

**CAMBIOS DE FERTILIDAD OBSERVADOS EN PERFILES DE SUELOS CHILENOS.  
III. CON LA LIXIVIACION DE CINCO DOSIS DE NITRATO DE SODIO  
EN UN SUELO VILCUN<sup>1</sup>**

**Fertility changes detected in Chilean soil profiles. III. With the lixiviation  
of five doses of Sodium Nitrate, in a soil Vilcun**

Gotardo Schenkel S.<sup>2</sup>  
Pedro Baherle V.<sup>3</sup>

**SUMMARY**

In a field trial, with percolation cylinder, six doses of Sodium Nitrate (0–12,8–48–128–480–1,280 kg N/ha) were lixiviated with 100 mm of distilled water. Nitrates, moisture content, pH (H<sub>2</sub>O), pH (KCl), and Al–Morgan were determined, in samples taken from the cylinders at each 5 cm depth, down to 90 cm. Comparisons were made among all treatments on the distribution of these variables according to depth.

The amounts of nitrate and water applied, together with nitrogen mineralization, were determinant conditions for the nitrate balance in the soil profile. During summer, the addition of water to the dry soil strongly stimulated nitrogen mineralization down to 20 cm, probably influencing down to 50 cm.

The posible redox conditions of this particular soil (Vilcun, Typic Dystrandepet) were inadequate for strict anaerobiosis, so no denitrification was observed, down to 90 cm.

The different amounts of Sodium Nitrate applied in this experiment did not affect soil reaction or Al–Morgan content.

With the application of 100 mm of water to the soil, almost all the nitrate present initially at 55–90 cm depth was lost. The nitrate adsorption, observed in Andepts, had no practical importance in reducing the mobility of nitrates, due to lixiviation by excess water.

As has been observed for other Chilean soils, moisture at 1/3 atm. did not represent well the field capacity condition of this soil. The soil used in this experiment had been under oats the previous season; roots had penetrated about 50 cm, so moisture and nitrates present below that depth was not useful to the plants.

**INTRODUCCION**

Gran parte de la actividad forestal, ganadera y agrícola del país se desarrolla sobre suelos que contienen alofán, conocidos en Chile con el nombre "trumao" y que evolucionan a partir de cenizas volcánicas

(Wright, 1965; Besoain, 1969 y 1974; Valdés, 1969; Aomine, 1970). Se les ubica entre los andosoles o andepts (Flach, 1969; Swindale, 1969; Coutinet, 1967; Besoain, 1969 y 1974; Valdés, 1969; Aomine, 1970).

Con frecuencia se olvida la importancia que incumbe a la profundidad del suelo para caracterizar su fertilidad, antecedente que jamás desconoce el clasificador de suelo. Entre los rasgos especiales que caracterizan a los andosoles de Sudamérica (Wright, 1964; Swindale, 1969), se reconocen sus perfiles de suelo profundos, muy a menudo con clara estratificación, producto de la deposición. También los trumaos son corrientemente suelos profundos, con anisotropía en las propiedades del perfil, derivada de la superposición de las

<sup>1</sup> Recepción de originales: 10 de marzo de 1982.

Los autores agradecen al Ing. Agr. Osvaldo Inostroza las múltiples facilidades otorgadas en el fundo "La Guitarra", en que se realizó este estudio.

<sup>2</sup> Casilla 244, Osorno, Chile.

<sup>3</sup> Estación Experimental La Platina (INIA), Casilla 5427, Santiago, Chile.

distintas capas de material volcánico (cenizas) de su manto superior, Las estratas han sido depositadas en tiempos diferentes, no manifiestan el mismo grado de intemperización, ni tienen la misma intensidad de alteración bioquímica en todo el perfil (Duchaufour, 1979). En muchos de estos suelos se reemplazó, en tiempos recientes (menos de un siglo atrás), la vegetación de bosques por otra de praderas, transición con la cual debería estar asociada un cambio de fertilidad (Schuffelen, 1958).

Las propiedades físicas varían con la profundidad, siendo fácil de reconocer las diferencias, a veces aun a ojo desnudo. Pueden citarse los cambios de color, estructura, dureza, retención de humedad, textura, etc. Es improbable que a éstos no acompañen modificaciones en las propiedades químicas, que, por haber sido poco estudiadas, se ignoran (Aomine, 1970; Wright, 1965; Schenkel y Baherle, 1982a).

El nitrógeno se incluye entre los nutrientes integrantes de la fórmula de fertilización NPKS, con buen comportamiento para corregir las principales deficiencias nutritivas que afectan a muchos suelos chilenos (Schenkel y otros, 1971, 1973 y 1982). Numerosos ensayos de campo confirman la importancia que tiene la fertilización NP para aumentar los rendimientos de los cultivos y de las praderas (IANSA, 1964/1965; Goić, 1968; Letelier, 1969; Rivas, 1970; Volke, 1972 y 1973; Rojas, 1973 y 1978).

La buena permeabilidad de los trumaos, unida a una gran porosidad y alta capacidad de retención de agua (Wright, 1964; Swindale, 1969), permite que en ellos ocurran alteraciones físicas, químicas y bioquímicas rápidas, siempre que cuenten con humedad y temperaturas adecuadas a los respectivos fenómenos. Por estar ubicados en una región con clima templado y encontrarse sometidos a lluvias intensas, se ven expuestos a la pérdida de nutrientes por lixiviación, lo cual debería afectar particularmente al nitrógeno. A su vez, en períodos calurosos se verá activada la mineralización de su fracción orgánica abundante, especialmente en superficie (San Martín, 1974), favorecida por la buena aireación. Las capas superiores de los andosoles contienen compuestos húmicos, que son relativamente resistentes a la descomposición microbiana (Swindale, 1969; San Martín, 1974).

El horizonte superficial se verá expuesto a una continua sucesión de períodos de enriquecimiento (con la mineralización) y de empobrecimiento en nitratos (con las aguas lluvias y de riego). Aquí se originan dos importantes propiedades en la dinámica del nitrógeno. En la superficie, una fluctuación estacional en el contenido de nitratos (Black, 1968; Goetz, 1975) y un transporte de nitratos hacia el subsuelo (Black, 1968; Sunkel, 1979). No todo el nitrato arrastrado

hacia el suelo sub-superficial se recupera en las aguas de drenaje, porque puede verse expuesto a:

- a. una pérdida parcial o total por desnitrificación, cuando las condiciones óxido-reductoras del suelo favorecen este proceso (Ponnamperuma, 1972; Buresh, Casselman y Patrick, 1980).
- b. una adsorción de nitratos por el subsuelo. Esta propiedad se manifiesta en suelos andepts sudamericanos (Kinjo y Pratt, 1971; Kinjo, Pratt y Page, 1971) y ha sido determinada también en muestras de suelo del sur de Chile (Schalscha, Pratt y Domecq, 1974).
- c. un transporte ascendente en el perfil, especialmente durante los meses de verano, cuando la evaporación excede a la precipitación (Boswell y Anderson, 1970; Dancer y Peterson, 1969), pudiendo considerarse aprovechable el nitrógeno nítrico situado a una distancia de 130 cm desde la superficie (Herron y otros, 1968).

Se desconoce la intensidad con la cual se manifiestan los procesos antes mencionados sobre los suelos trumaos, aunque se reconoce que ellos pueden generar heterogeneidad en el contenido de nitratos del perfil, como se ha observado en otros suelos (Knittel y Fischbeck, 1979). Su incidencia sobre la fertilidad de los suelos es evidente, porque si la desnitrificación no asimilativa es un proceso dominante en el subsuelo, difícilmente habrá una recuperación del nitrato arrastrado desde la superficie (Buresh y Patrick, 1978). A su vez, la no formación de una zona intensamente anaeróbica lleva a creer que el nitrato del suelo está expuesto a una pérdida en el perfil, debido a su transporte más allá de la zona radicular (Jones y otros, 1981; Urbina, 1967).

Es difícil anticipar como se distribuyen los nitratos en el perfil de los suelos trumaos, cuando son lixiviados desde la superficie. Pueden estar expuestos a pérdidas por la actividad anaeróbica presente en los suelos inundados (Ponnamperuma, 1972), aunque esta condición no es suficiente para que se realice la desnitrificación. En efecto, la penetración restringida del oxígeno en los suelos inundados origina en ellos la formación de una capa aeróbica superficial y otra subyacente anaeróbica (Buresch y otros, 1980). La profundidad de penetración del oxígeno en el suelo sumergido es determinada por el efecto neto definido entre el suministro de oxígeno al suelo y la velocidad de consumo de oxígeno (Buresch y otros, 1980). También se ignora con qué intensidad se manifiesta la adsorción de nitratos a lo largo del perfil, propiedad que ha sido determinada en una muestra superficial de suelo chileno similar al de este trabajo (Schalscha y otros, 1974).

Múltiples factores afectan a la lixiviación de nitratos (Black, 1968), debiendo destacarse entre ellos (Sun- kel, 1979) el volumen de agua aplicada, la presencia de cultivos, la cantidad de nitrato presente y el suelo. Para la presente experiencia se elige un suelo Vilcún, en verano, después de cosechar avena. La elección recae en este cultivo, con una profundidad de arraigamiento próxima a 0,50 m, para que asegure un empobrecimiento del perfil en nitratos, en la primavera precedente al inicio de la experiencia. El agua y los fertilizantes se agregan en forma puntual a la superficie del suelo, mediante el empleo de percoladores.

