

CAPACIDAD DE OXIDACIÓN DE AZUFRE DE ALGUNOS SUELOS DE LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE¹

Sulphur oxidation capacity of some soils of the south central area of Chile

Hernán Figueroa P.², Luis Longeri S.² e Iván Vidal P.²

S U M M A R Y

Sulphur is an important element in plant nutrition. The elemental sulphur oxidizing capacity of 30 soils belonging to five series of the South Central region of Chile was determined. The series were Cauquenes (Ultic Paleustalf), Collipulli (Typic Haplohumult), Diguillín (Typic Dystrandept), Santa Bárbara (Thaptic Haploxerand) and San Carlos (Ultic Palexeralf). Soil samples at 75% field capacity were amended with 500 mg S kg⁻¹ and S-SO₄ content was measured after incubation at 25°C for 10, 20 and 30 days. Non S-amended samples were also incubated as a comparison. Sulphur oxidation followed a zero-order kinetic with k₀ ranging from 0.02 to 4.98 mg kg⁻¹ day⁻¹. The average sulphur oxidation rate was 3.44; 2.85; 1.35; 0.61 and 0.45 mg S-SO₄ kg⁻¹ day⁻¹ in series Diguillín, San Carlos, Cauquenes, Santa Bárbara, and Collipulli, respectively. Stepwise multiple regression analysis (r² = 0.87**) selected soil interchangeable Na, K and Ca, P-Olsen and sand percentage contents as predictors of the S oxidation rate (T), according to the equation:

$$T = -3.69 + 2.13Na + 1.45K + 0.38Ca + 0.038P\text{-Olsen} + 0.039\text{Sand}$$

Key words: sulphur, oxidation rate, soils.

INTRODUCCIÓN

Las primeras referencias sobre necesidades de azufre (S) para la nutrición de las plantas datan de mediados del siglo XVIII. En Chile, una de las primeras evidencias de deficiencias de S se encontró en 1946, en un suelo derivado de cenizas volcánicas (Opazo, 1982). Posteriormente se informan respuestas a la aplicación de S en diferentes suelos y cultivos del sur del país: Vogel (1959) en betarraga forrajera; Barahona (1959) y Rojas (1973) en praderas; Letelier (1969) en remolacha azucarera, raps y praderas, y Sierra (1980) en papas. En estudios realizados en macetas se informa la deficiencia de S en

suelos de la zona centro-sur de Chile (Araos, 1967; Devaud, 1970; Shenkel *et al.*, 1971a, 1971b, 1972a, 1972b, 1973).

Cuando el S elemental se agrega al suelo es oxidado al estado de sulfato. Numerosos factores afectan este proceso (Nor y Tabatabai, 1977), siendo la humedad y la temperatura los de mayor influencia (Li y Caldwell, 1966; Nor y Tabatabai, 1977; Skiba y Wainwright, 1984; Deng y Dick, 1990). Según Janzen y Bettany (1987b) las tasas máximas de oxidación de S en el suelo se alcanzan con un contenido de agua cercano a la capacidad de campo y a una temperatura de aproximadamente 30°C.

Otro factor que influye es la actividad y tipo de población microbiana que participa en el proceso oxidativo, compuesta por bacterias autotróficas

¹Recepción de originales: 17 de octubre de 1995.

²Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Casilla 537, Chillán, Chile. E-mail: ivald@udec.cl

y bacterias; hongos y actinomicetes heterotróficos (Vishniac y Santer, 1957; Bear, 1965; Rehm y Caldwell, 1969; Fliermans y Brock, 1972; Tisdale y Nelson, 1975; Wainwright, 1984; Grayston y Wainwright, 1987; McCaskill y Blair, 1987; Gupta *et al.*, 1988; Chapman, 1990; Grayston y Germida, 1990; Lindemann *et al.*, 1991). En general, la especie *Thiobacillus thiooxidans* se asume como el organismo responsable de gran parte de la oxidación de S en los suelos agrícolas, pero trabajos más recientes (McCaskill y Blair, 1987; Cifuentes y Lindemann, 1993), han demostrado que heterótrofos del suelo, que generalmente se encuentran en mayor número que *Thiobacillus*, pueden ser responsables de la mayor parte del S oxidado en algunos suelos.

Otro factor importante en la tasa de oxidación del S, es el tamaño de la partícula. Janzen y Bettany (1987a) plantean que la oxidación de este elemento es una reacción exclusivamente superficial, y que los átomos del exterior de las partículas están expuestos a mayor actividad química y biológica. Consecuentemente, la cantidad de sulfato producida por unidad de tiempo es función del total del área superficial del S y no de su masa.

