



UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

FACULTAD DE AGRONOMIA

**FERTILIZACION FOSFATADA EN MEJORAMIENTOS
DE CAMPO EN LA REGION ESTE**

FACULTAD DE AGRONOMIA

por

DE INVESTIGACION Y
BIBLIOTECA

Santiago FERRES LOPEZ
Pedro Martín QUEHEILLE RAMPOLDI
Ignacio RIET TRUCCO

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo
(Orientación Agrícola Ganadera).

MONTEVIDEO
URUGUAY
2003

PAGINA DE APROBACIÓN

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. M.Phil. Raúl Bermúdez

Ing. Agr. M Sc. Enrique Moliterno

Ing. Agr. Omar Casanova

Ing. Agr. Aurora Cerveñansky

Fecha:

Autores:

Santiago Ferrés López

Pedro Martín Queheille Rampoldi

Ignacio Riet Trucco

AGRADECIMIENTOS

A nuestros directores y ahora amigos Raúl Bermúdez y Walter Ayala por su invalorable paciencia, dedicación y compañerismo dentro y fuera de la tesis.

A Omar Casanova por las ideas aportadas para una mejor comprensión del presente trabajo así como también por su dedicación brindada para poder culminar el mismo.

A Milton Carámbula por todos los consejos y enseñanzas vertidas a favor de la tesis y nuestro desarrollo como futuros profesionales.

A Enrique Deambrosis, Néstor Saldain, Ramón Méndez, Graciela Quintans, Pablo Rovira, Tane Gaggero y Horacio Saravia por toda la ayuda aportada para que la tesis llegara a buen puerto.

A Luis “El Capo” Casales por todos los aportes realizados principalmente fuera de la tesis.

A Jhon Jackson, Néstor “Caco” Serrón y Gerardo Ferreira por la ayuda, convivencia y por el fútbol vertido en el club San Lorenzo.

A todo el plantel femenino del INIA 33 que siempre nos ayudó en todo lo que estuvo a su alcance.

Al Bruno y al Rafa por llevarnos, traernos y bancarnos todos los días.

Al resto del personal de semillas, Palo a Pique y taller que sería imposible nombrarlos a todos, pero nos acordamos de todos y cada uno de ellos.

A Gonzalo Zorrilla por recibirnos y tratarnos siempre bien en la institución.

A nuestras familias y amigos un agradecimiento más que especial por aguantarnos siempre y en todos los momentos, no sólo de la tesis sino a lo largo de la carrera y de la vida, ya que sino fuera por ellos seguramente no estaríamos donde estamos.

TABLA DE CONTENIDO

PAGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	XIV
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 FÓSFORO EN EL SUELO.....	3
2.1.1 CONTENIDO EN LOS SUELOS.....	3
2.1.2 PÉRDIDAS DE FÓSFORO DE LOS SUELOS.....	4
2.1.3 DINÁMICA, ASIMILABILIDAD Y FORMAS DEL FÓSFORO EN LOS SUELOS.....	5
2.1.3.1 <u>Mineralización de los fosfatos</u>	7
2.1.3.2 <u>Reacciones del fósforo en los suelos</u>	8
2.1.3.2.1 Mecanismos de retención del fósforo en los suelos.....	8
2.1.3.2.2 Retención en suelos ácidos.....	8
2.1.3.2.3 Retención en suelos calcáreos.....	9
2.1.3.3 <u>Caracterización a corto plazo del equilibrio entre el fósforo de la fase sólida y el fósforo en solución (Isotermas de retención de fósforo)</u>	9
2.1.3.4 <u>Evolución a largo plazo de la disponibilidad del fósforo agregado</u>	10
2.1.3.5 <u>Reacciones lentas de retrogradación del fósforo lábil hacia fósforo fijado</u>	11
2.1.3.6 <u>Asimilabilidad del fósforo para las pasturas</u>	11
2.1.3.7 <u>Efecto del pH del suelo en la disponibilidad del fósforo</u>	12
2.1.3.8 <u>Comportamiento del fósforo bajo condiciones de anegamiento</u>	13
2.1.3.8.1 Cambios ocurridos en el suelo como resultado del anegamiento.....	13
2.1.3.8.2 Efecto de la inundación sobre la transformación y disponibilidad del fósforo.....	14
2.2 <u>FUNCIÓN DEL FÓSFORO EN LAS PLANTAS</u>	16
2.2.1 EL FÓSFORO EN LA FISIOLOGÍA DE LA PLANTA.....	16
2.2.2 EFECTO DE LA DEFICIENCIA DE FÓSFORO.....	17
2.3 <u>MÉTODOS PARA ESTIMAR EL CONTENIDO DE FÓSFORO</u>	19
2.3.1 <u>CARACTERIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO</u>	20
2.3.1.1 <u>Bray I</u>	20
2.3.1.2 <u>Resinas catiónicas</u>	20