## MATERIALES Y METODOS

La parte experimental de este trabajo involucra un ensayo de campo y algunas determinaciones analíticas en el laboratorio.

### Ensayo de campo

1. Suelo. El suelo elegido se ubica sobre la serie Vilcún (Chile/IREN, 1964), 3 km al sur de la ciudad de Vilcún, en la provincia de Cautín. Corresponde a un suelo derivado de cenizas volcánicas, que se clasifica como Typic Dystrandept (Valdés, 1969). El lugar del ensayo estaba sembrado con avena de grano, cv. Soleil II, en el fundo La Guitarra.

2. Equipo de percolación. La movilidad lateral y vertical del nitrato aplicado en la superficie del suelo se estudia en cilindros de percolación de acero. Cada

uno de estos cilindros se introduce con cuidado en el suelo, hasta una profundidad de 90 cm, de modo que solo sobresalga un borde de 1 a 2 cm. Concéntrico a él, se ubica un tubo que sólo penetra 3 a 4 cm en el suelo, como se ve en la Figura 1. En el interior del tubo regulador de agua se localizan las diferentes dosis de nitrógeno, rodeadas de un corto trozo de manguera plástica, que sirve como guía.

3. Dosis de nitrógeno. La fuente de nitrógeno es nitrato de sodio (p.a.) en estado sólido. Las cantidades usadas se indican en el Cuadro 1; se pesan en el laboratorio y se llevan en bolsas plásticas al campo, donde se introducen con cuidado dentro de la guía plástica contenida en el interior del tubo regulador de agua.

Para el cálculo de las dosis equivalentes, se presume que el nitrato de sodio se distribuye en toda la sección transversal del cilindro percolador.

CUADRO 1. Cantidades de nitrato de sodio agregadas por tratamiento

TABLE 1. Amounts of Sodium Nitrate used in each treatment

| Tratamiento | Dosis (g/cilindro) | N (kg/ha) |
|-------------|--------------------|-----------|
| 0           | 0                  | 0         |
| 1           | 1,44               | 12,8      |
| 2           | 5,4                | 48,0      |
| 3           | 14,4               | 128,0     |
| 4           | 54,0               | 480,0     |
| 5           | 144,0              | 1.280,0   |

4. Distribución geométrica de los cilindros de percolación en el terreno. La ubicación que se dió a los distintos tratamientos se observa en la Figura 1. También se señala ahí el lugar de donde se extrajeron las muestras de suelo, a las respectivas profundidades del perfil del suelo, para determinar su condición inicial. A esta se le denomina muestra inicial.

5. Cantidad de agua agregada. Al iniciar la experiencia se dispone del antecedente dado en la Figura 2, que las lluvias más intensas de 1965 se registran el 16.06, con 54 mm, y el 28.11, con 49,2 mm de agua caída en 24 horas, en Carillanca. Para la experiencia se elige una cantidad de 100 mm de agua, lo que representa:

$$0,1 \text{ m} \times 3,14 \times (0,24 \text{ m})^2 = 0,018 \text{ m}^3 = 18 \text{ litros/cilindro}$$

Un detalle de las cantidades de agua agregadas a cada tratamiento se entrega en el Cuadro 2.

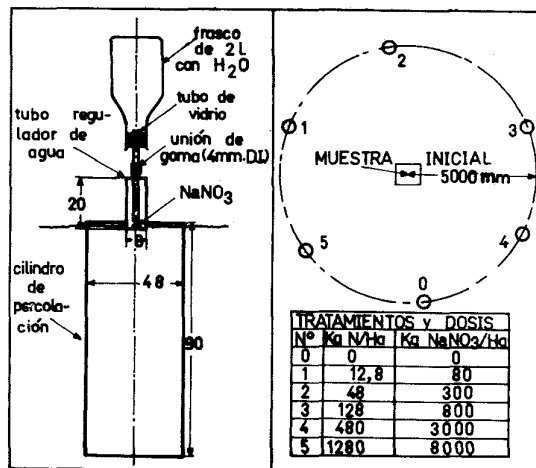


FIGURA 1. Equipo de percolación y su distribución en el terreno por tratamiento de NaNO<sub>3</sub> agregado (medidas en cm).

FIGURE 1. Sketch of the percolation equipment and its location on the terrain.

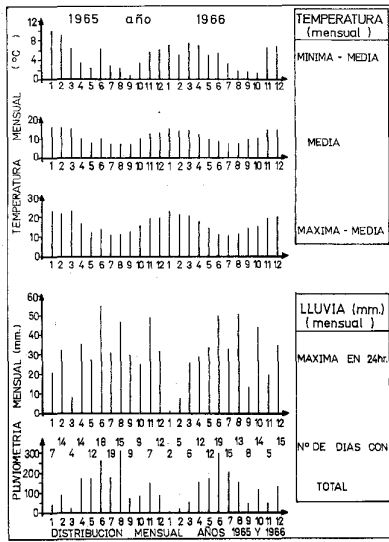


FIGURA 2. Variación estacional de temperatura y pluviometría (38°44' lat. S y 72°25' long. W).

FIGURE 2. Seasonal variation of temperature and precipitation (lat. 38°44' S; long. 72°25' W).

6. Protección del cilindro de percolación. Para reducir la evaporación de agua a un mínimo, se cubre la superficie del percolador con una cubierta plástica, exceptuando sólo al tubo regulador de agua, que queda descubierto. Sobre esta lámina de plástico se coloca material vegetal, especialmente paja y pasto, para mejorar la aislación térmica y evitar la incidencia directa de los rayos solares.

7. Riego. Para movilizar el nitrato en el suelo, se usa agua destilada, introducida en un frasco plástico de dos litros de capacidad. En la boca de éste se coloca un tapón de goma, perforado y conectado con una manguera. Este conjunto se invierte sobre el cilindro concéntrico, como se ve en la Figura 1. El agua escurre libremente desde dicho frasco, toda vez que su nivel dentro del tubo regulador desciende notablemente. De este modo se constituye en agua de reserva, la que está contenida dentro del frasco.

El procedimiento adoptado da buenos resultados, aunque exige un control diario derivado de la diferente permeabilidad observada en los distintos tratamientos, originando una distinta fecha de extracción para cada cilindro.

CUADRO 2. Cantidades de agua destilada agregada (lt) a los cilindros de percolación con distintos tratamientos de nitrógeno

TABLE 2. Amounts of distilled water (lt/cylinder) added to each N treatment at the indicated dates, and dates of extraction of the percolating cylinders

| FECHA<br>1966                                    | TRATAMIENTOS DE NITROGENO (kg de N/ha) |       |       |       |       |       | Inicial* |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
|  | 0                                      | 12,8  | 48    | 128   | 480   | 1.280 |          |
| 10.01  | 2                                      | 2     | 2     | 2     | 2,00  | 2,00  | —        |
| 12.01  | 2                                      | 2     | —     | —     | —     | —     | —        |
| 13.01  | —                                      | 2     | 2     | 2     | 1,85  | —     | —        |
| 16.01  | —                                      | —     | 2     | —     | 2,00  | 2,00  | —        |
| 17.01  | 2                                      | 2     | 1     | 2     | 1,00  | 1,00  | —        |
| 19.01  | 2                                      | 2     | 2     | —     | 2,00  | 2,00  | —        |
| 21.01  | 2                                      | 2     | —     | 2     | —     | 2,00  | —        |
| 22.01  | 2                                      | —     | 2     | —     | —     | —     | —        |
| 24.01  | 2                                      | 2     | 1     | 1     | 2,00  | 1,75  | —        |
| 26.01  | 2                                      | 2     | 2     | —     | 1,00  | 1,00  | —        |
| 28.01  | 2                                      | 1     | 2     | —     | 1,00  | 1,50  | —        |
| 29.01  | —                                      | —     | —     | 1     | —     | —     | —        |
| 30.01  | —                                      | 1     | —     | —     | 1,00  | 0,50  | —        |
| 01.01  | —                                      | —     | 2     | —     | 1,15  | 2,00  | —        |
| 04.02  | —                                      | —     | —     | 1     | 1,00  | 1,00  | —        |
| 13.02  | —                                      | —     | —     | 2     | —     | —     | —        |
| 15.02  | —                                      | —     | —     | 1     | 1,00  | 1,25  | —        |
| 18.02  | —                                      | —     | —     | 1     | 1,00  | —     | —        |
| 24.02  | —                                      | —     | —     | 1     | —     | —     | —        |
| 01.03  | —                                      | —     | —     | 2     | —     | —     | —        |
| Total  | 18                                     | 18    | 18    | 18    | 18,00 | 18,00 | 0        |
| Fecha de extracción del cilindro de percolación: |  |       |       |       |       |       |          |
| 1966   | 01.02                                  | 05.02 | 09.02 | 06.03 | 20.02 | 18.02 | 12.01    |

\*El tratamiento inicial corresponde al instante de comenzar la experiencia.

8. Extracción de cilindros. Solamente después de dos días de agotar la presencia de agua en el tubo regulador (no en el frasco de agua) de cada tratamiento, se procede a su extracción. Con este objeto, se excava el suelo hasta que el cilindro metálico quede completamente al descubierto.

