

**CAMBIOS DE FERTILIDAD OBSERVADOS EN PERFILES DE SUELOS CHILENOS.
II. CON FERTILIZACION FOSFATADA EN UN SUELO VILCUN (TYPIC DYSTRANDEPT)
SEMBRADO CON ALFALFA¹**

**Fertility changes detected in Chilean soil profiles.
II. With phosphate fertilization, in a Vilcun soil (Typic Dystrandep) seeded with alfalfa**

**Gotardo Schenkel S.²
Pedro Baherle V.³**

SUMMARY

In order to identify the soil properties affected by repeated fertilizations, P-Olsen, P fixation, Al-Morgan, pH, organic matter, N-total, C/N ratio, and K-extractable were determined in soil samples taken every 5 cm, down to 40 cm, and every 10 cm, from there down to 90 cm. The soil corresponded to one of the replications of a field trial carried on by G. Müller and A. Bustamante, at Carillanca Experiment Station, INIA-Temuco, with the objective of studying the response of alfalfa to different N, P and K fertilization treatments, repeated during 3 years.

Phosphate fertilization modified the levels of P-Olsen and Al-Morgan in the soil profile. The largest changes occurred with the highest doses applied (1,200 kg/ha P₂O₅, accumulated in 3 years), though these changes were also detected with 100 kg/ha/year. The lack of changes with 150 kg/ha K and 48 kg/ha N, accumulated in 3 years, can be explained by the limited doses applied.

Phosphate fertilization reduced the amount of Al-Morgan in all the soil profile, down to 90 cm; but the enrichment with P-Olsen was limited to the upper 25 cm of the soil profile. It is not known if these changes occurred simultaneously or if one preceded the other.

Highest alfalfa yields were obtained with the largest phosphate applications (400 kg/ha/year, during 3 years); soil acidity was not increased, but a drastic reduction of the Al-Morgan level was observed, in particular in the superficial horizon. Consequently, soil pH is not an adequate criterion to be associated with productivity; the level of Al-Morgan gives a better indication of soil productivity.

INTRODUCCION

En el suelo Vilcún se prevé una buena respuesta a la fertilización fosfatada, con el diagrama de fertilidad (29). Parece improbable que el buen desarrollo de la alfalfa, alcanzado en los mejores tratamientos con abonos fosfatados, no se asocie con alguna transformación nutritiva beneficiosa en el perfil de suelo. En este

artículo se pretende identificar algunos de estos cambios. Por el contrario, se cree difícil que los tratamientos potásicos o nitrogenados causen una fertilidad diferencial en el perfil, porque sus dosis acumuladas son pequeñas, lo que también se intentará observar.

La interpretación adecuada de los resultados encontrados en esta serie de estudios exige una revisión bibliográfica sobre aluminio y fijación de fósforo y su disponibilidad, lo que se efectuó en la I Parte (28).

MATERIALES Y METODOS

En la ejecución de este trabajo se emplea:

¹ Recepción de originales: 10 de marzo de 1982.

² Casilla 244, Osorno, Chile.

³ Estación Experimental La Platina (INIA), Casilla 5427, Santiago, Chile.

Ensayo de campo: Diseñado y ejecutado por G. Müller y M. Bustamante (no publicado), para conocer la respuesta de la alfalfa (*Medicago sativa* cv. Alta Franconia) a distintos tratamientos de fertilización aplicados anualmente. Se probó superfosfato triple en 4 dosis (0–100–200 y 400 kg P₂O₅/ha); sulfato de potasio en dos dosis (0 y 50 kg K₂O/ha) y salitre sódico en dos dosis (0 y 16 kg N/ha). A excepción de la primera abonadura, agregada en el momento de la siembra (localizada junto con la semilla), los fertilizantes fueron aplicados al voleo en primavera.

A través de los tres años que se controló el ensayo, se comprobó respuesta a la fertilización fosfatada, pero no así a la nitrogenada o potásica, como se ve en el Cuadro 1. Bajo una abonadura determinada, se consideran todos los tratamientos que en su fórmula de fertilización llevan dicho nutriente y en la cantidad indicada, independientemente de los restantes abonos que le acompañen.

Suelo: La alfalfa se sembró el 21 de septiembre de 1963, en la Estación Experimental Carillanca, sobre un suelo derivado de ceniza volcánica, perteneciente a la serie Vilcún. Se trata de un "suelo aluvial que ocupa posición baja o intermedia, con una topografía plana, uniforme o ligeramente ondulada, en planos depositacionales y terrazas recientes; compuesto de limo sobre gravas con matriz arenosa de composición mixta" (10). Estos suelos son el producto de la redepósito que sufren las cenizas volcánicas por el agua, con un substratum, que puede ser de arenas y gravas volcánicas, ubicado a los 75 cm. Pueden clasificarse como "Typic Dystrandept" (37).

Extracción de muestras de suelo: Para conocer el efecto que puede causar la abonadura sobre el perfil del suelo, se elige la cuarta repetición del ensayo de campo. Paralelo al eje de esta repetición y a un metro del borde externo, se excava una zanja de 1,30 m de profundidad, de modo que permita una fácil extracción de las muestras, sin peligro de contaminación. Estas se retiran el 22 de febrero de 1967 de las estratas respectivas, mediante espátula y se guardan en bolsas plásticas, previamente identificadas, hasta el momento de su secado. Una muestra se extrae cada 5 cm, hasta alcanzar 40 cm de profundidad. A continuación y hasta llegar a 90 cm, se recoge una cada 10 cm. Las 20 parcelas de la cuarta repetición del ensayo de campo se someten a la misma operación.