2.3.1.3	<u>Ácido cítrico</u>	20
2.3.2	CARACTERIZACIÓN DEL ANÁLISIS FOLIAR.....	20
2.3.2.1	<u>Para qué sirve ?</u>	21
2.3.2.1.1	Diagnóstico de deficiencias minerales o desórdenes nutricionales.....	21
2.3.2.1.2	Evaluación del estado nutricional y recomendaciones de fertilización.....	21
2.3.2.2	<u>Tipos de análisis foliares</u>	22
2.3.2.2.1	Análisis químico total.....	22
2.3.2.2.2	Análisis de tejidos frescos o análisis rápido.....	22
2.3.3	EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES MÉTODOS.....	22
2.4	FERTILIZANTES FOSFATADOS.....	25
2.4.1	CÁLCULO DEL CONTENIDO DE FÓSFORO DE LOS FERTILIZANTES.....	25
2.4.2	TERMINOLOGÍA DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS.....	25
2.4.2.1	<u>Fósforo soluble al agua</u>	25
2.4.2.2	<u>Fósforo soluble al citrato de amonio</u>	25
2.4.2.3	<u>Fósforo insoluble al citrato</u>	26
2.4.2.4	<u>Fósforo asimilable</u>	26
2.4.2.5	<u>Fósforo total</u>	26
2.4.2.6	<u>Fósforo soluble en ácido cítrico al 2 %</u>	26
2.4.3	FUENTES DE FÓSFORO.....	27
2.4.4	FUENTES DE FÓSFORO PARA LAS PASTURAS.....	27
2.4.4.1	<u>Fosfatos de roca parcialmente acidulados</u>	30
2.4.4.2	<u>Reacciones de los fertilizantes fosfatados insolubles al agua</u>	30
2.5	EFICIENCIA DE DIFERENTES FUENTES DE FÓSFORO.....	32
2.5.1	FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA RELATIVA DE LOS FERTILIZANTES.....	32
2.5.1.1	<u>Factores del suelo</u>	32
2.5.1.1.1	Propiedades del suelo que pueden afectar la eficiencia relativa de los fertilizantes.....	33
2.5.1.2	<u>Especie forrajera considerada</u>	34
2.5.1.3	<u>Granulación y solubilidad del fósforo</u>	34
2.5.1.4	<u>Método de aplicación</u>	35
2.5.1.4.1	Presiembra.....	35
2.5.1.4.2	A la siembra.....	36
2.5.1.4.3	Postsiembra.....	36
2.5.1.4.4	Comparación entre aplicación al voleo o en bandas.....	37
2.5.1.4.5	Eficiencia de las aplicaciones en superficie.....	39
2.6	REQUERIMIENTOS Y EFICIENCIA DE LAS DIFERENTES LEGUMINOSAS FRENTE AL FÓSFORO.....	41
2.6.1	TRÉBOL BLANCO.....	42
2.6.2	LOTUS.....	43
2.6.2.1	<u>Estrategias adaptativas de tres especies de Lotus</u>	43

2.6.3	COMPARACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE FÓSFORO DE ALGUNAS LEGUMINOSAS TEMPLADAS	44
2.7	<u>PRODUCCIÓN DE LEGUMINOSAS FRENTE AL AGREGADO DE FÓSFORO Y RESPUESTA ANIMAL</u>	51
2.8	<u>FÓSFORO EN LA NUTRICIÓN DE RUMIANTES</u>	52
2.8.1	APETITO Y DIGESTIÓN DE LA MATERIA SECA	52
2.8.2	RESPUESTA ANIMAL FRENTE AL AGREGADO DE FÓSFORO	53
2.8.2.1	<u>Fertilidad</u>	53
2.8.2.2	<u>Producción de leche</u>	53
2.8.2.3	<u>Tasa de crecimiento</u>	53
2.8.2.4	<u>Requerimientos de fósforo</u>	54
2.8.2.5	<u>Muerte</u>	57
2.8.3	PREVENCIÓN DE LAS DEFICIENCIAS DE FÓSFORO	57
2.9	<u>CONSIDERACIONES FINALES</u>	58
3.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	59
3.1	<u>UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO</u>	59
3.2	<u>DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS</u>	59
3.3	<u>DETERMINACIONES EN LA PASTURA</u>	61
3.3.1	MATERIA SECA DISPONIBLE	61
3.3.2	ANÁLISIS BOTÁNICO	61
3.4	<u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA</u>	61
3.5	<u>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u>	62
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	65
4.1	<u>EXPERIMENTO I: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A LA MEZCLA CON <i>TRIFOLIUM REPENS</i> CV. ZAPICÁN Y <i>LOTUS CORNICULATUS</i> CV. SAN GABRIEL</u>	66
4.1.1	AÑO 1	66
4.1.2	AÑO 2	69
4.1.3	AÑO 3	72
4.1.4	AÑO 4	75
4.1.5	AÑO 5	77
4.1.6	TOTAL ACUMULADO	79
4.1.7	COMPORTAMIENTO DE LAS FUENTES DE FÓSFORO	82
4.1.8	EFICIENCIA DE LAS DIFERENTES FUENTES UTILIZADAS	84
4.1.9	CONCLUSIONES	85
4.2	<u>EXPERIMENTO II: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A LA MEZCLA CON <i>TRIFOLIUM REPENS</i> CV. ZAPICÁN Y <i>LOTUS CORNICULATUS</i> CV. SAN GABRIEL</u>	86
4.2.1	AÑO 1	86
4.2.2	AÑO 2	88
4.2.3	AÑO 3	91

4.2.4 AÑO 4	93
4.2.5 AÑO 5	95
4.2.6 TOTAL ACUMULADO.....	96
4.2.7 CONCLUSIONES	99
4.3 <u>EXPERIMENTO III: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A <i>LOTUS SUBBIFLORUS</i> CV. EL RINCÓN</u>	100
4.3.1 AÑO 1	100
4.3.2 AÑO 2	101
4.3.3 AÑO 3	102
4.3.4 AÑO 4.....	104
4.3.5 TOTAL ACUMULADO.....	106
4.3.6 CONCLUSIONES	108
4.4 <u>EXPERIMENTO IV: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A <i>LOTUS PEDUNCULATUS</i> CV. GRASSLANDS MAKU</u>	109
4.4.1 AÑO 1	109
4.4.2 AÑO 2	110
4.4.3 TOTAL ACUMULADO.....	112
4.4.4 CONCLUSIONES	115
4.5 <u>EXPERIMENTO V: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A <i>LOTUS PEDUNCULATUS</i> CV. L EXPERIMENTAL 627</u>	116
4.5.1 AÑO 1	116
4.5.2 AÑO 2	118
4.5.3 TOTAL ACUMULADO.....	120
4.5.4 CONCLUSIONES	122
5. <u>DISCUSIÓN GENERAL DE LOS EXPERIMENTOS ANALIZADOS</u>.....	123
5.1 <u>ANÁLISIS DE SUELO</u>	123
5.2 <u>RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN INICIAL</u>	126
5.3 <u>ESTRATEGIAS DE REFERTILIZACIÓN</u>	128
5.4 <u>COMPORTAMIENTO DE LAS DIFERENTES FUENTES FOSFATADAS</u> ...	129
5.5 <u>RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN DE LAS DIFERENTES ESPECIES FORRAJERAS</u>	132
5.5.1 CONCLUSIONES DE LOS MEJORAMIENTOS EN BASE A <i>LOTUS CORNICULATUS</i> Y <i>TRIFOLIUM REPENS</i>	132
5.5.2 CONCLUSIONES DE LOS MEJORAMIENTOS EN BASE A <i>LOTUS PEDUNCULATUS</i>	132
5.5.3 COMPARACIÓN ENTRE ESPECIES	133
6. <u>RESUMEN</u>.....	134