9. Toma de muestras de suelo. El cilindro metálico, con todo su contenido, se traslada cuidadosamente hasta el laboratorio. Las muestras de suelo se extraen cada 5 cm de profundidad y a una distancia lateral de 5 cm, medidos desde un eje central, imaginario del cilindro. Cuando una parte del suelo se desprende del cilindro, se retiran las correspondientes muestras en el terreno mismo, para lo cual se les guarda en bolsas plásticas, junto a unas gotas de tolueno.

#### Análisis de suelo

1. Precauciones con las muestras. Para evitar, o al menos disminuir, las pérdidas de nitrato en el suelo por transformación en otras formas químicas se toman algunas precauciones que se respetan rigurosamente:

- analizar el nitrato a la mayor brevedad posible, contado desde el momento de la toma de muestra hasta la colorimetría del nitrato. Salvo en unos pocos casos, esto se cumplió dentro del día de la extracción de la muestra.
- agregar tolueno a la muestra utilizada para la extracción de nitrato.
- conservar la muestra en el refrigerador, para inhibir la actividad microbiológica capaz de alterar los tenores de nitratos.
- proteger las muestras de la incidencia directa de los rayos solares.
- evitar las temperaturas elevadas.

2. Determinación de humedad. El contenido de humedad se hace por gravimetría, utilizando para ello cápsulas de aluminio, o bien pesafiltros de vidrio, cuando la cantidad de suelo disponible es pequeña.

3. Determinación de nitratos. Se utiliza su propiedad que, al reaccionar con ácido brucin-sulfúrico, forma un complejo de color amarillo, en un medio fuertemente sulfúrico. La intensidad del color amarillo desarrollado es proporcional a la cantidad de nitratos presentes.

Se sigue el procedimiento de Autenrieth, en la forma descrita por Thun, Hermann y Knickmann (1955). La colorimetría se realiza en un espectrofotómetro Zeiss PMQ II, a 436 milimicrones.

4. Reacción del suelo. El pH se determina en una suspensión de suelo en agua destilada y en cloruro de

potasio normal, empleando en ambos casos una relación suelo/solución igual a 1/2,5. El pH se mide con electrodo combinado de vidrio y de referencia, marca Jena, utilizando potenciómetro de precisión Knick, tipo 350.

5. Humedad 1/3 atmósferas. Se aplica la técnica empleada por Salgado (1960), pero reemplazando la columna de regulación por un compresor "Presso-Vac", con un regulador de presión.

6. Aluminio-Morgan. Se determina con aluminon en el extracto de Morgan, expresando los resultados en ppm Al (Schenkel y otros, 1970).

7. Fósforo-Olsen. Se agitan por 10 minutos 2,5 g de suelo con 50 ml de NaHCO<sub>3</sub>, pH 8,5. La colorimetría se hace con molibdato de amonio y cloruro estano (Schenkel y otros, 1970).

## RESULTADOS Y DISCUSION

Para una mayor comodidad en la interpretación de los resultados, se presentan todos ellos en forma gráfica. La extraordinaria movilidad lateral y vertical observada para el nitrato de sodio, cuando se aplica localizado y sólido en un punto de la superficie del suelo, y se le arrastra con 100 mm de agua se ve en las figuras 3 y 4. La "distancia" indicada en ambas figuras alude al lugar que ocupan las respectivas submuestras de suelo, extraídas a una determinada profundidad, respecto del eje imaginario del cilindro percolador, en cuyo extremo superior se colocó el fertilizante nitrogenado. Las cantidades de nitrato recuperadas a distintas profundidades orientan sobre su movilidad vertical. Para el tratamiento 128 kg de N/ha, se perdió las muestras procedentes de una profundidad mayor de 45 cm.

Los resultados dados en las figuras 3 y 4 muestran:

- Un efecto diferencial considerable de la cantidad de nitratos aplicada en la superficie, sobre su distribución en todo el perfil de suelo, salvo para la dosis 12,8 kg de N/ha, que no se manifiesta más allá de 50 cm de profundidad. Para dosis iguales o superiores a 48 kg de N/ha, hay un enriquecimiento preferente de nitratos en el suelo subsuperficial, situado bajo 20 cm.
- La profundidad a la cual se sitúa la máxima concentración en nitratos parece crecer a medida que aumenta la cantidad de nitratos aplicada. Así se desprende de lo que ocurre separadamente con las submuestras procedentes de las distancias laterales 0-5 y 5-10 cm. En efecto, las profundidades con concentraciones máximas coinciden en ambas submuestras laterales y pueden definirse en: 5-10 cm, para 0 y

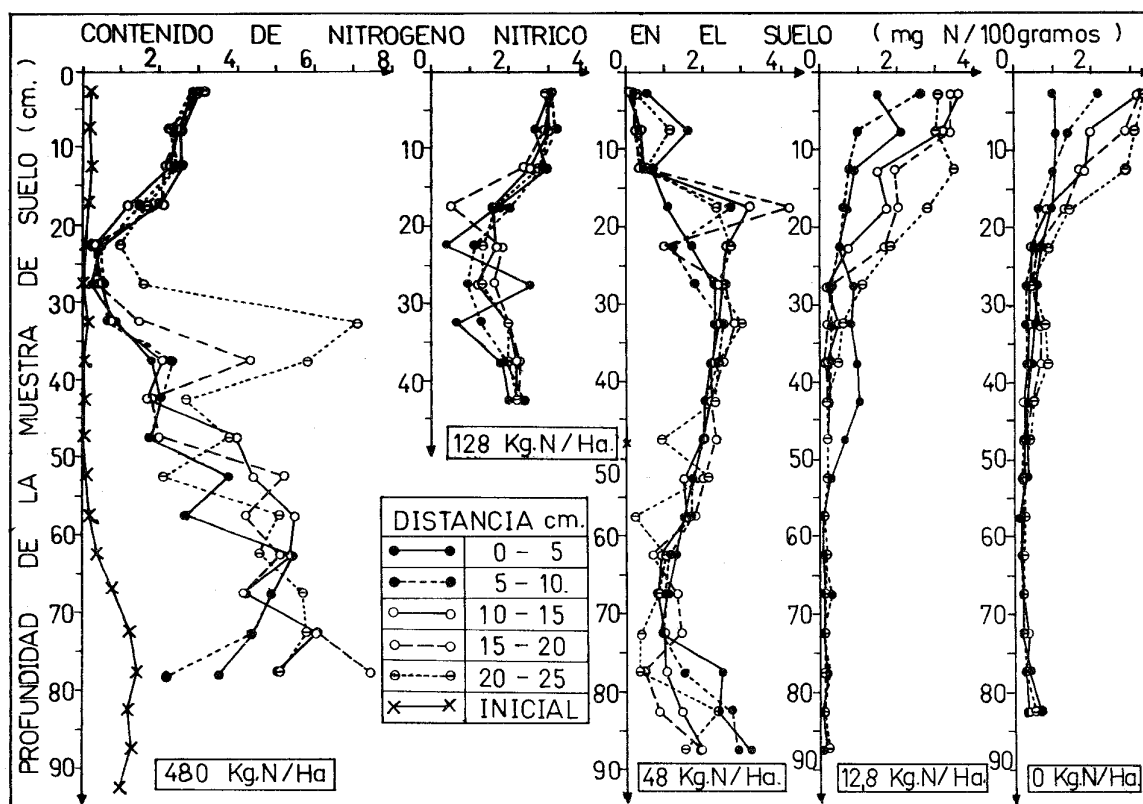


FIGURA 3. Movilidad del  $N-NO_3^-$  cuando se localizan distintas cantidades de  $NaNO_3$  y se aplica 100 mm de agua a un suelo Vilcún (Cautín).

FIGURE 3. Mobility of  $N-NO_3^-$  in the soil Vilcun (Cautín), with different applications of  $NaNO_3$  plus 100 mm of water.

12,8 kg de N/ha; 15–30 cm, para 48 kg de N/ha; 60–65 cm, para 480 kg de N/ha; y 70–75 cm, para 1.280 kg de N/ha.

3. Deben descartarse pérdidas significativas de nitratos por desnitrificación en el período estival, especialmente cuando se toma en cuenta las dosis convencionales de salitre aplicadas por los agricultores (inferiores a 128 kg de N/ha). Es así como las concentraciones máximas de nitrato decrecen espectacularmente a menos de 8 mg de N/100 g de suelo, en las muestras subsuperficiales de todas las submuestras laterales y para todos los tratamientos, cuando se comparan con los 42,1 mg de N/100 g de suelo, medidos en la muestra más rica del tratamiento 1.280 kg de N/ha. Si en el subsuelo existiese una condición de anaerobiosis estricta (Patrick, 1960), no sería posible el aumento de nitratos en el suelo. La desnitrificación recién comienza cuando se alcanza cierto potencial de óxido reducción, manteniéndose constantes las concentraciones de nitrato a potenciales redox superiores (Strickland, 1969; Dommergues y Mangenot, 1970).

