

INVESTIGACIONES

ROCAS FOSFÓRICAS CHILENAS. II. EFICIENCIA AGRONÓMICA Y SU USO COMO FERTILIZANTES FOSFATADOS EN SUELOS VOLCÁNICOS¹

Phosphoric rocks of Chile. II. Agronomic efficiency and its use as phosphate fertilizer in volcanic ash soils

Gloria Sepúlveda W.², Eduardo Besoain M.², y Rosa Molina M.²

SUMMARY

It was realized an experiment of glass house pots of ryegrass fertilizer with phosphoric rocks use as phosphate of direct use in volcanic soils. Since, the response of phosphoric rocks (PR) when being applied as phosphate fertilizer of direct use depends on the soil properties, the plants or crops and the type of phosphoric rocks. It was determined the yield of ryegrass (*Lolium perenne*) applying as phosphorus (P) sources three chilean phosphoric rocks (PR), La Serena, Bahía Inglesa and Mejillones and the PR Tampa from Florida (USA), used as reference. The rocks were applied in a natural way, grounded (< 300 mesh), without treatment and partially acidulated with 30 or 50% H₂SO₄, comparing its effect in the yield with the triple superphosphate, normal superphosphate and with acid potassium phosphate, reagent grade. The soil used was the Andisol Vilcún from the south of Chile, with low phosphorus available, < 3 (mg/kg) and acid pH 5.5. The soil was collected to (0-20 cm) of depth in the General López area (IX Región). The P sources were incorporated in the soil at rates of 0, 100, 200 and 400 (mg/pot) of P and it was also applied a base fertilization, except P and the nitrogen was added every 15 days. In every treatment it was quantified the yield and it was calculated the P absorption efficiency and the relative agronomic effectiveness (RAE) of the dry matter accumulated in the amount of six cuttings, during six months. The RAE was determined by means of response curves at different rates of phosphorus. The experimental design was of random blocks with three repetitions. Also it was realized the analysis of the available phosphorus and the pH of the soil before and after the experiment.

The behaviour of RFPA is different in comparison with the unfertilized witnesses the RFN from La Serena does not increase the yield, its value is the same to the one of the witness, however it improve its EAR when it is acidulated, the same of RF from Tampa. One part of the RF turns to be a low water soluble P content product. The higher degree of acidulation decreases the effect of the sources and the mineralogy since the rock reaction product is the same:

The yield of dry matter is related to the mineralogy of the P rock, the amount of P added, the acidulation degree and the interaction between the amount of P added with acidulation grade. The same factors determining increase in the P absorption of ryegrass and the available P and pH of the soil.

Phosphorus content is important dealing with applied reactive rocks, as Mejillones and Bahía Inglesa, fluorcarbonate apatite, they have the highest yield, but not with that of La Serena, a non reactive rock, chlorapatite that does not present any effect on the yield. However, the effectiveness of the last PR is strongly increased by acidulation and the effectiveness of Tampa rocks also increased with acidulation. Meanwhile the effectiveness of acidulated rocks is better in the early period of the plant development, the effect of none treated rocks progress with the time, a fact related to the low solubility of the rocks.

To conclude, the rocks of Bahía Inglesa and Mejillones, fluorcarbonate apatite, can be used directly as P fertilizers in agriculture in the acid volcanic soils, that have low phosphorus available and enough water supply. However, the use of the rock of Mejillones, due to its low content of P₂O₅ will be strengthened limited. Although the rock of La Serena, chlorapatite, can not be directly applied, but its use could be possible by partial acidulation as raw material to manufacture phosphate fertilizer.

Key words: Phosphoric rocks, partial acidulation, phosphated fertilizers, PR and acid soils, volcanic soils, apatites.

¹Recepción de originales: 11 de febrero de 1994.

²Centro Regional de Investigación La Platina (INIA), Casilla 439, Correo 3, Santiago, Chile.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de las rocas fosfóricas (RF) como fertilizantes fosfatados de uso directo depende de las propiedades químicas y mineralógicas que éstas posean, como así también de características específicas de las plantas y de factores del suelo; entre estas últimas se encuentra el pH, mineralogía de arcillas, contenido de calcio, capacidad de adsorción y disponibilidad de fósforo, etc. Junto al nitrógeno, el fósforo es el nutriente determinante de la producción agrícola, particularmente, en suelos derivados de piroclásticos. La fuerte dependencia de los cultivos por este nutriente y el elevado costo de los fertilizantes fosfatados convencionales han estimulado el interés por el uso de las RF y de otras fuentes con costos de fabricación o aplicación más económicos. Para Chile es interesante el estudio de validación agrícola de las RF para determinar su potencialidad como fertilizante fosfatado de uso directo, especialmente en suelos volcánicos ácidos (Andisoles y Ultisoles), altamente retentivos de fósforo. Además, debido a que el país cuenta con algunos yacimientos fosfóricos de cierta importancia, el estudio agronómico de las RF es de interés actual.

La propiedad de las RF, de no ser solubles en agua, pero sí lentamente solubles en suelos volcánicos ácidos comparada con la de los fertilizantes comerciales que son solubles en agua, podría constituirse en un factor favorable en los Andisoles, ya que éstas mantendrían, a través del tiempo, un abastecimiento de fósforo pequeño pero sostenido. Tal comportamiento es diferente a lo que ocurre con los fertilizantes fosfatados solubles, que al inducir una reacción de adsorción del fosfato casi instantánea en los componentes del suelo, restringen el aprovechamiento del fósforo por las plantas (Hingston, F.J.; Posner, A.M. y Quirk, J.P., 1967); reacción que en las primeras etapas del desarrollo puede ser crítico. La entrega permanente de pequeñas cantidades de fósforo por las RF en las diversas etapas de crecimiento, especialmente cuando existe una rizósfera desarrollada, facilita a las plantas la competencia con el suelo por el fósforo que se libera. La eficiencia de las RF depende de su solubilidad y una forma de aumentarla es someterlas a una acidulación parcial, proceso que transforma parte del fosfato original insoluble en fosfato monocálcico $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Las RF parcialmente aciduladas proporcionan mayor cantidad de P soluble inicial que las RF, el que es suficiente para satisfacer los requerimientos de las primeras etapas de desarrollo de los cultivos y que a la vez mantiene un potencial de entrega de P sostenida en el tiempo, determinado por fracciones de roca que no reaccionó con el ácido. En general,

las RF molidas, sin tratamiento, serían adecuadas para fertilizar praderas o cultivos de crecimiento largo que no requieran de niveles elevados de P en un período de crecimiento corto.

La eficiencia agronómica relativa (EAR) de numerosas RF ha sido evaluada en el extranjero mediante ensayos de invernadero y campo (Chien y Hammond, 1978; Mackay, Syers y Gregg, 1984; León y Hammond, 1984). En Chile, la RF de Gafsa (hiperfosfato) fue evaluada positivamente como fertilizante fosfatado, comparada con SFT, por Letelier (1957) y Goic (1967) habiéndose obtenido resultados positivos en cultivos y praderas de la X Región. Las RF chilenas han sido también evaluadas por Rodríguez y Ávila (1985), quienes determinaron que las RF de Mejillones y Bahía Inglesa eran reactivas y constituían un fertilizante potencial para los suelos volcánicos ácidos. Valdebenito (1985), llevó a cabo ensayos de laboratorio e invernadero con RF de La Serena (cloroapatita), cuyos resultados fueron negativos. También fueron negativos o contradictorios los ensayos efectuados con esta última RF tanto en invernadero como en campo (Montenegro y Besoain, 1986). Ensayos de invernadero efectuados por Fernández y Ruiz (1992), con un concentrado fosfórico de Mejillones, demostraron que éste se comparaba exitosamente al superfosfato triple (SFT) con cultivos en suelos volcánicos de la VIII y X Región.

Debido a que las RF son heterogéneas en su composición y propiedades (Besoain, Sepúlveda y Molina, 1991) y a que la respuesta a éstas depende de la naturaleza del suelo donde ellas se apliquen, de las plantas y del tipo de RF, se estimó conveniente evaluar la eficiencia agronómica relativa de algunas RF chilenas adicionadas en forma natural y parcialmente aciduladas comparándolas con los fertilizantes solubles, usando un suelo volcánico ácido, de bajo contenido de P disponible y relacionar su respuesta agronómica con propiedades de las RF y del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En un Andisol Vilcún, Typic Fulvudand del sector de General López de la IX Región, se efectuó un ensayo de macetas en invernadero, con ballica (*Lolium perenne*, variedad Ruani) fertilizada con distintas RF naturales (RFN) y RF preparadas a diferente grado de acidulación con ácido sulfúrico (RF parcialmente aciduladas, RFPA). Del suelo se utilizó el horizonte Ap (0-23 cm), con elevada capacidad de retención de P (>90%), bajo índice de disponibilidad de P Olsen de 3 (mg/kg) y de pH 5,5 (Cuadro 1).

CUADRO 1. Principales características del suelo Vilcún usado en el ensayo de macetas de la ballica (*Lolium perenne*) fertilizada con diferentes fuentes de fósforo

TABLE 1. Some characteristics of soil Vilcun used in pot experiments of ryegrass (*Lolium perenne*) fertilized with different phosphorus-sources

Tipo de Suelo	: Typic Fulvudand
Localidad	: General López (Vilcún), IX Región
Mineralogía < 2 m μ	: Imogolita (2) ¹ , alofán (5), feldespatos (1) ¹
P disponible (P-Olsen)	: 3 mg/kg.
pH agua 1:2,5	: 5,5
Materia orgánica	: 12,5%
Retención de humedad :	
1/3 atm	: 73,1%
15 atm	: 53,2%
Humedad aprovechable:	23,9%
Retención de P	: > 90%

¹Aproximación semicuantitativa: 5 = dominante 4 = abundante
3 = común 2 = presente
1 = escaso Tr = trazas.