7. <u>SUMMARY</u>	135
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	136
9. <u>ANEXOS</u>	146

LISTA DE CUADROS

Cuadro n°	Página n°
Cuadro 1. Consumo mundial de fertilizantes fosfatados (millones de toneladas de P ₂ O ₅) ²	
Cuadro 2. Resumen del comportamiento de los materiales de <i>Lotus pedunculatus</i> cv. Maku y LE 627 en la Unidad Experimental Palo a Pique, Treinta y Tres.	46
Cuadro 3. Efecto de la fertilización sobre el rendimiento de MS, relación tallo / raíz y fósforo absorbido por unidad de longitud radicular sobre lotus Maku y tres tipos de trébol blanco (TB).	47
Cuadro 4. Efecto de la fertilización y el tipo de planta sobre la concentración de fósforo y la relación N / P.	47
Cuadro 5. Eficiencia relativa de <i>Trifolium repens</i> y <i>Lotus pedunculatus</i> frente al agregado de fertilizantes fosfatados.	49
Cuadro 6. Composición de los sistemas radiculares de <i>Trifolium</i> y <i>Lotus</i> y su respuesta a la infección micorrizal.	50
Cuadro 7. Resumen de información sobre Mejoramientos en diferentes regiones del país.	51
Cuadro 8. Requerimientos de fósforo para ganado en crecimiento de varios pesos.	54
Cuadro 9. Requerimientos de fósforo para ganado de carne alimentado ad libitum, expresado como concentraciones dietarias (g/kg MS).	55
Cuadro 10. Requerimientos de fósforo de vacas lactantes alimentadas ad libitum, expresado como concentraciones dietarias (g/kg MS).	55
Cuadro 11. Requerimiento de fósforo de corderos castrados alimentados ad libitum, expresado como concentraciones dietarias (g/kg MS).	55
Cuadro 12. Requerimientos de fósforo de ovejas lactantes alimentadas ad libitum, expresado como concentraciones dietarias (g/kg MS).	55
Cuadro 13. Análisis de suelo de la Unidad Alférez.	59

Cuadro 14. Descripción de los cinco experimentos analizados.....	60
Cuadro 15. Precipitaciones mensuales (mm), temperaturas medias mensuales (°C) y días con heladas por mes para el periodo en estudio y el promedio de la serie 1972-1999.....	62
Cuadro 16. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su primer año frente a diferentes fuentes y dosis iniciales de fertilización fosfatada en kg de P ₂ O ₅ /ha.	67
Cuadro 17. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su segundo año frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P ₂ O ₅ /ha.	70
Cuadro 18. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su tercer año frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P ₂ O ₅ /ha.	73
Cuadro 19. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su cuarto año frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P ₂ O ₅ /ha.	76
Cuadro 20. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su quinto año frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P ₂ O ₅ /ha.	78
Cuadro 21. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en el total acumulado durante cinco años frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P ₂ O ₅ /ha.	80
Cuadro 22. Eficiencia de las diferentes fuentes fosfatadas en la producción de la MS total y la fracción leguminosa (TB +L).....	85
Cuadro 23. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) (kg de MS/ha) de un mejoramiento de primer año frente al agregado de diferentes niveles iniciales de Superfosfato simple (kg de P ₂ O ₅ /ha).....	86

Cuadro 24. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su segundo año frente a diferentes dosis iniciales y refertilizaciones en base a Superfosfato simple (kg de P ₂ O ₅ /ha).....	89
Cuadro 25. Porcentajes de la fracción leguminosa frente a las diferentes estrategias de fertilización fosfatada en base a Superfosfato simple.	91
Cuadro 26. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su tercer año frente a diferentes niveles iniciales y refertilizaciones en kg de P ₂ O ₅ /ha.	92
Cuadro 27. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su cuarto año frente a diferentes dosis iniciales y refertilizaciones en kg de P ₂ O ₅ /ha. .	94
Cuadro 28. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su quinto año frente a diferentes dosis iniciales y refertilización en kg de P ₂ O ₅ /ha.	96
Cuadro 29. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en sus cinco años frente a diferentes dosis iniciales y refertilizaciones en kg de P ₂ O ₅ /ha. .	98
Cuadro 30. Porcentajes de la fracción leguminosa frente a las diferentes estrategias de fertilización fosfatada en base a Superfosfato simple.	99
Cuadro 31. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento de primer año frente al agregado diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P ₂ O ₅ /ha.	100
Cuadro 32. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento de segundo año frente a diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P ₂ O ₅ /ha.	102
Cuadro 33. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento de tercer año frente a diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P ₂ O ₅ /ha.	103
Cuadro 34. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento de cuarto año frente a diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P ₂ O ₅ /ha.	105

Cuadro 35. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento en sus cuatro años frente a diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P ₂ O ₅ /ha.....	107
Cuadro 36. Respuesta a la fertilización inicial (kg de P ₂ O ₅ /ha) en la producción total de materia seca (MST) y de la fracción de Lotus Maku (MSM) para un mejoramiento de primer año.....	109
Cuadro 37. Respuesta a la fertilización inicial y anual (kg de P ₂ O ₅ /ha) en la producción total de materia seca (MST) y de la fracción de Lotus Maku (MSM) para un mejoramiento de segundo año.....	111
Cuadro 38. Respuesta a la fertilización inicial y anual (kg de P ₂ O ₅ /ha) en la producción total de materia seca (MST) y de la fracción de Lotus Maku (MSM) para un mejoramiento en el total acumulado de los dos primeros años.....	113
Cuadro 39. Porcentaje de Lotus Maku (%MSM) en la materia seca total (MST) en el segundo y en el total de los años (año 1 + año 2).	114
Cuadro 40. Porcentaje de Lotus Maku (%MSM) del segundo año sobre la producción total (MSM año 1+ MSM año 2) y porcentaje de la materia seca total (%MST) en el segundo año en la materia seca total (MST año 1 + MST año 2).	114
Cuadro 41. Respuesta a la fertilización inicial (kg de P ₂ O ₅ /ha) en la producción total de materia seca (MST) y de la fracción Lotus 627 (MS627) para un mejoramiento de primer año.	116
Cuadro 42. Porcentaje de la MS627, en la MST en un mejoramiento de primer año, según diferentes niveles de fertilización inicial (kg de P ₂ O ₅ /ha).	117
Cuadro 43. Producción total de materia seca (MST) y Lotus 627 (MS627) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su segundo año frente a diferentes niveles iniciales y 40 kg de P ₂ O ₅ /ha anuales de fósforo.	118
Cuadro 44. Porcentaje de la MS627, en la MST en un mejoramiento de segundo año, según diferentes estrategias de fertilización inicial y una misma fertilización anual de 40 kg de P ₂ O ₅ /ha.....	119
Cuadro 45. Producción total de materia seca (MST) y Lotus 627 (MS627) en kg de MS/ha de un mejoramiento en sus dos años frente a diferentes niveles iniciales y 40 kg de P ₂ O ₅ /ha anuales de fósforo.	120

Cuadro 46. Porcentajes de producción de un mejoramiento con Lotus 627, durante el primer y segundo año para la MST y MS627, según diferentes estrategias de fertilización inicial (kg de P ₂ O ₅ /ha).	121
Cuadro 47. Resultados del contenido de fósforo en suelo (µg /g) estimado por el método del ácido cítrico para el cuarto y quinto año de un Mejoramiento de TB+L manejado con distintos planes de fertilización con diferentes fuentes fosfatadas	124
Cuadro 48. Resultados del contenido de fósforo en suelo (µg /g) estimado por el método del ácido cítrico para el tercer y cuarto año de un Mejoramiento de TB+L manejado con distintos planes de fertilización con una fuente fosfatada.....	124
Cuadro 49. Resultados de contenido de fósforo en suelo (µg/g) estimado por el método del ácido cítrico para el segundo y tercer año de un Mejoramiento con LR manejado con distintos planes de fertilización en base a diferentes fuentes.	125
Cuadro 50. Respuesta promedio a la refertilización de los Experimentos I y II para diferentes dosis iniciales para el segundo, tercer y cuarto año de un Mejoramiento en base a la mezcla de TB y L.	128
Cuadro 51. Producción de la fracción leguminosa (TB+L) en kg de MS/ha, para dos estrategias de fertilización del Experimento I	130
Cuadro 52. Kilos de MS total producidos por cada dólar invertido por hectárea según la fuente fosfatada que se utilice.	131

LISTA DE FIGURAS

Figura n°	Página n°
Figura 1. Dinámica del fósforo (Rabuffetti et al, 1983).	6
Figura 2. Producción de la fracción leguminosa en kg de MS/ha frente a diferentes fuentes (Fosforita natural, FN; Superfosfato simple, S) y dosis de fertilización inicial en kg de P ₂ O ₅ /ha.....	68
Figura 3. Porcentaje de la fracción leguminosa (TB+L) frente a las diferentes estrategias de fertilización en un mejoramiento en su segundo año. Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S).....	71
Figura 4. Porcentaje de la fracción leguminosa (TB+L) frente a las diferentes estrategias de fertilización en un mejoramiento en su tercer año. Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S).....	74
Figura 5. Porcentaje de la fracción leguminosa (TB+L) frente a las diferentes estrategias de fertilización en un mejoramiento en su cuarto año. Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S).....	77
Figura 6. Porcentaje de la fracción leguminosa (TB+L) frente a las diferentes estrategias de fertilización en un mejoramiento en sus cinco años. Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S).....	82
Figura 7. Respuesta a la fertilización inicial con Superfosfato simple (kg de P ₂ O ₅ /ha) para el total de MS y los distintos componentes en su primer año (TB y L).	88
Figura 8. Respuesta a la fertilización inicial de la materia seca total (MST) y de la fracción leguminosa (MSM) de un mejoramiento con Lotus Maku de primer año.	110
Figura 9. Respuesta a la fertilización anual de la materia seca total (MST) y de la fracción leguminosa (MSM) de un mejoramiento con Lotus Maku de segundo año.	112
Figura 10. Respuesta a la fertilización fosfatada inicial con Superfosfato simple (kg de P ₂ O ₅ /ha) de materia seca total (MST) y Lotus 627 (MS627) en un mejoramiento en su primer año.....	118

Figura 11. Respuesta a la fertilización fosfatada inicial con Superfosfato simple (kg de P_2O_5 /ha) de materia seca total (MST) y Lotus 627 (MS627) en un mejoramiento en su segundo año. **120**

Figura 12. Respuesta a la fertilización fosfatada inicial con Superfosfato simple (kg de P_2O_5 /ha) de materia seca total (MST) y Lotus 627 (MS627) en un mejoramiento en sus dos años. **122**

Figura 13. Respuesta a la fertilización fosfatada inicial de diferentes leguminosas en mejoramientos de primer año. Superfosfato simple (S); Fosforita parcialmente acidulada (PA); Experimento I, II, IV y V ; Trébol blanco (TB); Lotus (L), Lotus Maku (LM); Lotus LE627 (L627). **126**

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos del Uruguay presentan en general bajos contenidos de fósforo, lo que limita la posibilidad de obtener buenas producciones de forraje y lograr una persistencia adecuada de las leguminosas introducidas, ya sea en pasturas convencionales como en Mejoramientos de Campo. Esta situación se agrava más en suelos con un importante grado de acidez y con una alta capacidad de fijación del fósforo, características que se presentan en la mayoría de los suelos de la Región Este del país. Es por éstas razones que el aporte externo de éste nutriente juega un rol fundamental para mejorar el comportamiento anteriormente mencionado.

Es importante conocer el punto de partida en cada situación, por tal motivo se han desarrollado varias opciones para determinar el contenido de fósforo de los suelos ya sea de manera directa por medio del análisis de suelo o en forma indirecta a través de análisis foliares.

Conocidas son las ventajas que se observan en las plantas que se desarrollan en ambientes sin limitaciones de nutrientes, lo cual repercute luego en la performance animal, mejorando las ganancias en sistemas intensivos, y el estado de los animales en aquellos más criadores, permitiendo fundamentalmente disminuir la edad de faena en los primeros y mejorar los índices reproductivos en los últimos.

En mejoramientos de campo natural, la estrategia de fertilización fosfatada determinará la calidad del mismo al modificar la cantidad de leguminosas con el correr de los años, mejorando al mismo tiempo las producciones de las gramíneas naturales al incrementarse los niveles de nitrógeno en el sistema, producto de la fijación y descomposición de residuos, así como también una mejora en las condiciones físicas y químicas del suelo.

La estrategia de fertilización implica considerar los niveles de fósforo a aplicar al momento de la siembra y en las refertilizaciones, al igual que la fuente que se utiliza para realizar dichas tareas. Por lo tanto, se debe planificar la dosis y el momento (cantidad y fraccionamiento) y si será una fuente que libere el fósforo soluble de manera inmediata o en forma lenta.

Otro aspecto a considerar es la o las especies a utilizar en el mejoramiento, ya que las mismas difieren en los requerimientos que tienen por el fósforo, así como en la eficiencia con que lo utilizan (kg MS/kg de P_2O_5 /ha agregado), aspectos que también varían si se utilizan especies puras o en mezcla.

La producción de carne ecológica cada día toma mayor importancia en nuestros sistemas de producción, ya que ésta es muy codiciada en varios mercados, dado que se produce de manera natural sin perjuicios para la salud humana y con efectos mínimos en el medio ambiente. Existen restricciones para el uso de fertilizantes, siendo el único fertilizante fosfatado permitido el hiperfosfato natural. Esto sería una ventaja basándose en que en los suelos de ésta región, con la utilización de éstos se logra una mayor eficiencia en producción con un menor costo por hectárea.

Si bien la tendencia mundial es ha disminuir el consumo de las rocas fosfatadas de aplicación directa (cuadro 1), Maene (2001) menciona que en algunos países de América como Brasil, Colombia y Uruguay estos productos encuentran un nicho marcado que ha permitido mantener el consumo y que las perspectivas son ha que se produzca un aumento en el mismo, por un aumento de las producciones orgánicas. Estos aspectos son de vital importancia para las condiciones de Uruguay donde la provisión de fosfatos depende de la importación.

Cuadro 1. Consumo mundial de fertilizantes fosfatados (millones de toneladas de P_2O_5).

<i>Producto</i>	<i>1973/74</i>	<i>1998/99</i>
<i>Roca fosfatada</i>	1,41	0,57
<i>Superfosfato simple</i>	6,32	6,98
<i>Superfosfato triple</i>	2,84	2,18
<i>NPK/PK</i>	8,87	6,97
<i>Fosfato de amonio</i>	3,53	14,07

Fuente: Maene, 2001.

El presente trabajo pretende evaluar la respuesta y eficiencia de Mejoramientos de Campo compuestos con distintas leguminosas frente al agregado de fósforo así como también la residualidad de éste en suelos de lomadas en la Región Este. Es por esto que se analizaron varios ensayos con diferentes estrategias de fertilización sobre mejoramientos sembrados en cobertura con distintas leguminosas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 FÓSFORO EN EL SUELO

Para las condiciones de Uruguay, el fósforo constituye el nutriente más limitante para la producción de leguminosas en suelos naturales y por lo tanto, los fertilizantes fosfatados constituyen el mayor porcentaje del total de fertilizantes consumidos.

Debido a que el fósforo es un elemento móvil en las plantas y a que las partes jóvenes en crecimiento tienen prioridad, en situaciones deficitarias los síntomas de carencia se presentan en las hojas viejas. En las pasturas, donde las plantas son un producto intermedio, el déficit de fósforo disminuye las tasas de crecimiento y afecta la concentración de fósforo en el forraje y por tanto su calidad nutritiva (Morón, 1996). La alta estabilidad (baja solubilidad) de los compuestos fosfatados es la causa inmediata de la deficiencia de fósforo en los suelos para las plantas. Los suelos son deficientes en fósforo cuando la tasa a la que las raíces de las plantas se abastecen es menor a la tasa a la que lo requieren para un óptimo crecimiento (Costin y Williams, 1983).

El beneficio más directo de la utilización del fósforo es el de incrementar la producción agrícola. Algunos beneficios adicionales incluyen una disminución de la erosión por aumento en la cobertura del suelo, un incremento en la capacidad de retención de agua de los suelos y una mejor estructura que se relaciona con un aumento en la materia orgánica del suelo, especialmente en los sistemas pastoriles (Lutz y Haque, 1975; Barrow, 1980).

2.1.1 CONTENIDO EN LOS SUELOS

Mengel y Kirkby (1982), mencionan que en general el contenido total de fósforo de los suelos está en el rango de 0,02 a 0,15 % de fósforo. La mayoría de los suelos del Uruguay contienen entre 0,02 y 0,08% de fósforo, valores considerados bajos e inferiores que las cifras de 0,14% y 0,8% comúnmente manejadas para nitrógeno y potasio, respectivamente (Rabuffetti et al, 1983).

El fósforo que se libera en forma soluble en los suelos por descomposición de los minerales primarios que lo contienen (apatita como fluorapatita), así como el proveniente de los residuos vegetales y de los fertilizantes se combina primariamente

con la fracción arcilla. Es por esto que el porcentaje de fósforo del suelo en su conjunto normalmente aumenta a medida que la textura se afina (Rabuffetti et al, 1983).

2.1.2 PÉRDIDAS DE FÓSFORO DE LOS SUELOS

- Remoción por las cosechas de forraje: ésta puede llegar a ser del 0,4% del contenido promedio de fósforo de la capa arable del suelo, que es donde se encuentra la mayor cantidad de este elemento (Lipman y Conybeare, 1936 citados por Rabuffetti et al, 1983).
- Transferencia de fósforo vía heces fuera del área de producción.
- Extracción en productos animales.
- Erosión: el fósforo puede ser perdido en solución por lixiviación dentro del perfil del suelo, en solución por escurrimiento superficial y en las partículas del suelo por escurrimiento superficial. Estos procesos existen naturalmente, pero la utilización del suelo por el hombre (suelo laboreado, descubierto y expuesto) produce normalmente un aumento del escurrimiento superficial. En general es aceptado que las pérdidas por lixiviación son de magnitudes muy bajas (Williams, 1974, Sharpley y Menzel, 1987 citados por Morón, 1992). Según el modelo de Wischmeier y Smith (1978), el promedio anual de pérdida de suelo del campo natural en la Unidad Experimental Palo a Pique, INIA Treinta y Tres es de 1,831 Mg/ha (megagramos por hectárea) (Terra y García Préchac, 2001), la cual es una erosión muy baja al compararla con la tolerancia adjudicada a este suelo (7 Mg/ha/año, Puentes, 1981 citado por García Préchac, 1992). Williams, 1974 citado por Morón, 1992, llama la atención sobre el significado que puede tener una misma cantidad de suelo perdido según provenga de un sistema agrícola o de uno bajo pasturas. Las fertilizaciones fosfatadas en cobertura determinan generalmente una gran acumulación de fósforo en los primeros centímetros del perfil. Por tanto, dada una misma cantidad de suelo erosionado, en un sistema de pasturas fertilizado la pérdida de fósforo puede ser significativamente más importante.

El suelo tiene una capacidad finita de reservar fósforo y cuando éste límite se alcanza la concentración de fósforo en la solución aumenta al aplicar fertilizante (Barrow 1989; Holford, 1989). Nash y Halliwell (1999), mencionan que algunos suelos de Australia están próximos a la saturación en fósforo debido a los años de fertilización que tienen lo que trae aparejado pérdidas del fósforo en solución. Esto, junto con la erosión, hace que el fósforo se pierda junto con los movimientos del agua, tanto por escurrimiento superficial como por la infiltración a través del perfil.

2.1.3 DINÁMICA, ASIMILABILIDAD Y FORMAS DEL FÓSFORO EN LOS SUELOS

El fósforo no se encuentra en el suelo en forma elemental, sino que forma compuestos de muy variada naturaleza. Estos compuestos derivan del ácido fosfórico (H_3PO_4), en el cual el fósforo se encuentra en forma de ortofosfato.

El fósforo puede encontrarse en la solución del suelo o en la fase sólida del suelo. En la solución del suelo la concentración de fósforo es muy pequeña, generalmente menor a 1 ppm. Las formas químicas presentes en la solución están relacionadas con el pH del medio. El $H_2PO_4^-$ predomina en medio ácido, mientras que el HPO_4^{2-} predomina a $pH > 7$ y alrededor de la neutralidad, ambos iones están en una proporción similar (Mengel y Kirkby, 1982; Rabuffetti et al, 1983).

Los fosfatos de la fase sólida del suelo pueden dividirse en dos grandes categorías: inorgánico y orgánico. En ambas categorías las cantidades relativas presentes en los suelos son muy variables. La cantidad de fósforo orgánico varía según la cantidad de materia orgánica del suelo y por lo tanto es más abundante en los horizontes superficiales de éstos (Rabuffetti et al, 1983). En Uruguay, diversas determinaciones han cuantificado al fósforo orgánico con valores cercanos al 50% del fósforo total del suelo (Zamalvide, 1992; Morón y Khíel, 1992).

El fósforo inorgánico se encuentra como fosfatos ocluidos y no ocluidos. La fracción no ocluida contiene fósforo en solución, fosfatos adsorbidos a las superficies del suelo y algunos fosfatos minerales. El fosfato ocluido es retenido por minerales de hierro y aluminio (Mengel y Kirkby, 1982).

El ciclo del fósforo es dinámico e involucra al suelo, a las plantas y microorganismos. En los ecosistemas naturales sería un ciclo cerrado, donde el fósforo es consumido por las plantas y retornaría al suelo por residuos de plantas y animales que serán descompuestos por microorganismos. Sin embargo los suelos bajo cultivos convencionales contienen bajos niveles de materia orgánica y el fósforo es regularmente removido en la cosecha (Stevenson, 1986).

Si bien existe poca información para los suelos del país, los contenidos en las diferentes formas de fósforo (P) según Rabuffetti et al (1983), pueden oscilar entre:

P inorgánico total.....	50 a 300 ppm
P lábil (Bray I).....	1 a 10 ppm (en suelos fertilizados hasta 100 ppm)
P solución.....	0,01 a 0,1 ppm (en suelos fertilizados hasta 0,5 ppm)
P orgánico.....	20 a 300 ppm

Del análisis del esquema de la figura 1, resultan algunos puntos a ser destacados:

- La solución contiene una proporción muy pequeña del fósforo inorgánico del suelo, generalmente del orden de 1/1000 a 1/10000, en suelo no fertilizado recientemente. Las bajas concentraciones en la solución están explicadas por la baja solubilidad de las formas de fósforo inorgánico de los suelos, así como la de los productos de reacción de los fertilizantes con los suelos. Lo anterior indica que el equilibrio $K_1 \rightleftharpoons K_2$ está fuertemente desplazado hacia la fase sólida (Rabuffetti et al, 1983).

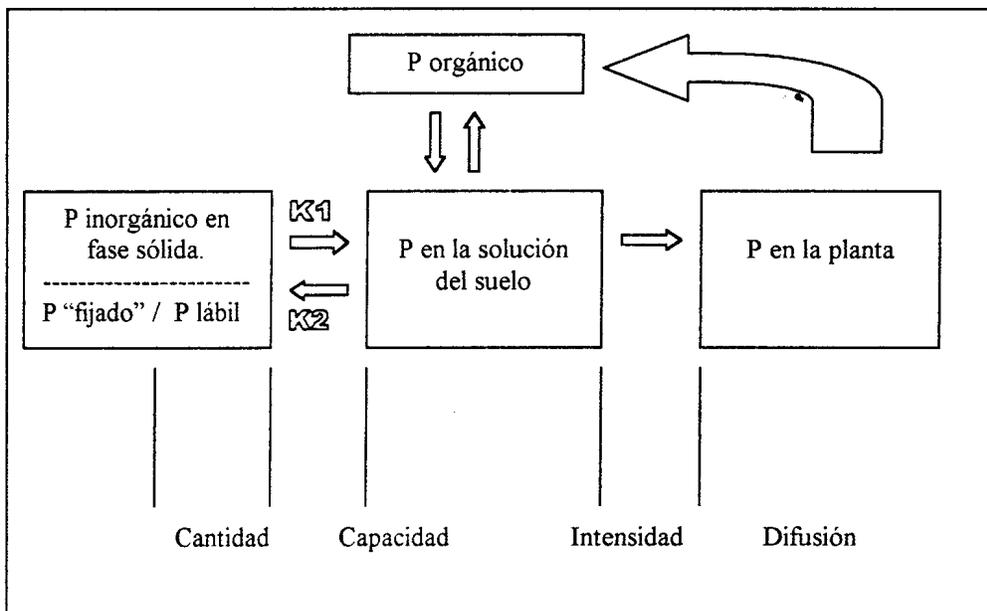


Figura 1. Dinámica del fósforo (Rabuffetti et al, 1983).

- Dentro del fósforo inorgánico de la fase sólida, se consideran separadamente dos fracciones: una de ellas denominada fósforo lábil y la otra conocida como fósforo fijado (esta fracción representa el fósforo insoluble). La diferencia entre el fósforo lábil y el resto del fósforo inorgánico está dado por su reactividad química. El fósforo lábil es aquel que responde rápidamente a un descenso en la concentración de fósforo de la solución del suelo, tendiendo a reponer ese fósforo en la solución hasta un nivel que sería el correspondiente a la constante del producto de solubilidad (kps) de las sustancias que lo forman (Mengel y Kirkby 1982; Rabuffetti et al, 1983).

La solución del suelo es adecuada si el fósforo inorgánico lábil es solubilizado al menos con la rapidez con que las raíces lo extraen de ésta (Rusell, 1980). Cuando el fósforo de la solución del suelo se ha agotado hay un rápido movimiento de las formas lábiles para reponer el fósforo en solución. Sin embargo cuando el fósforo lábil se ha agotado el movimiento desde las formas no lábiles del suelo es lento (Mengel y Kirkby, 1982; Whitelaw, 2000).

La mayoría de los fosfatos minerales contienen impurezas que influyen sobre su solubilidad, por lo que la hidroxiapatita con impurezas carbonadas tiene una mayor solubilidad que la apatita pura (Khasawneh y Doll, 1978).

2.1.3.1 Mineralización de los fosfatos

La descomposición de la materia orgánica (MO) es un proceso adicional, que influencia de manera directa e indirecta la adsorción de los fosfatos. La MO del suelo contiene fósforo por lo que la mineralización de la MO libera fosfatos hacia la solución del suelo. El fosfato liberado de esta manera se involucra en el equilibrio entre los iones fosfato libres y adsorbidos. Los microorganismos que descomponen la MO del suelo están asociados con un incremento en la producción de CO₂ que posiblemente mejore la solubilidad de los fosfatos del suelo (Mengel y Kirkby, 1982).

El fósforo orgánico del suelo se encuentra bajo varias formas. Algunas de estas son producidas por las plantas superiores, pero la mayor parte es sintetizada por microorganismos (Dalal, 1977).

El último proceso por el cual los fosfatos orgánicos se vuelven disponibles es por liberación de los fosfatos inorgánicos como resultado de la reacción con la fosfatasa a través de una reacción de hidrólisis. La enzima fosfatasa es producida por las raíces de plantas superiores como por numerosos microorganismos (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucos*, *Rhizopus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*) (Mengel y Kirkby, 1982).

Se ha sugerido que la actividad de la fosfatasa de las micorrizas puede influenciar en la habilidad de estos organismos de movilizar fósforo del suelo (Dalal, 1977). La actividad microbiana depende de la temperatura, maximizándose en el rango de 30 a 45°C. Es por esta razón que los fosfatos orgánicos toman gran importancia en la nutrición de las plantas bajo condiciones climáticas tropicales comparado con condiciones templadas (Mengel y Kirkby, 1982).

2.1.3.2 Reacciones del fósforo en los suelos

Cuando se agrega un fertilizante fosfatado soluble en agua al suelo se observa rápidamente una desaparición casi total del mismo de la solución del suelo. Este fenómeno es conocido como retención, fijación o adsorción de fósforo por parte del suelo, según el significado que se da a la terminología y a la interpretación del fenómeno. En términos generales, la causa de la desaparición del fósforo de la solución del suelo es la baja solubilidad de los productos de reacción del fósforo, fundamentalmente con los cationes calcio, hierro y aluminio, ya estén aquellos presentes en la solución del suelo o en superficies de alta reactividad química (Sanyal et al, 1991 citados por Mathews et al, 1998).

2.1.3.2.1 Mecanismos de retención del fósforo en los suelos

- A) Precipitación: este mecanismo funciona cuando existen en la solución del suelo cationes de aluminio (Al^{+3}) y posiblemente cationes de hierro (Fe^{+3}). La reacción del $H_2PO_4^-$ con estos cationes en solución resultará en compuestos que precipitan dada su baja kps. El tipo de precipitado que se forma depende en gran manera del pH del suelo.
- B) Adsorción: mediante este mecanismo el fósforo reacciona con cationes de alta reactividad química presentes en la superficie de las fracciones finas del suelo. En general, a medida que aumenta el contenido de óxidos de hierro libres y de arcilla aumenta la capacidad del suelo para retener fósforo por adsorción, debido a la mayor cantidad de posiciones con cationes “retenedores” de fósforo en la superficie de los coloides (Rabuffetti et al, 1983).

2.1.3.2.2 Retención en suelos ácidos

* Precipitación con hierro y aluminio en solución: la precipitación con aluminio es el principal mecanismo por el cual el fósforo se fija en suelos severamente ácidos ($pH < 4,5$) (Holford, 1983). Los productos iniciales de la reacción del superfosfato en suelos ácidos son fosfatos amorfos de hierro y aluminio en donde el fósforo está moderadamente disponible para las plantas, transformándose luego a estructuras cristalinas de menor solubilidad (Lindsay et al, 1962; Rajan, 1976; Sample et al, 1980).

* Adsorción en hidróxidos de hierro y aluminio y en arcillas aluminosilicatadas (caolinita): los suelos ácidos fijan el doble de cantidad del fósforo aplicado por unidad de superficie que los suelos neutros o calcáreos. El fósforo fijado en los suelos ácidos es retenido con cinco veces más fuerza que en suelos calcáreos (Olsen y Watanabe, 1957).

2.1.3.2.3 Retención en suelos calcáreos

Los procesos que se dan en suelos ácidos también ocurren en éstos tipos de suelos, pero con menor intensidad.

*Precipitación como CaHPO_4 : el alto pH y la gran actividad del calcio de los suelos alcalinos o calcáreos lleva a una rápida formación de fosfatos dibásicos de calcio, de baja solubilidad en agua pero de alta reactividad. Al inicio, éstos precipitados son amorfos y el fósforo está moderadamente disponible para las plantas. Luego éstos se transforman en formas menos solubles como ortofosfato de calcio [$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$], hidroxiapatita [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$] y fluorapatita [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$] (Lindsay et al, 1962; Rajan, 1976).

*Adsorción sobre carbonato de calcio: el ortofosfato de los fertilizantes fosfatados solubles puede neutralizarse y quedar adsorbido sobre las partículas de CaCO_3 . La intensidad de la adsorción sobre el carbonato dependerá de su cantidad y reactividad (Rabuffetti et al, 1983; Sanyal et al, 1991 citados por Mathews, 1998).

*Adsorción sobre arcillas aluminosilicatadas: en suelos calcáreos las arcillas tienen en general una alta saturación en calcio, por lo cual el H_2PO_4^- puede unirse a ellas a través de puentes de calcio (Rabuffetti et al, 1983; Sanyal et al, 1991 citados por Mathews, 1998).

En términos de reactividad química de los componentes resultantes, tanto en suelos ácidos como en suelos calcáreos, la primera etapa es la desaparición del fósforo agregado soluble de la solución del suelo. Se forman productos metaestables de alta reactividad química, que permanecen como fósforo lábil. A medida que transcurre el tiempo estos productos van evolucionando hacia formas más estables para las condiciones del suelo, mejor cristalizadas, de menor reactividad química y que desaparecen de la fracción de fósforo lábil de los suelos (Rabuffetti et al, 1983).

2.1.3.3 Caracterización a corto plazo del equilibrio entre el fósforo de la fase sólida y el fósforo en solución (Isotermas de retención de fósforo)

Syers et al (1973) citados por Zamalvide et al (1978), mencionan que una isoterma de retención describe la relación de equilibrio entre las cantidades de compuesto adsorbido y disuelto a una temperatura dada. Fox et al (1970) citados por Zamalvide et al (1978), afirman que la información primaria que brindan, es el conocimiento de la cantidad de fósforo que debe existir adsorbido en la fase sólida del suelo, para que en solución se mantenga determinada concentración.

Las características que explican mejor las diferencias en capacidad de retención de fósforo son:

- Contenido de arcilla: suelos de textura más pesada tienen una mayor retención de fósforo. También importa el tipo de arcilla, ya que las de tipo 1:1 (caolinita) tienen mayor retención que las de tipo 2:1 (montmorillonita).
- