

INFLUENCIA DEL FOSFORO Y DEL CALCIO EN LA PRODUCTIVIDAD DE *Medicago polymorpha*, EN EL SECANO INTERIOR MEDITERRANEO DE CHILE¹

Influence of phosphorus and calcium on the productivity of *Medicago polymorpha* in the interior dryland of the Mediterranean zone of Chile

Alejandro del Pozo L.², Nicasio Rodríguez S.² y Carmen Lobos S.²

S U M M A R Y

The responses of burr medic (*Medicago polymorpha*) to phosphorus (P) and calcium (Ca) were studied in both glasshouse and field experiments. The responses of other two species (*M. arabica* and *M. truncatula* cv. Jemalong) were evaluated only in glasshouse conditions. Changes in the available P-Olsen and Ca in a granitic soil (Serie Maule) of the interior dryland of the mediterranean zone of Chile, after the application of increasing amounts of P and Ca, were also evaluated.

In the laboratory, the available P-Olsen increased linearly after the application of increasing amounts of P, at the rate of 0.28 mg kg⁻¹ P per unit P applied. In the field, approximately 7.2 kg ha⁻¹ of P were needed to change the available P in 1 mg kg⁻¹. The available Ca increased exponentially with increasing amounts of Ca supply. The pH also increased rapidly up to 615 mg kg⁻¹ of Ca supplied.

In the glasshouse, shoot, root and nodule dry weight increased but, the root/shoot ratio decreased with increasing P supply, in the three species of *Medicago*. In the field, the percentage of P in shoots of *M. polymorpha* increased with increasing P supply, and ranged from 0.18 to 0.25%. Phytomass reached 2,682 kg ha⁻¹ in 1987, and 3,050 kg ha⁻¹ in 1988, both at the highest P application rate. Seed yield ranged from 305 to 681 kg ha⁻¹ in 1987, and from 300 to 387 kg ha⁻¹ in 1988. Phosphorus utilization efficiency, measured as phytomass per unit of P content, ranged from 391 and 566 kg dry matter/kg of P. Phosphorus use efficiency, measured as phytomass per unit P applied, was 73, 36 and 27 kg dry matter/kg P, with the application of 24, 62 and 97 kg P ha⁻¹, respectively. Both phytomass and seed production increased curvilinearly with available P in the 5 cm top soil. The P-Olsen requirement in the soil (P available) for 90% maximum yield, estimated by Mitscherlich function, was greater for phytomass than for seed production.

Calcium supply did not increase phytomass or seed production. The average calcium content in the plant was 1.6% and the utilization efficiency was 62 kg dry matter/kg of Ca.

Key words: annual medic, burr medic, *Medicago polymorpha*, phosphorus, calcium, applications, Chile.

INTRODUCCION

La rotación de medicagos anuales (*Medicago* spp)-trigo (*Triticum aestivum* L.) es un sistema integrado de producción ganado-cultivo de gran potencial productivo, en los suelos graníticos y metamórficos del secano interior de la zona Mediterránea de Chile (Del Pozo y otros, 1989a).

Entre las especies de *Medicago* naturalizadas en Chile, hualputra (*Medicago polymorpha*, Legumi-

nosae) es la más abundante y presenta una amplia distribución en la zona Mediterránea, particularmente, en el secano interior (Del Pozo, Ovalle y Avendaño, 1989; Ovalle y otros, 1993). También se encuentra *M. arabica* en aquellos lugares con mayor disponibilidad de agua, tales como los llanos (Del Pozo y otros, 1989b).

En praderas sucesionales del secano interior, la abundancia de *Medicago* spp y de otras leguminosas anuales es en general baja, debido, probablemente, a la baja fertilidad de esos suelos (Acuña, Avendaño y Ovalle, 1983) y al sobrepastoreo (Ovalle y otros (1990). Experimentos realizados en maceta demostraron que los nutrientes más limi-

¹Recepción de originales: 6 de enero de 1994.

²Centro Regional de Investigación Quilamapu (INIA), Casilla 426, Chillán, Chile.

tantes del crecimiento de *Medicago* spp en los suelos graníticos, eran fósforo (P) y calcio (Ca) (Del Pozo, Rodríguez y Lobos, 1989).

La fertilización fosfatada aumenta la actividad de la nitrogenasa y la fijación simbiótica de nitrógeno (Robson, 1969; Dahmane y Graham, 1981), y favorece el crecimiento (Rudd, 1971; Dahmane y Graham, 1981; Dauro, 1986; ICARDA, 1987; Paynter y Bolland, 1993) y la producción de semilla de *Medicago* spp (Bolland, 1985). También el Ca favorece la nodulación en *Medicago* spp (Ewing y Robson, 1990) y puede tener efectos importantes en la productividad de leguminosas anuales en el secano interior (Acuña y otros, 1982).

Dado los bajos niveles de P y de Ca disponible que presentan los suelos graníticos del secano interior, la fertilización fosforada y cálcica debiera tener un rol muy importante en el establecimiento y producción de *M. polymorpha*. En este artículo se presentan resultados de una serie de experimentos, en que se evaluaron: a) los cambios en el P y Ca disponible con la fertilización fosfatada y cálcica, respectivamente; b) los efectos del P y del Ca en el crecimiento y nodulación de tres especies de *Medicago*, *M. polymorpha*, *M. arabica* y *M. truncatula* (cv. Jemalong), en condiciones de invernadero; c) los efectos del P y Ca en el crecimiento y producción de semilla de *M. polymorpha*, en un suelo granítico del secano interior.

MATERIALES Y METODOS

Curva de disponibilidad de P-Olsen y de Ca en un suelo granítico

En condiciones de laboratorio, se estudiaron los cambios en el P-Olsen y Ca disponible, en función del fosfato y calcio agregado a un suelo granítico, a fin de determinar la capacidad tampón o "resistencia" al elevar los contenidos de P-Olsen y Ca. Se trabajó con un suelo granítico, Serie Maule, proveniente de Cauquenes. El suelo se extrajo de los primeros 15 cm, se secó al aire y se tamizó a 5 mm.

