren considerablemente en sus características físicas y químicas (ADAMS *et al.*, 1991).

LIU ZHENG *et al.* (1981) GUPTA *et al.* (1985) KEREN y BINGHAM (1985) y EVANS (1987) establecen que las causas que dan como resultado la deficiencia en boro son: el bajo contenido inherente de boro en el suelo, determinado por el tipo de suelo y material de partida, y la existencia de condiciones edáficas que favorecen la retención de boro y que pueden conducir a la no disponibilidad de este elemento.

Los suelos ricos en materia orgánica, tales como suelos turbosos, suelos con estiercol, y otros bajo condiciones de pobre drenaje (WHITESTONE *et al.*, 1942; SILLANPAA, 1972) suelen ser, con frecuencia, deficientes en boro debido a la retención de este elemento por la materia orgánica. Este tipo de suelos se localizan en zonas deprimidas o mal drenadas donde se favorece la acumulación de materia orgánica.

Varios autores también han indicado que la deficiencia en boro ocurre generalmente en suelos alcalinos (CORINO *et al.*, 1990) o con elevado contenido en materia orgánica (PERVIS y HANNA, 1939) debido a que el boro puede ser fuertemente retenido por procesos de intercambio de ligandos o por complejación con la materia orgánica (EVANS, 1987).

Otros autores indican que la existencia de pH ácidos (VINOGRADOV, 1959; GUPTA *et al.*, 1985; EVANS, 1987) y bajo contenido de materia orgánica (EVANS, 1987; CORINO *et al.*, 1990) favorecen la deficiencia en boro, ya que la adsorción de boro en estas condiciones es mínima, y debido a que es un elemento altamente móvil y fácilmente lavable, se facilita la pérdida de boro por lixiviación (AITKEN *et al.*, 1987).

Otro factor importante que va a determinar el contenido de boro en el suelo es la precipitación; de hecho, la deficiencia de boro es más fácil que

ocurra en suelos de regiones húmedas con elevada pluviosidad (GUPTA, 1979; GUPTA *et al.*, 1985; PANJAB SINGH *et al.*, 1988) debido al lavado. Por otra parte, la deficiencia en boro también se ha encontrado en muchas regiones áridas (GARG *et al.*, 1979; KHAN *et al.*, 1979; GULATI *et al.*, 1980).

La textura del suelo es otro factor que determina la mayor o menor riqueza de boro disponible en el suelo. La deficiencia en boro se puede encontrar en suelos con bajo contenido en arcilla (VINOGRADOV, 1959; GUPTA *et al.*, 1985; AITKEN *et al.*, 1987; EVANS, 1987). Sin embargo, otros autores indican que la existencia de texturas pesadas (junto con pH elevado) puede ocasionar deficiencia (CORINO *et al.*, 1990) debido a que se favorece la adsorción de boro (GUPTA *et al.*, 1985).

En suelos naturales, la toxicidad de boro no está tan ampliamente distribuida como la deficiencia (GUPTA *et al.*, 1985) y es más frecuente en regiones áridas y semiáridas donde el lavado es limitado (PIZARRO y BRAUN, 1963; BOHN *et al.*, 1979; GUPTA, 1979; PONNAMPERUNA *et al.*, 1981; LABORATORIO DE SALINIDAD DE US, 1982; KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1984; RATO DE MINGUEZ *et al.*, 1984; CERDA *et al.*, 1985; KEREN y BINGHAM, 1985; MAAS, 1986).

La toxicidad de boro es frecuente en suelos salinos y sódicos (PENMAN y Mc ALPIN, 1949; VINOGRADOV, 1959; HUTCHINSON y VIETS, 1969; IL'IN y ANIKINA, 1974; GUPTA, 1979; PONNAMPERUNA *et al.*, 1981; LABORATORIO DE SALINIDAD DE US, 1982; CARTWRIGHT *et al.*, 1983; RATO DE MINGUEZ *et al.*, 1984; CERDA *et al.*, 1985; ADRIANO, 1986; CARTWRIGHT *et al.*, 1986; NICHOLAICHUK *et al.*, 1988; AHMED y EL-TAWAIL, 1989; LIU ZHENG *et al.*, 1989).

Por otra parte, son frecuentes concentraciones de boro a niveles tóxicos en áreas deprimidas, zonas mal drenadas o con drenaje impedido (IL YIN y ANIKINA, 1974; CERDA *et al.*, 1985) o en aquellas que presentan capa freática superficial (WILCOX, 1960).

1.5. Factores que afectan a la disponibilidad de boro en los suelos

El contenido de boro presente en la disolución del suelo (boro soluble) es controlado por el contenido de boro adsorbido, y el equilibrio entre ambas fases determina el suministro de este nutriente para las raíces de las plantas (HATCHER y BOWER, 1958). A mayor capacidad del suelo para adsorber boro, más bajo es el contenido de este elemento en la disolución (GUPTA *et al.*, 1985). Esta capacidad de adsorción depende de las características y

propiedades que posea el suelo. JIN *et al.* (1987) indican que el boro presente en la disolución del suelo y el débilmente adsorbido por los componentes, constituyen el boro fácilmente disponible para las plantas, y ambas fracciones pueden considerarse como factores de intensidad del poder de suministro de boro de los suelos.

Las propiedades de los suelos tienen una gran influencia sobre la disponibilidad de boro para las plantas (SHUMAN *et al.*, 1992). Por otra parte, los factores medio-ambientales (GUPTA *et al.*, 1985) y el tipo de material parental (HADDAD, 1980) influyen de un modo más o menos directo en la cantidad de boro presente en la disolución.

Aunque el contenido de boro disponible de los suelos está relacionado con los diferentes factores edáficos, existen muchas contradicciones en la bibliografía acerca de esta relación. Esta falta de acuerdo entre los autores se centra principalmente en dos aspectos:

- determinar qué factores condicionan principalmente el contenido de boro soluble
- conocer la influencia de los distintos constituyentes edáficos en la mayor o menor disponibilidad de boro.

Según AGUILAR-ROS y AGUILAR (1977), EVANS y SPARKS (1983) y ZORITA VIOTA (1988), las propiedades del suelo que pueden influir en la disponibilidad de boro para las plantas son: pH, textura, materia orgánica y óxidos de Fe y Al. Otros autores incluyen también Ca intercambiable (ECK y CAMPBELL, 1962; TANAKA, 1967; FOX, 1968; EL KHOLI *et al.*, 1970; BEAUCHAMP y HUSSAIN, 1974; AGUILAR-ROS y AGUILAR, 1977; PINYERD *et al.*, 1984) y CaCO_3 (BRUQUE *et al.*, 1981; ZORITA VIOTA, 1988; KAPLAN *et al.*, 1990).

REISENAUER *et al.* (1973) y MOYANO *et al.* (1989) indican que la disponibilidad de boro se ve afectada por varios factores simultáneamente. ZORITA VIOTA (1988) observó que ninguno de los factores (materia orgánica, caliza, pH, contenido y tipo de arcilla) considerados de forma aislada era responsable de la disponibilidad de boro, sino que más bien era consecuencia de la acción conjunta de todos ellos.

2. OBJETIVOS

Los objetivos que se plantearon en este trabajo fueron:

1. Conocer los rangos de concentración de boro soluble en las muestras de suelos seleccionadas para determinar la existencia de concentraciones

potencialmente tóxicas o deficientes de este elemento.

2. Con la información obtenida, elaborar un mapa de distribución de boro en cada uno de los dos horizontes.

3. Conocer la relación que existía entre el contenido de boro y las variables edáficas y medioambientales en el conjunto de suelos y en cada uno de los dos horizontes estudiados.

4. Determinar qué parámetros influían principalmente en el contenido de boro soluble.

Para llevar a cabo los objetivos 3 y 4 se seleccionaron aquellas propiedades del suelo, que según la bibliografía consultada, parecían influir en la concentración de boro presente en la disolución del suelo. Dichas propiedades fueron: contenido de materia orgánica, arcilla, carbonato cálcico, óxidos de Fe y Al libres, cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K), pH y conductividad eléctrica del extracto de saturación (C.E.).