4. Todos los tratamientos se comportan de un modo similar frente a la lixiviación, por cuanto los mayores tenores de nitrato se registran para las submuestras periféricas, encontrándose la mayor pobreza en las muestras centrales. Es posible que este resultado sea la consecuencia de la operatoria experimental, por la cual se enfatiza la importancia del volumen de agua. El flujo de agua descendente, que arrastra al nitrato localizado puntualmente en la superficie, no es uniforme a través de las distintas secciones de un corte transversal del cilindro percolador. Es muy probable que el flujo vertical de agua disminuya desde el centro hacia la periferia. Así, es más completo el arrastre de nitratos en la submuestra central que en las restantes, particularmente en la parte superior del percolador. El tratamiento 480 kg de N/ha da una excelente confirmación, mostrando claramente la diferenciación aludida, bajo 20 cm de profundidad. Por el contrario, la excepción la constituye el tratamiento 48 kg de N/ha, pues en él resultan excesivamente bajos los contenidos de nitrato en las submuestras super-

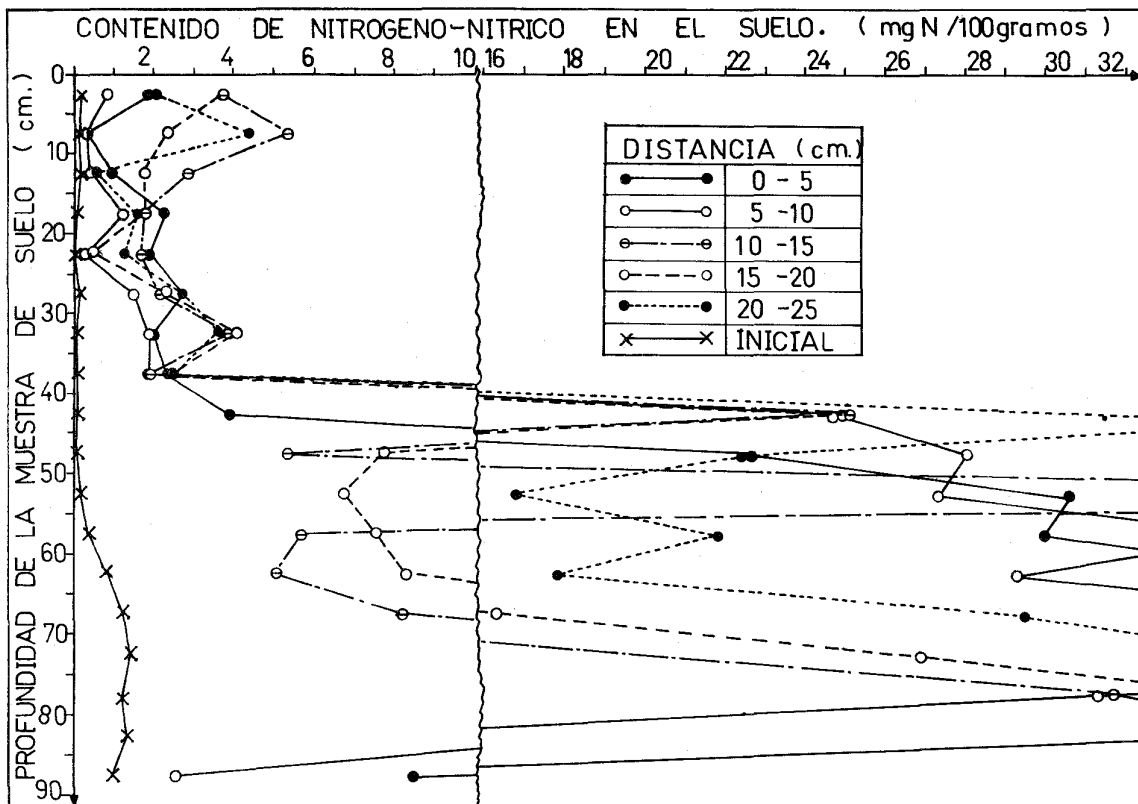


FIGURA 4. Movilidad del  $\text{N-NO}_3^-$  cuando se aplican 100 mm de agua a 1.280 kg/ha de  $\text{N(NaNO}_3)$ , localizado en la superficie de un suelo Vilcún (Cautín).

FIGURE 4. Mobility of  $\text{N-NO}_3^-$  in the soil Vilcun (Cautin), with the application of 1,280 kg/ha of  $\text{N(NaNO}_3)$ , localized on the surface, plus 100 mm of water.

ficiales a menos de 15 cm; la diferenciación en el contenido de nitratos se distingue en las muestras periféricas a mayor profundidad.

5. Hay un enriquecimiento de nitratos en los 55 cm superficiales del perfil que recibió 100 mm de agua respecto del que no recibió agua. Bajo esta profundidad se observa un empobrecimiento para el perfil del tratamiento 0 kg de N/ha, respecto a la muestra inicial.

Se ha supuesto, anteriormente, que el nitrato de sodio se desplaza fácilmente en el perfil, por ser muy soluble en agua. Por tanto, si fuere solamente la lixiviación el factor que provoca las diferencias superficiales, en el tratamiento sin fertilización nitrogenada, debiera ser más rica la muestra que no se le aplicó agua (muestra inicial) que la que se le aplicó (tratamiento 0 kg de N/ha). Sin embargo, el resultado experimental dado en las figuras 3 y 4, es opuesto y sugiere que aquí interviene otro fenómeno que debe ser tomado en cuenta. Esto indica que no es suficiente considerar

únicamente el contenido de nitratos iniciales. Como la discrepancia anotada se origina por los distintos tratamientos de agua, es esencial referirse a los contenidos de humedad en los perfiles que se comparan.

La elección de un suelo sembrado con avena, de vigoroso crecimiento y buen rendimiento de grano, explica que al comienzo de la experiencia (10 de enero de 1966) se constata un gran agotamiento de las reservas de agua en todo el perfil, hasta una profundidad de 55 cm, particularmente en los 30 cm superficiales. En la Figura 5 se da los contenidos de humedad para los diversos tratamientos a las distintas profundidades. Además, se incluyen las humedades del valor 1/3 atmósfera y del suelo al comenzar la experiencia (humedad inicial).

Las lluvias invernales y/o primaverales elevan los contenidos de humedad en el perfil a valores próximos (inferiores o superiores) a la capacidad de campo en todo el perfil, atendiendo a la buena permeabilidad.

Posteriormente, en el verano, con su característico déficit de lluvias (Figura 2), se realiza el crecimiento de la avena prácticamente a expensas de la humedad del suelo. La evapotranspiración disminuye los contenidos de humedad, especialmente en el suelo superficial, a los valores medidos para la muestra inicial. Después, se ha vuelto a enriquecer el perfil con la aplicación de 100 mm de agua.

Pareciera posible hacer una estimación de la profundidad hasta la cual se produjo la extracción de agua, y por tanto de nitratos, por la avena. El uso del agua que hacen los cultivos a partir de la humedad del perfil se relaciona con la velocidad de evapotranspiración y con la profundidad del suelo considerada (Miller y Aarstad, 1971; Ogata y Richards, 1957). Veihmeyer y Hendrickson (1950 y 1955) han sostenido durante muchos años que el agua es igualmente aprovechable para el crecimiento y transpiración de las plantas, cuando se mantiene su contenido en el suelo entre la humedad correspondiente a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (PMP). Sin embargo, hay evidencia creciente que el rendimiento de muchos cultivos aumenta si el suelo se humedece bastante antes de alcanzar el PMP (Marshall, 1959; Gardner,

1972). Además, el suelo se hace menos permeable al agua y su movimiento hacia los pelos radicales se hará más restringido cuando está más seco el suelo (Marshall, 1959). Por lo tanto, habría una menor aprovechabilidad del agua disponible en el perfil, con la profundidad a la cual se encuentra. Es precisamente lo que ocurre con la intersección entre las curvas 1/3 atm. y humedad inicial a la profundidad 50-55 cm, indicando con ello que la humedad bajo esta profundidad tuvo un escaso valor para la nutrición de la avena. Se admite que, con un criterio aún más estricto, se puede restringir el límite a la profundidad 40-50 cm (Figura 5). Por analogía, se deduce que el nitrato situado bajo la profundidad señalada, tampoco participó en la nutrición de la avena. Si así fuese, significa que la mayor riqueza de nitratos observada bajo 55 cm en el perfil del tratamiento inicial (Figura 3), que de los tratamientos 0 y 12,8 kg de N/ha, se debe a la remoción de nitratos causada con la lixiviación de 100 mm de agua. Es implícito a esta afirmación que la mayor riqueza en nitratos, observada para los horizontes superiores (0-40 cm) del tratamiento 0 kg de N/ha respecto del inicial, no se debe a un movimiento ascendente del nitrato presente inicialmente

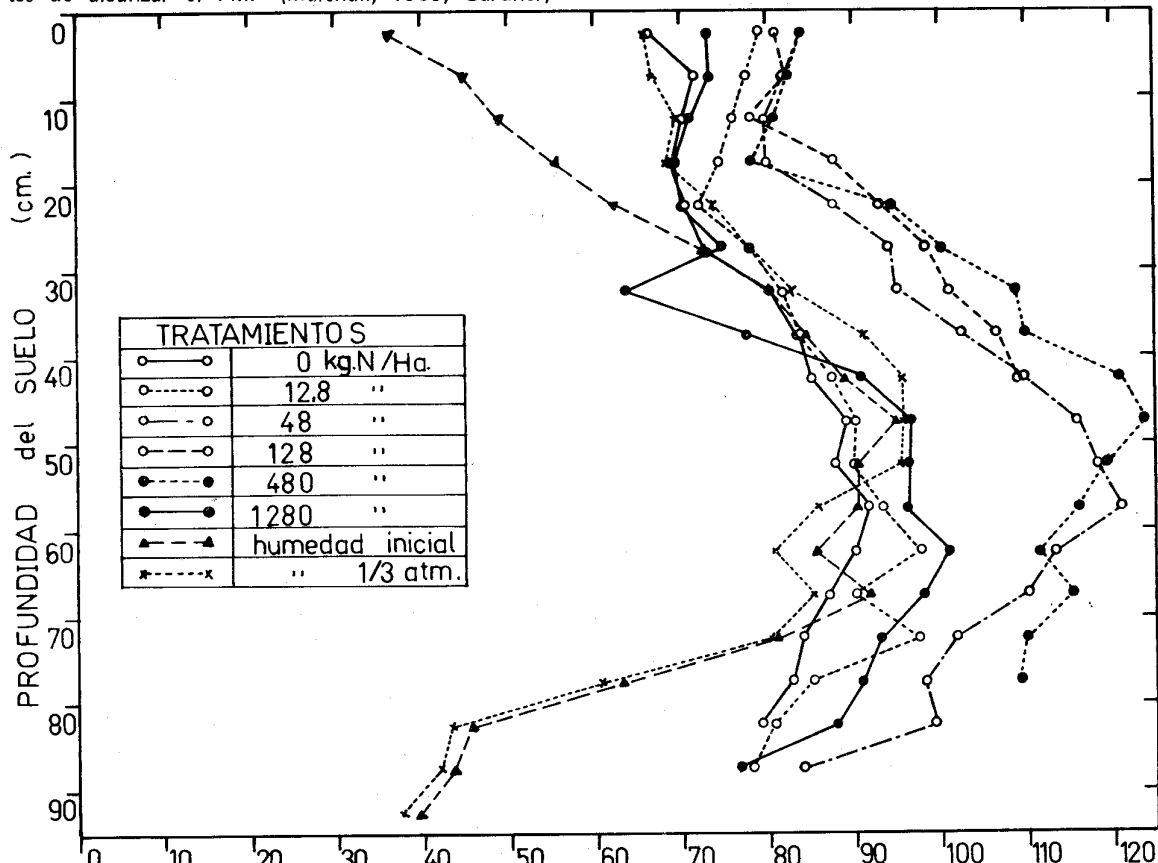


FIGURA 5. Humedad del suelo para distintas profundidades y tratamientos, al término de la experiencia.

FIGURE 5. Soil moisture content at different depths and with different N treatments, at the end of the experiment.



en el subsuelo, sino que es producto de la mineralización, estimulada por el agua agregada al efectuar la experiencia de lixiviación. Todo el riego se hizo con agua destilada, por lo que se descarta cualquier contaminación con nitratos.

La humedad inicial se mantiene inferior al valor  $1/3$  atm., en todas las profundidades del suelo ubicadas a menos de 55 cm. En cambio, más abajo siempre es mayor la humedad que la determinada a  $1/3$  atm., con la particularidad que cuanto más profundo tanto más semejantes son ambos valores (Figura 5).

Al aumentar la sequía del suelo Vilcún en su superficie, disminuye la mineralización de nitrógeno, como ha sido encontrado para otros suelos por Reichman, Grunes y Viets, 1966; Sabey, 1969; Sabey y Johnson, 1971; Blasco, 1971; Stanford y Epstein, 1974. Las muestras secas al aire tienen el mayor contenido de nitratos cuando se incuban con suficiente humedad (San Martín, 1974), encontrando Stanford y Epstein (1974) una relación casi lineal entre cantidades de nitrógeno acumuladas por mineralización y los contenidos de humedad del suelo. La mineralización más intensa ocurre entre retenciones de humedad del suelo de 0,33 a 0,10 bar. (Stanford y Epstein, 1974). Por tanto, se espera obtener una mayor presencia de nitratos en la superficie del suelo que recibió agua de lixiviación (tratamiento 0 kg de N/ha), respecto del tratamiento N inicial, como efectivamente ocurrió.

La comparación de los contenidos y distribución de nitratos en los dos perfiles que no recibieron nitrato, pero uno de ellos agua, permite reconocer la incidencia de dos procesos distintos, que modifican la distribución de nitratos en el perfil. En primer lugar, el cambio de humedad en la superficie causó una rápida respuesta de los microorganismos, intensificando la mineralización. Similares efectos causados por la variación de humedad en el suelo han sido observados por Robinson (1960) y Van der Paauw (1967). Debe hacerse notar que la adición de 100 mm de agua al tratamiento sin nitrógeno beneficia fundamentalmente a las submuestras periféricas, especialmente las superficiales, del cilindro de percolación. Con ello se insinúa que las condiciones de aireación son susceptibles de mejorarse para intensificar la mineralización. La adición de agua también origina un severo empobrecimiento de nitrato en las estratas inferiores del perfil del tratamiento inicial. Esta variación en el contenido de nitratos se produce más allá de la profundidad alcanzada por las raíces y debe relacionarse, necesariamente, con las pérdidas de nitrato por lixiviación (Sunkel, 1979). Se cumple rigurosamente en los tratamientos 0 y 12,8 kg de N/ha (Figura 3), no siendo posible comprobarlo a dosis superiores porque se enmascara con el nitrato que fue arrastrado desde el fertilizante aplicado en superficie.

Lo anterior hace pensar que el nitrato presente en la profundidad 60–90 cm del tratamiento inicial, es el remanente de la pérdida de nitratos que se produjo en el invierno, otoño o primavera, inmediatamente anterior a la toma de muestra. Este nitrógeno procede de la mineralización que tuvo lugar en la superficie del suelo sembrado con avena, por un proceso natural de incubación del suelo, pero sin que la avena lo absorbiera, porque no tenía un sistema radicular suficientemente desarrollado. La aplicación de 100 mm de agua eliminó el nitrato del subsuelo de todos los tratamientos desde la profundidad 60–90 cm, enriqueciendo las aguas de drenaje. Este nitrógeno corresponde a una pérdida del nitrato producido en la superficie del suelo, derivada del exceso de agua y de la falta de un sistema radicular de absorción activa en el período de su transporte vertical descendente en el perfil.

La conducta del suelo Vilcún antes analizada tiene gran importancia práctica, porque:

1. El nivel de nitratos en la superficie de un suelo descubierto es dependiente de la actividad de los microorganismos en los períodos favorables a la mineralización del nitrógeno, mientras no se produzca su transporte vertical por un exceso de agua. Se ignora que ocurre con la movilidad de los nitratos en presencia de plantas activas, caso de las praderas.
2. La distribución de nitratos en el perfil está estrechamente asociada con las condiciones hídricas del suelo. El conocimiento de la distribución de las lluvias, en el período precedente al de la toma de muestra, parece como necesario para hacer una buena interpretación de la disponibilidad de nitratos que tiene un suelo (Soubies y otros, citado por Black, 1968; Van der Paauw, 1962, 1965 y 1967).
3. La acumulación de nitratos en el suelo puede verse favorecida por la senescencia de plantas ricas en nitrógeno, por constituir un sustrato adecuado a una mineralización del nitrógeno (Schertz y Miller, 1972).
4. La mineralización de nitrógeno se retarda a bajas temperaturas y menores contenidos de humedad (Williams, 1967), porque las bajas temperaturas probablemente retardan más la nitrificación que la amonificación (Campbell, Biederbeck y Warder, 1971 y 1973).
5. Suelos pobres en nitratos en la superficie, pueden disponer de considerables reservas en las estratas subsuperficiales. Particularmente cierta puede ser esta riqueza del subsuelo en nitratos, cuando se aplican grandes cantidades de salitre (sobre 128 kg de N/ha), inmediatamente antes de una lluvia intensa.
6. El nitrógeno nítrico del subsuelo puede considerarse aprovechable sólo para especies vegetales cuyo sistema radicular lo explora (Herron y otros, 1968; Dancer y Peterson, 1969), debiendo considerarse perdido para ese cultivo todo nitrato que se sitúa a ma-

por profundidad (Jones y otros, 1981; Sunkel, 1979).

7. Los estudios comparativos con distintas fuentes nitrogenadas y/o sus épocas de aplicación serán incompletos si se desconoce la distribución vertical del nitrato en el respectivo perfil, dependiendo en gran medida de la dosis de N a la cual se efectúa la comparación.

Se observan diferencias en los contenidos de humedad de los perfiles correspondientes a los distintos tratamientos lixiviados. No se dispone de antecedentes que permitan atribuirlos a un efecto de heterogeneidad del suelo (Knittel y Fischbeck, 1979).

Los mayores contenidos de humedad pertenecen a los tratamientos que recibieron más nitrógeno (48, 128 y 480 kg de N/ha), salvo la dosis máxima 1.280 kg de N/ha. En este último caso, se observó una modificación en la estructura del suelo, lo cual se tradujo en una menor retención de humedad, aproximándose a las condiciones iniciales, especialmente bajo 20 cm.

El contenido de humedad de todas las muestras de suelo extraídas al término de la experiencia, permite dudar que el límite superior de la humedad aprovechable —si es que puede ser definido (Gardner, (1972)— quede representado por el valor 1/3 atm. pues es siempre superado. Es bien conocido el efecto que tiene el secado sobre las características de humedad de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas (Muller y Schelhaas, 1972; Forsyth, 1972). En suelos chilenos se observa con frecuencia que la humedad a capacidad de campo y en condiciones naturales supera al valor 1/3 atm. (Carmona, 1964; Alcayaga, 1964), encontrando Salgado (1960) lo opuesto en suelos de textura liviana o arenosa. El valor obtenido a una presión diferencial de 1/10 atm. puede ser más adecuado, como determinación simple del límite superior del agua aprovechable para los cultivos. Tiene la ventaja adicional de dar una información del límite superior al cual se realiza la mineralización más intensa (Stanford y Epstein, 1974). Así se explican los valores considerablemente mayores a 1/3 atm. determinados en la Figura 5.

El nitrato de sodio se menciona entre los fertilizantes con acción fisiológica alcalina. En esta experiencia no se determina ningún efecto de la dosis de nitrato de sodio aplicada sobre la reacción del suelo, proporcionándose en la Figura 6 el promedio de las lecturas obtenidas para todos los tratamientos, hasta 90 cm de profundidad. Las mediciones de pH se hacen en una suspensión en agua y otra en cloruro de potasio. Al igual que con una anterior experiencia (Schenkel y Baherle, 1982b), se encuentra un ligero aumento de pH con la profundidad, siendo su variación muy gradual y casi constante en el perfil.

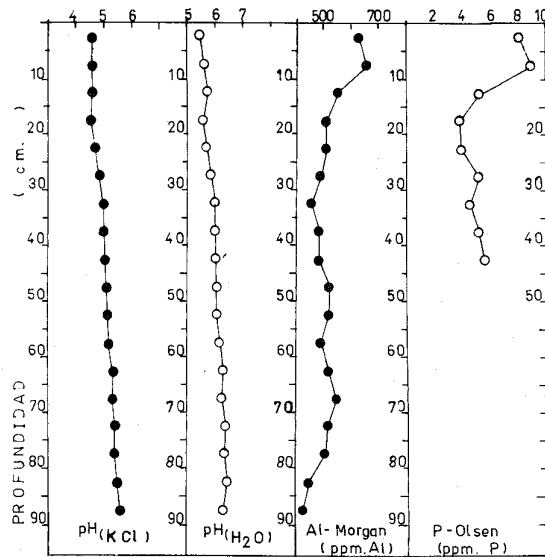


FIGURA 6. Cambios observados con la profundidad en un suelo Vilcún. Fundo La Guitarra (Cautín).

FIGURE 6. pH, Al-Morgan, and P-Olsen changes observed with depth of a soil Vilcun (Cautin).

En la misma Figura 6, también se incluyen las variaciones de fósforo (Olsen) y aluminio (Morgan), aunque sólo hasta la profundidad de 45 cm. Tampoco se observa influencia alguna del tratamiento con distintas dosis de nitrato de sodio sobre ambas propiedades. Debe destacarse que surgieron dificultades analíticas serias en la determinación de P-Olsen con cloruro estano, que invalidaron las determinaciones, especialmente las más profundas. Las interferencias en la colorimetría del fósforo se intensificaron a medida que aumentaba la profundidad a la cual se había extraído la muestra analizada. Las múltiples repeticiones agotaron las muestras de suelo, concluyéndose que el empleo de cloruro estano debe eliminarse de estos estudios. Su discusión se hará en un próximo trabajo.

Los mayores tenores de P-Olsen en la superficie están asociados con una mayor abundancia de Al-Morgan, situación similar a la antes determinada (Schenkel y Baherle, 1982b) solamente para el tratamiento que tampoco recibió fósforo, pero no así para el que lo recibió. Aunque la mencionada relación se mantiene en los mismos tratamientos sin abono fosfatado de ambos suelos, hay un aumento de las cantidades de aluminio medidas en todo el perfil del suelo de esta experiencia y una correspondiente disminución del P-Olsen, en relación a lo observado anteriormente (Schenkel y Baherle, 1982b). En aquella experiencia se encontraron sólo 400 ppm de Al en las profundidades 0-5 y 35-40 cm, mientras aquí se llega a 650 ppm únicamente en la superficie (0-10 cm). De

ninguna manera influye la dosis de nitrato de sodio sobre la distribución del Al-Morgan en el perfil del suelo Vilcún, correspondiendo los valores graficados al promedio.

## CONCLUSIONES

Del presente trabajo se desprenden las siguientes conclusiones, para el suelo Vilcún:

1. La distribución de nitratos en el perfil de suelo es afectada por la dosis de nitrato de sodio aplicada antes de la lixiviación, por la cantidad de agua agregada y por la mineralización del nitrógeno en el suelo superficial.
2. Hay un enriquecimiento de nitratos en la superficie, que alcanza hasta 55 cm de profundidad, común a todos los tratamientos que recibieron 100 mm de agua, respecto del tratamiento inicial, donde no se agrega agua ni nitrato de sodio. La adición de agua de lixiviación estimula la mineralización de nitrógeno, cuando el suelo inicialmente seco en el verano enriquece sus contenidos de humedad. Su efecto se manifiesta nítidamente hasta 25 cm, aunque puede haber llegado hasta 55 cm.
3. Bajo 55 cm y por lo menos hasta 90 cm, hay una pérdida de casi todo el nitrato inicial, porque fue arrastrado por el agua agregada. El fenómeno ha sido común a todos los tratamientos que recibieron agua, pero a dosis de 48 kg de N/ha o superiores, se enmascara el resultado, porque parte del nitrato de sodio aplicado en la superficie ha sido arrastrado hasta esta profundidad con 100 mm de agua.
4. Los tratamientos 0 y 12,8 kg de N/ha tienen un empobrecimiento neto de nitratos, para la profundidad mayor de 55 cm después de la lixiviación, porque todo el nitrógeno nítrico inicialmente presente ahí se transportó a una distancia superior a 90 cm, con 100 mm aplicados en la superficie.
5. Si la adsorción de nitratos observada en otros suelos chilenos (Schalscha y otros, 1974) también se manifiesta en el suelo Vilcún, tiene escasa trascendencia para impedir la movilidad del nitrato, especialmente bajo 50 cm y tal vez en todo el perfil (Figura 3).
6. La dosis de nitrato de sodio aplicada en la superficie tiene extraordinaria influencia sobre la distribución del nitrógeno nítrico en el perfil. La pobreza en nitratos, medida en el subsuelo para los tratamientos 0 y 12,8 kg de N/ha y no observada para dosis superiores, se atribuye a que con las últimas se favorece un enriquecimiento preferente del suelo subsuperficial (bajo 20 cm), que alcanza a lo menos hasta 90 cm de profundidad.
7. Cuando aumenta la cantidad de nitrato de sodio agregada en la superficie, se determina una mayor concentración máxima de nitratos en el perfil de suelo lixiviado, ubicándose la estrata más rica de cada tratamiento a mayor profundidad, cuando crece la dosis aplicada. Las pérdidas por exceso de agua de riego o lluvia deberían afectar más a los suelos con mayor riqueza en nitratos o a los que reciben una fertilización más intensa con salitre.
8. Al aumentar la sequía del suelo Vilcún en su superficie (muestra inicial), se frena la mineralización de nitrógeno, la cual se reactiva cuando se rehúmedece. Este efecto hace que algunos suelos chilenos (San Martín, 1974) tengan un mayor contenido en nitratos cuando se incuban, en las mismas condiciones, muestras secas al aire que muestras húmedas.
9. El agua puede modificar la distribución de nitratos en el perfil del suelo por intermedio de dos procesos distintos, cuando se presentan condiciones favorables a ellos. En la superficie hay una rápida respuesta de la población de microorganismos para intensificar la mineralización de nitrógeno, cuando se humedece el suelo seco, con el consiguiente enriquecimiento en nitratos. Pero, la adición de agua también origina un severo empobrecimiento de nitratos, especialmente en las estratas inferiores del perfil que se encuentran fuera del alcance del sistema radicular de las plantas cultivadas.
10. Las raíces de la avena penetraron probablemente sólo hasta 50 cm de profundidad, por cuanto fue inaprovechable para su nutrición el agua y el nitrógeno nítrico situado bajo esta profundidad. El enriquecimiento en nitratos y en humedad del subsuelo se produjo antes de iniciar la presente experiencia, mientras el suelo se destinó al cultivo de la avena. Así como no es indiferente la profundidad a la cual se acumula el agua disponible para las plantas, también la distribución de nitratos en el perfil tiene importancia para determinar su utilización por los cultivos. Las condiciones más favorables se originan, probablemente, cuando la mayor riqueza en nitratos y humedad es superficial.
11. La presencia de nitratos en el subsuelo del suelo Vilcún es el remanente del nitrato superficial mineralizado o aplicado como fertilizante, pero no utilizado por la avena. La movilidad vertical descendente del nitrato debería disminuir considerablemente en cultivos cuyo sistema radicular sea activo permanentemente, por ejemplo, praderas permanentes. Para los cultivos anuales, hay ciertos períodos críticos favorables al descenso del nitrato superficial, donde su transporte no sería interceptado por las raíces aún ausentes (antes