Curva de P-Olsen. El experimento se realizó en envases de plástico de 125 cc, los cuales se llenaron con 30 g de suelo. Los niveles de P empleados fueron 0, 9, 18, 37, 74 y 147 mg kg⁻¹, aplicados como KH₂PO₄, con cuatro repeticiones. Cada tratamiento se humedeció hasta capacidad de campo y se cubrió con tela de polietileno para mantener la humedad. En el laboratorio, las muestras se incubaron a temperatura ambiente por 15, 30, 60 y 90 días. Al finalizar los períodos de incubación las muestras se secaron al aire y se determinó pH

y fósforo disponible (Olsen). La relación entre el P agregado y el P disponible se ajustó a un modelo lineal, mediante análisis de regresión.

Curva de Ca. Los niveles de Ca aplicados fueron 0, 77, 154, 307, 615, 1.230, 1.844 y 2.459 mg kg⁻¹ como CaCO₃, con cuatro repeticiones. Las muestras se incubaron a temperatura ambiente durante 15, 30, 60 y 90 días. Al término de la incubación se determinó el pH (1:2,5 en H₂O) y el Ca (extracción con NH₄OAc) por absorción atómica a los 15 días (todos los niveles) y 90 días (tres niveles).

Efectos de la fertilización con fósforo y calcio en la producción de *Medicago* spp

Experimento 1 (invernadero). En condiciones de invernadero, se evaluó el efecto del P y del Ca, en la producción de *M. polymorpha*, *M. arabica* y *M. truncatula* (cv. Jemalong). Las semillas de la dos primeras especies se colectaron en el área de Cauquenes. La variedad Jemalong se obtuvo de Australia, y se usó como testigo, dado que es una especie ha sido bastante estudiada y utilizada en Australia. El experimento se llevó a cabo en macetas de 1,5 L llenas con un suelo granítico, Serie Maule, Cauquenes (Fundo El Bordo). Se evaluaron 3 especies de *Medicago*, a 3 niveles de P (0, 14 y 79 mg kg⁻¹), aplicados como KH₂PO₄ y a dos niveles de Ca (0 y 500 mg kg⁻¹), como CaCO₃, en un arreglo factorial. Se aplicó una fertilización base con K₂SO₄. Se sembraron 30 semillas por maceta y se dejaron 10 plantas/maceta. Las semillas se inocularon con una cepa local de *Rhizobium meliloti*. Las plantas se cortaron a inicios de floración y se evaluó peso seco de la parte aérea, raíces y de nódulos. Los resultados se analizaron mediante un análisis de variancia factorial y las medias se compararon mediante diferencias mínimas significativas (D.M.S.).

Experimento 2 (de campo). En condiciones de campo, se evaluó el efecto de la fertilización fosforada, en la disponibilidad de P en el suelo, producción de semillas y fitomasa, y acumulación de P en *M. polymorpha*. El experimento se realizó en el Campo Experimental Cauquenes (Fundo El Bordo), en un suelo granítico de la Serie Maule.

Los contenidos iniciales de N, P, K y Ca eran 7, 6, 185 y 490 mg kg⁻¹, respectivamente, el porcentaje de materia orgánica (M.O.) era 1,7%, y el pH 6,6. Los niveles de P aplicados fueron 0, 24, 62 y 97 kg ha⁻¹ como superfosfato triple. Se consideró dos niveles de fertilización con Ca, 500 y 1.000 kg ha⁻¹ de CaCO₃. El diseño fue de parcelas divididas de 2 x 4 con 3 repeticiones, donde los niveles de Ca eran las parcelas principales y los niveles de P las subparcelas. Se realizó una fertilización básica de 100

kg ha⁻¹ de K₂SO₄ y de 25 kg ha⁻¹ de boronatrocalcita. El tamaño de las subparcelas fue de 3 x 5 m.

Se sembró semilla de *M. polymorpha* proveniente del fundo El Roma (Cauquenes), en hileras a 20 cm y dosis de 27 kg ha⁻¹. Las semillas fueron inoculadas con una cepa de *Rhizobium meliloti*, obtenida en la zona de Cauquenes. La siembra se realizó el 25.05.87. Se controló las malezas con metabenzthiazuron y diclofop metil.

Sesenta días después de la siembra, se evaluó el fósforo disponible entre 0-5 cm y entre 5-20 cm. Al final del período de crecimiento se evaluó producción de fitomasa y semillas, componentes de rendimiento, y fósforo y calcio extraído por la planta. La superficie de muestreo fue de 1 m², para rendimiento de semilla. En el segundo año (1988) las parcelas no volvieron a fertilizarse y se evaluó el fósforo residual y la producción de fitomasa y de semillas.

La diferencias estadísticas entre tratamientos se analizaron mediante análisis de variancia para parcelas divididas y las medias se compararon a través de la Prueba de Duncan. La relación entre el P agregado y P disponible, para los niveles 0-5 cm y 5-20 cm de profundidad, se ajustó a un modelo lineal mediante regresión. La relación entre el P disponible en el suelo y la producción de fitomasa o de semillas, se ajustó a a la función de Mitscherlich, mediante regresión no lineal, usando el método de Gauss (SAS, 1989):

$$Y = A - B * \exp(-C * X)$$

donde:

X = P disponible en el suelo (mg kg⁻¹),

Y = fitomasa o producción de semilla (kg ha⁻¹),

A = producción máxima (kg ha⁻¹),

B = estimación de la respuesta de la planta al P disponible (kg ha⁻¹),

C = parámetro que determina la curvatura de la relación.

Se calculó la eficiencia de recuperación de P y Ca, medida como contenido de P (o Ca) en la planta (kg ha⁻¹)/P (o Ca) aplicado (kg ha⁻¹), eficiencia de utilización de P y Ca, medida como materia seca (kg ha⁻¹)/contenido de P (o Ca) en la planta (kg ha⁻¹), y eficiencia de uso del P y Ca, medida como materia seca (kg ha⁻¹)/P (o Ca) aplicado (kg ha⁻¹).

Las condiciones térmicas e hídricas durante los dos años de evaluación se muestran en el Cuadro 1.

RESULTADOS

Cambios en la disponibilidad de fósforo con la adición de fosfato

En el experimento de laboratorio, el P disponible aumentó linealmente con la aplicación de fosfato, a razón de 0,28; 0,33; 0,26 y 0,15 mg kg⁻¹ de P por mg kg⁻¹ de P agregado, después de 15, 30, 60 y 90 días de incubación, respectivamente (Figura 1). El pH fue, en promedio, 6,2, y no varió con la fertilización fosfatada ni con el tiempo de incubación.