Análisis de las muestras de suelo: El suelo, tamizado por 2 mm, se guarda en frascos plásticos, con cierre hermético, hasta el momento de ser requerido para las correspondientes determinaciones. Se usaron los siguientes procedimientos para los análisis:

- pH (KCl); Suspensión del suelo en una solución normal de KCl en una relación 1: 2,5. La lectura se efectúa con electrodo combinado de vidrio y calomelano, después de esperar cuatro horas con agitación ocasional.
- N total: Técnica de Kjeldahl, con mercurio como catalizador; procedimiento de Forster, citado por Thun (36).
- Materia orgánica: Acción de la mezcla crómica-sulfúrica sobre el suelo. Se aplica el método de Springer y Klee, citado por Thun (36).

CUADRO 1. Rendimientos promedios (ton/ha mat. verde) de alfalfa con distinta fertilización.
Suelo: Vilcún¹

TABLE 1. Average yields of alfalfa (ton/ha green matter) with different fertilization treatments. Soil series: Vilcun

FECHA DE CORTE	TRATAMIENTOS DE FERTILIZACION ANUAL (kg/ha)							
	FOSFORO (P ₂ O ₅)				POTASIO (K ₂ O)		NITROGENO (N)	
	0	100	200	400	0	50	0	16
20.04.64	2,71	2,95	2,99	4,46	3,00	3,69	3,17	3,73
04.12.64	19,95	22,51	23,72	27,10	22,69	24,16	22,72	25,49
21.01.65	19,76	22,84	21,92	23,43	21,84	22,21	20,43	22,59
16.03.65	6,12	7,32	7,56	8,87	7,35	7,65	7,26	8,29
27.12.65	19,93	20,21	18,71	20,20	19,55	20,08	19,66	20,19
09.02.66	13,96	16,15	15,45	18,06	15,49	16,53	15,49	17,58

¹ Datos suministrados por el Sr. Mario Bustamante.

- P—Olsen: En general se sigue la técnica de extracción con bicarbonato de sodio, solución 0,5 Normal, pero con las modificaciones mencionadas por Schenkel y otros (30).
- Al—Morgan: Se determina por colorimetría con aluminon en el extracto de Morgan, por el procedimiento descrito por Baherle (1), pero enrasando a 100 ml en vez de 50 ml.
- K: Se mide con fotómetro de llama Zeiss la cantidad de K extraída con una solución de HCl N/2, al usar una relación suelo/extractante 1/10 y un tiempo de agitación de 60 minutos.
- Fijación de P: 10 g de suelo se agitan durante dos horas con 100 ml de una solución de KH_2PO_4 que contiene 1,054 g/litro. Después de 48 horas de reposo, se mide el P que permanece en la solución sobrenadante, mediante reactivo vanadomolibdico (5).
- C/N: Esta relación se obtiene por cálculo directo, a partir de las cantidades de carbono y nitrógeno determinadas previamente.
- Secado de las muestras: El proceso de secado modifica algunas propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas (9, 27 y 34). No obstante, como la recolección de suelo se hizo en el verano, cuando las muestras contenían poca humedad, se prefirió trabajar con suelo seco al aire, eliminando el agua a la sombra, a una temperatura inferior a 25°C .

RESULTADOS Y DISCUSION

Por razones de claridad se entregan en este trabajo únicamente los resultados obtenidos para tres tratamientos de aplicación anual de fosfatos: 0, 100 y 400 kg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$. Las dosis 0 y 400 se incluyen por representar las condiciones experimentales extremas, mientras la dosis 100 corresponde a una cantidad de abono fosfatado agregada corrientemente por los agricultores en las praderas.

La extraordinaria influencia de las adiciones de fosfato sobre las cantidades de P—Olsen en las muestras superficiales se ve en la Figura 1 y el Cuadro 2. Análogamente se ilustra con claridad los cambios que produce el fosfato sobre los valores de Al—Morgan en todo el perfil. La adición anual de 400 kg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ durante tres años produce modificaciones manifiestas en el perfil del suelo, en un doble sentido:

- a) enriquecimiento de P—Olsen hasta 25 cm, cuya diferencia máxima respecto del testigo se ve en la superficie. Este resultado confirma las observaciones de Midgley (3), Ozanne y otros (21) y Spencer (3). En otros términos, se comprueba movilidad vertical de fósforo sobre este suelo "trumao" (2,

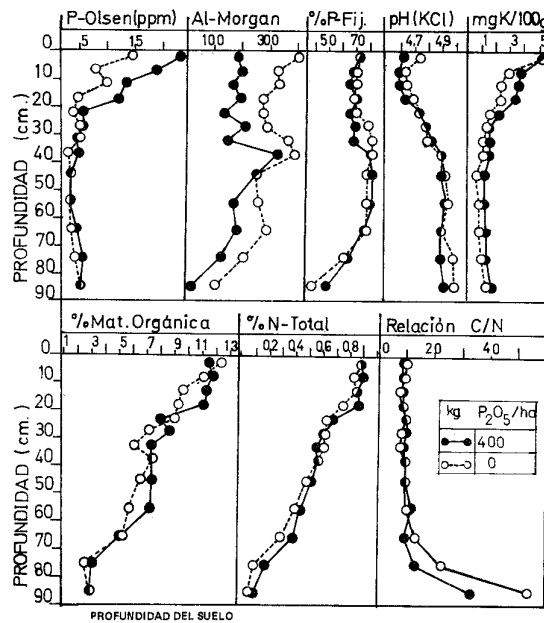


FIGURA 1. Cambios en el suelo con abonadura fosfatada.
FIGURE 1. Soil changes due to phosphate applications.