Además de estos parámetros propiamente edáficos, se incluyeron factores ambientales que podrían afectar al contenido de boro soluble, como son: precipitación (P), evapotranspiración potencial (ETP) y diferencia entre ambas (P-ETP). También se consideraron otros dos factores más como son, altitud y material de partida, teniendo en cuenta la distinta situación de los suelos y la diferente naturaleza del material parental sobre el que estaban desarrollados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se analizó el contenido de boro soluble en un total de 246 muestras correspondientes a 135 suelos (DONCEL, 1994). De cada suelo se seleccionó para su análisis el horizonte superficial (135 muestras) y el horizonte C o, en su defecto, el que quedara a mayor profundidad exceptuando la roca madre (111 muestras). Se eligió el horizonte C porque, al estar en contacto con el material de partida, se consideró que representaría mejor el contenido de boro en dicho material.

Los suelos elegidos se encontraban distribuidos por toda la geografía navarra de forma que estaban representados desde los tipos más característicos, como Cambisoles y Regosoles calcáricos y eútricos, Fluvisoles calcáricos, hasta aquellos que, a pesar de presentar una localización puntual, eran importantes por su peculiaridad: Podsoluvisoles, Andosoles, Gypsisoles.

Los valores de los parámetros que, según la bibliografía consultada condicionaban el contenido

en boro soluble (materia orgánica, pH, arcilla, carbonatos, Fe y Al libres, cationes de cambio: Ca, Mg, Na y K, material de partida, altitud, precipitación y evapotranspiración potencial) se relacionaron mediante análisis estadístico con el contenido en boro. Todos los datos de los suelos (excepto el contenido de boro) estaban ya determinados en estudios anteriores (IÑIGUEZ *et al.*, 1982-1992). Las técnicas empleadas para la determinación de estos parámetros fueron:

— Análisis granulométrico: Método internacional modificado con el empleo de la Pipeta de Robinson.

— Materia orgánica: Método de ANNE (1945) de combustión húmeda.

— pH: en pasta saturada con KCl 1 N.

— Carbonatos: Método manométrico del calcímetro de Bernard.

— Cationes de cambio: Método de saturación-desplazamiento con acetato amónico 1N (pH 7) descrita en Soil Conservation Service (1972). Na y K de cambio se determinaron por fotometría de llama, y Ca y Mg de cambio por complexometría de acuerdo al método de Diehl *et al.* (1950).

— Conductividad eléctrica: en extracto de pasta saturada tras un periodo de reposo de 16-24 h. utilizando para ello un conductímetro.

— Contenido en óxidos de Fe y Al libres: Método de ditionito-citrato-bicarbonato descrito por Soil Conservation Service (1972). La cantidad de Fe y Al extraída se midió por absorción atómica.

— Clasificación de los suelos: de acuerdo con FAO (1974) teniendo en cuenta los datos de campo y los análisis realizados en el laboratorio.

Los datos de precipitación, evapotranspiración potencial y P-ETP fueron recogidos de estudios realizados por el Gobierno de Navarra (DIPUTACION FORAL DE NAVARRA, 1982). Los valores de estos parámetros que se asignaron a cada perfil procedían de la estación más próxima al punto donde se tomó la muestra.

El contenido de boro soluble se analizó en el extracto de pasta saturada obtenido a partir de 100 g de suelo y utilizando agua desionizada de calidad milli Q. Después de 16 horas de reposo se centrifugaron a 4.000 r.p.m. y se filtraron a través de papel de filtro Whatman N° 42. El extracto obtenido se analizó por ICP-AES a una longitud de

Material de partida	Grupo	Nº de Muestras	Tipos de Suelos	
Rocas Igneas	I	8	Cambisol eútrico, Cambisol húmico, Regosol eútrico, Luvisol órtico.	
Rocas Metamórficas	E	17	Andosol húmico, Cambisol dístrico, Cambisol gleico, Cambisol húmico, Ranker, Regosol dístrico, Regosol eútrico.	
Materiales ricos en Sales	S	64	Cambisol cálcico, Cambisol cálcico fase salina, Cambisol cálcico fase salina y sódica, Fluvisol calcárico, Fluvisol calcárico fase salina, Regosol calcárico, Regosol calcárico fase salina, Solonchack gleico fase sódica, Solonchack órtico, Solonchack órtico fase sódica, Xerosol háplico, Xerosol háplico fase salina, Yermosol háplico fase salina.	
Areniscas Triásicas	T	10	Acrisol órtico, Luvisol crómico, Phaeozem háplico, Regosol dístrico.	
Materiales ricos en CO ₃ Ca				
Contenido en CO ₃ Ca				
Hor. A	Hor. C			
>10%	>10%	M	63	Cambisol cálcico, Fluvisol calcárico, Phaeozem calcárico, Regosol calcárico, Rendzina, Vertisol crómico, Xerosol háplico.
<10%	<10%	N	54	Acrisol húmico, Acrisol órtico, Cambisol crómico, Cambisol dístrico, Cambisol eútrico, Cambisol húmico, Luvisol cálcico, Luvisol crómico, Luvisol órtico, Phaeozem lúvico, Podzoluvisol dístrico, Regosol eútrico, Regosol dístrico, Rendzina.
>10%	<10%	R	2	Cambisol cálcico.
<10%	>10%	L	28	Cambisol cálcico, Cambisol dístrico, Cambisol gleico, Gleysol eútrico, Luvisol crómico, Luvisol gleico, Regosol calcárico.

Tabla 1. Clasificación de los suelos según el material de partida

onda de 249,678 nm (DONCEL, 1993). Todo el material utilizado era de polipropileno lavado previamente con agua desionizada milli Q.

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa Systat. Los test empleados para todo el conjunto de muestras fueron: correlación de Pearson, componentes principales, regresión paso a paso y análisis cluster. A las muestras de cada uno de los dos horizontes se aplicaron correlación de Pearson y componentes principales. También se estudió la relación entre el contenido de boro en ambos horizontes a través de un análisis de correlación de Pearson.

Debido a la gran diversidad de tipos de suelos considerados se agruparon las muestras teniendo en cuenta el tipo de material de partida y la dinámica predominante en cada caso (Tabla 1), con el fin de observar las diferencias que podrían existir entre los distintos grupos en cuanto a contenido de boro y los factores que influirían en él. Los test aplicados en estos grupos fueron: medias pareadas, anova de 1 criterio (tipo de material) considerando únicamente la variable boro, y anova de 1 criterio (tipo de material) considerando todas las variables; estos anovas fueron realizados en cada uno de los dos horizontes.

Por otra parte, se separaron las muestras de horizontes A en dos grupos según su pH (pH <5 y pH > 5). En cada uno de ellos se aplicó un análisis de correlación de Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. CONTENIDO DE BORO

El contenido medio de boro para el conjunto de las muestras fue de 0,10 mg kg⁻¹ (Tabla 2). Según los límites establecidos por LIU ZHENG *et al.* (1989) para clasificar los suelos en función de su contenido en boro soluble (Tabla 3) los resultados en el 97,2 % de las muestras cayeron dentro del rango considerado como deficiente (< 0,50 mg kg⁻¹). Sólo el 1,2 y el 1,6 % de las muestras analizadas presentó un contenido de boro medio y alto,

Nº de Muestras	246
Conc. mínima (mg kg ⁻¹)	0,00
Conc. máxima (mg kg ⁻¹)	2,44
Media	0,10
Varianza	0,05
Desviación estándar	0,23
Error estándar	0,02
C.V.	2.34

Tabla 2. Parámetros estadísticos obtenidos en el análisis de las muestras de suelos

B soluble (mg kg ⁻¹)	Total muestras%	Horiz. A%	Horiz. C%
DEFICIENTE (<0,50)	97,2	98,6	95,5
Deficiente muy bajo (<0,25)	91,1	93,4	88,3
Deficiente bajo (0,25-0,501)	6,1	5,2	7,2
MEDIO (0,50-1,00)	1,2	-	2,7
ALTO (1,00->2,00)	1,6	1,4	1,8
Alto (1,00-2,001)	1,2	0,7	1,8
Muy Alto (>2,00)	0,4	0,7	-

*según Liu Zheng *et al.* (1989)

Tabla 3. Clasificación de los suelos según su contenido en boro

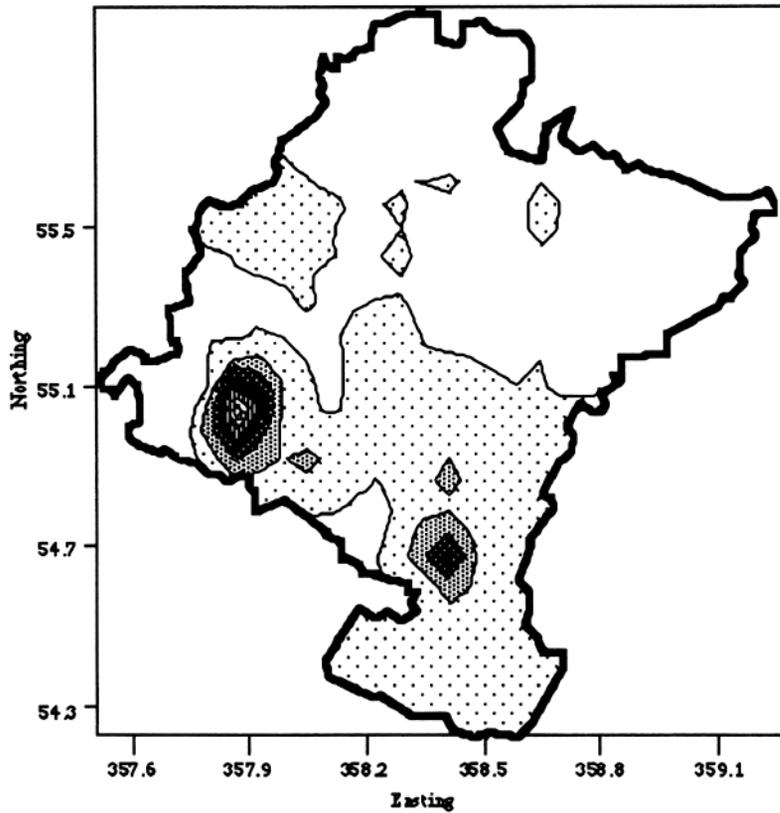
respectivamente. Esta distribución en rangos de concentración de boro se mantuvo prácticamente igual cuando se consideraron independientemente las muestras correspondientes a horizontes A y a horizontes C.

2. RELACIÓN DEL CONTENIDO DE BORO CON PARÁMETROS EDÁFICOS Y AMBIENTALES

Las variables Precipitación, Altitud y Evapotranspiración (ETP) estaban fuertemente relacionadas entre sí. Existía una correlación positiva y altamente significativa entre Precipitación y la variable Altitud ($r = 0,417$; $P < 0,01$) siendo negativa ($r = -0,497$; $P < 0,01$) con ETP. Se obtuvo una ecuación que relacionó la Precipitación con los valores de ETP y Altitud: $Y = 3096,132 + 0,408x_1 - 3,429x_2$; siendo $Y =$ Precipitación (mm); $x_1 =$ Altitud (m) y $x_2 =$ ETP (mm). Esta ecuación indicó que las zonas de mayor altitud acompañadas de bajos valores de ETP son las que soportaban mayor pluviosidad. Debido a esta relación, elegimos la Precipitación para el tratamiento estadístico ya que su interpretación englobaba a los otros dos parámetros medio-ambientales (ETP y Altitud). En el Mapa Nº 3 se puede observar la distribución de la precipitación en el área estudiada⁽¹⁾.

El análisis de correlación de Pearson realizado en el conjunto de muestras de suelo, nos indicó que las variables más fuertemente relacionadas con el boro (Tabla 4) eran pH, Ca y Na, que lo estaban positivamente, y Precipitación que lo estaba negativamente. Relaciones similares han sido obtenidas por otros autores en lo que se refiere a cationes de cambio Ca y Na (KAPLAN *et al.*, 1990;

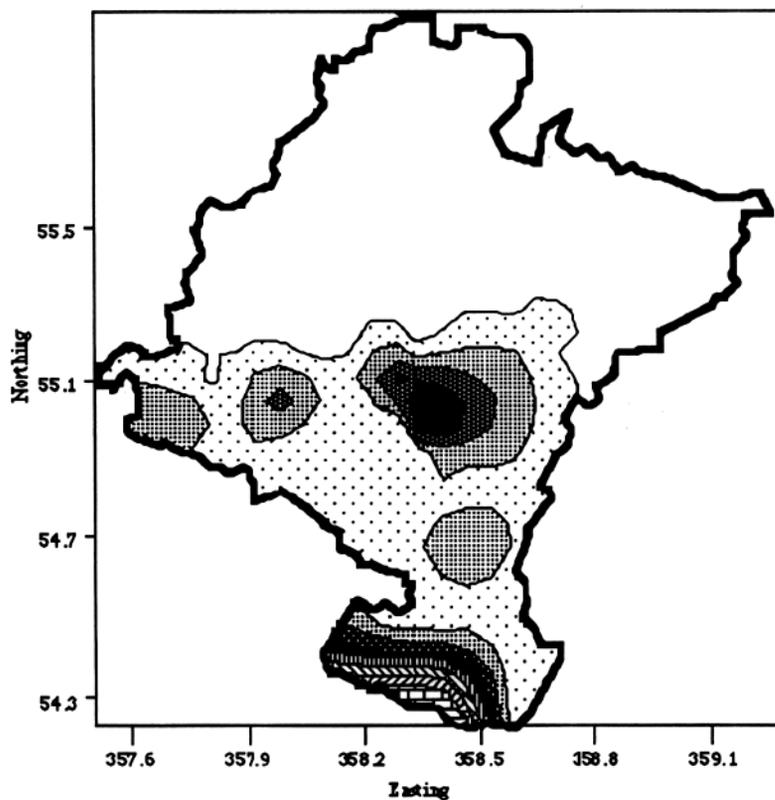
(1) El Mapa de Precipitación anual (Mapa Nº 3) se realizó utilizando como base las coordenadas geográficas y los datos de precipitación anual (mm) de 51 estaciones, tanto pluviométricas como termopluviométricas. Los datos de precipitación utilizados proceden de estudios realizados por el Gobierno de Navarra (DIPUTACION FORAL DE NAVARRA, 1982) y están recogidos, junto con las coordenadas correspondientes, en DONCEL (1994).



Contenido de boro (mg kg ⁻¹)	
□	0,00-0,05 Deficiente muy bajo
◻	0,05-0,25 Deficiente muy bajo
▨	0,25-0,50 Deficiente bajo
■	0,50-0,75 Medio
■	0,75-1,00 Medio
▨	1,00-1,25 Alto
▨	1,25-1,50 Alto
▨	1,50-1,75 Alto
▨	1,75-2,00 Alto

Escala horizontal 1:1300000
 0 13 Km 26 Km 39 Km 52 Km 65 Km

Mapa N° 1. Distribución del contenido de boro. Horizonte A



Contenido de boro (mg kg ⁻¹)	
□	0,00-0,05 Deficiente muy bajo
◻	0,05-0,25 Deficiente muy bajo
▨	0,25-0,50 Deficiente bajo
■	0,50-0,75 Medio
■	0,75-1,00 Medio
▨	1,00-1,25 Alto
▨	1,25-1,50 Alto
▨	1,50-1,75 Alto
▨	1,75-2,00 Alto

Escala horizontal 1:1300000
 0 13 Km 26 Km 39 Km 52 Km 65 Km

Mapa N° 2. Distribución del contenido de boro. Horizonte C

Variabes	r	N
Boro-pH	0,315**	243
Boro-Ca	0,277**	244
Boro-Na	0,320**	244
Boro-P	-0,305**	246
Boro-Mg	0,226*	244
Boro-K	0,134ns	244
Boro-Arcilla	0,073ns	243
Boro-Carbonatos	0,141ns	245
Boro-M. orgánica	-0,110ns	245
Boro-C.E.	-0,045ns	63
Boro-Fe	-0,530ns	26
Boro-AL	-0,592ns	21

**altamente significativo P<0,01
*significativo P<0,05
ns: no significativo

Tabla 4. Relación de boro con las distintas variables

SHUMAN *et al.*, 1992) y pH (DATA y RATHORE, 1992; HADWANI *et al.*, 1992).

La matriz de correlación completa (datos no presentados) puso también de manifiesto que los valores de pH ácido, estaban ligados a elevada pluviosidad (junto con situación a mayor altitud y baja ETP) y escaso contenido en boro. Los mayores contenidos en boro estaban relacionados con baja pluviosidad (alta ETP y escasa altitud), y valores elevados de pH y saturación en bases.