Las fuentes de fósforo aplicadas fueron las rocas fosfóricas chilenas: Mejillones; Bahía Inglesa y La Serena y una RF Tampa de Florida (EE.UU.), RF que se importa a Chile para fabricar superfosfato normal. La RF de La Serena, que se usó en el ensayo, es de origen ígneo, sin embargo, en la zona existen otras fosforitas sedimentarias/marinas. La RF de Mejillones y Bahía Inglesa son de origen sedimentario al igual que la RF de Tampa. Las RF se aplicaron molidas bajo 100 mesh, en forma natural (RFN) y parcialmente aciduladas (RFPA) con ácido sulfúrico al 30 y 50%. Las fuentes de comparación fueron superfosfato triple (SFT), superfosfato normal (SFN) y fosfato ácido de potasio (KH₂PO₄ p.a.).

La caracterización de las RFN se realizó por difracción de rayos X, espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), análisis químico elemental y solubilidad de las rocas en diversos extractantes (Besoin, et al., 1991) y la determinación de solubilidad en agua de las RFPA.

El procedimiento experimental consistió en sembrar 1,5 g de ballica (*Lolium perenne*) por maceta, con capacidad de 1.000 ml cada una [800 (g suelo húmedo/maceta)]. De cada una de las fuentes se aplicaron dosis de P de 100, 200 y 400 (mg/maceta). Se incluyó un testigo con fertilización base, pero sin P, y otro sin fertilización. Todos los tratamientos recibieron la misma fertilización base (Cuadro 2). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Luego de la germinación se aplicó nitrógeno en forma de NH₄NO₃, cada 12 a 15 días, y se regó periódicamente manteniendo la humedad

programada a 2/3 de capacidad de campo. Se realizaron seis cortes de ballica, efectuados cada 30 días. El material foliar se secó a 65 °C durante 48 horas y se pesó, luego se calculó el rendimiento de materia seca (m.s.) en la suma de seis cortes y se expresó en (g/maceta). Se determinó, a través de análisis foliar, el P absorbido por las plantas y en el suelo se determinó pH en H₂O y P disponible (Olsen), al término del experimento, en muestra compuesta de tres repeticiones. Se usó el SFT como fuente de fósforo de referencia y se relacionó el rendimiento con propiedades de las RF, del suelo y con P absorbido por las plantas.

CUADRO 2. Fertilización base¹ aplicada al suelo Vilcún en los diversos tratamientos del ensayo de invernadero de la ballica (*Lolium perenne*)

TABLE 2. Basic fertilization applied to soil Vilcún used in glasshouse experiments of ryegrass (*Lolium perenne*)

Elemento	Compuesto usado por maceta	Cantidad aplicada
K	K ₂ SO ₄ p.a.	1,34 g
N ²	NH ₄ NO ₃ p.a. (22,9 g/L)	10,00 ml
Ca	CaCO ₃	0,74 g/L
Solución (20 ml/maceta)		
Mg	3MgCO ₃ Mg(OH) ₂ 3H ₂ O	0,37 g/L
Mn	MnSO ₄ H ₂ O	1,2 g/L
Cu	CuSO ₄ 5H ₂ O	0,83 g/L
Mo	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ 4H ₂ O	0,07 g/L
Zn	ZnCl ₂	0,33 g/L
B	H ₃ BO ₃	0,53 g/L

¹Fertilización base recomendada por Schenkel y Baherle (1971), agregada en forma proporcional.

²N se aplicó cada 12-15 días.

La absorción de P (A_i) se calculó mediante la relación:

$A_i = (m.s.) \cdot (\% P) / 100$ y se expresó en (mg/maceta) de P absorbido.

La eficiencia de absorción de P (E_i), que corresponde a la relación porcentual entre P absorbido por la ballica en el tratamiento y la dosis de P agregada, se calculó de la siguiente forma:

$$E_i (\%) = [(A_i - A_0) \cdot 100 / P_i]$$

donde:

A_i = absorción del tratamiento (mg P extraído por la planta);

A_o = absorción del testigo (mg P extraído como aporte del suelo);

P_i = P agregado al tratamiento (mg).

La efectividad agronómica relativa (EAR) que corresponde a la relación porcentual entre los rendimientos obtenidos al usar RF vs. SFT, en que se calculó el rendimiento relativo acumulado en seis cortes, se obtuvo aplicando la siguiente fórmula:

$$EAR (\%) = ([(Rdto. RF - T) / (Rdto. SFT - T)]) \cdot 100$$

donde:

Rdto. RF = rendimiento de la ballica fertilizada con RF;

T = rendimiento del testigo,

Rdto. SFT = rendimiento de la ballica fertilizada con SFT.

Se calculó el grado comercial que tiene una RF, el BPL (Bone Lime Phosphate), que corresponde al % de P_2O_5 de una RF, el que se expresa como % $Ca_3(PO_4)_2$.

$$BPL = \% Ca_3(PO_4)_2 = (\% P_2O_5)_{RF} \cdot 2,185$$

Se realizó un análisis estadístico para comparar los 46 tratamientos entre sí, de los tratamientos se seleccionaron 36 y se realizó un análisis factorial y un análisis de varianza, se determinó el nivel de significancia al 1% ($P \leq 0,01$). A continuación, se seleccionaron los tratamientos y se realizaron contrastes ortogonales para determinar en el rendimiento de la ballica los efectos de 1) tipo de RF (localidad) por dosis de P aplicada, 2) del grado de acidulación de las RF por tipo de roca (para determinar interacciones) y 3) grado de acidulación por dosis de P adicionado.

Se realizaron además 7 contrastes ortogonales para determinar y comparar efectos en rendimiento: contraste 1) ¿hay diferencia entre el rendimiento promedio de las RF de Bahía Inglesa y Mejillones y el rendimiento del SFT?; contraste 2) ¿hay diferencia entre el rendimiento del fosfato ácido de potasio, KH_2PO_4 y el rendimiento obtenido con el SFT?; contraste 3) ¿es el rendimiento de la RF de La Serena diferente del rendimiento del testigo?; contraste 4) ¿hay diferencia entre el rendimiento al aplicar la RF de Mejillones acidulada al 30% y el rendimiento del SFT?; contraste 5) ¿es el rendimiento de la RF de Bahía Inglesa acidulada al 30% diferente del rendimiento obtenido con el SFT?; contraste 6) ¿hay diferencia entre el rendimiento obtenido al aplicar la RF de Mejillones acidulada al 50% y el rendimiento del SFT? y contraste 7) ¿es el rendimiento de la RF de Bahía Inglesa acidulada al 50% diferente del rendimiento obtenido con el SFT?

Se realizó un análisis de regresión entre rendimiento de la ballica y solubilidad del P de las RF en diferentes extractantes, ácido cítrico, ácido fórmico y citrato de amonio (pH 7,0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respuesta en el rendimiento de la ballica fertilizada con diferentes fuentes de fósforo

El análisis estadístico indicó efecto altamente significativo ($P \leq 0,01$) a efecto de la acidulación, tipo de RF, dosis de P e interacción entre acidulación y dosis de P.

Los mayores rendimientos se obtuvieron cuando se fertilizó con las RFN de Mejillones y de Bahía Inglesa en dosis de P de 200 y 400 (mg/maceta) (Cuadro 3 y Figura 1), así como con la aplicación de SFT y KH_2PO_4 como fuentes de comparación. Se determinó que los mayores rendimientos de la ballica se relacionan con las absorciones más elevadas de P por las plantas (Figura 2), con un R^2 de 0,99 entre ellos, sin considerar a la RF de La Serena. La mayor absorción de P, 82,9 (mg/maceta) (Figura 3) se obtuvo con la RF de Mejillones acidulada al 50%, con un rendimiento de 33,4 (g/maceta); seguido por la sal, KH_2PO_4 , con una absorción de 78,6 (mg/maceta) de P y un rendimiento de 31,4 (g/maceta) de m.s. y el SFT, con una absorción de 71 (mg/maceta) de P y un rendimiento de 28,0 (g/maceta). El testigo sin fertilizar logró una absorción de P de sólo 3,2 (mg/maceta) y un rendimiento de 3,6 (g/maceta) (Cuadro 3 y Figuras 3 y 1). Por otra parte, con la aplicación de la RFN en dosis de 400 (mg/maceta) de P, los mayores rendimientos se obtuvieron con la RF de Mejillones y de Bahía Inglesa con valores de 28,6 y 27,2 (g/maceta), que igualaron al SFT y absorciones de P de 65,5 y 62,8 (mg/maceta), respectivamente (Cuadro 3 y Figura 3). Al mismo tiempo, las mayores eficiencias de absorción de P correspondieron a las RF de Mejillones y Bahía Inglesa, a la dosis de P aplicada de 100 (mg/maceta), con valores de 36 y 33%, respectivamente (Cuadro 3). Por el contrario, los valores más bajos para rendimiento y absorción se obtuvieron con las RF La Serena y Tampa, con rendimientos de 5,5 y 19,4 (g/maceta) de m.s. y absorciones de 4,3 y 30,1 (mg/maceta) de P, respectivamente, con la dosis máxima de 400 (mg/maceta) de P, siendo el rendimiento de la ballica al aplicar la RFN de Tampa aproximadamente 4 veces mayor que el obtenido al fertilizar con la RFN de La Serena. Por el contrario, la RF de La Serena no presentó respuesta en rendimiento, ni en absorciones de P por las plantas.

CUADRO 3. Efecto de la aplicación de fósforo con rocas fosfóricas naturales y parcialmente aciduladas con H₂SO₄ al 30 y 50% en el rendimiento, absorción de fósforo y eficiencia agronómica relativa de las ballicas¹ (*Lolium perenne*), comparada con el superfosfato triple (rendimiento SFT = 100%) y otras fuentes fosfatadas (SFN, KH₂PO₄)

TABLE 3. Effect of phosphorus application from phosphoric rocks, natural and partially acidulated with 30 and 50% of sulfuric acid in yield, phosphorus uptake and the relative agronomic effectiveness of ryegrass¹ (*Lolium perenne*) compared with superphosphate (superphosphate yield = 100%) and another phosphorus sources (NSF, KH₂PO₄)

Fuente de fósforo	Rendimiento (g/maceta)			Absorción de P At (mg P/maceta)			Eficiencia absorción de P (Et (%))			Eficiencia agronómica relativa (%)		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
SFT	22,2	27,8	28,0	38,6	57,7	71,0	36	27	17	100	100	100
SFN	19,5	21,6		31,4	41,9		29	19		86	84	
KH ₂ PO ₄	22,8	28,5	31,4	41,9	59,1	78,6	39	28	19	103	103	114
RFN²:												
Tampa	9,8	15,3	19,1	11,0	21,5	30,1	8	9	7	32	48	63
Mejillones	21,4	22,2	28,6	39,6	44,5	65,5	36	21	16	96	72	102
Bahía Inglesa	20,7	23,9	27,2	35,8	47,5	62,8	33	22	15	92	94	97
La Serena	3,5	4,5	5,5	2,7	3,6	4,4	0	0	0	-2	2	7
RFPA³ 30%:												
Tampa	14,3	18,9	23,7	18,8	29,9	46,9	16	13	11	57	63	82
Mejillones	20,9	25,8	30,8	39,3	52,8	79,8	36	25	19	93	92	112
Bahía Inglesa	19,1	20,8	26,3	32,8	40,4	56,5	30	19	13	83	71	93
La Serena	12,4	18,8	22,4	16,4	27,4	41,1	13	12	10	46	62	77
RFPA 50%:												
Tampa	17,4	21,0	26,7	25,2	38,8	55,8	22	18	13	74	71	94
Mejillones	21,0	25,9	33,4	38,2	57,5	82,9	35	27	20	94	92	122
Bahía Inglesa	19,2	23,8	29,7	32,7	45,9	66,6	30	21	16	84	83	107
La Serena	17,8	22,4	26,2	27,0	44,3	50,7	24	21	12	76	77	93
Testigos:												
- Sin fert. base	3,6			3,2								
- Con fert.	3,9			3,1								

Simbolos: Dosis de fósforo, D1 = 100 mg/maceta; D2 = 200 mg/maceta; D3 = 400 mg/maceta. SFT = Superfosfato triple; SFN = Superfosfato normal. KH₂PO₄ = fosfato mono-ácido de potasio, sal pro análisis. Et = Eficiencia de absorción de P. At = Absorción de P del tratamiento (mg P extraído). EAR = Eficiencia agronómica relativa.

¹En suma de seis cortes (for six cuts).

²RFN: Roca fosfórica natural.

³RFPA: Roca fosfórica parcialmente acidulada con ácido sulfúrico.

Resultados del análisis estadístico

Se seleccionaron los tratamientos y se realizaron análisis de contrastes ortogonales:

1) Contraste ortogonal del tipo de RF por dosis de P aplicado.

a) Efecto de diferentes dosis en el rendimiento a nivel de cada RF (Cuadro 4, letras minúsculas, a nivel vertical). Al incrementar la dosis de P aplicada, aumenta en forma significativa el rendimiento promedio de la ballica, por ej. fertilizada con RFN de Bahía Inglesa con dosis de P de 100; 200 y 400 (mg/maceta) se obtienen rendimientos promedios signi-

ficativamente diferentes de 19,7; 22,8 y 27,7 (g/maceta), respectivamente (Cuadro 4).

b) Efecto de diferentes RF en el rendimiento a nivel de cada dosis (Cuadro 4, letras mayúsculas a nivel horizontal). Cuando se aplicó la dosis de P de 100 (mg/maceta) los rendimientos promedios obtenidos al aplicar las RF de Mejillones y Bahía Inglesa son significativamente iguales, 21,2 y 19,7 (g/maceta), respectivamente y significativamente mayores a los obtenidos al aplicar la RF de Tampa, 13,9 (g/maceta) y éstos, a su vez, mayores a los obtenidos con la RF de La Serena, con rendimientos promedios de 11,2 (g/maceta).

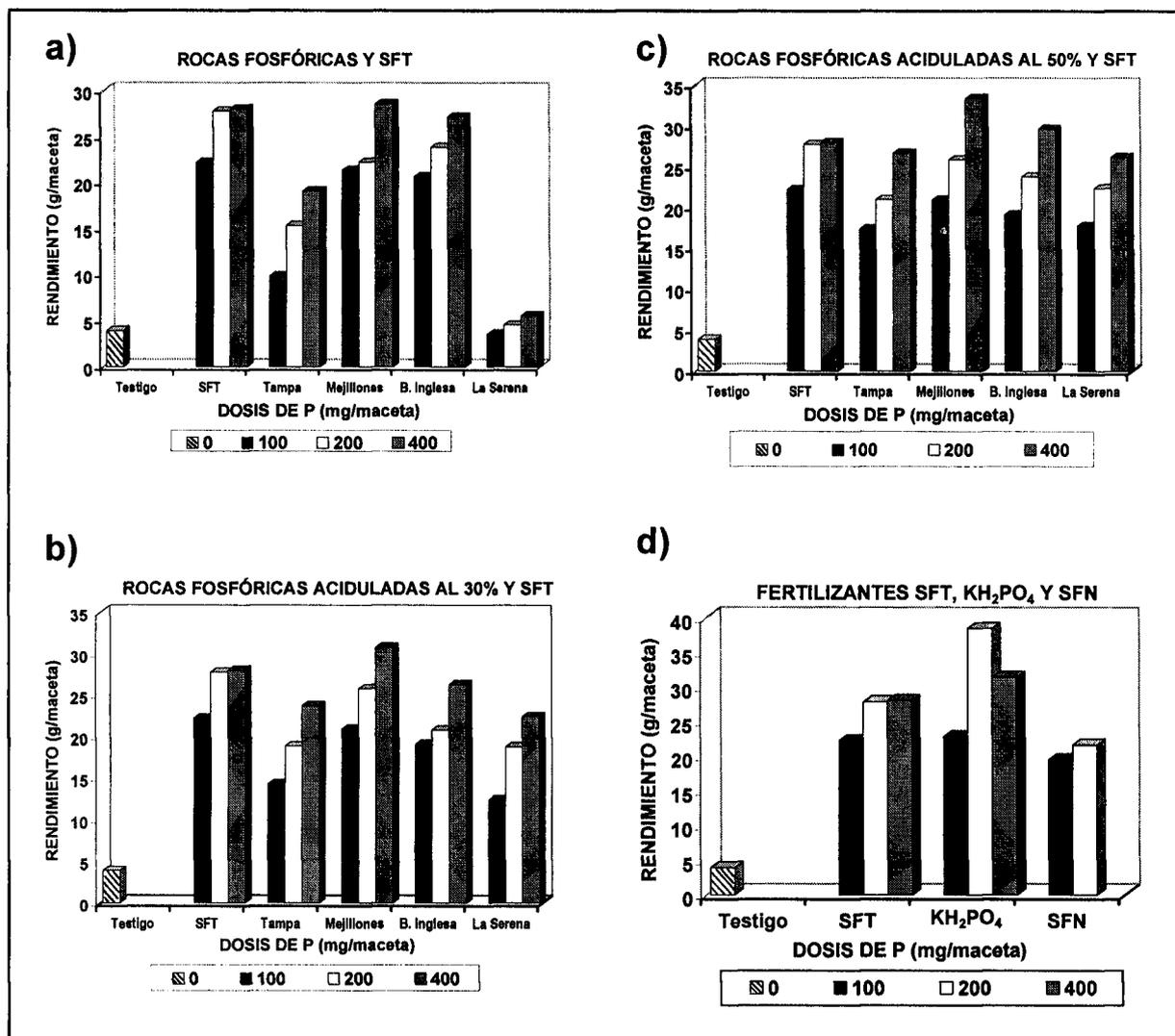


FIGURA 1. Efecto de la aplicación de fósforo de rocas fosfóricas: a) RF naturales, b) RF aciduladas con H₂SO₄ al 30% y c) RF aciduladas al 50% en el rendimiento de la ballica (*Lolium perenne*), comparada con otras fuentes de fósforo d) SFT, KH₂PO₄ y SFN (en suma de seis cortes).

FIGURE 1. Effect of phosphorus application from phosphoric rocks, PR nature (a), or acidulated with sulfuric acid to 30% (b) and 50% (c) in the yield of ryegrass (*Lolium perenne*) compared with another phosphorus sources (TSF, KH₂PO₄ and NSF (d) (in sum of six cuts).

Al agregar dosis de P de 200 y 400 (mg/maceta), los rendimientos promedios de las distintas RF fueron significativamente diferentes y como ej. al aplicar la dosis de P de 200 (mg/maceta) se obtuvieron valores en rendimiento, en orden decreciente de 25,4; 22,8; 18,4 y 15,2 (g/maceta) para las RF de Mejillones, Bahía Inglesa, Tampa y La Serena, respectivamente (Cuadro 4).

Según la fuente de P aplicada, a las dosis de P de 200 y 400 (mg/maceta) los rendimientos de la ballica siguen la secuencia:

Rendimiento RF (Mejillones > Bahía Inglesa > Tampa > La Serena).

Al realizar pruebas de contrastes, se determinó que los rendimientos de las RF de Mejillones y Bahía Inglesa, en promedio, son significativamente distintas, al 1%, a los rendimientos obtenidos al aplicar SFT (contraste 1). El análisis estadístico nos indica también que al aplicar el fosfato monoácido de potasio, los rendimientos son mayores y significativamente distintos al SFT (contraste 2) y que al fertilizar con la RF de La Serena los rendimientos promedios obtenidos son iguales a los valores de rendimiento