10 y 37), no obstante poseer elevada capacidad fijadora de P;

- b) disminución del Al—Morgan hasta 90 cm. Este resultado es muy interesante, particularmente cuando se toma en cuenta que se trata de un suelo que no presenta deficiencia de calcio, ni respuesta a la cal (29), porque tal función se atribuye generalmente a las enmiendas. Moschler y otros (18) encuentran estrecha correlación entre la disminución del Al intercambiable en el suelo y el aumento de rendimiento de la alfalfa y su mayor longevidad.

Si la cantidad extraída con la solución de Morgan representa una fracción activa de este elemento —lo que parece probable (1 y 27)— habría cierta desintoxicación del Al (28), más allá de la zona hasta la cual descendió el P. Oportuno es preguntarse como se produjo este mejoramiento. Atendiendo a la presencia abundante de raíces de alfalfa en todo el perfil, hasta la profundidad en estudio se supone que tales alteraciones del Al en el suelo se pueden producir con o sin la participación de la propia alfalfa. La participación de la planta podría implicar dos mecanismos posibles:

1. mayor absorción de Al (tolerancia), como consecuencia de la mayor producción de materia seca (y raíces) en los tratamientos con P elevado;
2. cierta conversión del Al tóxico en formas menos activas, con eventual participación de compuestos orgánicos.

CUADRO 2. Cambios producidos en el perfil del suelo por la fertilización fosfatada

TABLE 2. Changes induced to the soil profile by phosphate fertilization

Profundidad (cm)	DOSIS DE FERTILIZACION FOSFATADA (kg P ₂ O ₅ /ha/año)																
	0			100			400			0			100			400	
	P - Olsen (ppm)			pH (KCl)			% Mat. Org.			Al-Morgan (ppm)							
0 - 5	14,7	18	23,3	4,75	4,70	4,63	12,30	12,40	11,4	300,0	272,5	192,3					
5 - 10	7,8	15,5	18,9	4,65	4,70	4,60	11,00	12,75	11,7	266,5	282,5	199,0					
10 - 15	9,9	12,9	13,2	4,65	4,75	4,60	9,60	11,85	11,2	265,5	240,0	182,1					
15 - 20	4,7	8,6	12,3	4,70	4,75	4,63	9,20	11,50	11,0	237,5	244,0	198,3					
20 - 25	4,0	5,8	5,9	4,75	4,75	4,73	8,90	11,75	7,9	237,3	285,0	167,5					
25 - 30	5,4	4,3	5,7	4,80	4,80	4,80	7,05	8,15	8,5	245,0	271,5	205,0					
30 - 35	5,4	4,5	5,0	4,80	4,85	4,83	6,05	9,65	7,3	282,5	266,5	274,0					
35 - 40	3,4	4,2	5,0	4,90	4,90	4,90	7,40	9,35	7,2	292,0	294,0	265,5					
40 - 50	3,7	5,2	3,7	4,90	4,90	4,93	6,55	8,70	7,4	224,5	246,8	228,3					
50 - 60	3,6	4,9	4,2	4,95	5,00	4,93	5,70	8,05	7,2	229,0	202,8	185,2					
60 - 70	4,0	5,6	5,1	4,90	5,05	4,90	5,15	5,55	5,0	244,3	282,5	189,7					
70 - 80	4,7	7,1	5,9	5,00	4,85	4,90	2,55	4,15	3,1	200,5	128,0	162,2					
80 - 90	5,1	5,0	5,7	5,00	4,95	4,93	2,95	3,95	2,9	151,5	123,0	113,0					
	K (mg/100 g)			% P-fijación			% N-total			C/N							
0 - 5	5,3	4,5	5,3	71,1	69,3	74,0	0,8424	0,7917	0,8461	8,32	8,93	7,68					
5 - 10	2,8	3,3	3,7	69,5	68,7	67,3	0,7869	0,8428	0,8463	7,97	8,62	7,88					
10 - 15	2,3	3,3	3,5	69,3	62,2	64,5	0,8027	0,8658	0,8061	6,82	7,80	7,92					
15 - 20	2,3	2,8	3,3	67,8	72,3	68,8	0,7090	0,7741	0,8172	7,40	8,47	7,67					
20 - 25	1,5	2,3	2,2	69,5	74,0	66,0	0,5875	0,7133	0,6257	8,63	9,39	7,20					
25 - 30	1,3	1,8	1,5	76,8	71,0	69,3	0,5824	0,6246	0,5786	6,90	7,44	8,37					
30 - 35	1,0	1,3	1,5	80,8	76,5	67,3	0,5623	0,5785	0,5208	6,13	9,51	7,99					
35 - 40	1,0	1,0	1,5	81,0	82,0	79,9	0,5142	0,4986	0,5031	8,20	10,69	8,16					
40 - 50	0,5	1,0	1,2	76,5	79,3	80,0	0,4589	0,5304	0,4784	8,14	9,35	8,82					
50 - 60	0,8	0,8	1,0	77,0	81,8	79,0	0,3647	0,4505	0,3982	8,91	10,19	10,31					
60 - 70	0,8	1,0	1,2	76,3	81,8	75,9	0,2581	0,2977	0,3458	11,37	10,63	8,24					
70 - 80	1,0	1,5	1,3	60,1	49,8	62,8	0,0650	0,0910	0,1543	21,48	26,00	11,45					
80 - 90	1,3	2,0	1,8	37,5	43,4	49,1	0,0254	0,3970	0,0520	52,03	56,71	31,79					

Las modificaciones constatadas para P-Olsen y Al-Morgan con la dosis 400 kg P₂O₅/ha/año, también se manifiestan cuando se examina lo que ocurre en el tratamiento 100 kg/ha/año. Hay un enriquecimiento de P-Olsen hasta 25 cm, intermedio al comportamiento observado con las dos dosis antes mencionadas, y sólo una escasa disminución del Al-Morgan -aunque en todo el perfil- semejando más a los valores medidos para el tratamiento testigo.