Li y Caldwell (1966) y Nor y Tabatabai (1977) señalan que la dosis de S aplicado no afecta la cantidad oxidada del elemento. Sin embargo, Janzen y Bettany (1987b) afirman que cada adición de S da como resultado un incremento proporcional en la producción de sulfato y que, por lo tanto, la oxidación está claramente limitada por la cantidad de sustrato disponible.

En consideración a que el S debe ser oxidado a sulfato para poder ser utilizado por las plantas, y a que su tasa de oxidación varía enormemente en los diferentes suelos, se planteó la presente investigación con el objetivo de medir la capacidad de oxidar S elemental de algunos suelos de la zona centro-sur de Chile y relacionarla con sus propiedades físicas y químicas, bajo condiciones controladas de temperatura y humedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se colectaron 30 muestras superficiales (0-25 cm) de suelos, seis de cada una de las series Cauquenes (Ultic Paleustalf), Collipulli (Typic Haplohumult), Diguillín (Typic Dystrandept), Santa Bárbara (Thaptic Haplocerand) y San Carlos (Ultic Palexeralf). Las muestras fueron secadas al aire, tamizadas por una malla de 2 mm y guardadas en bolsas de polietileno.

Submuestras fueron caracterizadas en algunas de sus propiedades físicas y químicas. Los análisis efectuados fueron textura (método del hidrómetro de Bouyoucos), densidad aparente (método del terrón), retención de agua a 33 y 1.500 kPa (método de la olla a presión), pH al agua (relación suelo:agua de 1:2,5), materia orgánica (combustión húmeda), N-NO₃ (Robarge *et al.*, 1983), P disponible (Olsen), cationes de intercambio (extracción con acetato de amonio a pH 7), capacidad de intercambio de cationes (saturación con acetato de amonio a pH 7), microelementos (Lakanen y Ervio, 1971), aluminio intercambiable (extracción con KCl). Mediante relaciones matemáticas se calculó el porcentaje de saturación de bases y el porcentaje de saturación de aluminio. En el Cuadro 1 se indica la ubicación geográfica (latitud y longitud), serie a que pertenecen y uso que se estaba dando a los suelos al momento de la toma de las muestras. En los Cuadros 2 y 3 se muestran sus características físicas y químicas.

Para la determinación de la capacidad de oxidación del S⁰, submuestras de suelo seco al aire, equivalentes a 30 g de suelo seco, se depositaron en frascos de plástico de 250 mL de capacidad. Luego se les agregó S elemental, polvo ventilado (500 mg kg⁻¹), se homogeneizó la mezcla y se les adicionó agua destilada suficiente para llevarlas al 75% de su capacidad de campo. Los frascos se colocaron dentro de bandejas cerradas, en presencia de agua para mantener una atmósfera saturada y evitar la desecación de las muestras. Luego se incubó a 25°C por 10, 20 y 30 días. En forma similar se incubaron submuestras control sin agregado de S.

Cuadro 1. Identificación de las muestras de suelo**Table 1. Soil samples identification**

Serie	Muestra	Lat.	Long.	Lugar muestreo	Uso suelo
Sta. Bárbara	1	36°48	71°48	15 km SE Pinto	Barbecho
	2	36°57	71°47	9 km E Zapallar	Rastrojo
	3	36°57	71°52	3 km E Zapallar	Rastrojo
	4	36°53	71°56	9 km E El Carmen	Barbecho
	5	36°53	71°55	10 km E El Carmen	Rastrojo
	6	36°53	71°54	12 km E El Carmen	Rastrojo
Diguillín	7	36°36	71°57	14 km E Chillán	Rastrojo
	8	36°36	71°53	20 km E Chillán	Rastrojo
	9	36°47	72°06	18 km S Chillán	T. Blanco
	10	36°44	72°16	4 km E Bulnes	Pradera
	11	36°44	72°15	5 km E Bulnes	T. Rosado
	12	36°24	71°58	1 km N Sn Carlos	Alfalfa
San Carlos	13	36°21	71°58	7 km N Sn Carlos	T. Blanco
	14	36°19	71°58	10 km N Sn Carlos	T. Blanco
	15	36°18	71°58	11 km N Sn Carlos	Tomate
	16	36°16	71°58	15 km N Sn Carlos	Maíz
	17	36°15	71°58	16 km N Sn Carlos	T. Rosado
	18	36°22	72°01	8 km N Sn Carlos	T. Blanco
Cauquenes	19	37°01	72°15	13 km E Cabrero	Pradera
	20	37°06	72°31	4 km E Yumbel	Rastrojo
	21	37°06	72°28	8 km E Yumbel	Rastrojo
	22	36°25	72°24	3 km S Ninhue	Pradera
	23	36°26	72°22	5 km SE Ninhue	Rastrojo
	24	36°27	72°21	7 km SE Ninhue	Rastrojo
Collipulli	25	36°46	71°54	7 km S Pinto	Rastrojo
	26	36°49	71°54	13 km S Pinto	Rastrojo
	27	36°48	72°00	15 km SO Pinto	Pradera
	28	36°42	72°06	10 km S Chillán	Rastrojo
	29	36°44	72°06	13 km S Chillán	Rastrojo
	30	36°46	72°06	16 km S Chillán	Pradera

Lat.: latitud sur, Long.: longitud oeste.

Pradera: pradera natural.

Rastrojo: rastrojo de trigo.

N: norte; S: sur; E: este; O: oeste.

Al final de cada período de incubación, se determinó el contenido de sulfato, mediante extracción con CaCl_2 0,01 M (Lawrence y Germida, 1988). Para ello, a alícuotas equivalentes a 10 g de suelo seco se les agregó 25 mL de CaCl_2 0,02 M y suficiente agua destilada para completar un volumen de 50 mL, considerando el contenido

de agua de cada suelo. Luego de agitar a 150 rpm por 30 minutos y filtración (papel Whatman N° 42) se determinó el contenido de S-SO_4 en el extracto por turbidimetría (Bardsley y Lancaster, 1965). La cantidad de S oxidado se calculó por diferencia entre el S-SO_4 extractado de los suelos con y sin agregado de S elemental.

Cuadro 2. Características físicas seleccionadas de los suelos considerados en la experiencia**Table 2. Selected physical properties of the soils studied**

Serie	Muestra	Sistema USDA (%)				Da	HBSS (%)	
		Arena	Limo	Arcilla	Text		33 kPa	1.500 kPa
Santa Bárbara	1	36,6	52,7	10,7	Fl	0,79	63,1	37,8
	2	32,1	56,0	11,9	Fl	0,79	71,3	38,0
	3	34,9	57,7	7,4	Fl	0,68	70,0	39,5
	4	38,6	55,2	6,2	Fl	0,78	72,3	36,8
	5	37,1	57,9	5,0	Fl	0,75	69,7	39,0
	6	35,0	57,4	7,6	Fl	0,90	74,5	38,2
Diguillín	7	33,1	48,1	18,8	F	1,00	49,3	27,6
	8	39,0	44,1	16,9	F	0,94	52,2	30,6
	9	41,6	46,4	12,0	F	1,14	43,4	22,8
	10	39,8	51,0	9,2	Fl	1,03	60,3	28,8
	11	39,1	50,7	10,2	Fl	1,09	67,3	33,5
	12	31,9	54,6	13,5	Fl	0,96	60,9	28,6
San Carlos	13	34,4	39,2	26,4	F	1,48	31,0	19,5
	14	35,7	37,5	26,8	F	1,41	31,3	21,4
	15	36,6	39,2	24,2	F	1,42	30,5	18,4
	16	34,9	38,9	26,2	F	1,32	32,3	18,0
	17	26,7	39,7	33,6	Fa	1,37	31,3	17,0
	18	31,1	38,7	30,2	Fa	1,35	33,6	19,3
Cauquenes	19	53,8	33,4	12,8	FA	1,53	23,1	11,7
	20	29,7	46,6	23,7	F	1,67	24,4	13,6
	21	31,8	43,3	24,9	F	1,71	24,4	15,1
	22	57,0	27,3	15,7	FA	1,69	17,9	9,2
	23	74,1	16,6	9,3	FA	1,90	9,5	4,5
	24	41,4	25,6	33,0	Fa	1,75	22,8	13,9
Collipulli	25	25,2	25,6	49,2	a	1,35	30,7	21,0
	26	25,0	38,3	36,7	Fa	1,10	38,8	26,1
	27	19,6	36,5	43,9	a	1,47	26,6	16,2
	28	25,5	39,0	35,5	Fa	1,45	29,4	18,5
	29	32,0	37,9	30,1	Fa	1,46	29,8	19,6
	30	11,0	34,2	54,8	a	1,34	35,2	20,3

Da: Densidad aparente ($t\ m^{-3}$).

Text: Texturas (F: franco, Fl: franco limoso, FA: franco arenoso, Fa: franco arcilloso, a: arcilloso).

HBSS(%) 1.500 kPa: Porcentaje humedad a 1.500 kPa, base suelo seco. 33 kPa: Porcentaje humedad a 33 kPa, base suelo seco.

Se empleó análisis de correlación simple y de regresión lineal múltiple stepwise (SYSTAT Inc., USA) para examinar las relaciones entre las propiedades individuales de los suelos y oxidación de S. Se usó análisis de varianza y prueba de comparación entre medias de Tukey para detectar diferencias en la capacidad de oxidar S entre las series de suelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 4 se entregan las concentraciones netas de $S-SO_4$ determinadas en los suelos a los 10, 20 y 30 días de incubación, calculadas por diferencia entre las muestras con y sin agregado de S elemental. Aunque en todas las muestras de suelos hubo aumento del contenido neto de S-

Cuadro 3. Características químicas seleccionadas de los suelos considerados en la experiencia**Table 3. Selected chemical properties of the soils studied**

Serie	Muestra	pH	M.O. (%)	N-NO ₃ ----- (mg kg ⁻¹) -----	P	K	Ca	Mg cmol (+) kg ⁻¹	Na	Al
	1	6,33	9,0	2,3	3,8	0,16	7,74	0,83	0,16	0,03
	2	6,23	16,1	9,5	12,0	0,45	9,21	1,76	0,37	0,03
Santa	3	6,19	13,0	3,0	9,6	0,35	3,39	0,52	0,02	0,08
Bárbara	4	6,11	7,7	24,0	3,4	0,10	4,44	0,62	0,21	0,01
	5	6,30	7,9	12,8	4,6	0,40	6,66	1,11	0,18	0,01
	6	6,12	10,6	13,0	9,1	0,12	5,83	0,65	0,16	0,01
	7	6,15	11,5	26,5	23,3	0,30	11,10	3,05	0,73	0,04
	8	6,24	12,4	19,5	11,3	0,88	9,60	2,10	0,24	0,04
Diguillín	9	5,94	7,0	46,0	7,2	0,51	6,86	1,57	0,14	0,02
	10	6,27	11,8	16,5	14,6	0,59	10,82	2,13	0,18	0,02
	11	5,82	9,9	88,5	15,1	0,29	8,03	1,67	0,46	0,02
	12	5,58	9,8	32,0	14,6	0,64	5,40	1,20	0,21	0,07
	13	5,94	4,4	1,0	16,8	0,35	7,95	2,25	0,24	0,01
	14	6,12	6,5	5,3	18,2	0,75	8,03	2,62	0,26	0,01
San Carlos	15	5,99	5,2	1,0	25,9	0,47	8,42	2,31	0,26	0,02
	16	5,90	5,8	2,5	21,8	0,41	7,82	2,07	0,24	0,01
	17	5,84	7,0	1,0	15,6	0,13	8,18	1,88	0,26	0,06
	18	6,03	6,7	3,5	45,8	0,52	9,24	2,47	0,54	0,02
	19	6,04	6,5	25,5	29,3	0,14	8,06	2,25	0,15	0,01
	20	6,83	2,5	5,0	3,8	0,19	7,52	3,67	0,24	0,02
Cauquenes	21	6,87	2,3	1,0	3,4	0,13	6,45	3,24	0,26	0,03
	22	6,18	2,1	5,0	3,1	0,24	4,14	1,42	0,20	0,03
	23	6,09	1,4	2,5	2,2	0,10	1,89	0,71	0,15	0,03
	24	6,18	1,9	4,8	4,8	0,35	5,12	1,85	0,19	0,03
	25	5,43	1,3	1,0	3,1	0,34	3,00	1,63	0,54	0,35
	26	5,87	7,4	3,5	4,1	0,29	6,04	1,97	0,14	0,11
Collipulli	27	5,75	4,7	1,3	3,1	1,18	5,49	1,73	0,09	0,38
	28	5,60	3,6	1,5	4,3	0,29	4,13	1,88	0,13	0,84
	29	5,68	2,3	3,3	4,6	0,39	5,74	2,16	0,13	0,18
	30	5,38	3,7	4,8	4,8	0,11	7,11	2,90	0,17	1,45

SO₄ durante la incubación, la capacidad oxidativa mostró una amplia variabilidad tanto en los suelos en general, como en los suelos de una misma Serie, producto, posiblemente, de las diferencias en sus propiedades físicas y químicas o en el manejo agrícola (Cuadros 1, 2 y 3), las cuales pueden incidir en la biomasa microbiana y en las especies de microorganismos presentes (Burke *et al.*, 1974; Pichtel y Dick, 1991).

La cinética de los procesos microbianos del suelo ha sido descrita como de cero orden, con una velocidad independiente de la concentración

del sustrato (Doner *et al.*, 1974; MacDuff y White, 1985), o de primer orden, con una velocidad proporcional a la concentración del sustrato (Stanford *et al.*, 1975; Van Veen y Paul, 1981). Debido a que no existe, por lo tanto, un criterio uniforme respecto a la cinética que mejor representa estos procesos, se calculó los coeficientes de correlación para la relación tasa de oxidación de S versus tiempo de incubación de acuerdo a una cinética de orden cero y de primer orden, y las constantes de las reacciones k₀ (mg S kg⁻¹ día⁻¹) y k₁ (mg S día⁻¹) respectivas (Cuadro 5).

