

# INCIDENCIA DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD SOBRE LA OXIDACIÓN DE AZUFRE ELEMENTAL EN UN SUELO DERIVADO DE CENIZAS VOLCÁNICAS<sup>1</sup>

## Effect of temperature and soil moisture on elemental sulphur oxidation in a volcanic ash soil

Roxana Silva S.<sup>2</sup>, Luis Longeri S.<sup>2</sup>, Iván Vidal P.<sup>2</sup> y Marco Sandoval E.<sup>2</sup>

### ABSTRACT

An experiment was performed to determine the effect of temperature and soil moisture content on the oxidation rate of elemental sulphur in a soil of volcanic ash origin (Typic Fulvudand). Combinations of five temperature levels (5, 15, 25, 35 and 45 °C) and four levels of soil moisture (air-dry, 50, 75 and 100% field capacity) were used. Elemental sulphur (500 mg kg<sup>-1</sup>) was added to the soil and the sulphate content was measured after 10, 20 and 30 days of incubation. Samples without added sulphur were used as controls. A significant temperature-soil moisture interaction on the process of sulphur oxidation was found. It was not possible to apply only one model to simulate the kinetics of sulphur oxidation under the different soil moisture-temperature treatments. Oxidation rate showed a wide range of variation, from 0.3 to 36 kg S-SO<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, the highest rate was achieved with a temperature of 35 °C and a soil moisture content equivalent to field capacity (-0.03 MPa).

**Key words:** oxidation rate, sulphate, incubation, Andisol, *Thiobacillus thiooxidans*.

### INTRODUCCIÓN

Así como en muchas áreas del mundo, en Chile se han reconocido deficiencias de azufre, principalmente en las zonas centro-sur y sur del país (Vogel, 1959; Araos, 1967; Devaud, 1970; Shenkel *et al.*, 1971a, 1971b, 1972a, 1972b, 1973; Sierra, 1980; Opazo, 1982; Venegas *et al.*, 1986). Estas deficiencias se pueden corregir con el empleo de azufre elemental, que es una alternativa económica e importante de fertilización azufrada. El azufre elemental también se usa corrientemente como acidificante del suelo.

En su forma elemental, el azufre es un sólido cristalino, amarillo, inerte e insoluble en agua, lo que minimiza sus pérdidas por lixiviación (Benavides, 1991; Watkinson y Blair, 1993). Sin embargo, este producto debe ser oxidado a sulfato para ser absorbido por la planta (Janzen y Bettany, 1987a ; Deng y Dick, 1990).

La oxidación del azufre elemental en el suelo es un proceso principalmente biológico, causado por la actividad de microorganismos. Diversas especies oxidan el azufre elemental, tales como bacterias autotróficas, heterotróficas, filamentosas y fotosintéticas, además de hongos. Sin embargo, las de mayor importancia son las bacterias autotróficas del género *Thiobacillus*, destacando *T. thiooxidans*, que obtiene la energía necesaria para su crecimiento de la oxidación del azufre

<sup>1</sup>Recepción originales: 21 de Septiembre de 1996.

<sup>2</sup>Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Casilla 537, Chillán, Chile. Email: ivalidal@udec.cl

inorgánico (Nor y Tabatabai, 1977; Lawrence y Germida, 1988; Germida y Janzen, 1993).

En el suelo, son numerosos los factores que afectan la tasa de oxidación del azufre elemental. Entre ellos, además del tamaño de las partículas del azufre, se tiene la temperatura, el pH, el contenido de humedad, contenido de nutrientes y materia orgánica (Attoe y Olson, 1966; Janzen y Bettany, 1987a; Germida y Janzen, 1993; Graeme *et al.*, 1993).

Diversos autores, tales como Li y Caldwell (1966), Janzen y Bettany (1987b), Watkinson y Blair (1993), indican como los factores más importantes la temperatura y el contenido de humedad del suelo.

Skiwa y Wainwright (1984), indican que el proceso de oxidación del azufre elemental ocurre en un rango de temperatura de 4 a 45 °C. Sin embargo, una oxidación significativa sólo ocurre con temperaturas superiores a los 15 °C y se inhibe a  $\pm 50$  °C. La temperatura óptima se señala en el rango de 25-37 °C (Li y Caldwell, 1966; Nor y Tabatabai, 1977; Skiwa y Wainwright, 1984; Deng y Dick, 1990).