Este trabajo no da ninguna información sobre la secuencia de estos cambios; esto es, si ambas modificaciones son simultáneas o una de ellas precede a la otra.

Los resultados anteriores confirman la afirmación hecha por Smeck y Runge (32), cuando sostienen que, aunque el P del suelo puede considerarse esencialmente inmóvil durante intervalos de tiempo cortos, se pueden trasladar grandes cantidades de éste, tanto vertical como horizontalmente, durante los largos períodos envueltos en el desarrollo de un suelo.

Además, conviene recordar la similitud de estos resultados con los de Boawn y Rasmussen (6). Para una dosis acumulada de 1.344 kg P/ha, determinan 98, 31 y 5,3 ppm P-Olsen en las respectivas profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm, al cabo de 5 años. Más aún, dejan constancia que la diferencia observada entre los valores de P analizados para muestras recogidas en dos años consecutivos, reflejan una considerable movilidad vertical, por el enriquecimiento que presentan las muestras sub-superficiales. Lamentablemente, dudan de la validez de sus resultados, por la posible contaminación que pudo causar el empleo de un barrenador. Semejante situación no ocurrió en la experiencia del trabajo en discusión.

Todavía más, traslocación de P en el perfil también se ha observado por otros investigadores, mencionados en la I Parte (28). Woodhouse (38) advierte que elevadas dosis de N (672 kg/ha), aplicadas junto al fosfato, provocan una pronunciada disminución de P asimilable y de su movilidad vertical, especialmente a mayores profundidades.

Humphreys y Pritchett (15) vinculan la capacidad tampón y de sorción de P con su movilidad en el perfil, encontrando que cuando aquéllas aumentan, la mayor parte del P agregado se retiene en los horizontes superficiales en una forma poco asimilable. Una función importante incumbe a la materia orgánica (25).

La fertilización fosfatada no causa cambio alguno, o sólo muy ligero, sobre las restantes características del suelo ilustradas (Figura 1 y Cuadro 2); vale decir: fijación de P, pH (KCl), K aprovechable, materia orgánica, N total y relación C/N. Sobre todo llama la atención que la fertilización fosfatada no tenga acción alguna sobre la adsorción de P (% de fijación de P), especialmente cuando se sostiene que tanto la toxicidad de Al como la fijación de P limitan el crecimiento de las plantas, con variación en la importancia relativa de estos fenómenos (23 y 24).

Parece más acertado vincular la toxicidad del Al con una escasa disponibilidad de P, constituyéndose ambos factores en determinantes de la fertilidad del suelo para el crecimiento de la alfalfa en el suelo Vilcún. Este criterio se ha sustentado por algunos investigadores, citados en la Revisión de Literatura, efectuada previamente (28). Por su intermedio, se puede explicar la falta de asociación encontrada entre la fijación de P y fertilización fosfatada, rendimiento de alfalfa, P disponible y Al—Morgan.

Debe insistirse en la falta de una relación entre la reacción del suelo y los cambios en la cantidad de Al—Morgan con la fertilización fosfatada. Generalmente se estima que una disminución de la cantidad de Al tóxico para las plantas se logra cuando aumenta el pH.

Por lo demás, hay evidencia que a veces el encalado perjudica la fertilidad de suelos pobres en P, aunque pudiera mejorar la situación del Al, especialmente cuando se trata de suelos ricos en materia orgánica (20 y 35). En otros casos existiría un efecto de compensación mutua entre la cal y el fosfato, detectándose aumentos de rendimiento debido a las aplicaciones de cal —aumento de pH— hasta el punto en el cual el Al intercambiable se inmoviliza (31).

Por lo tanto, la disminución de Al—activo (Morgan) no se vincula necesariamente con cambios en la reacción del suelo. Este antecedente constituye un nuevo argumento para desestimar la utilidad del pH en el diagnóstico de fertilidad de los suelos trumaos (27 y 34). Además, es oportuno recalcar que las adiciones de abono fosfatado al suelo, durante tres años como superfosfato triple en dosis de 400 kg P₂O₅/ha, anualmente, no han intensificado la acidez del suelo.

Esta invariabilidad de la reacción del suelo frente a las aplicaciones de abonos fosfatados puede hacerse extensiva a los fertilizantes nitrogenados y potásicos. Así lo constatan Pierre y otros (22), cuando afirman que ni las aplicaciones de KCl o de CaH₄(PO₄)₂ tienen efecto apreciable en el pH de los suelos de acidez media, si las sales solubles se eliminan por lixiviación. Además, el movimiento descendente de la acidez por el uso de fertilizantes nitrogenados fue lento, pues en su trabajo, 2.600 kg N/ha, aplicados durante 15 años a la forma de NH₄NO₃, no muestran incremento de la acidez del suelo bajo los 25 cm.