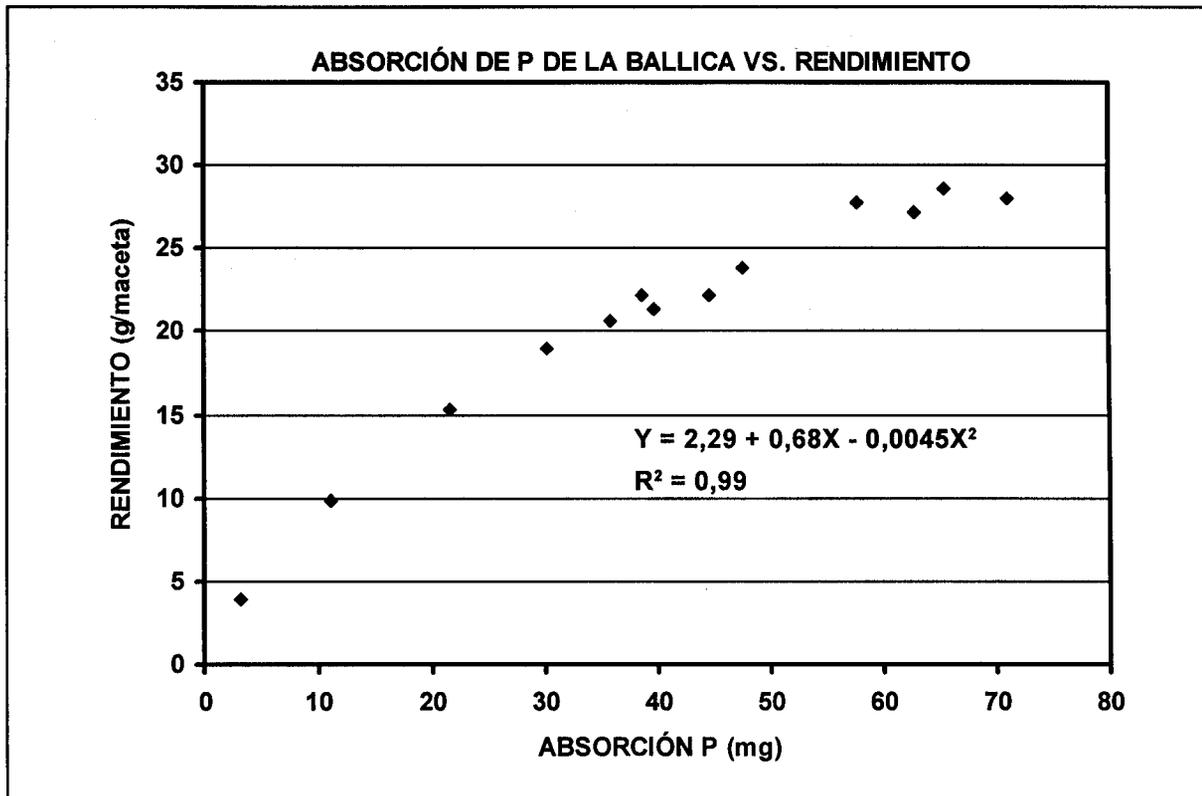


FIGURA 2. Relación entre el rendimiento (g/maceta) y la absorción de fósforo por la ballica (*Lolium perenne*) al aplicar fósforo de las rocas fosfóricas de Bahía Inglesa, Mejillones y Tampa (en suma de seis cortes).

FIGURE 2. Phosphorus extraction by ryegrass (*Lolium perenne*) under phosphorus application from phosphoric rocks of Bahía Inglesa, Mejillones and Tampa in relation with yield (g/pot) (in sum of six cuts).

CUADRO 4. Efecto de la aplicación de fósforo con rocas fosfóricas naturales de Tampa Mejillones, Bahía Inglesa y La Serena a las dosis de 100; 200 y 400 (mg/maceta) de P sobre el rendimiento de materia seca (g/maceta) de la ballica¹ (*Lolium perenne*)

TABLE 4. Effect of phosphorus application from natural phosphoric rocks of Tampa, Mejillones, Bahía Inglesa and La Serena of at rates of 100; 200 y 400 (mg/pot) of phosphorus on the dry matter yield (g/pot) of ryegrass¹ (*Lolium perenne*)

Dosis P (mg)	Rendimiento de ballica con rocas fosfóricas (g/maceta) ¹			
	Tampa	Mejillones	Bahía Inglesa	La Serena
100	B 13,9 c ²	A 21,2 c	A 19,7 c	C 11,2 c
200	C 18,4 b	A 25,4 b	B 22,8 b	D 15,2 b
400	C 23,2 a	A 30,8 a	B 27,7 a	D 18,0 a

Rendimiento testigo con fertilización base, excepto P = 3,9 (g/maceta).

¹En suma de seis cortes (in sum of six cuts).

²Letras diferentes, a nivel vertical (minúsculas), a nivel horizontal (mayúsculas), indican diferencias significativas (Duncan P < 0,05).

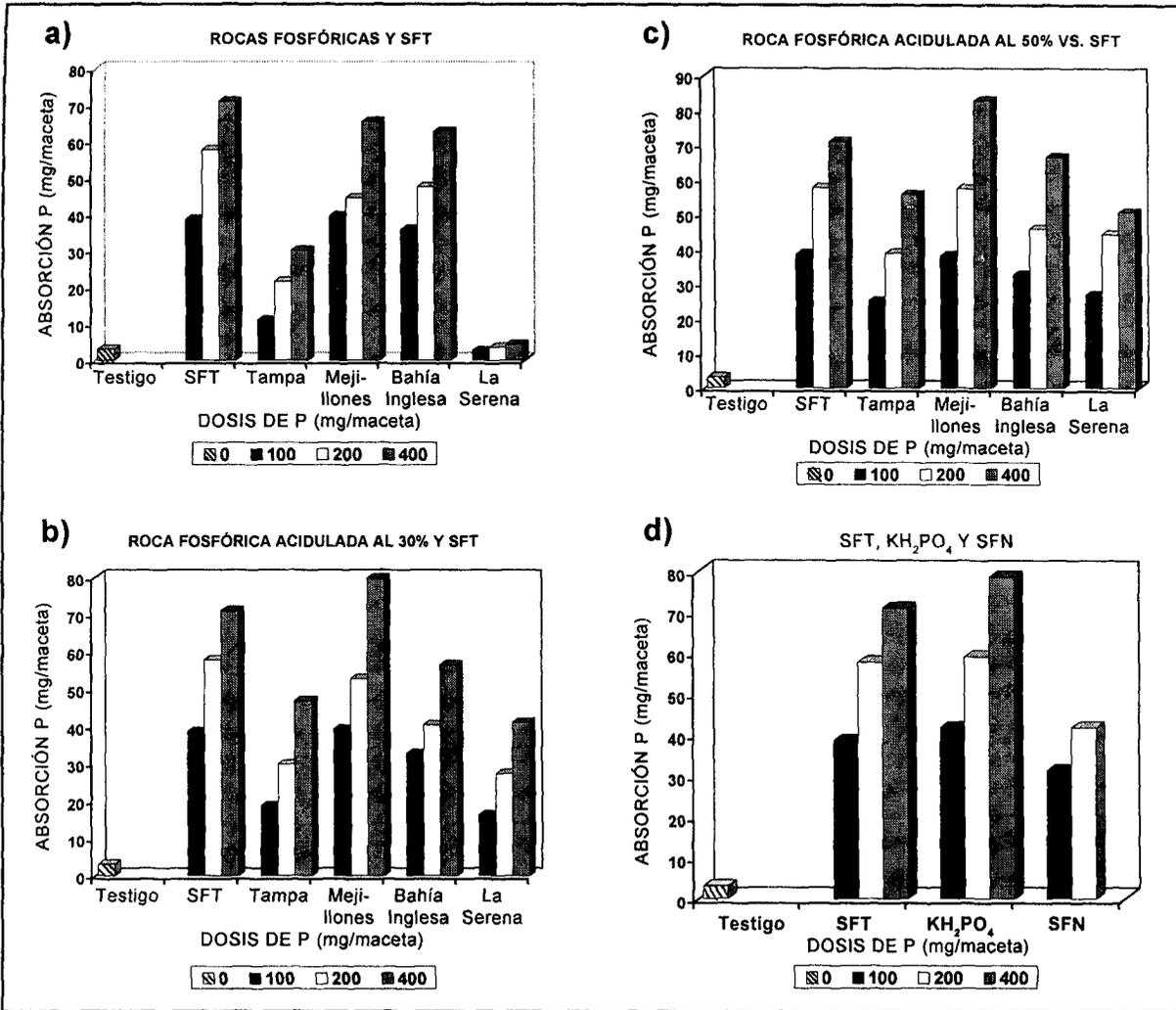


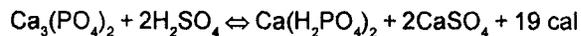
FIGURA 3. Efecto de la aplicación de fósforo de rocas fosfóricas: a) RF naturales, b) RF aciduladas con H₂SO₄ al 30% y c) RF aciduladas al 50% en la absorción de P de la ballica (*Lolium perenne*), comparada con otras fuentes de fósforo d) SFT, KH₂PO₄ y SFN (en suma de seis cortes).

FIGURE 3. Effect of phosphorus application from phosphoric rocks, PR nature (a), or acidulated with sulfuric acid to 30% (b) and 50% (c) in the phosphorus extraction by ryegrass (*Lolium perenne*) compared with another phosphorus sources TSF, KH₂PO₄ and NSF (d) (in sum of six cuts).

de la ballica en el suelo usado como testigo (contraste 3).

Efecto de la acidulación

Cuando las RF se aplican aciduladas, los rendimientos y absorciones respecto a los testigos y a las RFN, aumentan (Cuadro 3), e, independientemente de su origen, tienden a homologarse al nivel de 50% de acidulación (Figuras 1 y 3). Ello es debido a que, independientemente de la mineralogía de la RF, el producto de acidulación es el mismo de acuerdo a la reacción:



A una misma dosis de P, el rendimiento aumentó con el grado de acidulación. Este alcanzó un máximo, al acidular al 50% la RF de La Serena a la dosis de 400 (mg/maceta) de P, el rendimiento varió de 5,5 (g/maceta) con la aplicación de RFN a 26,2 (g/maceta) con RFPa, o sea, el rendimiento aumentó 5 veces. Al aumentar el nivel de acidulación de la RFN de La Serena aumentó la concentración del P soluble en agua (Cuadro 5), y con ello los rendimientos (Cuadro 3).