Cuadro 4. Concentraciones netas de S-SO₄ (mg kg⁻¹) en los suelos estudiados después de 10, 20 y 30 días de incubación a 25°C

Table 4. Net concentration of S-SO₄ (mg kg⁻¹) in the soils studied after 10, 20 and 30 days of incubation at 25°C

Serie	Muestra	Tiempo 10	Tiempo 20	Tiempo 30
Santa Bárbara	1	1,31	3,29	3,29
	2	31,00	60,39	75,23
	3	2,92	2,25	3,10
	4	0,00	5,16	5,92
	5	4,89	10,33	12,50
	6	1,41	6,67	6,67
	Media	6,92	14,68	17,79 c*
Diguillín	7	78,89	129,53	149,24
	8	44,52	72,61	104,44
	9	16,07	33,72	50,15
	10	20,10	108,67	135,34
	11	44,99	80,87	95,24
	12	15,02	28,09	76,46
	Media	36,60	75,58	101,81 a
San Carlos	13	42,36	75,51	73,08
	14	54,95	95,90	95,15
	15	41,33	78,80	108,58
	16	33,06	68,85	54,29
	17	16,63	29,21	50,82
	18	82,56	88,29	132,44
	Media	45,15	72,76	85,73 ab
Cauquenes	19	27,33	55,33	86,41
	20	14,09	31,93	53,26
	21	9,02	14,37	18,97
	22	3,38	17,94	29,02
	23	9,58	13,34	14,56
	24	15,78	26,77	40,58
	Media	13,20	26,61	40,47 bc
Collipulli	25	0,00	0,00	0,75
	26	4,32	11,65	19,81
	27	4,32	9,20	15,03
	28	4,03	9,58	16,16
	29	8,64	17,18	21,89
	30	0,56	2,16	6,95
	Media	3,65	8,30	13,43 c

*Cifras con letras distintas difieren al nivel de significancia del 5%.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación (r) para la cinética de oxidación del azufre, asumiendo que sea de cero orden (S-SO₄ vs t) o de primer orden (log S-SO₄ vs t) y las constantes de velocidad k₀ y k₁ respectivas

Table 5. Correlation coefficients for the oxidation kinetic of the sulphur assuming it is zero-order (S-SO₄ vs t) or first order (log S-SO₄ vs t) and the rate constant k₀ and k₁

Serie	Muestra	Cinética 0 orden		Cinética 1° orden	
		k ₀	r	k ₁	r
Santa Bárbara	1	0,118	0,9487	0,046	0,8660
	2	2,551	0,9889	0,044	0,9602
	3	0,086	0,7813	0,003	0,1732
	4	0,229	0,9208	0,319	0,8753
	5	0,429	0,9863	0,047	0,9460
	6	0,253	0,9343	0,078	0,8660
Diguillín	7	4,984	0,9665	0,032	0,9523
	8	3,414	0,9948	0,043	0,9964
	9	1,681	0,9998	0,057	0,9851
	10	4,946	0,9666	0,095	0,9139
	11	3,216	0,9774	0,038	0,9506
	12	2,425	0,9457	0,081	0,9912
San Carlos	13	2,524	0,9251	0,027	0,8404
	14	3,264	0,9314	0,027	0,8597
	15	3,632	0,9974	0,048	0,9816
	16	1,987	0,8579	0,025	0,6623
	17	1,650	0,9946	0,056	0,9999
	18	4,031	0,9419	0,024	0,9241
Cauquenes	19	2,872	0,9995	0,058	0,9917
	20	1,776	0,9959	0,067	0,9912
	21	0,623	0,9866	0,037	0,9895
	22	1,016	0,9761	0,108	0,9527
	23	0,474	0,9285	0,021	0,9476
	24	1,327	0,9978	0,047	0,9977
Collipulli	25	0,023	0,7746	0,216	0,8660
	26	0,668	0,9913	0,076	0,9851
	27	0,500	0,9977	0,062	0,9926
	28	0,540	0,9944	0,070	0,9900
	29	0,742	0,9918	0,047	0,9637
	30	0,225	0,9180	0,126	0,9991

k₀: mg kg⁻¹ día⁻¹.

k₁: día⁻¹.

La comparación de los coeficientes de correlación entre los dos modelos señala que en un 77% de los suelos la cinética de orden cero presentó un mejor ajuste. Este resultado permite inferir que, bajo las condiciones de este estudio, la tasa de oxidación de S fue independiente de la cantidad de S aplicada inicialmente, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Li y Caldwell (1966) y Nor y Tabatabai (1977). Por consiguiente, todas las consideraciones posteriores se hacen basándose en esta cinética de oxidación.

El suelo Diguillín tuvo las mayores tasas de oxidación, con un rango de variación de k_0 entre 1,68 y 4,98 mg S-SO₄ kg⁻¹ día⁻¹ y un valor promedio de 3,44 mg S-SO₄ kg⁻¹ día⁻¹. A continuación se ubicó la Serie San Carlos (rango 1,65 a 4,03; valor promedio 2,85), le sigue la Serie Cauquenes (rango 0,47 a 2,87; valor promedio 1,35), luego la Serie Santa Bárbara (rango 0,12 a 2,55; valor promedio 0,61), y por último la Serie Collipulli (rango 0,02 a 0,67; valor promedio 0,45).

El análisis de varianza aplicado a la concentración neta de S-SO₄, después de 30 días de incubación, mostró diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre las Series de suelos. Al comparar la oxidación media de S en las muestras de cada Serie mediante la prueba de Tukey, se distinguen claramente tres grupos de suelos (Cuadro 4). El primer grupo, compuesto por las Series Diguillín y San Carlos, se caracteriza por presentar las mayores velocidades de oxidación a los 30 días, con valores de acumulación de S-SO₄ de 101,8 y 85,7 mg kg⁻¹, respectivamente. El suelo Cauquenes, con una acumulación de 40,5 mg kg⁻¹ mostró una capacidad de oxidación media. Las menores velocidades de oxidación ocurrieron en las series Santa Bárbara y Collipulli, que solamente acumularon 17,8 y 13,4 mg kg⁻¹, respectivamente.

En el Cuadro 6 se indican los coeficientes de correlación lineal simple entre las tasas (k_0) de oxidación de S y las características físicas y químicas de los suelos. Sobresalen por su correlación altamente significativa ($P \leq 0,01$), los ca-

lidades Ca, Na y Mg de intercambio, el P disponible Olsen, el Zn y el Fe extractables. El porcentaje de materia orgánica del suelo correlacionó significativa ($P \leq 0,05$), al igual que el porcentaje de saturación de aluminio, el que lo hizo, sin embargo, negativamente. Llama la atención que estos resultados no coinciden con los obtenidos por Janzen y Bettany (1987a) y Lawrence y Germida (1988), quienes encontraron que la capacidad oxidativa de S de los suelos está relacionada positivamente con el pH del suelo. Sin embargo, Skiba y Wainwright (1984) sostienen que el pH del suelo no es un factor crítico que inflencie el proceso, y que la oxidación del S puede ocurrir entre pH 4,0 a 9,3.

Respecto al efecto del fósforo disponible, los resultados son coincidentes con los obtenidos por Janzen y Bettany (1987a) y Lawrence y Germida (1988) quienes encontraron que a mayor disponibilidad de fósforo se presentó una mayor oxidación de S. El efecto benéfico de la materia orgánica sobre el proceso de oxidación del S ha sido informado por numerosos investigadores (Skiba y Wainwright, 1984; Wainwright *et al.*, 1986; Janzen y Bettany, 1987a; Cifuentes y Lindemann, 1993), quienes encontraron mayores tasas de oxidación de S en suelos más ricos en materia orgánica.

El efecto depresivo del porcentaje de saturación de aluminio sobre la oxidación del S puede atribuirse al efecto tóxico de este elemento sobre los microorganismos. El efecto positivo de las bases de intercambio Ca, Mg y Na sobre la tasa de oxidación del S, indicado anteriormente, puede explicarse por la disminución de la solubilidad del aluminio que provoca el aumento de estos cationes en el suelo.

El análisis de regresión lineal múltiple stepwise señaló que, de las propiedades de los suelos, las variables Ca, K y Na de intercambio, P Olsen y contenido porcentual de arena (sistema USDA), explican en más de un 85% la tasa de oxidación de S ($T = \text{mg S kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$) en los suelos bajo estudio, de acuerdo a la siguiente ecuación.

Cuadro 6. Correlación lineal simple entre la tasa de oxidación de azufre y las propiedades físicas y químicas de los suelos**Table 6. Simple linear correlation between the sulphur oxidation rate and physical and chemical soil properties**

Propiedad	r	F	Signif.
pH al agua	0,1318	0,495	
Materia orgánica	0,3982	5,277	*
N-NO ₃	0,3352	3,543	
Fósforo disponible	0,7452	34,967	**
Capac. intercambio catiónico	0,2183	1,301	
K intercambio	0,3443	3,764	
Ca intercambio	0,8026	50,705	**
Mg intercambio	0,4639	7,676	**
Na intercambio	0,5319	11,045	**
Fe extractable	0,4731	8,073	**
Mn extractable	0,1152	0,376	
Zn extractable	0,5421	11,655	**
Cu extractable	0,2984	2,736	
Al intercambio	-0,3379	3,609	
% Arena (USDA)	0,1124	0,358	
% Limo (USDA)	0,1126	0,360	
% Arcilla (USDA)	-0,1863	1,006	
% Arena (Internacional)	0,0863	0,210	
% Limo (Internacional)	0,2890	2,552	
Capacidad de campo	0,0463	0,060	
Punto marchitez permanente	-0,0159	0,007	
Densidad aparente	-0,0461	0,043	
Porcentaje saturación de bases	0,3367	3,580	
Porcentaje saturación aluminio	-0,3981	5,278	*