CUADRO 1. Promedios mensuales de temperaturas (Tmax y Tmin), precipitación (PP) y evaporación (EV) en Cauquenes, durante el período de ensayo

TABLE 1. Mean monthly temperature (Tmax and Tmin), precipitation (PP) and Pan evaporation (EV) in Cauquenes, during the period of the experiments

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1987												
Tmax	31,1	31,2	28,3	21,3	15,7	15,7	13,5	15,0	17,0	21,2	26,5	28,4
Tmin	12,8	13,3	11,6	8,6	5,1	4,4	6,4	5,3	6,3	8,5	9,8	11,5
PP	0,0	0,5	28,2	22,6	149,4	49,7	341,0	157,0	103,8	54,3	1,7	0,0
EV	340,3	288,4	221,4	109,0	40,3	33,6	28,2	47,4	95,5	138,6	214,6	313,2
1988												
Tmax	29,1	31,5	26,3	21,9	16,5	14,3	12,8	13,7	17,3	21,3	26,2	29,6
Tmin	11,6	12,5	10,9	7,5	5,0	4,8	2,7	4,7	7,4	6,1	9,3	12,4
PP	0,8	0,0	27,0	15,5	80,7	120,1	177,7	177,4	62,3	7,6	28,2	0,8
EV	298,4	276,3	159,9	105,5	53,7	28,1	33,0	40,5	87,1	175,8	240,0	287,2

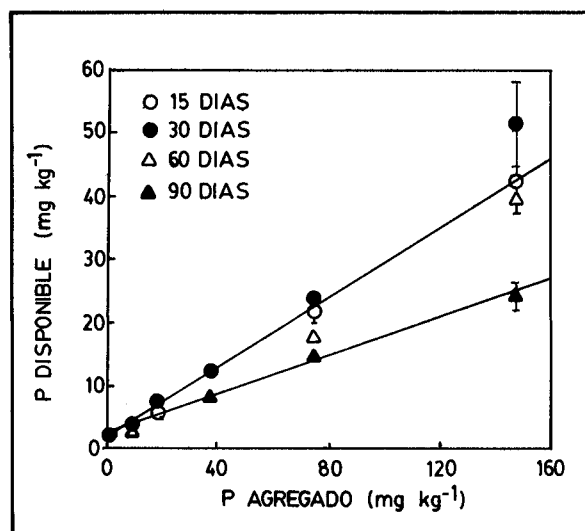


FIGURA 1. Cambio en el fósforo (P) disponible (Olsen) a los 15, 30, 60 y 90 días después de la aplicación de cantidades crecientes de P (KH_2PO_4), en un suelo granítico incubado en laboratorio a temperatura ambiente. Valores promedio de cuatro repeticiones.

FIGURE 1. Change in the available phosphorus (P) (Olsen) 15, 30, 60 y 90 days after the application of increasing amounts of P (KH_2PO_4), in a granitic soil incubated in the laboratory at room temperature. Mean values of four replicates.

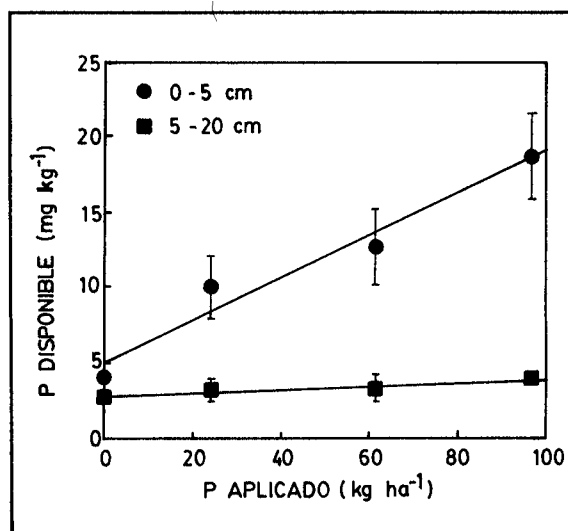


FIGURA 2. Cambio en el fósforo disponible entre 0-5 y 5-20 cm, en un suelo granítico, con la aplicación de superfosfato triple en el ensayo de campo. Valores promedio de tres repeticiones. Las ecuaciones de regresión fueron: 0-5 cm: $y = 4,9 + 0,14x$, $R^2 = 0,96$, $n = 12$; 5-20 cm: $y = 2,8 + 0,01x$, $R^2 = 0,86$, $n = 12$.

FIGURE 2. Change in the available phosphorus between 0-5 and 5-20 cm, in a granitic soil, with the application of superphosphate-triple in the field trial, in 1987. Mean values of three replicates. Regression equations were: 0-5 cm: $y = 4.9 + 0.14x$, $R^2 = 0.96$, $n = 12$; 5-20 cm: $y = 2.8 + 0.01x$, $R^2 = 0.86$, $n = 12$.

En el campo, la aplicación de superfosfato triple aumentó el P disponible en los primeros 5 cm desde 4 a 19 mg kg^{-1} , con la dosis máxima (97 kg ha^{-1} de P). La pendiente de la relación entre el P disponible y el P aplicado fue de 0,14 mg kg^{-1} de P/ kg ha^{-1} de P, para los primeros 5 cm. Esto significa que se requiere aplicar 7,2 kg ha^{-1} para aumentar en 1 mg kg^{-1} el P disponible. Entre los 5 y 20 cm el P disponible se incrementó levemente con la aplicación de fertilizante (Figura 2).

Cambios en la disponibilidad de calcio con la adición de calcio

En el laboratorio, el calcio disponible, a los 15 días de incubación, aumentó en forma exponencial al aumentar el nivel de Ca agregado (Figura 3). El Ca disponible inicial era de 490 mg kg^{-1} y alcanzó 1.294 mg kg^{-1} con la aplicación de 2.460 mg kg^{-1} (equivalente a 4 ton ha^{-1} de CaCO_3). No se observó diferencias en el Ca disponible entre los 15 y 90 días de incubación. El pH aumentó desde 5,9 (control) hasta 7,2, con la aplicación de 615 mg kg^{-1} de Ca, pero mayores aplicaciones de Ca no incrementaron el pH.