CUADRO 5. Solubilidad en agua del fósforo contenido en las diferentes fuentes fosfatadas utilizadas y solubilidad del fósforo en los solventes ácido cítrico, citrato de amonio, ácido acético y ácido fórmico de las rocas fosfóricas naturales

TABLE 5. Water solubility of phosphorus contents in the different phosphorus sources employed and solvents solubility of phosphorus in citric acid, ammonium citrate, acetic acid and formic acid from natural phosphoric rocks

Fuente de fósforo y mineralogía	Modificación de la fuente de P	P total fuente % P ₂ O ₅	BPL ¹ %	% total ² P ₂ O ₅ (% relativo) ³ soluble en				
				Agua	Ácido cítrico 2%	Citrato amonio pH 7,0	Ácido acético 2 M	Ácido fórmico 2%
RF La Serena Cloroapatita	RFN ⁴	33,0	73	0,0	6,6 (20,0)	0,3 (1,0)	4,8 (14,5)	7,8 (23,6)
	RFFPA ⁵ 30%	30,8		7,9 (26)				
	RFFPA 50%	33,0		15,4 (47)				
RF Mejillones Fluor-carbonato-apatita	RFN	5,0	11	0,0	4,8 (96,0)	0,6 (12,0)	2,8 (56,0)	3,9 (78,0)
	RFFPA 30%	4,9		1,8 (37)				
	RFFPA 50%	3,2		1,8 (56)				
RF B. Inglesa Fluor-carbonato-apatita	RFN	16,4	40	0,0	9,0 (49,0)	5,4 (29,3)	6,7 (36,6)	9,4 (51,1)
	RFFPA 30%	15,6		5,0 (32)				
	RFFPA 50%	14,6		8,2 (56)				
RF Tampa Fluor-carbonato-apatita	RFN	32,4	71	0,0	6,5 (20,0)	0,6 (2,0)	4,8 (14,8)	7,8 (24,1)
	RFFPA 30%	30,1		7,2 (24)				
	RFFPA 50%	26,9		12,0 (45)				
SFT	Granulado			87				

¹BPL = Bone Lime Phosphate o grado comercial que tiene una RF, corresponde al % P₂O₅ de una RF el que se expresa como % Ca₃(PO₄)₂.

²% total P₂O₅ = El P solubilizado se expresa como % P₂O₅ de la RF total analizada (mg P₂O₅ solubilizados/mg de RF analizada) x 100.

³% relativo = Valores indicados entre paréntesis son los valores del % P₂O₅ relativo y corresponden a los mg de P solubilizados de 100 mg del contenido de P₂O₅ total de la roca, o sea se expresa como % del contenido total de P₂O₅ de cada RF.

⁴RFN = roca fosfórica natural, molida.

⁵RFFPA = Roca fosfórica parcialmente acidulada con ácido sulfúrico.

Resultados del análisis estadístico

2) Contraste ortogonal del grado de acidulación por tipo de RF

a) Efecto del grado de acidulación de las RF en el rendimiento a nivel de cada RF aplicada (Cuadro 6, letras minúsculas, a nivel vertical). No existen diferencias significativas en los rendimientos promedios al aplicar RF de Mejillones y Bahía Inglesa, por lo tanto, no existe efecto a la acidulación. En cambio sí existe efecto a la acidulación para las RF de La Serena y Tampa, se obtienen rendimientos significativamente mayores al aplicar estas RF aumentando el grado de acidulación, por ej. con RF La Serena se obtienen rendimientos de 4,5 a 17,9 y 22,2 (g/maceta) al incrementar el grado de acidulación de 0 a 30 y 50%, respectivamente (Cuadro 6).

b) Efecto de diferentes RF en el rendimiento a nivel de cada acidulación (Cuadro 6, letras mayúsculas, nivel horizontal). Cuando se aplican las RFN sin aci-

dular (0% acidulación), los rendimientos promedios obtenidos con las RF de Mejillones 24,8 (g/maceta) y de Bahía Inglesa 24,0 (g/maceta), son iguales entre sí y significativamente mayores a los rendimientos de las RF de Tampa, 14,8 (g/maceta) y valores significativamente menores se obtienen al usar RF de La Serena 4,5 (g/maceta). Los rendimientos de la ballica siguen la siguiente secuencia:

[RF Mejillones = RF Bahía Inglesa] > RF Tampa > [RF La Serena = Testigo]

En pruebas de contraste se determinó que los rendimientos de las RF de Mejillones y Bahía Inglesa en promedio son significativamente distintas al 1%, a los rendimientos obtenidos con el SFT (contraste 1).

Los rendimientos de las RFFPA al 30% en promedio (25,8 g/maceta) son significativamente mayores que los rendimientos de la RFFPA de Bahía Inglesa (22,1 g/maceta) y los de ésta, significativamente mayores

CUADRO 6. Efecto de la aplicación de fósforo con rocas fosfóricas naturales de Tampa, Mejillones, Bahía Inglesa y La Serena y parcialmente aciduladas con ácido sulfúrico al 30 y 50% sobre el rendimiento de materia seca de la ballica¹ (*Lolium perenne*) (g/maceta)

TABLE 6. Effect of phosphorus application from nature phosphoric rocks of Tampa, Mejillones, Bahía Inglesa y La Serena and partially acidulated 30 y 50% of sulfuric acid on the dry matter yield of ryegrass¹ (*Lolium perenne*) (g/pot)

Tipo acidulación %	Rendimiento de ballica con rocas fosfóricas (g/maceta) ¹			
	Tampa	Mejillones	Bahía Inglesa	La Serena
Ac. 0%	B 14,8 c ²	A 24,8 b	A 24,0 a	C 4,5 c
Ac. 30%	C 19,0 b	A 25,8 ab	B 22,1 b	C 17,9 b
Ac. 50%	C 21,7 a	A 26,9 a	B 24,2 a	C 22,2 a

Rendimiento testigo con fertilización base, excepto P = 3,9 (g/maceta).

¹En suma de seis cortes (in sum of six cuts).

²Letras diferentes, a nivel vertical (minúsculas), a nivel horizontal (mayúsculas), indican diferencias significativas (Duncan P < 0,05).

a los rendimientos de Tampa 19,0 (g/maceta) y La Serena 17,9 (g/maceta), los cuales no son significativamente diferente entre sí (Cuadro 6). El mismo comportamiento se obtiene del análisis de las RFPA aciduladas al 50%. Sin embargo, las RF de Mejillones y Bahía Inglesa no presentan efecto en el rendimiento a la acidulación (Cuadro 6, letras minúsculas), por lo tanto el incremento en el rendimiento de la RF de Mejillones comparada con la de B. Inglesa al acidularla, se debe a un mayor efecto en la dosis (Cuadro 3), ya que se determinó que existe interacción entre dosis y grado de acidulación.

3) Contraste ortogonal del grado de acidulación por dosis

a) Efecto de diferentes dosis de P en el rendimiento a nivel de cada acidulación de la RF (Cuadro 7, letras minúsculas, vertical). Al aumentar la dosis de P aplicada aumenta significativamente el rendimiento promedio de cada uno de los grados de acidulación de las RF. Cuando las RF se acidulan al 30% los rendimientos aumentan significativamente con valores de 16,7; 21,1 y 25,8 (g/maceta) al aumentar las dosis de P a valores de 100; 200 y 400 (mg/maceta) (Cuadro 7).

CUADRO 7.-Efecto de la aplicación de fósforo con rocas fosfóricas naturales y parcialmente aciduladas, con ácido sulfúrico al 30 y 50%, a las dosis de 100; 200 y 400 (mg/maceta) de P sobre el rendimiento de materia seca de ballica¹ (*Lolium perenne*) (g/maceta)

TABLE 7.- Effect of phosphorus application from nature phosphoric rocks and partially acidulated, 30 and 50% of sulfuric acid, at rates of 100; 200 y 400 (mg/pot) on the dry matter yield (g/pot) of ryegrass¹ (*Lolium perenne*)

Dosis P (mg)	Rendimiento de ballica ¹ con rocas fosfóricas aciduladas		
	Ac. 0%	Ac. 30%	Ac. 50%
100	C 13,8 c ²	B 16,7 c	A 19,0 c
200	C 17,1 b	B 21,1 b	A 23,2 b
400	C 20,1 a	B 25,8 a	A 29,0 a

Rendimiento testigo con fertilización base, excepto P = 3,9 (g/maceta).

¹En suma de seis cortes (in sum of six cuts).

²Letras diferentes, a nivel vertical (minúsculas), a nivel horizontal (mayúsculas), indican diferencias significativas (Duncan P < 0,05).

b) Efecto del grado de acidulación en el rendimiento a nivel de cada dosis (Cuadro 7, letras mayúsculas, horizontal). En cada una de las dosis de P aplicadas aumentan significativamente los valores de rendimiento promedio, al incrementar el grado de acidulación de las RF (Cuadro 7). Con la dosis de P de 200 (mg/maceta) se obtienen rendimientos promedios de 17,1 (g/maceta) al adicionar las RFN (acidulación 0%), rendimiento que aumenta significativamente a 21,1 y 23,2 (g/maceta) al aumentar la acidulación al 30 y 50%, respectivamente (Cuadro 7).

Resultados estadísticos, de los contrastes ortogonales, comparaciones entre medias de tratamientos:

- Se determinó que los rendimientos obtenidos al aplicar RF de Mejillones acidulada al 30% son iguales a los rendimientos obtenidos con SFT (contraste 4).
- El rendimiento de la RF de Bahía Inglesa acidulada al 30% es significativamente diferente al rendimiento obtenido con SFT (contraste 5).
- El rendimiento obtenido al aplicar RF de Mejillones acidulada al 50% es igual al rendimiento obtenido con SFT (contraste 6).

- El rendimiento de la RF de Bahía Inglesa acidulada al 50% es significativamente distinto al rendimiento obtenido al aplicar SFT (contraste 7).

Efecto de la solubilidad de las RF en diferentes extractantes

Con respecto a la solubilidad de las RF en diferentes extractantes (Sepúlveda, *et al.*, 1992), con excepción de la RF de La Serena, se determinó una relación cuadrática entre rendimiento y solubilidad. El mayor rendimiento se obtuvo con las RF más solubles en ácido fórmico, ácido cítrico y citrato de amonio neutro, con un $R^2 = 0,89$; $0,86$ y $0,73$, respectivamente (Figura 4).