- de la siembra) o ya senescentes (después de cosecha). La presencia de nitratos a partir de una determinada profundidad del perfil, indica que las raíces de las plantas que crecen sobre ese suelo no llegan hasta ahí. Su recuperación sólo es posible con otra especie vegetal de sistema radicular más profundo, porque de lo contrario pasará este nitrato a enriquecer el agua de drenaje (Sunkel, 1979).
12. Los suelos difieren en sus contenidos en nitratos, a las distintas profundidades del perfil, debido a la intervención de numerosos factores. La determinación de los niveles de nitrato en la superficie de los suelos derivados de cenizas volcánicas será insuficiente para permitir un buen diagnóstico de su disponibilidad de nitrógeno para las plantas. Además, surge otra dificultad, derivada de la gran movilidad que tiene el nitrato en suelos similares al Vilcún. Será indispensable definir muy bien cual es el momento de la toma de muestra, porque los tenores en nitrato superficiales deberían ser continuamente modificados por los cambios de humedad y temperatura.
  13. Los tratamientos con nitrato de sodio no modifican la reacción del suelo a ninguna profundidad, ni el Al-Morgan. En cambio, con la profundidad aumenta ligeramente el pH y disminuyen las cantidades de aluminio extractable.
  14. El contenido de humedad de todas las muestras de suelo extraídas, transcurridos dos días de agregar el agua de lixiviación, indica que la humedad del suelo Vilcún a capacidad de campo no queda bien representada por el valor 1/3 atm., porque lo supera. Resultados iguales han sido obtenidos anteriormente con otros suelos chilenos (Carmona, 1964; Alcayaga, 1964).
  15. Las posibles condiciones de óxido-reducción imperantes en el suelo Vilcún son inadecuadas a la existencia de una anaerobiosis estricta, con lo cual deben mantenerse constantes las concentraciones de nitrato en el perfil, cuando no intervienen otros factores que controlan su movilidad. Si esta afirmación no fuese rigurosamente exacta en todas las profundidades del perfil, por razones de heterogeneidad (Knittel y Pischbeck, 1979), puede concluirse con seguridad que la velocidad de desnitrificación sería extremadamente lenta, porque nunca se agotó el nitrato, a ninguna profundidad, para los tratamientos que recibieron menos nitrato de sodio en la superficie. Para efectos prácticos, deben descartarse pérdidas importantes de nitrato por desnitrificación en este suelo, a lo menos en el período estival, particularmente si las dosis de salitre agregadas corresponden a las comúnmente aplicadas por los agricultores de la región (inferiores a 128 kg de N/ha).

## RESUMEN

En un ensayo de campo con cilindros de percolación, se lixivian 6 dosis de nitrato de sodio (0—12,8—48—128—480— y 1.280 kg de N/ha), con 100 mm de agua. Se determinan los nitratos, humedad, pH (H<sub>2</sub>O), pH (KCl) y Al-Morgan, en las muestras extraídas de todos los tratamientos, cada 5 cm de profundidad y hasta 90 cm. Su distribución con la profundidad del perfil se compara en todos los tratamientos.

El balance de nitratos del perfil del suelo Vilcún, depende de las cantidades de nitrato de sodio y agua aplicadas, junto al aumento proveniente de la mineralización de nitrógeno en la muestra superficial. En el verano, cuando se humedece el suelo seco con el agua de lixiviación, se estimula intensamente la mineralización de nitrógeno hasta 20 cm y su efecto se extiende probablemente hasta 50 cm.

Las posibles condiciones redox imperantes en el suelo

Vilcún son inadecuadas a la existencia de una anaerobiosis estricta, por lo que no se observa desnitrificación a ninguna profundidad, hasta 90 cm.

Los distintos tratamientos con nitrato de sodio no modifican la reacción del suelo, ni las cantidades de aluminio determinadas en el extracto Morgan, en ninguna parte del perfil estudiado.

Una pérdida casi total del nitrato inicial, presente en la profundidad 55—90 cm, se produce con 100 mm de agua aplicados en la superficie. La adsorción de nitratos medida en los Andepts, no tuvo importancia práctica para reducir la movilidad de nitratos en el perfil del suelo Vilcún, o para evitar sus pérdidas en el agua de drenaje, por un exceso de aguas lluvias o de riego.

La humedad del suelo Vilcún a capacidad de campo queda mal representada por el valor 1/3 atm., que es

superado a menudo, lo que también ha sido determinado para otros suelos chilenos. El suelo de la experiencia había sido sembrado previamente con avena,

donde sus raíces alcanzaron hasta 50 cm, siendo inaprovechable la humedad y el nitrato situado bajo esta profundidad.

### LITERATURA CITADA

- AOMINE, S. 1970. Volcanic soils. Chilean soil survey and research. Project UNDP/SF/113/CHI/AGL. Period of activity 4.04.1970 to 31.10.1970. 63 p.
- ALCAYAGA, S. 1964. Características generales de los suelos ñadis. Mesa Redonda de Suelos Volcánicos, Valdivia, Chile, 1964. Santiago, Sociedad Agronómica. Publicación Especial N° 1. p. 1—13.
- BESOAIN, E. 1974. Consideraciones generales sobre la formación de minerales secundarios en los andosoles. Esquema de una secuencia de meteorización de las cenizas volcánicas. Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura, Depto. de Agrología, SAG. Boletín Agrológico 1(1): 7—25.
- BESOAIN, E. 1969. Mineralogía de las arcillas de los suelos de cenizas volcánicas. En: IICA. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina, 6—13 julio, 1969. Turrialba, Costa Rica, Centro de Enseñanza e Investigación del IICA. p. B.1.1.—B.1.13.
- BLACK, C. 1968. Soil—plant relationships. 2nd. ed. New York, John Wiley & Sons. 792 p.
- BLASCO, M. 1971. Efecto de la humedad sobre la mineralización del carbono en suelos volcánicos de Costa Rica. Turrialba (Costa Rica) 21(1): 7—12.
- BOSWELL, F. and O. ANDERSON, 1970. Nitrogen movement comparisons in cropped versus fallowed soil. *Agronomy Journal* 62(4): 499—503.
- BURESH, R., M. CASSELMAN and W. PATRICK. 1980. Nitrogen fixation in flooded soil systems, a review. *Advances in Agronomy* 33: 149—191.
- BURESH, R. and W. PATRICK. 1978. Nitrate reduction to ammonium in anearobic soil. *Soil Sci. Soc. Am. Journal* 42(6): 913—918.
- CAMPBELL, C., V. BIEDERBECK and F. WARDER. 1971. Influence of simulated fall and spring conditions on the soil system. II. Effect on soil nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 480—483.
- CAMPBELL, C., V. BIEDERBECK and F. WARDER. 1973. Influence of simulated fall and spring conditions on the soil system. III. Effect of method of simulating spring temperature on ammonification, nitrification, and microbial population. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37(3): 382—386.
- CARMONA, P. 1964. Algunas características hídricas en suelos de trumaos y ñadis en la provincia de Osorno. Mesa Redonda de Suelos Volcánicos, Valdivia, Chile, 1964. Santiago, Sociedad Agronómica. Publicación especial N° 1. p. 17—28.
- COUTINET, S. 1967. Contribution a l'étude des sols allophane. *L'Agronomie Tropicale* 22(12): 1157—1175.
- CHILE. INSTITUTO DE RECURSOS NATURALES (IREN). 1964. Suelos, descripciones. Proyecto Aerofotogramétrico CHILE/OEA/BID. Publicación N° 2. 391 p.
- DANCER, W. and L. PETERSON. 1969. Recovery of differentially placed  $\text{NO}_3\text{--N}$  in a silt loam soil by 5 crops. *Agronomy Journal* 61(6): 893—895.
- DOMMERMUES Y. et F. MANGENOT. 1970. *Ecologie Microbienne du sol*. Paris, Masson, 796 p.
- DUCHAUFOUR, Ph. 1979. Introduction générale. Alteration des roches cristallines au milieu superficiel. *Science du Sol* 1979(2/3): 87—89.
- FLACH, K. 1969. El uso de la 7a aproximación para la clasificación de los suelos de cenizas volcánicas. En: IICA. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina, 6—13 julio, Turrialba, Costa Rica. Centro de Enseñanza e Investigación del IICA. p. A.7.1.—A.7.18.
- FORSYTH, W. 1972. Proposed technique to avoid the effect of air—drying on the water retention of soils derived from volcanic ash. En: IICA. II. Panel sobre suelos volcánicos de América, 18—24 junio, Pasto, Colombia. Universidad de Nariño, Informes de Conferencias, Cursos y Reuniones N° 82. p. 481—495.
- GARDNER, W. 1972. The impact of L.A. Richards upon the field of soil water physics. *Soil Science* 113(4): 232—237.
- GOETZ, H. 1975. Availability of N and other nutrients of 4 fertilized range sites during the active growing season. *J. Range Management* 28(4): 305—310.
- GOIC, L. 1968. Diferentes niveles de fósforo y nitrógeno en establecimiento de mezcla forrajera en 5 series de suelos de la zona Osorno. *Agricultura Técnica (Chile)* 28(1): 38—41.
- HERRON, G., G. TERMAN, A. DREIER and R. OLSON. 1968. Residual nitrate nitrogen in fertilized deep loess—derived soils. *Agronomy Journal* 60(5): 477—482.
- IANSÁ. 1964/1965. Resultados de la investigación agronómica en remolacha azucarera. Temporada 1964/65. Chile, Santiago, Industria Azucarera Nacional, Departamento Agrícola, p. 15—153.
- JONES, A., E. SKOGLEY, V. MEINTS and J. MARTIN. 1981. Nitrogen uptake by spring wheat; soil distribution and recovery of N fertilizer from alternate crop—fallow and re—crop management systems. *Agronomy Journal* 73(6): 967—970.

- KINJO, T. and P. PRATT. 1971. Nitrate adsorption. I. In some acid soils of Mexico and South America. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35(5): 722—725.
- KINJO, T., P. PRATT, and A. PAGE. 1971. Nitrate adsorption. III. Desorption movement and distribution in andepts. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35(5): 728—732.
- KNITTEL, H. and G. FISCHBECK. 1979. Die Heterogenität des Nitratgehaltes in den Profilschichten einer Ackerbraunerde zu Beginn des Fruehjahrs. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 142(5): 689—695.
- LETELIER, E. 1969. Respuesta a la fertilización de los suelos volcánicos chilenos (trumaos) según resultados de ensayos de campo. En: IICA. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina, 6—13 julio, 1969, Turrialba, Costa Rica. Centro de Enseñanza e Investigación del IICA, p. C.3.1.—C.3.14.
- MARSHALL, T. 1959. Relation between water and soil. Harpenden, Commonwealth Bureau of Soils. Technical Communication Nº 50. 91 p.
- MILLER, D. and J. AARSTAD. 1971. Available water as related to evapotranspiration rates and deep drainage. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 131—134.
- MULLER, A. and R. SCHELHAAS. 1972. Influence of drying on moisture characteristics of some volcanic ash derived soils. En: IICA. II. Panel sobre suelos volcánicos de América, 18 al 24 de junio, 1972, Pasto, Colombia. Universidad de Nariño. Informes de Conferencias, Cursos y Reuniones Nº 82. p. 439—480.
- OGATA, G. and L. RICHARDS. 1957. Water content changes following irrigation of bare field soil that is protected from evaporation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 21: 355—356.
- PATRICK, W. 1960. Nitrate reduction rates in a submerged soil as affected by redox potential. *Congr. Soil Sci., Trans.* 7th (Madison, Wis.): 494—500.
- PONNAMPERUMA, F. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24: 29—88.
- REICHMANN, G., D. GRUNES and P. VIETS. 1966. Effect of soil moisture on ammonification and nitrification in 2 Northern Plains soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30(3): 363—366.
- RIVAS, S. 1970. Informe de 3 temporadas; ensayos extensivos en parcelas grandes, 1967—1968, 1968—1969 y 1969—1970. Temuco, Chile, Estación Experimental Carillanca (INIA) y SAG. Informe Técnico 1970 s/p (Mecanografiado).
- ROBINSON, J. 1960. Nitrogen studies in a coffee soil. I. Seasonal trends of natural soil nitrate and ammonia in relation to crop growth, soil moisture and rainfall. *J. Agric. Sci.* 55: 333—338.
- ROJAS, O. 1978. Investigaciones en fertilidad de suelos. En: IANSA, 1978. Cultivo de la remolacha en Chile. Tomo 3. Santiago, Chile, Industria Azucarera Nacional S.A. p. 1—82.
- ROJAS, O. 1973. Investigaciones en fertilidad de suelos. Años 1960 a 1970. En: IANSA, 1973. El cultivo de la remolacha azucarera en Chile. Tomo 5. Santiago, Chile, Industria Azucarera Nacional S.A. 140 p.
- SABEY, B. 1969. Influence of soil moisture tensions on nitrate accumulation in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 263—266.
- SABEY, B. and B. JOHNSON. 1971. Effect of soil moisture tension on nitrate accumulation in Drummer silty clay loam. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 848—850.
- SALGADO, J. 1960. Estudio sobre métodos y medidas de la humedad aprovechable a las plantas en diferentes texturas de suelos. Chillán, Chile. U. de Concepción, Fac. de Agronomía. 118 p. (Tesis mecanografiada).
- SAN MARTIN, E. 1974. Transformaciones del nitrógeno orgánico en suelos de la asociación Santa Bárbara. Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura, Depto. de Agrología, SAG. *Boletín Agrológico* 1(1): 30—53.
- SHALSCHA, E., P. PRATT and T. DOMERCO. 1974. Nitrate adsorption by some volcanic ash soils of southern Chile. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38(1): 44—45.
- SCHENKEL, G. y P. BAHERLE. 1982a. Cambios de fertilidad observados en perfiles de suelos chilenos. I. Antecedentes. *Agricultura Técnica (Chile)* 43(1): 39—46.
- SCHENKEL, G. y P. BAHERLE. 1982b. Cambios de fertilidad observados en perfiles de suelos chilenos. II. Con fertilización fosfatada en un suelo Vilcún (Typic Dystrandept) sembrado con alfalfa. *Agricultura Técnica (Chile)* 43(2):
- SCHENKEL, G., BAHERLE, P. FLOODY, H. y GAJARDO, M. 1982. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. XXI. Comportamiento de algunas fórmulas de fertilización, provincia Biobío. *Agricultura Técnica (Chile)* 42(1): 1—14.
- SCHENKEL, G., P. BAHERLE, H. FLOODY y M. GAJARDO. 1973. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. XIII. Comportamiento de algunas fórmulas de fertilización, provincia de Llanquihue. *Agricultura Técnica (Chile)* 33(3): 121—128.
- SCHENKEL, G., P. BAHERLE, T. FLOODY y M. GAJARDO. 1971. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. VII. Comportamiento de algunas fórmulas de fertilización, provincia de Cautín. *Agricultura Técnica (Chile)* 31(4): 181—191.
- SCHENKEL, G., P. BAHERLE, T. FLOODY y M. GAJARDO. 1970. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. I. Experiencia preliminar. *Agricultura Técnica (Chile)* 30(4): 173—187.
- SCHERTZ, D. and D. MILLER. 1972. Nitrate-N accumulation in the soil profile under alfalfa. *Agronomy Journal* 64(5): 660—664.
- SCHUFFELEN, A. 1958. Die Mineräldüngung als Voraussetzung für die Umwandlungsmöglichkeiten von "Naturböden" in "Kulturböden". En: Schmitt, L. und H. Errelt, 1958. 100 Jahre erfolgreiche Düngewirtschaft. Frankfurt a. Main, Sauerlander Verlag p. 46—57.
- STANFORD, G. and H. EPSTEIN. 1974. Nitrogen minerali-

- zation—water relations in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38(1): 103–107.
- STRICKLAND, R. 1969. Fluctuations in available mineral nitrogen in a flooded rice soil on the subcoastal plains of the Adelaide river, N.T. Aust. *J. Exp. Agric. An. Husbandry* 9(40): 532–540.
- SUNKEL, R. 1979. Nitratauswaschung im landwirtschaftlich genutztem Wassergebiet Mussum. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 142(2): 207–218.
- SWINDALE, L. 1969. Propiedades de los suelos de cenizas volcánicas. En: IICA. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina, 6–13 julio, 1969. Turrialba, Costa Rica. Centro de Enseñanza e Investigación del IICA. p. B.10.1–B.10.9.
- THUN, R., R. HERRMANN und E. KNICKMANN. 1955. Die Untersuchung von Böden. Band 1. Dritte Auflage. Berlin, Neumann Verlag. 271 p.
- URBINA, A. 1967. Los riegos con exceso de agua arrastran los nitratos del suelo. *Investigación y Progreso Agrícola* 1: 16.
- VALDES, A. 1969. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Chile. En: IICA. Panel sobre suelos derivados de ceniza volcánica de América Latina, 6 al 13 julio, 1969. Turrialba, Costa Rica. Centro de Enseñanza e Investigación del IICA. p. A.1.1.–A.1.15.
- VAN DER PAAUW, F. 1962. Effect of winter rainfall on the amount of nitrogen available to crops. *Plant and Soil* 16: 361–380.
- VAN DER PAAUW, F. 1965. Wetter Abhängigkeit der Bodenfruchtbarkeit. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 108(2): 129–137.
- VAN DER PAAUW, F. 1967. Role of the organic cycle in fluctuations of crop yield. *Int. Soc. Soil Sci. Trans.* 1966. p. 125–129.
- VEIHMEYER, F. and A. HENDRICKSON. 1955. Does transpiration decrease as soil moisture decreases. *Trans. Am. Geophys. Un.* 36: 425–428.
- VEIHMEYER, F. and A. HENDRICKSON. 1950. Soil moisture in relation to plant growth. *An. Rev. Plant Physiol.* 1: 285–304.
- VOLKE, V. 1973. Fertilización nitrogenada y fosfatada del trigo en suelos trumaos de las provincias de Malleco y Cautín. *Agricultura Técnica (Chile)* 33(1): 6–15.
- VOLKE, V. 1972. Factores de producción del trigo en suelos trumaos de las provincias de Malleco y Cautín. *Agricultura Técnica (Chile)* 32(4): 189–200.
- WILLIAMS, C. 1967. Nitrogen, sulphur and phosphorus, their interactions and availability. *Int. Soc. Soil Sci. Trans.* 1966. p. 93–111.
- WRIGHT, Ch. 1965. The volcanic ash soils of Chile. Report to the Government of Chile. Rome. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 201 p. (Report 2017).
- WRIGHT, Ch. 1964. The "Andosols" or "Humic Allophane" soils of South America. Meeting on the Classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 11–12 June, 1964. *World Soil Resources Report* 14: 9–22.