La oxidación del azufre elemental tiene una relación parabólica con los cambios en el contenido de humedad del suelo, con un máximo cercano a -0,03 MPa (Janzen y Bettany, 1987b). Por otro lado, Kittans y Attoe (1965) establecen un máximo de oxidación con valores de humedad correspondientes a un 87,5% de la capacidad de campo (-0,03 MPa). Con un menor contenido de agua, la actividad microbiana se ve limitada y se reduce la humectación de las partículas de azufre, el que es altamente hidrofóbico. Inversamente, con un alto contenido de humedad, la oxidación es limitada por la reducción de la aireación del suelo (Janzen y Bettany, 1987b).

Los estudios realizados en Chile en esta materia son escasos. Sólo se cuenta con el trabajo de Figueroa (1995), quien determinó la tasa de oxidación de diferentes suelos de la VIII Región

de Chile. El efecto de la humedad y temperatura sobre esta variable no se ha determinado. Por ello, el objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto de la temperatura y el contenido de humedad sobre la tasa de oxidación del azufre elemental, en un suelo Andisol (Serie Diguillín) de un alto potencial productivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo utilizado en el experimento corresponde a la Serie Diguillín (thermic, medial, Typic Fulvudand) (36°34' lat S; 72°10' long W). La elección de este suelo se basó en antecedentes proporcionados por Figueroa (1995), quien encontró, al trabajar con 30 muestras de suelos pertenecientes a cinco series de la zona centro-sur de Chile, que este suelo presentaba las mayores tasas de oxidación de azufre elemental.

Se extrajo una muestra de la capa arable del suelo (0-25 cm), la que fue secada al aire y tamizada por una malla de 2 mm. La determinación de algunas de las propiedades físicas y químicas entregó los siguientes resultados: arena, 31%; limo, 41,5%; arcilla, 27,5% (USDA); densidad aparente, 1,06 Mg m<sup>-3</sup>; retención de agua a capacidad de campo (-0,03 MPa) y punto de marchitez permanente (-1,5 MPa), 56,7 y 32,3%, respectivamente; pH al agua (1:2,5), 6,33; materia orgánica, 11,7%; N-NO<sub>3</sub>, 6 mg kg<sup>-1</sup>; P-Olsen, 11 mg kg<sup>-1</sup>; K, Ca, Mg y Na de intercambio, 0,48, 13,3, 2,41 y 0,47 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

La oxidación del azufre elemental se midió bajo condiciones de laboratorio en 20 tratamientos, resultantes de la combinación de cuatro niveles de humedad y cinco temperaturas de incubación. Los contenidos de humedad correspondieron a secado al aire y 50, 75 y 100% del valor del suelo, equivalentes a retención de agua de -10 MPa, -2,51 MPa, -0,16 MPa y -0,03 MPa. Las temperaturas empleadas fueron, 5, 15, 25, 35 y 45 °C, que cubren el rango de la oxidación biológica indicado anteriormente, y

de la temperatura diaria promedio del área de donde procede el suelo.

La oxidación del azufre elemental en el suelo, se determinó usando el procedimiento descrito por Figueroa (1995). Se pesaron alícuotas equivalentes a 30 gramos de suelo base peso seco (bps), en duplicado para cada tratamiento, que se depositaron en frascos plásticos, con tapa, de 250 ml de capacidad. Luego, se les agregó azufre polvo ventilado, en dosis de 500 mg S° kg<sup>-1</sup>, mezclando completamente para asegurar su distribución homogénea en el suelo. Posteriormente, se agregó agua destilada en la cantidad requerida por cada tratamiento y nuevamente se mezcló el suelo para uniformar la humedad.

Las muestras de suelo se colocaron dentro de depósitos cerrados, uno por cada tratamiento de temperatura y se incubaron por 10, 20 y 30 días. Para evitar pérdidas de humedad, la incubación se realizó bajo una atmósfera saturada dentro de los depósitos. La medición del peso del suelo antes y después del período de incubación, indicó cambios mínimos y no significativos en el contenido de humedad en todos los tratamientos. Los frascos fueron abiertos durante la incubación para permitir una correcta aireación y no detener el proceso de oxidación.

En forma similar se incubaron muestras de suelo sin la adición de azufre elemental, con el fin de determinar la producción de sulfato debido al proceso de mineralización del azufre nativo del suelo.