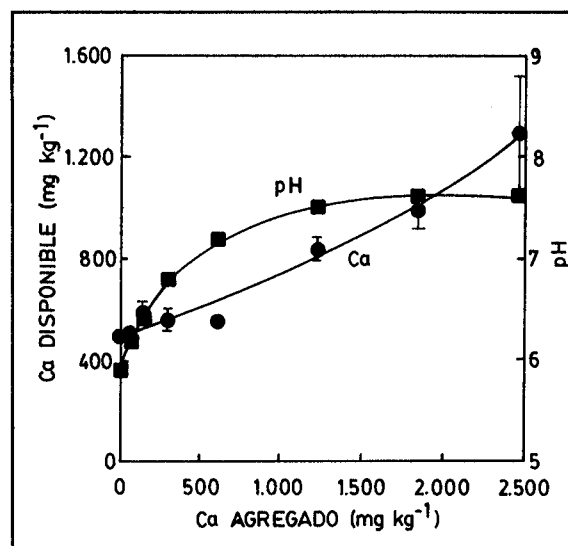


FIGURA 3. Cambio en el Ca disponible y del pH a los 15 días de incubación después de la aplicación de cantidades crecientes de Ca (CaCO_3), en un suelo granítico incubado en laboratorio a temperatura ambiente. Valores promedio de cuatro repeticiones. La ecuación de regresión para el Ca fue: $y = 495 + \exp(0,0004x)$, $R^2 = 0,88$, $n = 32$.

FIGURE 3. Change in the available Ca and pH 15 days after the application of increasing amounts of Ca (CaCO_3), in a granitic soil incubated in the laboratory at room temperature. Mean values of four replicates. Regression equation for Ca was: $y = 495 + \exp(0.0004x)$, $R^2 = 0.88$, $n = 32$.

Crecimiento y nodulación de tres especies de *Medicago* en condiciones de invernadero (experimento 1)

La adición de P aumentó significativamente ($P \leq 0,001$) la materia seca de la parte aérea, raíces y de nódulos, al momento del inicio de la floración, en las tres especies de *Medicago* (Cuadro 2). La mayor producción se obtuvo con *M. arabica*, que fue la especie que presentó el período desde siembra a floración más largo. La interacción especie x fósforo fue también significativa ($P \leq 0,005$). No hubo un efecto de la aplicación de Ca. La relación raíces: parte aérea disminuyó notablemente al aumentar la aplicación (y disponibilidad) de P (Cuadro 2).

CUADRO 2. Materia seca aérea, raíces, nódulos (g/maceta) y razón raíces/aérea, al momento del inicio de la floración, en tres especies de *Medicago*, crecidas en el invernadero, a tres niveles de fósforo. Valores promedio de dos niveles de calcio y tres repeticiones. D.M.S.(0,05) aérea = 0,49; raíces = 0,28; nódulos = 0,04

TABLE 2. Shoot, root and nodule dry matter (g/pot) and root/shoot ratio at flower initiation, of three species of *Medicago*, grown in the glasshouse with three levels of phosphorus supply. Mean values of two levels of calcium and three replicates. L.S.D. (0.05) shoots = 0.49; roots = 0.28; nodules = 0.04

	Fósforo aplicado (mg kg ⁻¹)		
	0 (2)	43 (14)	79 (23)
<i>M. polymorpha</i>			
Aérea	1,52	5,06	5,92
Raíces	1,63	2,42	2,56
Nódulos	0,06	0,14	0,17
Raíces: aérea	1,07	0,48	0,43
<i>M. arabica</i>			
Aérea	3,13	10,10	11,96
Raíces	1,49	3,42	3,41
Nódulos	0,05	0,25	0,39
Raíces: aérea	0,48	0,39	0,29
<i>M. truncatula</i>			
Aérea	1,21	4,51	4,77
Raíces	0,71	1,70	1,63
Nódulos	0,03	0,15	0,16
Raíces: aérea	0,59	0,38	0,34

Valores entre parentésis corresponden al fósforo disponible estimado de acuerdo a regresión de Figura 1.

Producción de fitomasa y de semillas en *M. polymorpha*, en condiciones de campo (experimento 2)

No se encontraron diferencias estadísticas (ANDEVA; $P > 0,05$), en la producción de fitomasa y de semillas, entre las dosis de 500 y 1.000 kg de CaCO₃ aplicado, por lo tanto, sólo se presentan los promedios de ambos niveles de CaCO₃. La fitomasa aumentó significativamente ($P \leq 0,01$) con la fertilización fosfatada, en ambos años (Cuadro 3). La producción de semilla fue significativamente mayor ($P \leq 0,01$) en 1987, en los subtratamientos con fósforo, pero no en 1988.

Recuperación y utilización de fósforo y de calcio

La extracción de P por la planta aumentó con la aplicación del fertilizante fosfatado, siendo la eficiencia de recuperación del P de 15 y 7% con las dosis de 24 y 94 kg ha⁻¹ de P, respectivamente (Cuadro 4). El P extraído por la pradera alcanzó, en promedio, 6,7 kg ha⁻¹ de P, con la aplicación de 97 kg ha⁻¹ de P (Cuadro 4).

Se encontró una alta correlación ($R^2 = 0,99$, $P \leq 0,01$) entre la fitomasa y el P extraído por la pradera (Figura 4). La eficiencia de utilización del P (fitomasa/contenido de P) disminuyó al aumentar la fertilización fosfatada, desde 566 kg de m.s./kg de P sin aplicación de P, a 391 kg de m.s./kg de P con 97 kg ha⁻¹ de P (Cuadro 4). La eficiencia de recuperación del P, fluctuó entre 0,15 y 0,07 cuando la dosis de P varió entre 24 y 97 kg ha⁻¹ de P, respectivamente (Cuadro 4). La eficiencia de uso del P (fitomasa/P aplicado) disminuyó desde 73 kg de m.s./kg de P, con la dosis de 24 kg ha⁻¹ de P, a 27 kg de m.s./kg de P con la dosis de 97 kg ha⁻¹ de P (Cuadro 4).

En 1987, tanto la fitomasa acumulada como la producción de semillas aumentó en forma curvilínea al incrementar el fósforo disponible (Figura 5a y 5b). De acuerdo a la función de Mitscherlich, se requieren 42,8 y 10,5 mg kg⁻¹ de P disponible para obtener la producción máxima de fitomasa y semilla, respectivamente.