Para apreciar la influencia que ejerce una fertilización nitrogenada y potásica sobre las características del suelo, se promedian los valores analíticos de los dos tratamientos siguientes: con dicha fertilización y sin ella. El Cuadro 3, y la correspondiente Figura 2, muestran la escasa —si alguna— influencia de la fertilización (N + K) sobre K aprovechable, relación C/N o N total del suelo.

En lo que al K concierne, parecería justificada la falta de diferencias en el perfil, por cuanto la dosis considerada es muy baja. Así se desprende de los trabajos de Pratt y Goulber, citados por Nunson y Nelson (19). Los autores mencionados concluyen que, con dosis de hasta 400 lb/acre/año, aplicadas durante 28 años, se puede asumir que todo el K permanece en los primeros dos pies (60 cm superficiales). Del mismo modo, Boswell y Anderson (7) estiman que una aplicación

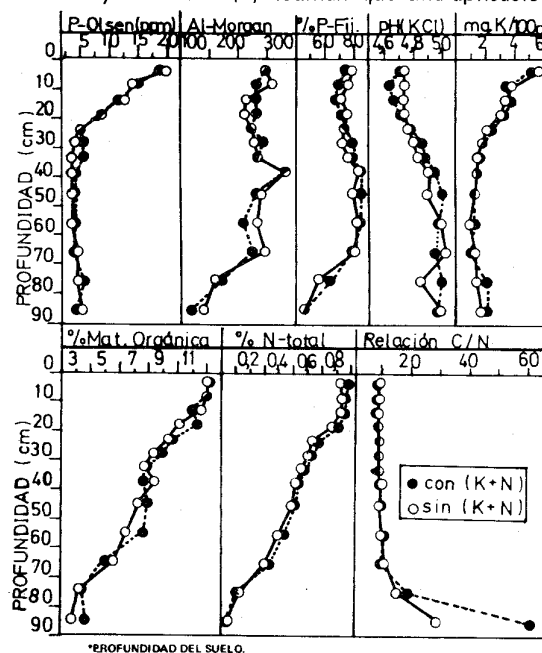


FIGURA 2. Cambios en el suelo con abonadura nitrogenada + potásica.

FIGURA 2. Soil changes due to nitrogen + potassium applications.

CUADRO 3. Efecto de la fertilización K y N sobre el perfil del suelo (16 kg N + 50 kg K₂O/ha/año)TABLE 3. Effect of K + N fertilization on the soil profile (16 kg N + 50 kg K₂O/ha/year)

Profundidad (cm)	P-Olsen (ppm)		%o Mat. Org.		Al-Morgan (ppm)		%o P-fijación		K(mg/100 g)		pH (KCl)		%o N total		C/N	
	sin	con	sin	con	sin	con	sin	con	sin	con	sin	con	sin	con	sin	con
0 - 5	20,0	18,8	11,8	12,0	244,0	247,5	74,2	70,0	5,3	4,8	4,70	4,68	0,7947	0,8556	8,46	7,99
5 - 10	14,2	15,1	11,8	11,8	258,3	230,0	71,6	65,8	3,5	3,1	4,70	4,60	0,8175	0,8362	8,23	8,04
10 - 15	12,6	11,8	11,4	10,8	213,7	229,1	67,1	63,8	3,0	3,4	4,70	4,63	0,8033	0,8385	8,09	7,34
15 - 20	8,9	9,2	9,9	11,2	211,0	231,2	71,8	67,8	2,7	3,0	4,70	4,68	0,7435	0,7969	8,11	8,01
20 - 25	5,1	5,5	9,2	9,5	222,5	220,0	70,0	68,8	1,8	2,1	4,73	4,75	0,6143	0,6588	8,54	8,22
25 - 30	4,4	5,8	8,2	8,8	227,0	241,8	68,2	74,7	1,5	1,5	4,77	4,83	0,5742	0,6077	8,14	8,25
30 - 35	3,8	5,8	7,6	7,7	232,0	231,0	72,8	74,5	1,2	1,4	4,80	4,85	0,5373	0,5580	8,06	7,87
35 - 40	3,8	4,7	8,3	7,5	284,3	278,7	79,6	81,8	1,2	1,2	4,87	4,93	0,4996	0,5080	9,47	8,42
40 - 50	3,8	4,4	7,1	7,8	236,5	229,5	76,0	80,9	1,0	0,9	4,87	4,98	0,4728	0,4989	8,56	8,91
50 - 60	3,9	4,5	6,2	7,5	231,2	206,4	78,8	79,5	0,7	1,0	4,97	4,95	0,3762	0,4241	9,55	10,08
60 - 70	5,0	4,3	5,5	4,9	243,5	222,8	77,8	77,6	0,8	1,1	5,00	4,93	0,2994	0,3127	10,47	8,93
70 - 80	5,0	6,2	3,1	3,3	157,0	168,8	53,3	62,1	1,2	1,9	4,83	4,98	0,1203	0,1027	14,63	18,14
80 - 90	5,7	4,9	2,7	3,6	138,0	118,3	44,1	44,2	1,5	1,9	4,97	4,95	0,0542	0,0309	28,40	66,40

normal de K no se lixivia más allá de la zona radicular, pues con dosis de 1.900 kg K/ha, la mayor acumulación de potasio se mantuvo en la estrata 15-30 cm y no hubo movimiento del potasio más allá de 61 cm. La característica del suelo para retener potasio depende de su capacidad de intercambio de cationes, propiedad de la cual son principales responsables las fracciones arcilla y la materia orgánica (19), retardando el movimiento del potasio. Además, hay una menor movilidad del potasio cuando los suelos tienen una cubierta vegetal (19).

Generalmente, se estima que la recuperación del N aplicado es mayor en los suelos cubiertos que en los desnudos, aunque hay quienes determinan escasa diferencia (33). Sin embargo, Boswell y Anderson (8) indican que el N aplicado se lixivia más de suelos cubiertos con vegetales, llegando a observar aún un cierto movimiento ascendente del nitrógeno durante los meses de verano, cuando la evaporación excede a la precipitación. Por esta razón, puede considerarse aprovechable el N nítrico del sub-suelo (11), aún en los casos que se encuentre a una distancia superior a 130 cm de la superficie (14). Precisamente esta condición se dió en el caso de la presente experiencia, porque la napa de agua freática se encontraba en el verano a una distancia próxima a 180 cm y las raíces de alfalfa llegaban hasta ella. Su discusión se dejará para otro trabajo.

De las figuras 1 y 2 se desprende que la relación C/N se mantiene constante hasta 70 cm de profundidad, esto es, en todo el espesor de suelo que contiene cenizas volcánicas. La constancia de dicha relación es una consecuencia de la disminución de N total que acompaña al gradual empobrecimiento en materia orgánica, a medida que se penetra en el perfil del suelo. Las reservas de N radican en la fracción orgánica. El aumento espectacular que se produce en la relación C/N más

allá de 70 cm, es la resultante del cambio pedogenético. Refleja una escasa presencia de material amorfo (alofana) y, en todo caso, es independiente de la fertilización nitrogenada, fosfatada o potásica. El aumento de los valores C/N puede estar seriamente afectado por la inconveniencia de los métodos de determinación de N total y de C orgánico. Para cuantificar las pequeñas cantidades de ambos elementos, habría sido más exacto trabajar con arrastre de vapor y con combustión seca, respectivamente (16).

CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se desprenden del ensayo de campo sembrado con alfalfa, después de mantenerse por tres años en el suelo Vilcún:

1. La fertilización fosfatada modifica las cantidades de Al activo (Morgan) y la disponibilidad de P (Olsen) en el perfil. Mientras el empobrecimiento en Al se produce en todo el perfil (hasta 90 cm), en los tratamientos con fertilización fosfatada, caracterizados por un mejor desarrollo de la alfalfa, se constata una acción menos profunda (hasta 25 cm) con el enriquecimiento en P disponible. Se desconoce si ambas modificaciones ocurren simultáneamente, o si una de ellas antecede a la otra.
2. La abundancia de raíces hasta la profundidad en estudio, insinúa la participación de la alfalfa en el efecto anterior, por cuanto, en los tratamientos fertilizados con fosfato, ella: a) podría estar capacitada para tolerar una mayor absorción de Al, con el consiguiente empobrecimiento en Al-Morgan en todo el perfil, más allá de la zona de enriquecimiento superficial en P-Olsen; b) contribuiría a la conversión del Al a formas menos activas, con la posible participación de compuestos orgánicos; c) las pequeñas cantidades de P disponible que pudieran traslocarse en el suelo a

- profundidades mayores de 25 cm, estarían expuestas a una inmediata absorción por las raíces de alfalfa ahí situadas. Habría un enriquecimiento sub—superficial en fósforo disponible, sólo cuando se apliquen mayores cantidades de fertilizante fosfatado en la superficie del perfil.
- Hay una movilidad vertical apreciable del P aplicado en la superficie del suelo, independientemente de la propiedad intensa de fijación que le caracteriza. Por consiguiente, debe considerarse esencialmente inmóvil al P del suelo en intervalos de tiempo cortos, lo cual no excluye la traslocación vertical, y tal vez horizontal, en períodos largos, como lo sostienen Sneek y Runge (32) y Boawn y Rasmussen (6).
 - Las aplicaciones acumuladas de 300 y 1.200 kg P₂O₅/ha enriquecen al suelo, hasta una profundidad de 25 cm, en P—Olsen, observándose la diferencia máxima con el testigo en los 5 cm superficiales, donde se incrementa desde 14,7 a 18 y 29,3 ppm P, respectivamente. También Boawn y Rasmussen (6) encuentran un enriquecimiento de P disponible en el horizonte 0—20 cm, con dosis acumuladas de 896 kg P/ha, el que se extiende hasta 60 cm de profundidad, después de 5 años, con una fertilización acumulada de 1.344 kg P/ha.
 - No se modifica la fijación de P ni la reacción del suelo como consecuencia de la fertilización acumulada de 1.200 kg P₂O₅/ha, en ninguna profundidad del perfil. Las aplicaciones de superfosfato triple no intensificaron la acidez del suelo en estudio.
 - Las fertilizaciones nitrogenadas y potásicas no tuvieron influencia sobre las propiedades estudiadas, esto es K intercambiable, materia orgánica, N—total, relación C/N, fijación de P, Al—Morgan, P—Olsen y reacción del suelo.
 - La falta de diferenciación entre los perfiles correspondientes a los tratamientos fertilizados con y sin potasio parece justificada, por cuanto debe considerarse baja la dosis acumulada de 150 kg K₂O/ha, durante los 3 años de experimentación. El movimiento de K se ha observado en otros suelos a dosis considerablemente superiores (7 y 19) y es siempre menor en suelos que tienen una cubierta vegetal (19), como sucede aquí con la alfalfa.
 - Con la profundidad se determina un gradual empobrecimiento del suelo en su contenido de materia orgánica, disminuyendo el N en forma similar desde su valor superficial de 0,86 ‰/N. La relación C/N se mantiene bastante constante hasta los 70 cm de profundidad, con un valor próximo a 9,0, generalmente aceptado en estos suelos (4, 13, 17 y 34).
 - La rápida y pronunciada fijación de P, que caracteriza al suelo Vilcún, debe atribuirse a la presencia de compuestos activos de Fe y, principalmente, Al (1, 24 y 26). Ellos inmovilizarán al P, acusando el suelo una pobreza en P disponible como una de sus propiedades principales, lo que se determina efectivamente con el diagrama de fertilidad (29).
 - La disminución de la cantidad de Al—Morgan observada en los tratamientos que recibieron P, con mayor producción de alfalfa, no alteró la reacción del suelo. Similares resultados han sido obtenidos en otros suelos (Moschler y otros, 18). No puede atribuirse, de ningún modo, a la enmienda calcárea, por no usarse en el ensayo de campo que sirve a este trabajo. La independencia de la reacción del suelo de la producción de alfalfa hace desestimar al pH del suelo como un criterio eficaz para el diagnóstico de la fertilidad de estos suelos; debería preferirse al Al activo (27).
 - El buen desarrollo de la alfalfa en los tratamientos más intensamente fertilizados con abono fosfatado, demuestra que este cultivo prospera bien en suelos chilenos ácidos (pH inferior a 5, en KCl), ricos en materia orgánica (alrededor de 11 ‰ hasta 25 cm de profundidad), siempre que sean ricos en P y tengan sólo una escasa presencia de Al activo, como lo observara Salgado (26). En suelos orgánicos, se cumpliría esta condición, aunque el Al total sea elevado, mientras sean pobres en Al activo (Evans y Kemprath, 12).
 - La pequeña cantidad de N aplicada anualmente (16 kg/ha) impide una correcta interpretación sobre su movilidad en el suelo. Debido a la gran importancia que tiene el N en la productividad de los suelos chilenos, sería conveniente contar con una experiencia de campo que ilustre sobre su movilidad en el perfil.