La RF de Mejillones presentaron valores de solubilidad de 12,0 y 96,0% P_2O_5 (es el % P_2O_5 solubilizado de la RF, expresado en forma relativa al contenido total del % P_2O_5 de la RF) en los extractantes citrato de amonio, pH 7,0 y ácido cítrico al 2%, respectivamente, valores que corresponden a 0,6 y 4,8% P_2O_5 como valores totales (es el % P_2O_5 solubilizado, calculado con respecto a la muestra total) (Cuadro 5). Lo mismo ocurre con la RF de Bahía Inglesa con

valores de 29,3 y 49,0% P_2O_5 relativo o valores totales de 5,4 y 9,0% P_2O_5 y la RF de La Serena tiene valores muy bajos de 1,0 y 20,0% P_2O_5 (valores totales de 0,3 y 6,6% P_2O_5) (Cuadro 5). De acuerdo a Chien y Hammond (1978), una RF es reactiva cuando presenta valores % P_2O_5 solubles totales, sobre 5,4% de P_2O_5 en citrato de amonio a pH 7 y sobre 10% en ácido cítrico y citrato de amonio a pH 3. La RF de Bahía Inglesa cumple con estas condiciones y es una de las RFN reactiva que presenta valores altos de rendimiento y absorción de P por las plantas (Cuadro 3). Con la RFN de La Serena no se obtuvo una respuesta en rendimiento, ni en absorción de P por la planta. Estos resultados, que concuerdan con su bajo valor de solubilidad total de 0,3 y 6,6% P_2O_5 en citrato de amonio a pH 7 y sobre 10% en ácido cítrico y corrobora el hecho de que es una RF muy poco reactiva.

Grado comercial de una RF. Las RF tienen una composición química variable con contenidos de P_2O_5 de 33,0; 18,4 y 5,0%, para las RF de La Serena, Bahía Inglesa y Mejillones, respectivamente y de 32,4% para la RF de Tampa (Cuadro 5). A partir de los valores porcentuales de P_2O_5 de las RF se

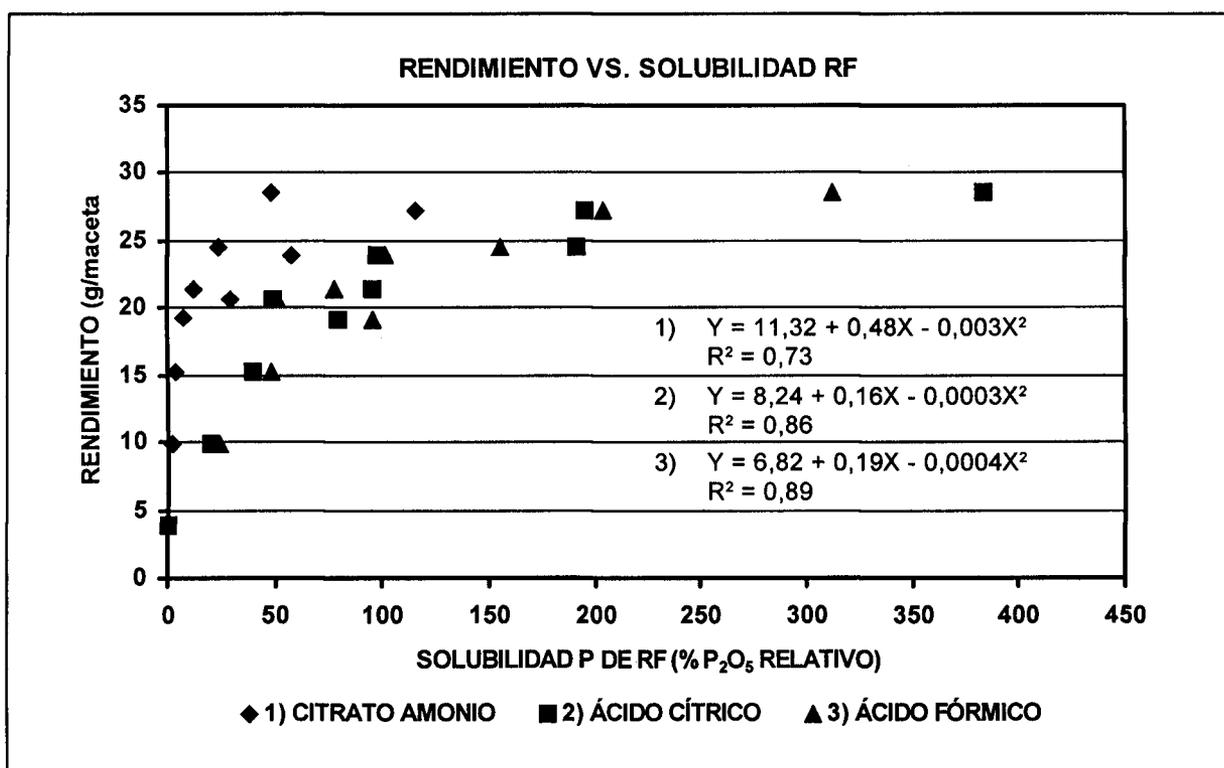


FIGURA 4. Relación entre solubilidad de las rocas fosfóricas de Bahía Inglesa, Mejillones y Tampa, en diferentes solventes: citrato de amonio pH 7, ácido cítrico y ácido fórmico y el rendimiento de la ballica (en suma de seis cortes).

FIGURE 4. Yield of ryegrass in relation with solubility of phosphorics rocks of Bahía Inglesa, Mejillones y Tampa in different solvents: amonium citrate pH 7, citric acid and formic acid (in sum of six cuts).

calculó el BPL (grado comercial que tiene una RF). Una RF se considera comercial cuando el valor del BPL presenta valores en el rango (60 - 83) % (Valdebenito, 1985). Según estos valores, son comerciales las RF de La Serena y de Tampa, con valores de BPL de 73 y 71%, respectivamente; en cambio, las RF de Bahía Inglesa y de Mejillones no serían comerciales por presentar valores de BPL de 40 y 11% (Cuadro 5). Sin embargo, los valores de BPL no se manifiestan en la respuesta en rendimiento al usar las RFN como fertilizantes fosfatados de aplicación directa, lo importante en este caso es la reactividad de la RF.

Reactividad de una RF

La reactividad de una RF está determinada por su composición mineralógica, química y solubilidad en diferentes extractantes (Besoain *et al.*, 1991).

El mayor rendimiento obtenido con la RF de Mejillones, a igualdad de dosis de aplicación de P, se debería a su mayor solubilidad y reactividad. El menor rendimiento con la RF de La Serena se debería a que se trata de una roca, no reactiva.

La caracterización mineralógica indica que el constituyente fosfórico de las RFN de Bahía Inglesa y Mejillones son fluorcarbonato apatita, de origen sedimentario, presentan elevado grado de sustitución isomórfica de fosfato por carbonato, con valores de 0,23 y 0,18, respectivamente (Besoain *et al.*, 1991). El rendimiento obtenido con el uso de la RFN de Bahía Inglesa (Cuadro 3), es coincidente también con su composición química y reactividad, situación que la califica como una fosforita muy reactiva con evidente capacidad fertilizante. La RFN de Mejillones, aun cuando también es reactiva, tiene un contenido de P_2O_5 inferior a 5,0%, valor que la limita para ser usada como fertilizante de uso directo, debido a que se necesita mayor cantidad de la RFN para aplicar una misma dosis de P. Por el contrario, la RFN de La Serena, la cual no presenta respuesta en rendimiento, es una cloroapatita de origen ígneo/sedimentario, roca, prácticamente, inerte que no presenta sustitución isomórfica de fosfato por carbonato (Besoain *et al.*, 1991). Sin embargo, aun cuando tiene un alto contenido de P, 33,0% P_2O_5 , es poco soluble en los extractantes de P, lo que explica que el rendimiento de la ballica sea similar al testigo.

Eficiencia Agronómica Relativa (EAR)

El análisis de los rendimientos acumulados en 6 cortes, se realizó calculando los índices de EAR (%) de las RF con y sin tratamientos de acidulación, comparándolas con la EAR del SFT (EAR = 100%), para las tres dosis usadas (Cuadro 3). Con la roca

de Mejillones, a la dosis de P de 400 (mg/maceta), se determinó el valor máximo de la EAR 102%; a esta misma dosis, pero acidulada al 30% la EAR, es del 112%.

La EAR (%) de las RFN, sin acidular, a la dosis de P de 200 (mg/maceta), determina el siguiente orden:

RF Mejillones = Bahía Inglesa > Tampa > La Serena

La EAR (%) aumentó con el tiempo, lo que podría estar indicando un efecto residual. En la eficiencia agronómica de las RFPA, a la dosis de P de 200 (mg/maceta), se reprodujo el mismo orden (Cuadro 3). Sin embargo, se debe señalar que con el incremento de la dosis de P de 100 a 400 (mg/maceta) y del grado de acidulación, la EAR tiende a homologarse, independientemente de la fuente de RF, y, es así como con la dosis y grado de acidulación máximos, la diferencia de EAR entre las RF de La Serena, Bahía Inglesa y Mejillones es menor, ya que los valores de la EAR fueron 93, 107 y 122%, respectivamente, comparadas con la EAR del SFT de 100%. La aplicación de las RF de Bahía Inglesa y Mejillones superaron la eficiencia del SFT, ya que se obtienen valores de EAR superiores al 100% (Cuadro 3). La EAR de las RF aciduladas al 50 % con H_2SO_4 , siguieron el siguiente orden: EAR (%) [RF Mejillones > Bahía Inglesa > La Serena > Tampa].

Fósforo disponible y pH del suelo

Al término del experimento (6 cortes) se determinó que la fertilización con las fuentes de fósforo indujeron cambios en el contenido del P disponible inicial del suelo y en el pH (Cuadro 8 y Figura 5). En el testigo sin fertilizar el contenido de P disminuyó desde 3 a 2 (mg/kg).

La adición de SFT aumentó el P disponible (Figura 5) sólo a las dosis de 200 y 400 (mg/maceta) de P de 3 (mg/kg) a 5 y 12 (mg/kg), respectivamente, pero disminuyó a 2 (mg/kg) con la dosis de 100 (mg/maceta) de P, disminución que se debería a la extracción del cultivo. Simultáneamente el pH se incrementó de 5,5 a (6,3-6,4) con las 3 dosis de P aplicadas. Este hecho significa que la adsorción de aniones $H_2PO_4^-$, por los componentes alofánicos u orgánicos del suelo, libera grupos OH^- al medio (Bowden *et al.*, 1980a).