En el segundo año (1988), también se observó una correlación curvilínea entre la fitomasa acumulada y la concentración de P residual disponible (Figura 6), pero no con la producción de semillas. El nivel de P (disponible en el suelo), estimado necesario para obtener un 90% de la producción máxima, fue 22,4 mg kg⁻¹.

CUADRO 3. Producción de fitomasa y de semillas de hualputra (*M. polymorpha*), a cuatro niveles de fósforo, en 1987 y 1988. Valores son promedio de dos niveles de calcio y tres repeticiones (\pm E.E.)

TABLE 3. Phytomass and seed production of burr medic (*M. polymorpha*), grown at four levels of phosphorus supply, in 1987 and 1988. Mean values of two levels of calcium and three replicates (\pm S.E.)

	Fósforo aplicado (kg ha ⁻¹ de P)			
	0	24	62	97
Fitomasa, kg ha ⁻¹ de m.s.				
1987	1.360 (\pm 223) b	1.699 (\pm 85) b	2.229(\pm 159) a	2.682 (\pm 253) a
1988	1.535 (\pm 250) c	1.870(\pm 159) bc	2.520(\pm 382) ab	3.050 (\pm 368) a
Semillas, kg ha ⁻¹				
1987	305 (\pm 37) b	681 (\pm 59) a	514 (\pm 67) a	666 (\pm 77) a
1988	300 (\pm 40) a	356 (\pm 41) a	387 (\pm 30) a	351 (\pm 59) a

Cifras con distinta letra en sentido horizontal indican diferencias significativas, según la Prueba de Duncan ($P \leq 0,05$).

CUADRO 4. Porcentaje de fósforo en la parte aérea, P extraído por la planta y eficiencias, en *M. polymorpha* crecida en cuatro niveles de P, en 1987. Valores promedio de dos niveles de calcio y tres repeticiones (\pm E.E.)

TABLE 4. Percentage of shoot phosphorus, P absorbed and efficiencies of *M. polymorpha* grown at four levels of P supply, in 1987. Mean values of two levels of calcium and three replicates (\pm S.E.)

	Fósforo aplicado (kg ha ⁻¹ de P)			
	0	24	62	97
P planta, %	0,18 (\pm 0,01) b	0,21 (\pm 0,01) b	0,25 (\pm 0,02) a	0,25 (\pm 0,01) a
Extracción de P, kg ha ⁻¹	2,40 (\pm 0,54) b	3,50 (\pm 0,19) b	5,50 (\pm 0,43) a	6,70 (\pm 0,84) a
Eficiencia de recuperación de P	-	0,15	0,09	0,07
Eficiencia de utilización de P	566	485	405	391
Eficiencia de uso de P	-	73	36	27

Cifras con distinta letra en sentido horizontal indican diferencias significativas, según la Prueba de Duncan ($P \leq 0,05$).

En relación al Ca, la concentración de éste en la parte aérea fue de 1,6% y el Ca extraído varió entre 26,6 y 28,5 kg ha⁻¹ de Ca (Cuadro 5). La eficiencia de recuperación (aparente) disminuyó desde 0,14 a 0,07 kg de Ca/kg de Ca aplicado, al aumentar el Ca aplicado desde 200 a 400 kg. La eficiencia de utilización fue de 62 kg de m.s./kg de Ca. La eficiencia de uso del Ca varió entre 4,1 y 8,8 kg de m.s./kg de Ca aplicado (Cuadro 5).

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Rol del fósforo

Los suelos graníticos del secano interior presentan bajos niveles de retención de P si se comparan con los suelos volcánicos. El aumento del P disponible a razón de 1 mg kg⁻¹ por cada 7,2 kg ha⁻¹ de P aplicado, significa que en estos suelos no sería difi-

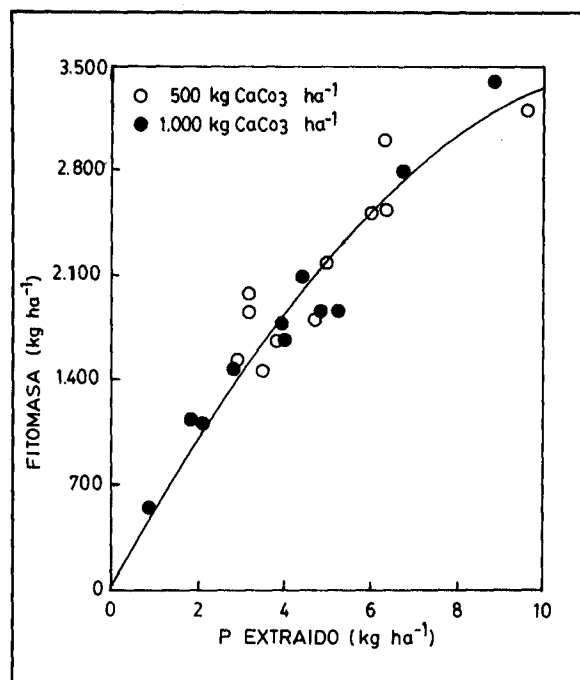


FIGURA 4. Relación entre la producción de fitomasa y la cantidad de fósforo extraído en *M. polymorpha* crecida en el campo a varios niveles de P y dos niveles de calcio, en 1987. La ecuación de regresión fue: $y = 549,5x - 21,2x^2$, $R^2 = 0,99$, $n = 22$.

FIGURE 4. Relationship between the phytomass production and the amount of phosphorus extracted from *M. polymorpha* grown in the field at various levels of P and two levels of calcium, in 1987. Regression equation was: $y = 549,5x - 21,2x^2$, $R^2 = 0,99$, $n = 22$.

cil ni caro incrementar el P disponible, a través de la aplicación de fertilizante fosforado. En cambio, en un Andisol de la Serie Vilcún, Campillo (1988) encontró que se requerían, aproximadamente, 16 kg ha⁻¹ de P para cambiar en 1 mg kg⁻¹ el P disponible de los primeros 10 cm.

La baja movilidad que tiene el P en el suelo explica que no haya cambiado el P disponible con la aplicación de P, entre los 5 y 20 cm de profundidad.