RESUMEN

Utilizando una repetición de un ensayo de campo, realizado por G. Müller y M. Bustamante (no publicado) en la Estación Experimental Carillanca (INIA, Temuco) con el objeto de estudiar la respuesta de la alfalfa a distintas fertilizaciones repetidas anualmente, los autores del presente trabajo se propusieron identificar las propiedades del suelo que son modificadas por la abonadura.

Para ello, se determinó: P—Olsen, fijación de P, Al—Morgan, pH, materia orgánica, N—total, relación C/N y K—extractable, en muestras de suelo extraídas cada 5 cm, hasta 40 cm de profundidad, y desde aquí, cada 10, hasta 90 cm.

Solamente los tratamientos con fertilización fosfatada, no así la abonadura potásica o nitrogenada en las cantidades empleadas, modificaron los contenidos de P—Olsen y Al—Morgan en el perfil del suelo. Los mayores cambios se observaron para 1.200 kg/ha de

P₂O₅, acumulados en tres años de aplicación a la alfalfa, aunque se manifiestan también con 100 kg/ha, aplicados anualmente. La influencia nula de la fertilización acumulada de 150 kg/ha de K₂O y 48 de N, en tres años, se explica por la escasa dosis utilizada.

La abonadura fosfatada produjo una disminución de las cantidades de Al—Morgan en todo el perfil, hasta 90 cm de profundidad; mientras que el enriquecimiento en P—Olsen se limitó al suelo superficial (hasta 25 cm). Se desconoce si ambos cambios fueron simultáneos, o uno de ellos precede al otro.

El mejor desarrollo de la alfalfa se observó con la mayor fertilización con superfosfato triple (400 kg/ha P₂O₅/año); no se acidificó el suelo, pero se redujo drásticamente el contenido de Al—Morgan, especialmente en el horizonte superficial. Así, la reacción del suelo resulta un criterio inadecuado para asociarlo con su productividad, siendo aventajado por el conocimiento de la cantidad de Al activo.

LITERATURA CITADA

1. BAHERLE, P. 1965. Influencia de la fertilización fosfatada sobre aluminio y hierro extractable. Chillán, Chile. Fac. de Agronomía, U. de Concepción. 89 p. (tesis mimeografiada).
2. BESOAIN, E. 1969. Mineralogía de las arcillas de los suelos de cenizas volcánicas de América Latina. En: IICA. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina, 6—23 julio, 1969. Turrialba, Costa Rica, Centro de Enseñanza e Investigación del IICA. p. B.1.1. — B.1.13.
3. BLACK, C. 1968. Soil—plant relationships. 2nd. ed. New York, John Wiley. 792 p.
4. BLASCO, M. 1969. Características químicas de los suelos volcánicos de Nariño, Colombia. 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.8.1. — B.8.10.
5. BLEIHOLDER, H. 1965. Factores que afectan la determinación de la fijación de fósforo en algunos suelos chilenos. Chillán, Chile, Fac. de Agronomía, U. de Concepción. 108 p. (tesis mimeografiada).
6. BOAWN, L. and P. RASMUSSEN. 1969. Phosphorus fertilization of hops. *Agronomy J.* 61(2): 211—214.
7. BOSWELL, F. and O. ANDERSON. 1968. Potassium movement in fallowed soils. *Agronomy J.* 60(6): 688—691.
8. BOSWELL, F. and O. ANDERSON. 1970. Nitrogen movement comparisons in cropped versus fallowed soils. *Agron. J.* 62(4): 499—503.
9. COLMET—DAAGE, F. 1969. Naturaleza de la fracción arcillosa de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas de Las Antillas, Ecuador y Nicaragua. 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.2.1.— B.2.12.
10. CHILE, CORFO. Instituto de Investigación de Recursos Naturales. 1964. Suelos; Descripciones. Proyecto Aerofotogramétrico CHILE/OEA/BID, 1964. Corporación de Fomento de la Producción. 381 p. (Publicación Nº 2).
11. DANCER, W. and L. PETERSON. 1969. Recovery of differentially placed Nitrate-Nitrogen in a silt loam soil by five crops. *Agron. J.* 61(6): 893—895.
12. EVANS, C. and KAMPRATH, E. 1970. Lime response as related to percent aluminum saturation, solution aluminum and organic matter content. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34(6): 893—896.
13. FASSBENDER, H.; L. MUELLER; y F. BALERDI. 1968. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II. Formas y su relación con las plantas. *Turrialba* 18(4): 333—347.