La aplicación de RFN de Bahía Inglesa y Mejillones, produjo efectos comparables en el suelo: con la dosis de P de 100 (mg/maceta) el P disponible disminuyó de 3 (mg/kg) contenido inicial, a 2 y 1 (mg/kg), respectivamente; con la dosis de P de 200 (mg/maceta) el P disponible aumentó a 6 y 5 (mg/kg), respectivamente, en tanto que con la dosis de P de

CUADRO 8. Efecto de la aplicación de diferentes fuentes fosfatadas sobre el contenido de P disponible (fósforo Olsen) y en los valores de pH del suelo al término del ensayo**TABLE 8. Effect of application of different phosphorus sources on the available phosphorus (phosphorus Olsen) and the pH of the soil at the end of the experiment**

Fuente de fósforo	Modificación	P disponible (mg/kg)			pH H ₂ O (1:2,5)		
		D1 ¹	D2	D3	D1	D2	D3
Testigo	Sin fertilización base	2			5,7		
	Con fertilización base	2			5,7		
SFT	Granulado	2	5	12	6,4	6,6	6,4
Tampa	RFN ²	2	1	1	6,1	6,4	6,3
	RFPA ³ 30%	2	3	5	6,1	6,1	6,1
	RFPA 50%	3	4	8	6,0	6,0	6,0
Mejillones	RFN	2	6	8	6,3	6,4	6,4
	RFPA 30%	3	6	13	6,1	6,0	6,0
	RFPA 50%	4	6	20	6,0	5,8	5,4
Bahía Inglesa	RFN	1	5	8	6,2	6,3	6,3
	RFPA 30%	3	3	7	6,1	6,1	6,1
	RFPA 50%	3	5	11	6,0	6,0	6,0
La Serena	RFN	1	1	1	5,5	5,5	5,5
	RFPA 30%	2	3	5	6,0	6,0	6,1
	RFPA 50%	3	5	6	6,1	6,1	6,1
SFN	Granulado	3	4		6,2	6,1	
KH ₂ PO ₄	p.a.	5	8	22	6,1	6,0	6,1

¹Dosis de fósforo, D1 = 100 mg/maceta; D2 = 200 mg/maceta; D3 = 400 mg/maceta.

²RFN, roca fosfórica natural, molida.

³RFPA, roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico.

400 (mg/maceta) el P disponible se incrementó a 8 (mg/kg), con ambas RFN, indistintamente. En forma simultánea el pH aumentó de 5,5 al rango (6,2-6,4) con las tres dosis de P aplicadas. Estos resultados señalan analogías de comportamiento entre estas RF y el SFT.

Con la aplicación de las RF de La Serena y Tampa el P disponible (Olsen) inicial del suelo disminuyó de 3 a 1 y 2 (mg/kg) respectivamente. Esto significa que la baja solubilidad y reactividad de estas rocas obliga a la ballica a consumir alrededor del 50% del P disponible inicial del suelo para su supervivencia, en condiciones de maceta.

El pH del suelo no varió con la aplicación de la RF de La Serena, pero sí con la de Tampa, ya que con ésta experimentó un alza de pH desde 5,7 a (6,1-6,4).

La adición de RF de Mejillones y Bahía Inglesa, aciduladas al 30% con H₂SO₄, provocó un aumento del P disponible del suelo Vilcún con las dosis de

200 y 400 (mg/maceta) de P, siendo mayor este efecto con la RF de Mejillones. Con el mismo nivel de acidulación, el uso de las RF de La Serena y Tampa determinó que el P disponible aumentase a 5 (mg/kg), con la dosis de 400 (mg/maceta) de P. Estas últimas RF provocaron una leve alza del pH de 5,5 a (6,0-6,1) (Cuadro 8).

La fertilización con RF de Mejillones y Bahía Inglesa, aciduladas al 50%, provocó aumentos del P disponible con todas las dosis usadas, siendo mayor cuando se usó la dosis de P de 400 (mg/maceta) (Figura 5). En este último caso, el P disponible aumentó de 2 (mg/kg) a 20 y 11 (mg/kg), respectivamente. En el caso de las RFPA (50%) de Tampa y La Serena, el P disponible aumentó levemente con la dosis de 200 (mg/maceta) de P, desde 3 (mg/kg) inicial, a 4 y 5 (mg/kg), respectivamente y con la dosis de P de 400 (mg/maceta) el P disponible aumentó con ambas rocas a 8 y 6 (mg/kg), respectivamente. El mayor incremento en el P disponible a 22 (mg/kg) se obtuvo al fertilizar con la sal de P.

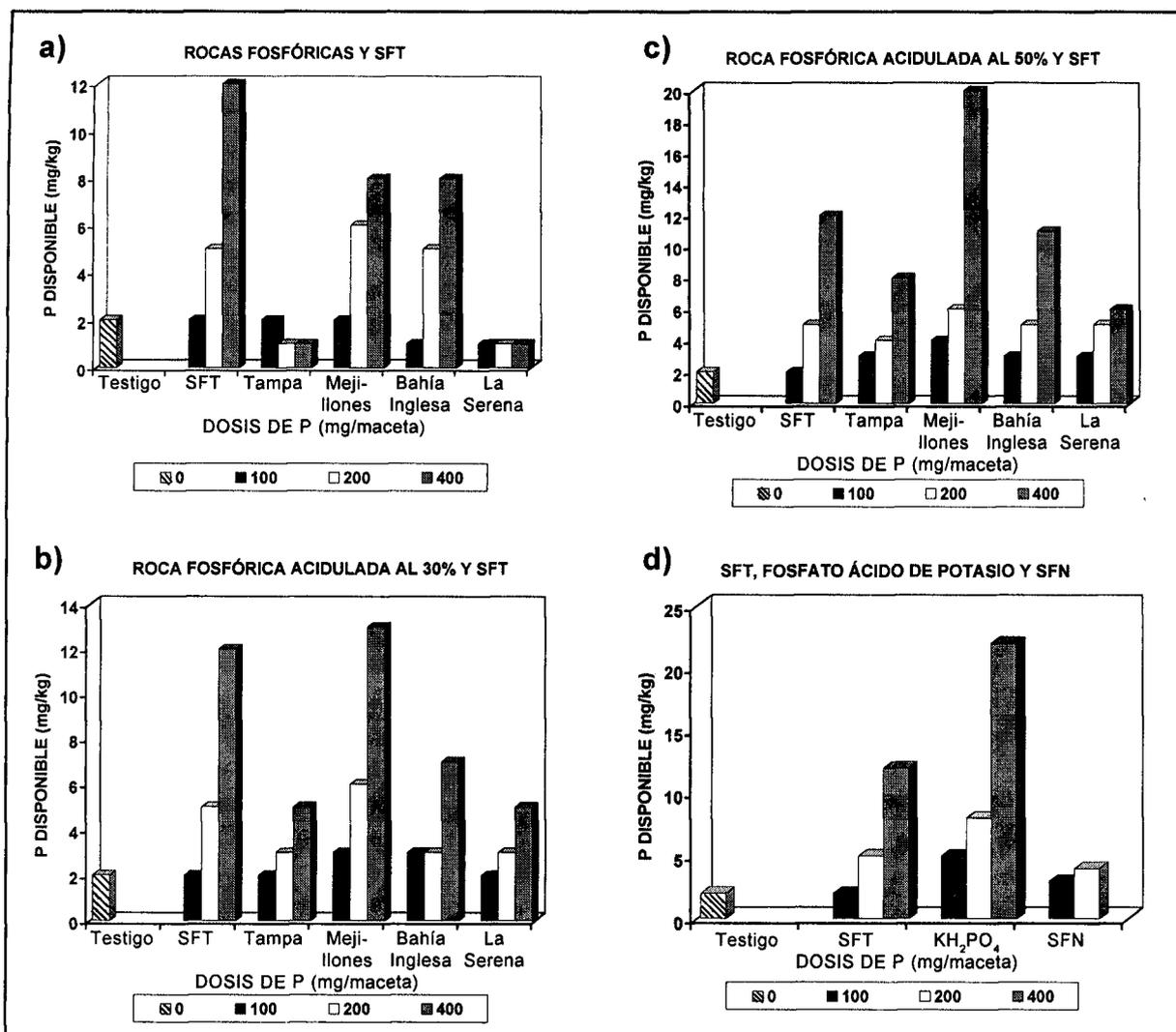


FIGURA 5. Efecto de la aplicación de fósforo de rocas fosfóricas: a) RF naturales, b) RF aciduladas con H₂SO₄ al 30% y c) RF aciduladas al 50% en el fósforo disponible (Olsen) del suelo comparada con otras fuentes de fósforo d) SFT, KH₂PO₄ y SFN, al final del experimento.

FIGURE 5. Effect of phosphorus application from phosphoric rocks, PR nature (a), or acidulated with sulfuric acid to 30% (b) and 50% (c) in available phosphorus of soil (Olsen) compared with another phosphorus sources TSF, KH₂PO₄ and NSF (d) at the end of the experiment.

El valor del pH se mantuvo, en todos los casos, alrededor de 6,0, excepto con la RF de Mejillones con cuya aplicación el pH permaneció entre 5,8 y 5,4 con las dosis de P de 200 y 400 (mg/maceta), respectivamente. El mayor incremento del P disponible del suelo se obtuvo con la aplicación de la sal, KH₂PO₄ p.a., la cual, a las dosis de 100; 200 y 400 (mg/maceta) de P provocó un aumento del P disponible desde 3 (mg/kg) a 5; 8 y 22 (mg/kg), respectivamente (cuadro 8, figura 5). Esta última cifra indica que la disponibilidad del P aumentó 7 veces en el suelo, y el pH del suelo a 6,1.

CONCLUSIONES

El efecto en el rendimiento de la ballica, al aplicar las rocas fosfóricas chilenas, en forma natural, como fertilizantes fosfatados de uso directo, en un suelo volcánico ácido, en condiciones de invernadero, depende del origen o de la naturaleza de la roca fosfórica, de la dosis de P, de la acidulación parcial y de la interacción entre acidulación y dosis de P aplicada. Los mayores rendimientos y eficiencias agronómicas se obtuvieron con las RF chilenas de Mejillones y Bahía Inglesa, son fluorcarbonato apa-

titas, muy reactivas, con elevado grado de sustitución isomórfica de fosfato por carbonato. Sin embargo, debido a que el contenido de P de la RFN de Mejillones es muy bajo, se necesitaría aumentar necesariamente la cantidad de RFN aplicada para obtener las dosis de P necesaria, lo que aumentaría el costo de aplicación. Tal circunstancia disminuye fuertemente su opción de uso. La RF de La Serena es una cloroapatita de origen ígneo, aplicada como fertilizante fosfatado de uso directo, no tiene efecto en el rendimiento de la ballica, estadísticamente, éste fue igual al rendimiento obtenido con el testigo, sin fósforo; sin embargo, acidulada mejora su EAR posibilitando su uso agrícola y su aplicación como materia prima para fabricar fertilizante fosfatado. Luego, la RF con mejor posibilidad para uso directo es la RF de Bahía Inglesa. El uso de las RFN reactivas aumentaron además el pH y el P disponible del suelo, en cambio, la RFN de La Serena no afectó al pH, ni al P disponible del suelo.