De los experimentos de invernadero y de campo se puede concluir, que la producción de fitomasa de *M. polymorpha* en suelos graníticos, aumenta al incrementar el P disponible (Olsen), hasta niveles de 22 mg kg⁻¹, o más, de P disponible. El valor de 1987 (42,8 mg kg⁻¹), calculado según la ecuación de Mitscherlich, excede el rango de P evaluado en estos experimentos y, probablemente, el valor obtenido en 1988 (22,4 mg kg⁻¹) sea más realista. Las otras dos especies evaluadas en condiciones de invernadero, *M. arabica* y *M. truncatula*, parecieran tener respuestas al P similares a *M. polymorpha*.

La mayor producción de materia seca en *M. arabica* en relación a las otras dos especies (Cuadro 2), se explica por el largo del período entre siembra e iniciación de la floración, el cual fue mayor en *M. arabica*.

La concentración de P en la parte aérea de *M. polymorpha* aumentó con la fertilización fosfatada y fue similar a las informadas por Acuña y otros (1991) en alfalfa (*M. sativa*). La eficiencia de recuperación del P (0,07 a 0,15) fue similar a aquellos informados por Paynter y Bolland (1993), para la misma especie, en Australia, cuando la dosis de P variaba entre 18,2 y 36,4 kg ha⁻¹ de P. Estos autores encontraron que en dosis menores de P (entre 2,3 y 9,1 kg ha⁻¹ de P), la eficiencia de recuperación aumentaba desde 0,29 a 0,81.

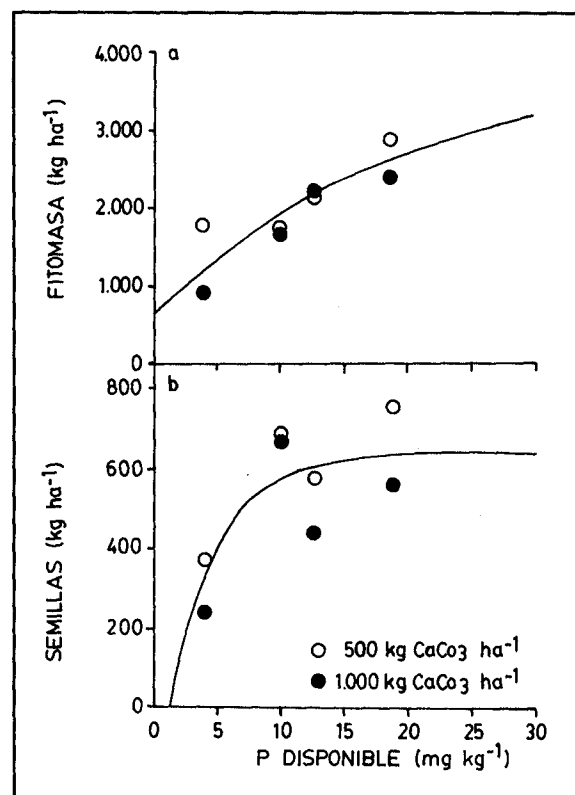


FIGURA 5. Relación entre la producción de fitomasa (a) y de semillas (b) y el fósforo disponible promedio en el suelo en los primeros 5 cm, para dos niveles de calcio aplicado, en 1987. Las funciones ajustadas fueron: a) $y = 4,000 - 3,400 \cdot \exp(-0,05x)$; b) $y = 650 - 900 \cdot \exp(-0,25x)$.

FIGURE 5. Relationship between phytomass (a) and seed (b) production and the mean available phosphorus in the soil at the first 5 cm, for two levels of applied calcium, in 1987. Fitted functions were: a) $y = 4,000 - 3,400 \cdot \exp(-0,05x)$; b) $y = 650 - 900 \cdot \exp(-0,25x)$.

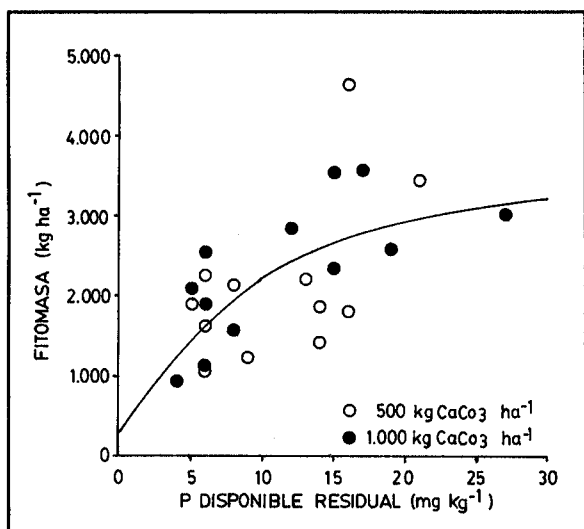


FIGURA 6. Relación entre la producción de fitomasa y el fósforo disponible residual en el suelo en los primeros 5 cm, para dos niveles de calcio aplicado, en 1988. La función ajustada fue: $y = 3.399 - 3.200 * \exp(-0,1x)$.

FIGURE 6. Relationship between phytomass production and the residual available phosphorus in the soil at the first 5 cm, for two levels of applied calcium, in 1988. Fitted function was: $y = 3,399 - 3,200 * \exp(-0,1x)$.

CUADRO 5. Fitomasa, porcentaje de calcio en la planta, Ca extraído y eficiencias de *M. polymorpha*, en dos niveles de calcio aplicado, en 1987. Valores promedio de tres repeticiones (\pm E.E.)¹

TABLE 5. Phytomass, percentage of shoot calcium, Ca content, and efficiencies of *M. polymorpha* grown at two levels of calcium supply, in 1987. Mean values of two levels of three replicates (\pm S.E.)¹

	Calcio aplicado (kg ha ⁻¹ de Ca)	
	200	400
Fitomasa, kg ha ⁻¹ de m.s.	1.758 (\pm 269) a	1.640 (\pm 269) a
Ca planta, %	1,6 (\pm 0,19) a	1,6(\pm 0,26) a
Ca extraído, kg ha ⁻¹ de m.s.	28,5 (\pm 0,54) a	26,6(\pm 0,19) a
Eficiencia de recuperación de Ca	0,14	0,07
Eficiencia de utilización de Ca	62,0	62,0
Eficiencia de uso	8,8	4,1

¹El nivel de fósforo aplicado fue 24 kg ha⁻¹.

Cifras con distinta letra en sentido horizontal indican diferencias significativas, según la Prueba de Duncan ($P \leq 0,05$).

En el caso de la producción de semillas, el nivel de P disponible para obtener el 90% de la producción máxima fue menor que para la producción de fitomasa. Eso significa que con mayores niveles de P disponible, se favorece más el crecimiento vegetativo que la producción de semillas. En Australia, en diversas especies de leguminosas anuales, entre ellas *M. polymorpha* (cvs. Circle Valley y Serena) y *M. truncatula* (cvs. Cyprus y Jemalong), Bolland (1985) encontró un gran aumento en la producción de semillas al incrementar la fertilización fosfatada; en *M. polymorpha*, la producción de semillas superó los 500 kg ha⁻¹ al aplicar 97 kg ha⁻¹ de P. Esto se debió al aumento del número de inflorescencias y de gloquίδeos, y no al del número de semillas por gloquίδeo o del peso de la semilla. También, Paynter y Bolland (1993), al evaluar el efecto del P en la producción de semillas de *M. polymorpha*, en Australia, determinaron que el requerimiento de P, para alcanzar el 90% de la producción máxima, fluctuaba entre 10 y 35 kg ha⁻¹ de fósforo.

En el segundo año (1988), la producción de fitomasa y de semillas fue relativamente alta, si se considera que de las semillas producidas en el primer año (1987), sólo un 10 a 15% puede germinar en el otoño siguiente (Avendaño, Del Pozo y Ovalle, 1993). La producción de fitomasa y semillas es normalmente mayor al tercer año desde el establecimiento (Ovalle, Del Pozo y Avendaño, 1993), debido a la dinámica de escarificación de las semillas que presenta esta especie (Avendaño y otros, 1993).

También la fertilización fosfatada tuvo efectos importantes en la partición de la biomasa, en particular en la razón m.s. raíces/m.s. aérea (Cuadro 2). Al aumentar la fertilización fosforada se incrementó más la biomasa aérea que la de raíces, disminuyendo la relación m.s. raíces/m.s. aérea. Algo similar encontró Dahmane y Graham (1981) en *M. truncatula*, lo que se tradujo en una disminución de la razón contenido de nitrógeno en raíces/nitrógeno en parte aérea.

Rol del calcio

En el invernadero, la adición de 500 mg kg⁻¹ de Ca (equivalente a 800 kg ha⁻¹ de CaCO₃), que aumentaría la disponibilidad de Ca desde 490 mg kg⁻¹ (equivalente a 2,45 cmol(+) kg⁻¹) a 604 mg kg⁻¹ (equivalente 3,02 cmol(+) kg⁻¹) (Figura 3), no tuvo un efecto en la productividad de *Medicago* spp.

M. polymorpha es una especie adaptada a suelos relativamente ácidos (Howieson y Ewing, 1986 y 1989; Ewing y Robson, 1990), y de hecho en Chile se le encuentra en un rango amplio de pH, que va

desde 5 a 8 (Ovalle y otros, 1993). Por lo tanto, la modificación del pH del suelo, a través del encalado, no sería necesaria en el caso de *M. polymorpha*, en los suelos graníticos del secano interior.

El calcio sí puede tener un efecto directo en la nodulación de *M. polymorpha* (Ewing y Robson, 1990); favorece por un lado, la adsorción del *Rhizobium*

a la superficie de la raíz (Caetono-Anolles, Lagares y Farelukes, 1989), e interviene en la expresión del gen *nod* (Richardson y otros, 1988).

Las estimaciones sobre el contenido de calcio interno y la eficiencia de utilización de Ca por *M. polymorpha* (Cuadro 5), indican que éstos serían similares a los de alfalfa (Acuña y otros, 1991).

RESUMEN

En condiciones de invernadero y de campo se estudió la respuesta de hualputra (*Medicago polymorpha*) a la aplicación de fósforo (P) y calcio (Ca). La respuesta de las especies *M. arabica* y *M. truncatula* (cv. Jemalong) se observó sólo en condiciones de invernadero. Se evaluaron también, los cambios en el P-Olsen y Ca disponible en un suelo granítico (Serie Maule) del secano interior de la zona Mediterránea de Chile, después de la aplicación de cantidades crecientes de P y Ca.

En el laboratorio, el P-Olsen disponible aumentó linealmente al incrementarse el P agregado, a razón de 0,28 mg kg⁻¹ por unidad de P agregado. En el campo, se necesitaron aproximadamente 7,2 kg ha⁻¹ de P para cambiar el P en un mg kg⁻¹. El Ca disponible aumentó exponencialmente con el nivel de Ca agregado. El pH también se elevó rápidamente hasta el nivel de 615 mg kg⁻¹ de Ca agregado.

En el invernadero, la materia seca aérea, de raíces y de nódulos, se incrementó con la aplicación de P, en las tres especies de *Medicago*, no así la razón raíces/aérea que disminuyó. En el campo, el porcentaje de P en la planta de *M. polymorpha* aumentó con el P agregado, fluctuando entre 0,18

y 0,25%. La fitomasa alcanzó 2.682 kg ha⁻¹ en 1987, y 3.050 kg ha⁻¹ en 1988, ambos valores obtenidos con el nivel máximo de P agregado. La producción de semillas fluctuó entre 305 y 681 kg ha⁻¹ en 1987, y entre 300 y 387 kg ha⁻¹ en 1988. La eficiencia de utilización de P, medida como la fitomasa por unidad de P en la planta, fluctuó entre 391 y 566 kg de m.s./kg. La eficiencia de uso del P, fue 73, 36 y 27 kg de m.s./kg, con la aplicación de 24, 62 y 97 kg ha⁻¹ de P, respectivamente. Tanto la producción de fitomasa como de semillas, aumentó en forma curvilínea con el P disponible, en los primeros 5 cm. El nivel de P-Olsen necesario para obtener el 90% del rendimiento máximo, estimado por la función de Mitscherlich, fue mayor para la producción de fitomasa que para la producción de semillas.

La aplicación de Ca no aumentó la producción de fitomasa o de semillas. El porcentaje promedio de Ca en la planta fue 1,6% y su eficiencia de utilización de 62 kg de m.s./kg.

Palabras claves: hualputra, medicagos anuales, *Medicago polymorpha*, fósforo, calcio, fertilización, Chile.