En la Tabla 5 se exponen los resultados del análisis de componentes principales realizado en el conjunto de muestras. Dadas las variables asociadas a la componente de mayor peso se pudo deducir la importancia que poseía la pluviosidad y, por tanto, la situación de los suelos en la geografía navarra. En cuanto al boro, la sexta componente estaba condicionada principalmente por el contenido de este elemento y, a mayor distancia y con sentido inverso, por Fe y Al libres.

La ecuación de regresión obtenida tomando como variable dependiente el contenido de boro: $Y = -0,174 + 0,042x_1 + 0,022x_2$. siendo: $Y = \text{mg kg}^{-1}$

boro estimadas; $x_1 = \text{pH}$ (en KCl 1 N); $x_2 = \text{Na}$ ($\text{cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$), indicó que el aumento de pH y de cationes Na de cambio, suponían un incremento lineal en la concentración de boro soluble en los suelos.

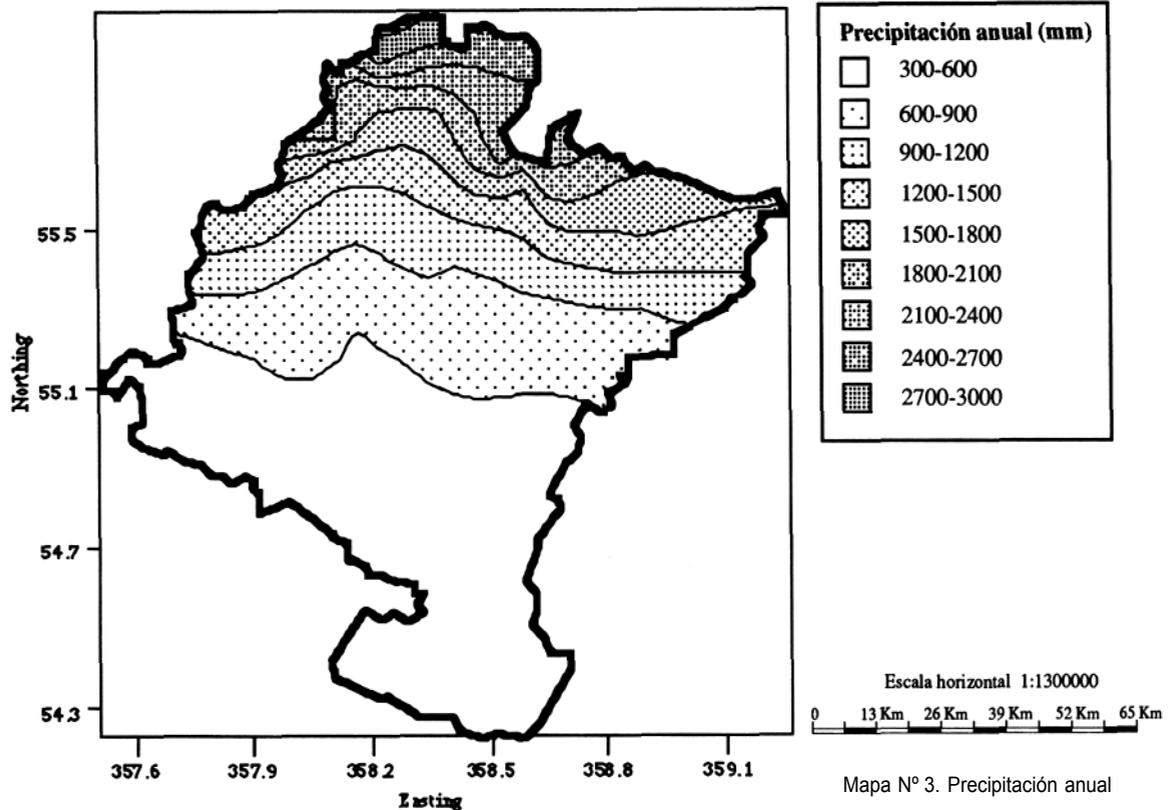
El análisis cluster considerando 5 grupos (datos no presentados), separó en 3 de ellos las muestras caracterizadas por presentar mayores niveles de boro, junto con pH más básico y elevado contenido en cationes de cambio, principalmente, Ca, Mg y Na.

El análisis de correlación de Pearson realizado en cada uno de los dos horizontes por separado (datos no presentados) puso de manifiesto que en el horizonte C prácticamente se mantenía la misma relación entre el boro y el resto de variables que al considerar todo el conjunto de muestras, mientras que en el A únicamente se obtuvo un coeficiente significativo entre boro y Na ($r = 0,280$; $P = 0,046$) y casi rozando el límite de significatividad con Ca ($r = 0,269$; $P = 0,073$). Por otra parte, existía una correlación positiva ($r = 0,436$; $P < 0,01$) entre el contenido de boro de ambos horizontes. Por lo que se refiere al análisis de componentes principales realizado en cada horizonte, no difería de forma importante del obtenido considerando todas las muestras.

El análisis de correlación de Pearson realizado en cada uno de los dos grupos de horizontes A separados según el pH, indicó que, de todas las variables consideradas, sólo el K de cambio presentaba un coeficiente de correlación positivo y significativo con el boro ($r = 0,556$; $P < 0,05$) en el grupo de muestras con $\text{pH} < 5$. En el otro grupo ($\text{pH} > 5$) no se obtuvieron relaciones significativas con el boro. La misma relación se encontró estableciendo otros valores de pH para separar los grupos ($\text{pH} 5,5$ y 6). Otros autores también encontraron una correlación positiva entre el boro y el K disponibles en suelos neutros y básicos (HADWANI *et al.*, 1989) y ácidos (MOYANO *et al.*, 1989). Por el contrario, PAKRASHI y HALDAR (1992) obtuvieron relación negativa entre el boro soluble en agua calien-

Componentes rotadas	Variabes	interpretación	varianza%
1	Arcilla, Fe y Al	Textura	15,12
2	K	Potasio de cambio	10,68
3	pH, Carbonat, M.orgánica y P	Pluviosidad	20,90
4	Mg, Ca y Na	Tipo de cationes de la CEC	13,12
5	C.E.	Contenido en Sales	11,17
6	Boro, Fe y Al	Contenido en Boro	13,38
			Total=84,37

Tabla 5. Análisis de Componentes Principales



te y el contenido de K de cambio. Según Cox y KAMPRATH (1972), el K aumenta la disponibilidad de boro debido a la formación de tetraboratos de alta solubilidad.

3. CONTENIDO DE BORO EN FUNCIÓN DEL MATERIAL DE PARTIDA

La clasificación de los suelos según el material de partida, indicó que los desarrollados sobre materiales ricos en sales (grupo S) son los que presentaban mayores niveles de boro tanto en el horizonte A como en el C, seguidos por los originados a partir de materiales calizos y con más de 10 % de CaCO_3 en ambos horizontes (grupo M). Por el contrario, los suelos más pobres en boro, tanto en A como en C, correspondían a los originados sobre rocas ígneas (grupo I) y metamórficas (grupo E) localizados en la zona más septentrional de Navarra (ver Mapa Nº 4)⁽²⁾.

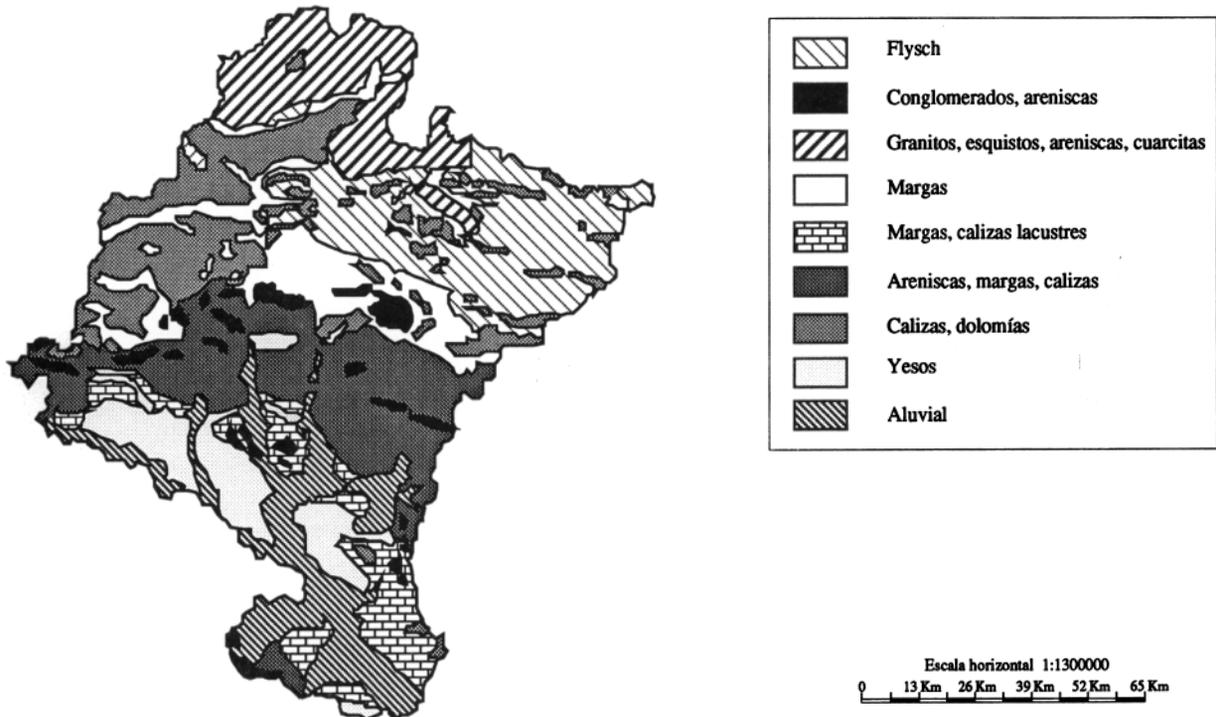
El test de medias pareadas puso de manifiesto la existencia de diferencias significativas entre el contenido de boro del horizonte A y C, en los suelos desarrollados sobre materiales calizos con un contenido en CaCO_3 < 10 % en A, (grupos L y

N). Ambos grupos presentaban mayor concentración de boro en el horizonte superficial, que podría deberse a su mayor contenido en cationes de cambio, principalmente Ca y Mg.

El anova de un criterio (tipo de material), en cada uno de los dos horizontes, tomando como variable el contenido en boro, indicó que, únicamente, el grupo S presentaba diferencias significativas con el resto, tanto en el horizonte A como en el C. Este anova, considerando el resto de variables, puso de relieve que las diferencias más importantes entre el grupo S y el resto, se debían a su mayor contenido en cationes de cambio (Na y Ca), pH más elevado y al hecho de estar situados en zonas de menor precipitación y altitud.

La elevada pluviosidad favorece la acidificación del suelo y en estas condiciones la adsorción de boro es mínima (MOYANO *et al.* 1989). Por otra parte, KAPLAN *et al.* (1990) aseguran que el boro es el único nutriente mineral esencial que está presente en la disolución del suelo como molécula no ionizada en el rango de pH adecuado para el crecimiento de las plantas. Debido a su naturaleza no iónica, es fácilmente lavable. En áreas de elevada pluviosidad, por tanto, su disponibilidad es generalmente baja, siendo frecuente la deficiencia en boro (GUPTA *et al.*, 1985). Todo esto explicaría el

(2) El Mapa de litología de Navarra (Mapa Nº 4) está elaborado tomando como base el incluido en el ATLAS DE NAVARRA (1977).



Mapa N° 4. Litología

bajo contenido de boro soluble en los suelos del norte de Navarra, a pesar de que algunos de ellos están desarrollados a partir de materiales potencialmente ricos en boro (rocas ígneas y metamórficas).

Los suelos pertenecientes a la mitad sur de Navarra presentan mayores concentraciones de boro debido a que son suelos enclavados en zonas de menor altitud con precipitación escasa y evapotranspiración potencial elevada. Por otra parte, poseen mayores niveles de Ca, Mg y Na de cambio, así como pH más básicos, variables todas ellas correlacionadas positivamente con el contenido de boro. Otro aspecto a tener en cuenta es que, en esta zona de Navarra, predominan las rocas sedimentarias que son más ricas en boro que las que existen en la mitad norte.

Las concentraciones de boro más elevadas (superiores a $0,25 \text{ mg kg}^{-1}$, y por tanto fuera del límite considerado como Deficiente muy bajo) pertenecen a horizontes A o C de suelos, en general, con escaso desarrollo y marcado carácter calcárico, salino, o ambos. Según GUPTA *et al.* (1985) el boro, al igual que el sodio y el cloruro, es soluble y se acumulará allí donde se depositen las sales, lo que explica que los suelos salinos y sódicos presenten, con frecuencia, concentraciones de boro tóxicas.

Dentro de este grupo de muestras ricas en boro (Tabla 6), las únicas con un contenido de boro hidrosoluble Medio (entre $0,50$ y $1,00 \text{ mg kg}^{-1}$) y Alto (entre $1,00$ y $2,00 \text{ mg kg}^{-1}$) y, por tanto, tóxico en este último caso, presentan un régimen hídrico xérico y, en algunos casos, arídico. Todas estas muestras, excepto una (perfil nº 41 horizonte C) poseen un moderado contenido en sales con valores de C.E. que superan los $2,0 \text{ dSm}^{-1}$. Con respecto al resto de variables edáficas, el porcentaje de carbonatos, arcilla y Ca de cambio es muy alto. La mayoría posee un contenido de Na de cambio elevado y un pH moderadamente básico. Algunos de estos suelos (24, 12, 29 y 19) tienen drenaje impedido o se encuentran imperfectamente drenados debido a que poseen texturas pesadas, a que existe una capa freática próxima a la superficie, o ambas. Las sales solubles de estos suelos proceden del material originario rico en sales y del agua freática que las lleva disueltas. Al estar la capa freática próxima a la superficie, las sales más solubles ascienden por capilaridad salinizando el suelo y formando costras blancas que aparecen en la superficie en las épocas secas. El boro podría seguir el mismo camino que el resto de sales solubles, enriqueciendo el perfil y acumulándose en los distintos horizontes debido a que el lavado es limitado. Con respecto a la textura, este grupo de muestras presenta alto contenido en arcilla.

Perfil	Horiz.	Boro mg kg ⁻¹	C.E. dSm ⁻¹	CaCO ₃ %	Arcilla %	Ca cmol(+)Kg ⁻¹	Na cmol(+)Kg ⁻¹	pH KCl 1N
24	C	0,70	7,44	32,61	41,45	38,38	2,24	7,35
13	C	0,83	17,89	41,81	29,57	50,18	7,20	7,85
41	C	0,87	-	43,20	26,00	15,00	0,84	7,10
12	A	1,03	9,18	33,50	46,92	34,00	2,16	7,15
29	B	1,32	2,66	39,71	31,30	11,50	5,90	7,55
1	C	1,36	3,30	21,40	25,10	16,16	3,30	7,45
19	A	2,44	2,09	17,82	36,20	42,42	0,80	7,10

Tabla 6. Muestras con mayor contenido en boro

CORINO *et al.* (1990) establecen que la existencia de texturas pesadas (junto con pH elevado) puede ocasionar deficiencia en boro debido a que en estas condiciones se favorece la adsorción de este elemento. En nuestro caso, la presencia de elevados niveles de arcilla, más que ocasionar la deficiencia en boro contribuye a su acumulación en el suelo al impedir el drenaje.

CONCLUSIONES

1. El análisis de boro soluble en el extracto de saturación por la técnica ICP-AES en un total de 135 suelos distribuidos por todo el territorio de Navarra (246 muestras correspondientes a horizontes A y C) ofrece un contenido medio de boro de 0,10 mg kg⁻¹. Casi la totalidad de las muestras analizadas (el 97,2 %) presenta una concentración de boro incluida dentro del rango considerado como Deficiente (< 0,50 mg kg⁻¹). Considerando el límite establecido como Deficiente muy bajo (< 0,25 mg kg⁻¹), el 91,1% del total de muestras está incluido en esta categoría. Únicamente, el 1,2 % presenta una concentración dentro del rango Medio (0,50-1,00 mg kg⁻¹) y el 1,6 % está dentro del rango Alto (1,00-> 2,00 mg kg⁻¹). Esta distribución en rangos de concentración de boro se mantiene prácticamente igual cuando se consideran independientemente las muestras correspondientes a horizontes A y a horizontes C.

2. A la vista de los resultados obtenidos en los distintos análisis estadísticos, puede decirse que en los suelos del norte de Navarra convergen una serie de factores, tanto propiamente edáficos como medio-ambientales que van a determinar un bajo contenido de boro soluble tanto en el horizonte A como en el C. Estos factores son: elevada precipitación, y por tanto situación a mayor altitud y bajo valor del parámetro ETP, escaso contenido en cationes de cambio principalmente Na, Ca y Mg, y por consiguiente pH ácidos. Por otra parte, es precisamente en el norte de Navarra donde afloran las rocas, que según la bibliografía consul-

tada, son más pobres en boro. Aunque el contenido de boro no parece depender de un único factor quizás el que resulta ser más importante en estos suelos es la pluviosidad que viene condicionada por la situación geográfica.

3. Los suelos enclavados en la mitad sur de Navarra, presentan una serie de características que determinan una mayor riqueza en boro que los del norte. Estas características son: situación en zonas de menor altitud, escasa precipitación y elevada ETP (valor bajo de P-ETP), mayor riqueza en cationes de cambio (Ca, Mg y Na) y pH, por tanto, más básico. Por otra parte, las rocas sedimentarias, sobre las que están desarrollados estos suelos, son más ricas en boro.

En algunas de las muestras pertenecientes a esta zona se llegan a alcanzar concentraciones de boro potencialmente tóxicas para la vegetación, ligadas a procesos de salinización. Además estas muestras presentan una serie de características que favorecen la acumulación y concentración de boro en el suelo, como son textura pesada y pH básico, condiciones que favorecen los procesos de adsorción de este elemento.

4. Se observa que los suelos que presentan altos niveles de boro en superficie, poseen, también, concentraciones elevadas en horizontes más profundos.

5. La interdependencia existente entre las variables, tanto propiamente edáficas como ambientales, que pueden determinar en mayor o menor grado la concentración de boro en la disolución del suelo, hace difícil determinar el principal responsable de su contenido en los suelos estudiados. Sin embargo, los resultados obtenidos parecen indicar que la precipitación atmosférica es uno de los principales factores condicionantes. Ejerce un efecto directo sobre la concentración de boro soluble favoreciendo su pérdida por lixiviación, y por otra parte, va a determinar las distintas propiedades edáficas que influyen en la disponibilidad y contenido de boro en la disolución del suelo.

BIBLIOGRAFIA

- ADAMS, J.A.; HAMZAH, Z. & SWIFT, R.S.
1991 Availability and uptake of boron in a group of pedogenetically-related Canterbury, New Zealand soils. *Aust. J. Soil Res.*, 29: 415-423.
- ADRIANO, D.C.
1986 Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, New York. 533 pp.
- AGUILAR-ROS, A. & AGUILAR, A.
1977 Determinación analítica del boro asimilable en suelos de cultivo. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 36 (11/12): 1277-1280.
- AHMED, S.H.H. & EL-TAWEL, B.
1989 Status of boron & exchangeable magnesium in the Salt-affected soils of the recent reclamation project, El-Zawia, at northern Delta, Egypt. *Egypt. J. Soil Sci.*, 29 (2): 223-235.
- AITKEN, R.L.; JEFFREY, A.J. & COMPTON, B.L.
1987 Evaluation of selected extractants for boron in some Queensland soils. *Aust. J. Soil Res.*, 25 (3): 263-273.
- ANNE
1945 Dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. Agro.*, 2: 161-172.
- ATLAS DE NAVARRA
1977 1ª Edición. Ed. Diáfara, S.A., Barcelona.
- AUBERT, H. & PINTA, M.
1971 *Les elements traces dans les sols*. O.R.S.T.O.M., Paris.
- BARBIER, G. & CHABANNES, J.
1953 Contribution á l'étude du bore dans le sol et les plantes. *Ann. Agron.*, Paris 4: 27-43.
- BEAUCHAMP, E.G. & HUSSAIN, J.
1974 Brown heart in rutabaga grown on souther Ontario soils. *Can. J. Soil Sci.*, 54: 171-175.
- BERGER, K.C.
1949 Boron in soils and crops. *Advanc. Agron.*, 1: 321-351
- BERGER, K.C. & TROUG, E.
1945 Boron availability in relation to soil reaction and organic matter content. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 10: 113-116.
- BIGGAR, J.W. & FIREMAN, M.
1960 Boron adsorption and release in soils and crops. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24: 115-119.
- BINGHAM, F.T.
1973 Boron in cultivated soils and irrigation waters. In E.L. Kothny (ed.). *Trace elements in the environment. Advances in chemistry*. Series 123, Am. Chem. Soc., Washington, D.C. Pages 130-138.
- BINGHAM, F.T.; ELSEEWI, A. & OERTLI, J.J.
1970 Characteristics of boron absorption by excised barley roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34: 613-617.
- BINGHAM, F.T. & PAGE, A.L.
1971 Specific character of B adsorption by an amorphous soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 892-893.
- BINGHAM, F.T.; PAGE, A.L.; COLEMAN, N.T. & FLACH, K.
1971 Boron adsorption characteristics of selected amorphous soils from Mexico and Hawaii. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 546-550.
- BOHN, H.L.; Mc NEAL, B.L. & O'CONNOR, G.A.
1979 Important ions. *Soil Chemistry*. A Wiley-Interscience Publication. Jhon Wiley & Sons, Inc. (eds.). New York, 10: 273-315.
- BOWEN, J.E.
1977 The fine art of using enough but not too much boron. *Crops Soil Mag.* Aug./Sept. 1977.
- BRUQUE, S.; MARTÓNEZ LARA, M. & MAZA, J.
1981 Micronutrientes en suelos agrícolas (capa arable) de Cártama (Málaga). I. Boro, cobre y molibdeno. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 40 (9/10): 1749-1764.
- CARTWRIGHT, B.; TILLER, K.G.; ZARCINAS, B.A. & SPOUNCER, L.R.
1983 The chemical assessment of the boron status of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 21: 321-332.
- CARTWRIGHT, B.; ZARCINAS, B.A. & SPOUNCER, L.R.
1986 Boron toxicity in South Australian barley crops. *Aust. J. Agric. Res.*, 37: 351-359.
- CERDI, A.; SALINAS, R.M. & CARO, M.
1985 Tolerancia de las plantas al boro. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 44 (3/4): 483-491.
- CORINO, L.; LUZZATI, A.; SIRAGUSA, N. & NAPPI, P.
1990 Osservazioni Sulla carenza borica della vite in alcune zone del Piemonte (Monferrato e Langhe). *Vignevini*, 4: 39-49.
- COUCH, E.L. & GRIM, R.E.
1968 Boron fixation by illites. *Clays Clay Miner.*, 16: 249-255.
- COX, F.R. & KAMPRATH, E.J.
1972 Micronutrient soil tests. *Micronutrients in agriculture*. J.J. Mortvedt, P.M. Giordana and W.L. Lindsay, ed. soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisc. pp. 289-317.