El rendimiento de la ballica, fertilizada con las RFN reactivas, también es función de la dosis de P aplicada por maceta y de la concentración de la acidulación de la RF con ácido sulfúrico. Estos mismos factores determinaron un incremento del P disponible del suelo y de la absorción de P por las plantas. A mayor dosis de P se obtuvo mayor rendimiento. Con la RFN de Mejillones y Bahía Inglesa, el efecto de la dosis de P de 400 (mg/maceta) comparado con el SFT, prácticamente homologó el rendimiento obtenido con el SFT, a la misma dosis. La acidulación parcial fue mayor al nivel de 50%. A ese nivel, la EAR de la RF de Mejillones y Bahía Inglesa superaron a la EAR del SFT. La acidulación parcial aumentó la eficiencia de la RF, principalmente de La Serena y Tampa, ya que transformó parte de la RF

en un producto soluble, que proporcionó más P al cultivo. En el caso de la RF reactivas la acidulación parcial al 30 y 50% con H_2SO_4 forma un producto con mayor contenido de P soluble. El mayor grado de acidulación atenúa la influencia del origen y de la mineralogía, ya que el producto de reacción para todas las rocas es el mismo: $Ca(H_2PO_4)_2$ y $CaSO_4$.

El ácido fórmico y el ácido cítrico son los extractantes que presentaron los mayores ajustes de regresión, al relacionarlos con rendimiento. Con respecto a la solubilidad de las RF en diferentes extractantes, se determinó una relación cuadrática entre rendimiento y solubilidad de la roca (sin considerar la RF de La Serena).

El grado comercial, valor del BPL de una RFN, no es importante en la determinación de la reactividad de una RF para ser usada como fertilizante fosfatado de aplicación directa. El BPL de la RFN de La Serena tiene un valor comercial, sin embargo, no tiene efecto en el rendimiento de la ballica cuando se aplica como fertilizante fosfatado de uso directo. Se comprobó también que los mayores rendimientos se relacionaban con las mayores absorciones de P por la planta, sin considerar a la RF de La Serena, la que no presenta respuesta en rendimiento, ni en absorción de P por la planta.

Los resultados obtenidos destacan la importancia de las rocas fosfóricas chilenas que, ciertamente, pueden constituir una alternativa interesante para sustitución de fertilizantes fosfatados tradicionales aplicados en la agricultura de los suelos volcánicos del sur de Chile. Ello puede significar un considerable ahorro de divisas al país y eventualmente menores costos de fertilización para los agricultores.

RESUMEN

Se realizó un experimento de macetas en invernadero de la ballica fertilizada con rocas fosfóricas (RF) chilenas aplicada como fosfato de uso directo, en un suelo volcánico ácido de Chile. Debido, a que la respuesta de las RF al ser aplicadas como fertilizantes fosfatados de uso directo, depende de las propiedades del suelo, de las plantas y del tipo de RF usada. Se determinó el rendimiento de la ballica (*Lolium perenne*) aplicando como fuentes de fósforo las RF chilenas de La Serena, Mejillones y Bahía Inglesa y una RF extranjera de Tampa (Florida, EE.UU.), empleada como referencia. Las RF se agregaron en forma natural, molidas bajo 300 mesh (RFN) y parcialmente aciduladas (RFPa) al 30 y 50% con ácido sulfúrico, comparando su efecto

como fertilizante fosfatado en el rendimiento, con el superfosfato triple, superfosfato normal y con fosfato ácido de potasio p.a. Se utilizó un Andisol Vilcún, Typic Fulvudand del sur de Chile, de bajo contenido de fósforo disponible 3 (mg/kg) y pH ácido 5,5, colectado a (0-20 cm) de profundidad en el sector de General López (IX Región). En cada tratamiento se cuantificó la materia seca y se calculó la eficiencia de absorción de P y la eficiencia agronómica relativa (EAR), para el rendimiento acumulado en los seis cortes de la ballica, durante seis meses. La EAR se determinó en base a curvas de respuesta usando dosis de P de 100, 200 y 400 (mg/maceta), se aplicó una fertilización base, excepto P y el N_2 se agregó cada 15 días. El diseño experimental fue de bloques

al azar con tres repeticiones. También se realizó análisis del P disponible y pH del suelo antes y después del experimento.

El rendimiento de las ballicas depende de la dosis de P, del origen, mineralogía y del grado de acidulación de las rocas fosfóricas con ácido sulfúrico e interacción de la dosis con el grado de acidulación. Estos mismos factores determinaron incrementos en la absorción de P de la ballica y del P disponible y pH del suelo. Al aplicar las RFN, el suministro de P es importante en la medida que las rocas sean reactivas. En rendimiento los mayores valores se obtuvieron con las RF de Bahía Inglesa y Mejillones, son fluorcarbonato apatitas, RF de mayor reactividad en comparación con la RF de La Serena, es una cloroapatita, RF no reactiva, la cual no presenta efecto sobre el rendimiento.

Con las RFPA el comportamiento es diferente comparada con los testigos sin fertilizar, la RFN de La Serena no aumenta el rendimiento, su valor es igual

al testigo, sin embargo, acidulada mejora su EAR al igual que la RF de Tampa. Se transforma parte de la RF en un producto con mayor contenido de P soluble en agua. El mayor grado de acidulación disminuye el efecto del origen y la mineralogía, ya que el producto de reacción para las rocas es el mismo: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y CaSO_4 .

Las RF de Bahía Inglesa y Mejillones, fluorcarbonato apatitas, se pueden usar en agricultura como fertilizantes fosfatados de uso directo en suelos volcánicos ácidos y de bajo contenido de P disponible. Sin embargo, el uso de la RF de Mejillones será limitado debido a su menor contenido de fósforo. La RFN de La Serena, una cloro apatita no se puede usar como fertilizante fosfatado de uso directo, sin embargo, sí se puede usar parcialmente acidulada o como materia prima para fabricar fertilizante fosfatado.

Palabras claves: Rocas fosfóricas, acidulación parcial, fertilizantes fosfatados, RF y suelos ácidos, suelos volcánicos, apatitas.

LITERATURA CITADA

- BESOAIN M., EDUARDO, SEPÚLVEDA W., GLORIA y MOLINA M., ROSA. 1991. Rocas fosfóricas nacionales. I. Caracterización mineralógica y química. *Agricultura Técnica (Chile)* 51(2): 121-130.
- BOWDEN, J.W.; POSNER, A.M. and QUIRK, J.P. 1980 a. Adsorption and charging phenomena in variable charge soils. En: Theng, B.K.G. (ed.). *Soils with variable charge*, Soil Bureau, Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt, New Zealand, p.: 147-166.
- CHIEN S., H. and HAMOND L., L. 1978. A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rocks for direct application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42(6): 935-939.
- FERNÁNDEZ DEL P., MIGUEL y RUIZ S., RAFAEL. 1992. Evaluación agronómica de un concentrado fosfórico de Mejillones. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile). Est. Exp. Carillanca (Temuco), 1º Seminario Nacional sobre uso de Rocas Fosfóricas en Agricultura. Temuco, Chile. Serie Carillanca Nº 29: 117-140.
- GOIC, M., L. 1967. Tipos de fosfato en establecimiento de praderas en Osorno. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile). Sub Estación Experimental de Barro Blanco (Osorno). Circular informativa Nº 2: 20 p.
- HINGSTON, F.J.; POSNER A.M. and QUIRK, J.P. 1967. Specific adsorption of anions. *Nature* 215: 1459-1461.
- LEÓN, L., A. y HAMMOND, L., L. 1984. Efectividad agronómica de las rocas fosfóricas del trópico latinoamericano. En: Grupo latinoamericano de investigadores en roca fosfórica (GLIRF). *La roca fosfórica, fertilizante de bajo costo*. Cochabamba, Bolivia. Tomo II: 211-252.
- LETIELIERA, ELÍAS. 1957. Comparación de diversos fosfatos en trigo. *Agricultura Técnica (Chile)*, Año XVII(2): 55-64.
- MACKAY A., D.; SYERS J., K. and GREGG, P.E.H. 1984. A glasshouse comparison of 6 phosphate fertilizers. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture* 12: 131-140.
- MONTENEGRO B., ADOLFO y BESOAIN M., EDUARDO. 1986. Efecto de diferentes rocas fosfóricas sobre el rendimiento de un cultivar de trigo alternativo en el suelo Vilcún. En: Fondo de Investigaciones Agropecuarias, FIA, Proyecto de Investigación sobre Suelos Volcánicos, Informe Final Registro 101-81, Chile. p.: 81-84.
- RODRÍGUEZ S., JOSÉ y ÁVILA T., PATRICIA. 1985. Evaluación de las rocas fosfóricas de Mejillones y Caldera para su uso en aplicación directa. *Ciencia e Investigación Agraria (Chile)* 12(1): 3-13.
- SCHENKEL S., GOTARDO y BAHERLE V., PEDRO. 1971. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. II. Método usado. *Agricultura Técnica (Chile)* 31: 9-24.

SEPÚLVEDA W., GLORIA, BESOAIN M., EDUARDO y MOLINA M., ROSA. 1992. Eficiencia agronómica de rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso como fertilizantes fosfatados en suelos volcánicos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. E.E. Carillanca. I Seminario Nacional sobre uso de rocas fosfóricas en Agricultura. Serie Carillanca Nº 29, Santiago, Chile. p.: 141-164.

VALDEBENITO C., SAMUEL. 1985. Caracterización de apatitas de la IV Región y sus posibilidades de uso de fertilizantes en suelos volcánicos de Chile. Univ. de Chile, Fac. de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Esc. de Química. (Tesis para optar al título de Químico). 83 p.