*, **: significancia a $P \leq 0,05$ y $P \leq 0,01$, respectivamente.

$$T = -3,69 + 2,13Na + 1,45K + 0,38Ca + 0,038P\text{-Olsen} + 0,039\text{Arena}$$

$$r^2 = 0,87$$

En consecuencia, los resultados obtenidos permiten inferir a modo de conclusión, que en todos los suelos estudiados existe actividad oxidativa de S, lo que permite suponer que en ellos están presente los microorganismos que intervienen en este proceso. La Serie Diguillín tiene las mayores tasas de oxidación de S seguida por las

series San Carlos y Cauquenes. En tanto, las series con menor tasa de oxidación fueron Santa Bárbara y Collipulli. La oxidación del S se ajustó mejor a una cinética de orden cero que a una de primer orden, lo que demuestra que este proceso, en los suelos estudiados, es independiente de la cantidad de sustrato disponible, y las variables de los suelos que más inciden en la tasa de oxidación de S corresponden a Ca, K y Na de intercambio, P Olsen y porcentaje de arena (sistema USDA).

RESUMEN

El azufre es un elemento importante en la nutrición de las plantas. Se evaluó la capacidad de oxidación de azufre (S) elemental de 30 suelos pertenecientes a cinco series de la zona centro-sur de Chile: Cauquenes (Ultic Paleustalf), Collipulli (Typic Haplohumult), Diguillín (Typic Dystrandept), Santa Bárbara (Thaptic Haploxerand) y San Carlos (Ultic Palexeralf). A las muestras de suelos humedecidas a un 75% de la capacidad de campo se les agregó una cantidad de S equivalente a 500 mg kg⁻¹ y se les midió el contenido de S-SO₄ después de incubación a 25 °C por 10, 20 y 30 días. Como control se usaron muestras sin S. La oxidación del S se ajustó mejor a una cinética de orden cero, variando k₀ en los diferentes suelos entre 0,02 y 4,98 mg kg⁻¹

día⁻¹. Las tasas de oxidación promedio de S en las series fueron 3,44; 2,85; 1,35; 0,61 y 0,45 mg S-SO₄ kg⁻¹ día⁻¹, en los suelos Diguillín, San Carlos, Cauquenes, Santa Bárbara y Collipulli, respectivamente. El análisis de regresión múltiple stepwise (r²=0,87) señaló que las propiedades de los suelos, predictoras de la tasa de oxidación de S (T) son Na, K y Ca de intercambio, P Olsen y porcentaje de arena (sistema USDA), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T = -3,69 + 2,13Na + 1,45K + 0,38Ca + 0,038P\text{-Olsen} + 0,039\text{Arena}$$

Palabras claves: azufre, oxidación, suelo.

LITERATURA CITADA

- ARAOS, J. 1967. Estudio de deficiencias nutritivas en muestras superficiales de suelos de Ñuble. *Agricultura Técnica (Chile)* 27: 15-20.
- BARAHONA, J. 1959. Ensayos de abonos con S y fósforo en praderas. *Chile. Simiente* 29: 16.
- BARDSLEY, C. AND LANCASTER, J. 1965. Sulfur. En: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological properties.* American Society of Agronomy, Inc. Publisher. Madison, Wisconsin, USA. pp. 1102-1116.
- BEAR, F. 1965. *Chemistry of the soil* (2nd. ed.). Reinhold Publishing Corporation. New York. USA. pp. 134-279.
- BURKE, M.; GORHAM, E. AND PRATT, D. 1974. Distribution of purple photosynthetic bacteria in wetland and woodland habitats of central and northern Minnesota. *J. Bacteriol.* 117: 826-833.
- CIFUENTES, F.R. AND LINDEMANN, W.C. 1993. Organic matter stimulation of elemental sulfur oxidation in a calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 727-731.
- CHAPMAN, S. 1990. Thiobacillus populations in some agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* 22: 479-482.
- DENG, S. AND DICK, R.P. 1990. Sulfur oxidation and Rhodanese activity in soils. *Soil Sci.* 150: 552-560.
- DEVAUD, E. 1970. Estudio de la disponibilidad del S y su interacción con N, P y K en Andisoles de Ñuble. Tesis de grado. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Chillán, Chile. 90 p.
- DONER, H.E.; VOLZ, M.G. AND McLAREN, A.D. 1974. Column studies of denitrification in soil. *Soil Biol. Biochem.* 6: 341-346.