- DATTA, S.P. & RATHORE, G.S.
1992 Status of available boron in some soils of Northern Hill Region of Chhatisgarh, Madhya Pradesh. *Journal of Research*. Birsa Agricultural University. 4 (1): 37-42.
- DE LE CHEVALLERIE-HAAF, U.; MEYER, A. & HENZE, G.
1986 *Z. Anal. Chem.*, 323,266.
- DIEHL, H.; GOETZ, C.A. & HACH, C.C.
1950 The versenate titration for total hardness. *Amer. Water Works. Assoc. Jour.*, 42.
- DIPUTACION FORAL DE NAVARRA
1982 Instituto Navarro del Suelo (ed.). *Estudio agroclimático de la Provincia de Navarra. Memoria y Tablas de Datos*. Tomo 2. 191 pp.
- DONCEL UNANUA, ANA J.
1993 *Ensayo de distintas técnicas analíticas para la determinación de boro soluble en suelos*. Proyecto de Investigación. Universidad de Navarra. Pamplona, 1993.
1994 *Características de la distribución de boro en suelos de Navarra*. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra. Pamplona, 1994.
- EATON, F.M. & WILCOX, L.V.
1939 The behaviour of B in soils. *U.S. Dep. Agric. Tech. Bull.* No. 696. Washington, D.C. 57 pp.
- ECK, P. & CAMPBELL, F.J.
1962 Effect of high calcium application on boron tolerance of carnation (*Dianthus caryophyllus*). *Am. Soc. Hort. Sci. Proc.*, 81: 510-517.
- EL-KHOLI, A.F.; EL DAMATY, A. & HAMDY, H.
1970 Interrelationship between soil properties and soluble boron. *J. Soil Sci. Un. Arab. Repub.*, 10, 267.
- ELLIS, B.G. & KNEZEK, B.D.
1972 Adsorption reactions of micronutrients in soils. In J.J. MORTVEDT; P.M. GIORDANO; W.L. LINDSAY (eds.). *Micronutrients in Agriculture*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wis., 59.
- EVANS, C.M. & SPARKS, D.L.
1983 On the chemistry and mineralogy of boron in pure and mixed systems: a review. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 14: 827-846.
- EVANS, L.J.
1987 Retention of boron by agricultural soils from Ontario. *Can. J. Soil Sci.*, 67 (1): 33-42.
- F.A.O. UNESCO
1974 *Soil Map of the World, I, Legend*, 59 pp.
- FOX, R.A.
1968 The effect of calcium and pH on boron uptake from high concentrations of boron by cotton and alfalfa. *Soil Sci.*, 106; 435-439.
- GÁRATE, A.; MEYER, B.
1983 A study of different manures and their relationship with boron. *Agrochimica*, 27 (5-6): 431-438.
- GARG, O.K.; SHARMA, A.N. & KONA, G.R.S.S.
1979 Effect of boron on the pollen vitality and yield of rice plants (*Oryza sativa* L. var. Jaya). *Plant Soil* 52: 591-594.
- GU, B. & LOWE, L.E.
1990 Studies on the adsorption of boron on humic acids. *Can. J. Soil Sci.*, 70: 305-311.
- GULATI, K.L.; OSWAL, M.C. & NAGPAUL, K.K.
1980 Effect of the concentration of boron on the uptake and yield of tomato and wheat at different levels of irrigation. *Plant Soil*, 54: 479-484.
- GUPTA, U.C.
1968 Relationship of total and hot-water soluble B, and fixation of added B to properties of podzol soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32: 45-48.
1979 Boron nutrition of crops. *Advances in Agronomy*. Academic Press, Inc. ed., 31: 273-307.
1983 Boron deficiency and toxicity symptoms for several crops as related to tissue boron levels. *J. Plant Nutr.*, 6: 387-395.
- GUPTA, U.C.; JAME, Y.W.; CAMPBELL, C.A.; LEYSHON, A.J. & NICHOLAICHUK, W.
1985 Boron toxicity and deficiency: a review. *Can. J. Soil Sci.*, 65 (3): 381-409.
- HADDAD, K.S.
1980 Hot water-soluble boron content of fine sedimentary and granitic soils as related to selected soil properties. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 46 (2): 123-125.
- HADWANI, G.J.; GANDHI, A.P.; PATEL, M.S. & YADAV, B.S.
1989 Depthwise distribution of different forms of boron in relation to soil properties in medium black calcareous soils of western Gujarat. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 37 (2): 295-300.
1992 Available boron in calcareous soils of Saurashtra (India). *Gujarat Agricultural University Research Journal*. 17 (2): 147-150.
- HATCHER, J.T.; BLAIR, G.Y. & BOWER, C.A.
1959 Response of beans to dissolved and adsorbed boron. *Soil Sci.*, 88: 98-100.
1962 Adjusting soil solutions to specified B concentrations. *Soil Sci.*, 94: 55-57.
- HATCHER, J.T. & BOWER, C.A.
1958 Equilibria and dynamics of boron adsorption by soils. *Soil Sci.*, 85: 319-323.
- HINGSTON, F.J.
1964 Reactions between boron and clays. Reprinted from the *Aust. J. Soil Res.*, Vol. 2, No. 1, pp. 83-95. June

1964. Reprinted for the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. Australia.
- HUTCHINSON, G.L. & VIETS, F.G., Jr.
1969 Detoxication of boron in plants with triisopropanolamine. *Soil Sci.*, 108: 217-221.
- ICHIKUNI, M. & KIKUCHI, K.
1972 Retention of boron by travertines. *Chem. Geol.*, 9: 13-21.
- IL'IN, V.B. & ANIKINA, A.P.
1974 Soil melioration: boron salinization of soils. *Sov. Soil Sci.*, 6: 68-75.
- IÑIGUEZ, J.; MUNILLA, C.; SANCHEZ-CARPINTERO, I.; VAL, R.M. & ROMERO, A.
1982-1992 Mapa de Suelos de Navarra. E. 1: 50.000. Principe de Viana. *Suple. Ciencias*, nº 2. Pamplona.
- JAME, Y.W.; NICHOLAICHUK, W.; LEYSHON, A.J. & CAMPBELL, C.A.
1982 Boron concentration in the soil solution under irrigation: a theoretical analysis. *Can. J. Soil Sci.*, 62: 461-470.
- JIN, J.; MARTENS, D.C. & ZELAZNY, L.W.
1987 Distribution and plant availability of soil boron fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51 (5): 1228-1231.
- KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H.
1984 Elements of group III. II. Boron. In CRC Press, Inc. (ed.). *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton, Florida, USA. 8: 127-134.
- KAPLAN, D.I.; BURKMAN, W.G.; ADRIANO, D.C.; MILLS, G.L. & SAJWAN, K.S.
1990 Determination of boron in soils containing inorganic and organic boron sources. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 708-714.
1990 Determination of boron in soils containing inorganic and organic boron sources. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 708-714.
- KEREN, R. & BINGHAM, F.T.
1985 Boron in water, soil and plants. *Adv. Soil Sci.*, 1: 229-276.
- KEREN, R.; GAST, R.G. & BAR-YOSEF, B.
1981 pH-dependent boron adsorption by Na-montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 45-48.
- KEREN, R. & MEZUMAN, U.
1981 Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation. *Clays Clay Miner.*, 29: 198-204.
- KHAN, A.H.; KHAN, P. & MINULLAH, S.
1979 Effects of micronutrients on the yield of wheat in North West Frontier province. *Pak. J. Sci. Ind. Res.*, 22: 338-340.
- KRAUSKOPF, K.B.
1972 *Introdução à geoquímica* (2 vis). USP e Polígono (ed.) S. P., 605 pp.
- LABORATORIO DE SALINIDAD DE US. (U.S. Salinity Laboratory Staff)
1982 *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Ed. Limusa, Mexico. L.A. Richards (ed.). Dpto. de Agricultura de los Estados Unidos de América. Rama de Investigación sobre Conservación de Suelo y Agua. Servicio de Investigaciones Agrícolas. 172 pp.
- LIU ZHENG; ZHU QI-QING & TANG LI-HUA.
1989 Regularities of content and distribution of boron in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 26 (4): 353-361.
1981 Boron-deficient soils and their distribution in China. *Soil Research Report No. 5*. Institute of Soil Science, Academia Sinica. Nanjing, China. pp. 1-13.
- MAAS, E.V.
1986 Salt tolerance of plants. *Applied Agricultural Research*, 1 (1): 12-25.
- MARCONI, A.; FREIRE, O.; ABRAHÃO, I.O. & BRASIL SOBRINHO, M.O.C.
1980 Boro nos minerais, rochas, solos e plantas. *Revista de Agricultura, Brazil*. 55 (1/2): 33-39.
- MARZADORI, C.; VITTORI ANTISARI, L.; CIAVATTA, C. & SEQUI, P.
1991 Soil organic matter influence on adsorption and desorption of boron. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 1582-1585.
- MAURICE, J.
1966 Geochemie du bore. *Ann. Agron.*, 17, 367.
- McGEEHAN, S.L.; TOPPER, K. & NAYLOR, D.V.
1989 Sources of variation in hot water extraction and colorimetric determination of soil boron. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 20 (17 & 18): 1777-1786.
- MERRIEN, A.
1984 Rôle du bore dans les plantes: applications au tournesol. *Bulletin Cetiom*, Nº 87/88, 3-7.
- MIR, J.M.
1982 *Nuevos métodos espectrofotométricos y fluorimétricos de determinación de boro*. Resumen de Tesis Doctoral. Dpto. de Química Analítica. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. Secretariado de Publicaciones. 13 pp.
- MOTT, C.J.B.
1981 Anion and ligand exchange. In D.J. Greenland and M.H.B. Hayes (eds.). *The chemistry of soil processes*. John Wiley & sons, Toronto, Ont. Pages 179-219.