LITERATURA CITADA

- ACUÑA P., HERNAN, AVENDAÑO R., JULIA, OVALLE M., CARLOS y SOTO O., PATRICIO. 1982. Praderas de secano en las regiones del Maule y Biobío. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile), Estación Experimental Quilamapu (Chillán). Boletín Técnico N° 54. 106 p.
- ACUÑA P., HERNAN, AVENDAÑO R., JULIA y OVALLE M., CARLOS. 1983. Caracterización y variabilidad de la pradera natural del secano interior de la zona mediterránea subhúmeda. Agricultura Técnica (Chile) 43: 27-38.
- ACUÑA P., HERNAN, SOTO O., PATRICIO, VIDAL V., AGUSTIN y MARTINEZ R., GERMAN. 1991. Fertilización de alfalfa con fósforo, potasio y azufre. Agricultura Técnica (Chile) 51: 315-322.
- AVENDAÑO, J., DEL POZO, A. and OVALLE, C. 1993. Hardseedness under field condition of *Medicago polymorpha* in the mediterranean zone of Chile. In: Proceeding of the XVII International Grassland Congress. New Zealand. p.: 2.206-2.207.
- BOLLAND, M.D.A. 1985. Effects of phosphorus on seed yield of subterranean clover, serradella and annual medics. Australian Journal Agricultural Research 25: 295-602.
- CAMPILLO R., RICARDO. 1988. Respuesta al carbonato de calcio y la fertilización fosfatada, de la mezcla de ballica perenne y trebol blanco, en un Andisol. Efecto en producción y evolución botánica. Agricultura Técnica (Chile) 48: 312-319.

- CAETONO-ANOLLES, G., LAGARES, A. and FAVELUKES, G. 1989. Adsorption of *Rhizobium melloti* to alfalfa roots: Dependence on divalent cations and pH. *Plant and Soil* 117: 67-74.
- DAHMANE, A.B.C. and GRAHAM, R.D. 1981. Effect of phosphate supply and competition from grasses on growth and nitrogen fixation of *Medicago truncatula*. *Australian Agricultural Research* 31: 761-772.
- DAURO, D. 1986. Effect de la fertilization phosphatee sur parcours naturel mediterraneen comportant des la zernes annuelle. CNEARC-INRA, Montpellier, 50 p. (These d'agronomie).
- DEL POZO L., ALEJANDRO, OVALLE M., CARLOS y AVENDAÑO R., JULIA. 1989. Los medicagos anuales en Chile. I. Comparación con Australia. *Agricultura Técnica (Chile)* 49: 260-267.
- DEL POZO L., ALEJANDRO, OVALLE M., CARLOS, AVENDAÑO R., JULIA y DEL CANTO S., PEDRO. 1989a. Los medicagos anuales en Chile. III. Perspectivas de la rotación medicago-trigo en el secano interior de la zona Mediterránea. *Agricultura Técnica (Chile)* 49: 275-280.
- DEL POZO L., ALEJANDRO, OVALLE M., CARLOS, AVENDAÑO R., JULIA y DEL CANTO S., PEDRO. 1989b. Adaptation of *Medicago polymorpha* to the subhumid mediterranean zone of Chile. In: *Proceeding of the XVI International Grassland Congress*. Nice, France. p.: 1.539-1.540.
- DEL POZO L., ALEJANDRO, RODRIGUEZ S., NICASIO y LOBOS S., CARMEN. 1989. Nutrientes que limitan el crecimiento y producción de medicagos anuales en el secano interior de la zona Mediterránea subhúmeda de Chile. *Agricultura Técnica (Chile)* 49: 36-40.
- EWING, M.A. and ROBSON, A.D. 1990. The effect of solution pH and external calcium concentration on the early growth and nodulation of several annual *Medicago* species. *Australian Journal Agricultural Research* 41:933-939.
- HOWIESON J.G and EWING, M.A. 1986. Acid tolerance in the *Rhizobium melloti-Medicago symbiosis*. *Australian Journal Agricultural Research* 37: 55-64.
- HOWIESON, J.G and EWING, M.A. 1989. Annual species of *Medicago* differ greatly in their ability to nodulate on acid soils. *Australian Journal Agricultural Research* 40: 843-850.
- ICARDA-INTERNACIONAL CENTER FOR AGRICULTURAL RESEARCH IN THE DRY AREAS. 1987. Pasture, forage and Livestock. Annual report.
- OVALLE, C., ARONSON, J., DEL POZO, A. and AVENDAÑO, J. 1990. The espinal: agroforestry system of the mediterranean-type climate region of Chile. *Agroforestry System* 10: 213-239.
- OVALLE, C., AVENDANO, J, DEL POZO, A. and CRESPO, D. 1993. Germoplasm collection, evaluation and selection of naturalized *Medicago polymorpha* in the mediterranean zone of Chile. In: *Proceeding of the XVII International Grassland Congress*. New Zealand. p.: 222-223.
- OVALLE M., CARLOS, DEL POZO L., ALEJANDRO y AVENDAÑO R., JULIA. 1993. Sistemas de establecimiento de medicago anual. *Agricultura Técnica (Chile)* 53: 211-217.
- PAYNTER, B.H. and BOLLAND, M.D.A. 1993. Comparison of the phosphate requirements of burr medic and yellow serradella with that of wheat in the low rainfall wheatbelt of Western Australia. *Australian Journal Experimental Agricultural* 33: 145-157.
- RICHARDSON, A.E., DJORDJEVIC, M.A., ROLFE, B.E. and SIMPSON, R.J. 1988. Effects of pH, Ca and Al on the exudation from clover seedings of compounds that induce the expression of nodulation genes in *Rhizobium trifolii*. *Plant and Soil* 109: 37-47.
- ROBSON, A.D. 1969. Soil factors affecting the distribution of annual a *Medicago* species. *Journal Australian Institute Agricultural Science* 35: 154-167.
- RUDD C.L. 1971. Response of annual medics pasture to superphosphate application and the correlation with available soil phosphorus. *Australian Journal Experimental Agriculture and Animal Husbandry* 12: 43-48.
- SAS INSTITUTE INC. 1989. SAS Stat User's Guide: Statistic. SAS/Institute Inc., Cary, North Carolina. 956 p.