14. HERRON, G.; G. TERMAN; A. DREIER; and R. OLSON. 1968. Residual nitrate nitrogen in fertilized deep loess-derived soils. *Agron. J.* 60(5): 477-482.
15. HUMPHREYS, F. and W. PRITCHETT. 1971. Phosphorus adsorption and movement in some sandy forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35(3): 495-500.
16. JACKSON, M. 1962. *Soil chemical analysis*. Englewood Cliffs, New York, Prentice Hall. 498 p.
17. LOGANATHAN, P. and L. SWINDALE. 1969. The properties and genesis of four middle altitude Dystrandept volcanic ash soils from Mauna Kea, Hawaii. Reprinted from *Pacific Science* 23(2): 161-171.
18. MOSCHLER, W.; G. JONES; and G. THOMAS. 1960. Lime and soil acidity effects on alfalfa growth in a yellow-red podzolic soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24: 507-509.
19. MUNSON, R. and W. NELSON. 1963. Movement of applied potassium in soils. *J. Agric. Food Chem.* 11(3): 193-201.
20. OKRUSZCO, H.; G. WARREN; and G. WILCOX. 1962. Influence of calcium on phosphate availability in muck soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 26(1): 68-71.
21. OZANNE, P.; D. KIRTON; and T. SHAW. 1961. The loss of phosphorus from sandy soils. *Aust. J. Agric. Res.* 12: 409-423.
22. PIERRE, W.; J. WEBB; and W. SHRADER. 1971. Quantitative effects of nitrogen fertilizer on the development and downward movement of soil acidity in relation to level of fertilization and crop removal in a continuous corn cropping system. *Agron. J.* 63(2): 291-297.
23. REEVE, N. and M. SUMNER. 1970a. Lime requirement of Natal oxisols based on exchangeable aluminum. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34(4): 595-598.
24. REEVE, N. and M. SUMNER. 1970b. Effects of aluminum toxicity and phosphorus fixation on crop growth on oxisols in Natal. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34(2): 263-267.
25. RIEKIRK, R. 1971. The mobility of phosphorus, potassium and calcium in a forest soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35(2): 350-356.
26. SALGADO, M. 1963. Fracciones de fósforo presentes en cuatro suelos empleados para ensayos de maceteros en alfalfa, con dosis crecientes de fosfato. Chillán, Chile. Esc. de Agronomía, U. de Concepción. 169 p. (tesis mimeografiada).
27. SCHENKEL, G. 1969. Problemas de la acidez en suelos chilenos derivados 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.9.1.-B.9.11.
28. SCHENKEL, G. y P. BAHERLE. 1982. Cambios de fertilidad observados en perfiles de suelos chilenos. I. Antecedentes. *Agricultura Técnica (Chile)* 43(1): 39-46.
29. SCHENKEL, G.; P. BAHERLE; T. FLOODY y M. GAJARDO. 1971. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. VI. Macronutrientes, provincia de Cautín. *Agricultura Técnica (Chile)* 31(4): 169-181.
30. 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.
31. SHOOP, G.; C. BROOKS; R. BLASER; and G. THOMAS. 1961. Differential responses of grasses and legumes to liming and phosphorus fertilization. *Agron. J.* 53: 111-115.
32. SMECK, N. and E. RUNGE. 1971. Phosphorus availability and redistribution in relation to profile development in an Illinois landscape segment. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35(6): 952-959.
33. SMIKA, D.; A. BLACK; and B. GREB. 1969. Soil nitrate, soil water and grain yields in a wheat-fallow rotation in the cereal plains as influenced by straw mulch.
34. SWINDALE, L. 1969. Las propiedades de suelos derivados 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.
35. TAYLOR, A. and E. GURNEY. 1965. Effect of lime on the phosphate potential and resin extractable phosphate in 5 acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29(4): 482-483.
36. THUN, R.; R. HERRMANN; und E. KNICKMANN. 1955. *Die Untersuchung von Boeden*. Band 1. 3. Auflage. Berlin, Neumann Verlag. 271 p.
37. VALDES, A. 1969. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Chile. 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. A.1.1.-A.1.15.
38. WOODHOUSE, W. 1969. Long-term fertility requirements of coastal Bermuda. II. Nitrogen, phosphorus and lime. *Agron. J.* 61(2): 251-256.