- MOYANO, A.; PRIETO, A.; GALLARDO, J.F. & SANTA REGINA, I.
1989 Boro hidrosoluble en suelos del centro-oeste semiárido de España y su relación con los parámetros edáficos. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 4: 109-115.
1989 Boro hidrosoluble en suelos del centro-oeste semiárido de España y su relación con los parámetros edáficos. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 4: 109-115.
- NICHOLAICHUK, W.; LEYSHON, A.J.; JAME, Y.W. & CAMPBELL, C.
1988 Boron and salinity survey of irrigation projects and the boron adsorption characteristics of some Saskatchewan soils. *Can. J. Soil Sci.*, 68 (1): 77-90.
- OKAZAKI, E. & CHAO, T.T.
1968 Boron adsorption and desorption by some hawaiian soils. *Soil Sci.*, 105: 255-259.
- PAKRASHI, A.C. & HALDAR, M.
1992 Distribution of boron in relation to physico-chemical properties in some soils of North Bengal. *Indian Agriculturist*, 36 (1): 25-28.
- PANJAB SINGH; MISRA, S.M. & SINHA, N.C.
1988 Boron in soils and crops-A review. *Narendra Deva J. Agric. Rec.*, 3 (2): 117-140.
- PARKS, R.Q. & SHAW, B.T.
1941 Possible mechanisms of boron fixation in soils. *Chemical. Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 6: 219-223.
- PARKS, W.L. & WHITE, J.L.
1952 Boron retention by clay and humus systems saturated with various cations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 16: 298-300.
- PAVAN, M.A. & CORREA, A.E.
1988 Reações de equilibrio solo-boro. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 23 (3): 261-269.
- PENMAN, F. & McALPIN, D.M.
1949 Boron poisoning in citrus. *Vict. J. Dep. Agric. (Aust.)*, 47: 181-189.
- PERVIS, E.R. & HANNA, W.J.
1939 The influence of overliming upon boron deficiency. *The American Fertilizer*, 91; 5-8.
- PESSOA DA CRUZ, M.C. & FERREIRA, M.E.
1984 Seleção de métodos para avaliação do boro disponível em solos. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 19 (12): 1457-1464.
- PHILIPSON, T.
1953 Boron in plant and soil. *Acta Agric. Scand.*, 3: 121-124.
- PINYERD, C.A.; ODOM, J.W.; LONG, F.J. & DANE, J.H.
1984 Boron movement in a norfolk loamy sand. *Soil Science*, 137 (6): 428-433.
- PIZARRO, O.C. & BRAUN, R.H.
1963 Intoxicación bórica en vides de La Rioja. *IDIA* 13-19.
- PONNAMPERUNA, F.N.; CAYTON, M.T. & LANTIN, R.S.
1981 Dilute hydrochloric acid as an extractant for available zinc, copper and boron in rice soils. *Plant and Soil.*, 61 (3): 297-310.
- PRATHER, R.J.
1977 Sulfuric acid as an amendment for reclaiming soils high in B. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 41: 1098-1101.
- RANKAMA, K. & SAHAMA, T.G.
1962 *Geoquímica*. Aguilar. Ed. Espanha. 862 pp.
- RATO DE MINGUEZ, S.; DE SESE, Z.; CANELO, H. & MIZUNO, I.
1984 Estudio del contenido de boro en suelos y aguas de la provincia de La Rioja mediante el uso de azometina-H. *Ciencia del Suelo*. 2 (1): 37-43.
- REISENAUER, H.M.; WALSH, L.M. & HOEFT, R.G.
1973 Testing soils for sulphur, boron, molybdenum, and chlorine. In L.M. WALSH and J.D. BEATON, Inc. (eds.). *Soil testing and plant analysis*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wis. pp. 173-200.
- RHOADES, J.D.; INGVALSON, R.D. & HATCHER, J.T.
1970 Laboratory determination of leachable soil boron. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34 (5): 871-875.
- RIBEIRO, A.C. & BRAGA, J.M.
1974 Adsorção de boro pelo solo. *Experientiae*, 17: 293-310.
- RUSSELL, E.W.
1973 *Soil conditions and plant growth*. 10th ed. Longman Ltd., London, 849 pp.
- RYAN, J.; MIYAMOTO, S. & STROEHLEIN, J.L.
1977 Relation of solute and sorbed boron to the boron hazard in irrigation water. *Plant Soil*, 47: 253-256.
- SALINAS FERNÁNDEZ, M.R.
1985 *Interacción boro x macronutrientes en la nutrición de las plantas de guisante (Pisum sativum)*. Tesis Doctoral. Dpto. Química Agrícola. Facultad de Ciencias. Universidad de Murcia. C.S.I.C., Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. 223 pp.
- SHORROCKS, V.M.
1991 Boron in the soil. *Behaviour, function and significance of boron in agriculture*. Borax Consolidated Ltd eds. Report on an International Workshop at St. John's College, Oxford, England, 23-25, July 1990. 44 pp.

- SHUMAN, L.M.; BANDEL, V.A.; DONOHUE, S.J.; ISAAC, R.A.; LIPPERT, R.M.; SIMS, J.T. & TUCKER, M.R.
- 1992 Comparison of Mehlich-1 and Mehlich-3 extractable soil boron with hot-water extractable boron. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 23 (1842): 1-14.
- 1992 Comparison of Mehlich-1 and Mehlich-3 extractable soil boron with hot-water extractable boron. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 23 (1 & 2): 1-14.
- SILLANPAA, M.
- 1972 Trace elements in soils and agriculture. *Soil Bull.* No. 17. FAO, Rome.
- SIMS, J.R. & BINGHAM, F.T.
- 1968 Retention of boron by layer silicates, sesquioxides and soil materials. III. Iron and aluminum-coated layer silicates and soil materials. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32: 369-373.
- SINGH, S.S.
- 1964 Boron adsorption equilibrium in soils. *Soil Sci.*, 98: 383-387.
- SOIL CONSERVATION SERVICE.
- 1972 *Soil survey laboratory methods for collecting soil samples.* USDA. Washington.
- TANAKA, H.
- 1967 Boron absorption by crop plants as affected by other nutrients of the medium. *Soil Sci. Pl. Nutr.*, 13: 41-44.
- VINOGRADOV, A.P.
- 1959 Boron in soils. In Consultants Bureau, Inc. (eds.). *The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils.* 2nd ed. Translated from russian. New York, 5: 26-41.
- WEAR, J.I.
- 1965 Boron. In C.A. Black et al. (ed.). *Methods of soil analysis. Agronomy.* Am. Soc. of Agron., Madison, Wisc., 9: 1059-1063.
- WHITESTONE, R.R.; ROBINSON, W.O. & BYERS, H.G.
- 1942 Boron distribution in soils and related data. U.S. Dep. Agric., *Tech. Bull.* No. 797. 32 pp., Washington, D. C.
- WIKNER, B. & UPPSTRÖM, L.
- 1980 Determination of boron in plants and soils with a rapid modification of the curcumin method utilizing different 1-3 diols to eliminate interferences. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 11 (1): 105-126.
- WILCOX, L.V.
- 1960 Boron injury to plants. US. Dep. Agric., A.R.S. Washington, D. C. *Agric. Info. Bull.* No. 211, pp. 3-7.
- YERMIYAHU, U.; KEREN, R. & CHEN, Y.
- 1988 Boron sorption on composted organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52 (5): 1309-1313.
- ZARCINAS, B.A. & CARTWRIGHT, B.
- 1987 Acid dissolution of soils and rocks for the determination of boron by Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Analyst*, 112 (8): 1107-1112.
- ZORITA VIOTA, T.
- 1988 El contenido de boro asimilable en varios suelos de las provincias de Cáceres y Zamora. *Anuario, Centro de Edafología y Biología Aplicada de Salamanca*, 13: 189-197.