- FLIERMANS, C. AND BROCK, T.D. 1972. Ecology of sulfur-oxidizing bacteria in hot acid soils. *J. Bacteriol.* 111: 343-350.
- GRAYSTON, S.J. AND GERMIDA, J.J. 1990. Influence of crop rhizospheres on populations and activity of heterotrophic sulfur-oxidizing microorganisms. *Soil Biol. Biochem.* 22: 457-463.
- GRAYSTON, S.J. AND WAINWRIGHT, M. 1987. Fungal sulphur oxidation: Effect of carbon source and growth stimulation by thiosulfate. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 88: 213-219.
- GUPTA, V.V.R.S.; LAWRENCE, J.R. AND GERMIDA, J.J. 1988. Impact of elemental sulfur fertilization on agricultural soils. I. Effects on microbial biomass and enzyme activities. *Can. J. Soil. Sci.* 68: 463-473.
- JANZEN, H. AND BETTANY, J. 1987a. Measurement of sulfur oxidation in soils. *Soil Sci.* 143: 444-452.
- JANZEN, H. AND BETTANY, J. 1987b. The effect of temperature and water potential on sulfur oxidation in soils. *Soil Sci.* 144: 81-89.
- LAWRENCE, J.R. AND GERMIDA, J.J. 1988. Relationship between microbial biomass and elemental sulfur oxidation in agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 672-677.
- LAKANEN, E. AND ERVIO, R. 1971. A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soils. *Acta Agr. Fenn.* 123: 223-232.
- LETELIER, E. 1969. Experimentación sobre azufre y otros macronutrientes de remolacha. *Boletín Remolachero. IANSA. Chile.* 44: 4-5.
- LI, P. AND CALDWELL, A. 1966. The oxidation of elemental sulfur in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 370-372.
- LINDEMANN, W.; ABURTO, J.J.; HAFFNER, W.M. AND BONO, A.A. 1991. Effect of sulfur source on sulfur oxidation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 85-90.
- 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 and Soil* 86: 151-172.
- MCCASKILL, M. AND BLAIR, G.J. 1987. Particle size and soil texture effects on elemental sulfur oxidation. *Agron. J.* 79: 1079-1083.
- NOR, Y. AND TABATABAI, M. 1977. Oxidation of elemental sulfur in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 736-741.
- OPAZO, J. 1982. Disponibilidad de azufre en suelos de la Región de los Lagos. Tesis de Magister Scientiae. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía. Santiago, Chile. 140 p.
- PICHEL, J. AND DICK, W. 1991. Sulfur, Iron and solid phase transformations during the biological oxidation of pyritic mine spoil. *Soil Biol. Biochem.* 23: 101-107.
- REHM, G. AND CALDWELL, A. 1969. Relationship of soil texture to sulfur oxidation. *Agron. J.* 61: 333-334.
- ROBARGE, W.P.; EDWARDS, A. AND JOHNSON, B. 1983. Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 14: 1207-1215.
- ROJAS, O. 1973. Investigación en fertilidad de suelos. Cultivos de la Remolacha Azucarera en Chile. IANSA. Chile. 5: 83-91.

- SCHENKEL, G.; BAHERLE, P.; FLOODY, T. Y GALLARDO, M. 1971a. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. IV. Macronutrientes, provincia de Malleco. *Agricultura Técnica (Chile)* 31: 129-135.
- SCHENKEL, G.; BAHERLE, P.; FLOODY, T. Y GALLARDO, 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 GALLARDO, 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 GALLARDO, M. 1972b. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. X. Macronutrientes, provincia de Osorno. *Agricultura Técnica (Chile)* 32: 99-109.
- SCHENKEL, G.; BAHERLE, P.; FLOODY, T. Y GALLARDO, 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, Est. Exp. Remehue. Osorno, Chile. *Boletín Divulgativo* N° 74.
- SKIBA, U. AND WAINWRIGHT, M. 1984. Oxidation of elemental sulphur in coastal-dune sands and soils. *Plant and 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.
- TISDALE, S. AND NELSON, W. 1975. Soil fertility and fertilizers. (3th. Ed.). Macmillan Publishing. New York, USA. pp. 83-297.
- 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.
- VISHNIAC, W. AND SANTER, M. 1957. The Thiobacilli. *Bacteriol. Rev.* 21: 195-209.
- VOGEL, O. 1959. Problemas de carencias minerales en betarragas. Ensayos de abonos con seis elementos. Chile. *Simiente*. 29: 31-36.
- WAINWRIGHT, M. 1984. Sulfur oxidation in soils. *Adv. Agron.* 37: 349-381.
- WAINWRIGHT, M.; NEVELL W. AND GRAYSTON, S. 1986. Effects of organic matter on sulphur oxidation in soil and influence of sulphur oxidation on soil nitrification. *Plant and Soil*. 96: 369-376.