Al término de cada período de incubación, se determinó el contenido de sulfato (S-SO<sub>4</sub>) de los tratamientos, con adición de azufre elemental y de los controles, mediante extracción con CaCl<sub>2</sub> 0,01 M (Lawrence y Germida, 1988). Para ello, alícuotas equivalentes a 10 g de suelo seco se extractaron con 25 ml de una solución de CaCl<sub>2</sub> 0,02 M y suficiente agua destilada para completar 50 ml de volumen, considerando el contenido de agua del suelo. El contenido de sulfato en el extracto se determinó por turbidi-

metría (Bardsley y Lancaster, 1965). La oxidación del azufre elemental en cada tratamiento, se calculó por la diferencia en las concentraciones de sulfato entre las muestras con y sin agregado de este sustrato.

Para el análisis de los resultados se consideró un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 5 x 4 x 2, donde los factores fueron cinco niveles de temperatura, cuatro contenidos de humedad y dos repeticiones. Se efectuó un análisis de varianza y se usó la prueba de diferencias mínimas significativas (DMS) para la comparación entre medias.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1, se presentan las concentraciones netas de S-SO<sub>4</sub> (muestras con adición de azufre menos muestras controles), acumuladas en los distintos tratamientos durante un período de 10, 20 y 30 días de incubación. En todas las combinaciones de temperatura y humedad hubo aumento del contenido de S-SO<sub>4</sub> durante la incubación. No obstante, en el suelo seco el proceso de oxidación fue muy bajo.

Se puede señalar, además, que la oxidación del azufre elemental no sigue una misma cinética para las diferentes condiciones de incubación. Por ejemplo, para una humedad de 75% del valor de retención a -0,03 MPa y a una temperatura de incubación igual o inferior a 25 °C, la oxidación del azufre elemental es lineal (cinética de cero orden). A temperaturas mayores (35 °C a 45 °C) las tendencias se hacen parabólicas con una estabilización gradual de la cantidad de sulfato producido en el tiempo. De ello, se deduce que es imposible aplicar un modelo único para representar la oxidación de azufre.

La cinética de muchos procesos bióticos que ocurren en el suelo ha sido descrita como de orden cero (Doner *et al.*, 1974; Macduffy y White, 1985) o como de primer orden (Stanford *et al.*, 1975; Van Veen y Paul, 1981). En el caso espe-

**Cuadro 1. Concentraciones netas de S-SO<sub>4</sub> en el suelo después de 10, 20 y 30 días de incubación a diferentes temperaturas y contenidos de humedad (promedio de dos repeticiones)**

**Table 1. S-SO<sub>4</sub> concentration in the soil after a incubation by 10, 20 and 30 days under different temperatures and soil moisture (average two replicates)**

N°	Tratamientos		Concentraciones netas de S-SO <sub>4</sub> <sup>(*)</sup>		
	Temperatura °C	Humedad	10 días	20 días	30 días
			----- mg S-SO <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> -----		
1	5	seco al aire	-1,3	0,5	1,7
2	5	50% CC	0,8	3,4	4,1
3	5	75% CC	3,7	3,9	3,9
4	5	100% CC	3,4	5,0	9,2
5	15	seco al aire	-1,5	1,9	1,7
6	15	50% CC	3,6	6,6	11,9
7	15	75% CC	8,2	11,2	29,6
8	15	100% CC	46,9	90,0	127,3
9	25	seco al aire	1,0	2,0	3,4
10	25	50% CC	8,4	11,6	16,5
11	25	75% CC	19,1	20,5	36,5
12	25	100% CC	98,0	126,5	135,3
13	35	seco al aire	2,5	6,7	16,0
14	35	50% CC	19,6	41,9	52,0
15	35	75% CC	53,6	65,1	71,1
16	35	100% CC	171,0	130,9	152,5
17	45	seco al aire	2,6	1,4	8,1
18	45	50% CC	11,7	38,4	41,0
19	45	75% CC	100,2	97,5	95,5
20	45	100% CC	66,1	62,8	85,2

\*Se adicionó una cantidad de azufre elemental correspondiente a 500 mg kg<sup>-1</sup>.

cífico de la oxidación del azufre elemental, Figueroa (1995), al trabajar con muestras de 30 suelos de la zona centro sur de Chile, encontró que para una humedad de suelo correspondiente a un 75% del valor de retención a -0,03 MPa y temperatura de 25 °C, la producción neta de sulfato se ajustó mejor a una cinética de orden cero, coincidiendo con los resultados del presente trabajo, en similares condiciones de humedad y temperatura. En consecuencia, bajo las condiciones experimentales en referencia, el proceso sería independiente de la cantidad de sustrato. Otros autores, como Janzen y Bettany (1987a), señalan que la velocidad de oxidación

del azufre elemental es un fenómeno estrictamente superficial y que debe expresarse como la cantidad de sustrato oxidado por el área superficial y por unidad de tiempo.

Con el propósito de poder efectuar una comparación entre los distintos tratamientos, se procedió a calcular la velocidad máxima de oxidación del azufre observada en cada uno de ellos, para lo cual se dividió el valor máximo de oxidación entre dos mediciones por el número de días transcurridos entre estas dos mediciones (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Tasas máximas de oxidación de azufre elemental en un suelo Andisol (Typic Fulvudand), influenciado por la temperatura y contenidos de humedad**

**Table 2. Sulphur oxidation maximum rate as influenced by temperature and soil moisture in a Andisol soil (Typic Fulvudand)**

Tratamientos	Humedad				Promedio temperatura
	Seco al aire -10 Mpa	50% CC -2,5 Mpa	75% CC -0,16 Mpa	100% CC -0,03 MPa	
Temperatura °C					
----- kg S-SO <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> -----					
5	0,36	0,55	0,78	0,89	0,66
15	0,70	1,14	3,90	9,82	3,92
25	0,30	1,78	4,05	20,78	6,72
35	1,97	4,71	11,94	36,23	13,72
45	1,42	5,68	21,24	14,10	10,60
Promedio humedad	0,95	2,78	8,37	16,39	

\*DMS ( $P \leq 0,05$ ) = 3,01 kg S-SO<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

\*Se consideró una densidad aparente de 1,06 g cm<sup>3</sup> y 20 cm de profundidad de suelo.

El análisis de varianza, mostró un efecto positivo de los factores temperatura y humedad y de la interacción entre estos sobre la tasa máxima de oxidación ( $P \leq 0,05$ ). Este resultado difiere del encontrado por Janzen y Bettany (1987b) y Lee *et al.*, (1988), donde la temperatura fue más importante que la humedad en la oxidación del azufre. Esta discrepancia es producto, posiblemente, de las diferencias en las características químicas y físicas de los suelos usados en los experimentos.

La tasa de oxidación máxima presentó un amplio intervalo de variación, manifestándose valores desde 0,3 a 36 kg S-SO<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, lo que deja de manifiesto la gran influencia de la temperatura y humedad en el proceso.

En general, a bajas temperaturas (5 °C), independientemente del contenido de agua en el suelo, la oxidación es muy reducida. El aumento sucesivo de temperatura, hasta los 35 °C, tuvo un efecto estimulante creciente sobre la acumulación neta de sulfato. Cabe señalar, que la más alta tasa de oxidación del azufre elemental se

alcanzó a una temperatura de 35 °C, con un contenido de agua del suelo a -0,03 MPa. Al respecto, otros investigadores indican que la temperatura óptima es cercana a 30 °C (Li y Caldwell, 1966), entre 25 y 30 °C (Deng y Dick, 1990) o en el rango 30-37 °C (Skiwa y Wainwright, 1984).

El aumento de la temperatura de incubación de 35 a 45 °C, condujo a una disminución de la tasa de oxidación en el tratamiento de humedad a -0,03 MPa, posiblemente debido a una mayor demanda de oxígeno de los microorganismos del suelo y al efecto restrictivo del mayor contenido de humedad sobre la difusión de este gas. Por otro lado, Skiwa y Wainwright (1984), informan que el proceso oxidativo a temperaturas superiores a 45 °C, puede provocar la producción de algunos intermediarios, como tiosulfato y tetratiónato y, en consecuencia, una disminución de la tasa de acumulación de sulfato en el suelo.

A bajos contenidos de humedad (suelo seco al aire, que corresponde a un 29% del agua a -0,03 MPa), independientemente de la temperatura,

la oxidación es mínima. En general, la tasa de oxidación del azufre elemental aumentó con el incremento del contenido de humedad del suelo, alcanzando su valor máximo a  $-0,03$  MPa. Ello coincide con otras investigaciones donde señalan que el contenido óptimo de humedad del suelo, depende de la textura y está en un rango de retención desde  $-0,27$  MPa a  $-0,01$  MPa (Jansen y Bettany, 1987b; Deng y Dick, 1990).

Se puede inferir, además, que aun cuando se presentan bajas tasas de oxidación a contenidos de humedad inferiores a punto de marchitez permanente ( $-1,5$  MPa), el proceso continúa. Esto puede hacer pensar que el agua puede llegar a ser más limitante para el crecimiento de las plantas que para el proceso de oxidación del azufre. A su vez, Jansen y Bettany (1987b), también encontraron niveles relativamente altos de oxidación a  $-1,5$  MPa. Otros autores (Nor y Tabatabai, 1977; Wainwright, 1984) han atribuido este comportamiento, en parte, a la oxidación abiótica del azufre elemental.

## CONCLUSIONES

- La temperatura y la humedad del suelo influyó en forma significativa sobre el proceso de oxidación del azufre elemental.
- No fue posible aplicar un modelo único para representar la cinética de oxidación del azufre, bajo los diferentes tratamientos de humedad y temperatura a que se sometió el suelo.
- Las tasas de oxidación presentaron un amplio intervalo de variación entre los tratamientos evaluados, manifestándose valores desde  $0,3$  a  $36$  kg S-SO<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>. La tasa máxima se alcanzó con una temperatura de  $35$  °C y con un contenido de humedad equivalente a  $-0,03$  MPa.

## RESUMEN

Se realizó un experimento con el propósito de determinar el efecto de la temperatura y el contenido de humedad sobre la tasa de oxidación del azufre elemental, en un suelo derivado de cenizas volcánicas (Typic Fulvudand). Se evaluaron cinco niveles de temperatura ( $5$ ,  $15$ ,  $25$ ,  $35$  y  $45$  °C) y cuatro niveles de humedad (seco al aire y  $50$ ,  $75$  y  $100\%$  de la capacidad de retención a  $-0,03$  MPa). Se agregó una cantidad de azufre elemental equivalente a  $500$  mg kg<sup>-1</sup> y se midió el contenido de sulfato después de  $10$ ,  $20$  y  $30$  días de incubación. Como control se usaron muestras sin azufre elemental. La interacción temperatura y humedad del suelo influyeron en forma significativa sobre el proceso de oxidación

del azufre. No fue posible aplicar un modelo único para representar la cinética de oxidación del azufre bajo los diferentes tratamientos de humedad y temperatura a que se sometió el suelo. Las tasas de oxidación presentaron un amplio intervalo de variación entre los tratamientos evaluados, manifestándose valores desde  $0,3$  a  $36$  kg S-SO<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>. La tasa máxima se alcanzó con una temperatura de  $35$  °C y con un contenido de humedad equivalente a  $-0,03$  MPa.

**Palabras claves:** tasa de oxidación, sulfato, incubación, Andisol, *Thiobacillus thiooxidans*.

## LITERATURA CITADA

- ARAOS, J.F. 1967. Estudio de deficiencias nutritivas en muestras superficiales de suelos de Ñuble. *Agricultura Técnica (Chile)* 27: 15-20.
- ATTOE, O.J AND OLSON, R.A. 1966. Factors affecting rate of oxidation in soils of elemental sulfur and that added in rock phosphate-sulfur fusions. *Soils Sci.* 101: 317-325.
- BARDLEY, C.E. AND LANCASTER, J.D. 1965. Sulfur. *In: Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. p. 1103-1115.
- BENAVIDES, C. 1991. Aplicación de enmiendas químicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. *Publicaciones Misceláneas Agrícolas* N° 35. p. 93-96.
- DENG, S. AND DICK, R.P. 1990. Sulfur oxidation and rhodanese activity in soils. *Soil Sci.* 150: 552-560.
- DEVAUD, E.G. 1970. Estudio de la disponibilidad de S y su interacción con N, P y K en Andisoles de Ñuble. Tesis Ingeniero Agrónomo. Chillán, Chile. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. 120 p.
- DONER, H.E.; VOLZ, M.G. AND McLAREN, A.D. 1974. Column studies of denitrification in soil. *Soil Biol. Biochem.* 6: 341-346.
- FIGUEROA, H.A. 1995. Capacidad de oxidación de azufre de algunos suelos de la zona Centro-sur de Chile. Tesis Ingeniero Agrónomo. Chillán, Chile. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. 30 p.
- GERMIDA, J.J. AND JANZEN, H.H. 1993. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. *Fertilizer Res.* 35: 101-114.
- GRAEME, J.B.; LEFROY, R.D.B.; DANA, M. AND ANDERSON, G.C. 1993. Modelling of sulfur oxidation from elemental sulfur. *Plant Soil* 155/156: 379-382.
- JANZEN, H.H. AND BETTANY, J.R. 1987a. Measurement of sulfur oxidation in soils. *Soils Sci.* 143: 444-452.
- JANZEN, H.H. AND BETTANY, J.R. 1987b. The effect of temperature and water potencial on sulfur oxidation in soils. *Soil Sci.* 144: 81-89.
- KITTAMS, H.A. AND ATTOE, O.J. 1965. Availability of phosphorus in rock phosphate-sulfur fusions. *Agron. J.* 57: 331-334.
- LEE, A.; WATKINSON, J.H. AND LAUREN, D.R. 1988. Factors affecting oxidation rates of elemental sulphur in a soil under ryegrass dominant sward. *Soil Biol. Biochem.* 20: 809-816.
- LI, P. AND CALDWELL, A.C. 1966. The oxidation of elemental sulfur in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 30: 370-372.
- LAWRENCE, J.R AND GERMIDA, J.J. 1988. Relationship between microbial biomass and elemental sulfur oxidation in agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 52: 672-677.
- MACDUFF, J.H. AND WHITE, R.E. 1985. Net mineralization and nitrification rates in a clay soil measured and predicted in permanent grassland from soil temperature and moisture content. *Plant Soil* 86: 151-172.
- NOR, Y.M. AND TABATABAI, M.A. 1977. Oxidation of elemental sulfur in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 41: 736-741.

- OPAZO, J. 1982. Disponibilidad de azufre en suelos de la Región de Los Lagos. Tesis Magister Scientiae. Santiago, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. 95 p.
- SCHENKEL, G.; BAHERLE, P.; FLOODY, T. Y GAJARDO, M. 1971a. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en maceta. IV. Macronutrientes, Provincia Malleco. Agricultura Técnica (Chile) 31: 129-135.
- SCHENKEL, G.; BAHERLE, P.; FLOODY, T. Y GAJARDO, M. 1971b. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. VI. Macronutrientes, Provincia de Cautín. Agricultura Técnica (Chile) 31: 169-180.
- SCHENKEL, G.; BAHERLE, P.; FLOODY, T. Y GAJARDO, M. 1972a. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. IX. Comportamiento de algunas fórmulas de fertilización. Provincia de Valdivia. Agricultura Técnica (Chile) 32: 48-55.
- SCHENKEL, G.; BAHERLE, P.; FLOODY, T. Y GAJARDO, M. 1972b. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en maceta. X. Macronutrientes, Provincia de Osorno. Agricultura Técnica (Chile) 32: 99-109.
- SCHENKEL, G.; BAHERLE, P.; FLOODY, T. Y GAJARDO, M. 1973. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. XII. Macronutrientes, Provincia de Llanquihue. Agricultura Técnica (Chile) 33: 111-121.
- SIERRA, C. 1980. Fertilización con azufre en la zona sur. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Remehue. Osorno, Chile. Boletín Divulgativo Nº 74. 14 p.
- SKIWA, U. AND WAINWRIGHT, M. 1984. Oxidation of elemental-S in coastal-dune sands and soils. *Plant Soil* 77: 87-95.
- STANFORD, G.; DZIENIA, S. AND VANDER POL, R.A. 1975. Effect of temperature on denitrification rate in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39: 867-870.
- VENEGAS, A.; VIDAL, I. Y MARÍN, M.E. 1986. Prospección nutricional en huertos de guindo dulce en las Provincias de Ñuble y Concepción, VIII Región, Chile. *Agro-Ciencia (Chile)* 2: 113-121.
- VAN VEEN, J.A. AND PAUL, E.A. 1981. Organic carbon dynamics in grassland soils. 1. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.* 61: 185-201.
- VOGEL, O. 1959. Problemas de carencias minerales en betarragas. Ensayos de abonos con seis elementos. *Simiente* 29: 31-36.
- WAINWRIGHT, M. 1984. Sulfur oxidation in soils. *Advan. Agronomy* 37: 349-396.
- WATKINSON, J.H. AND BLAIR, G.J. 1993. Modelling the oxidation of elemental sulfur in soils. *Fert. Res.* 35: 115-126.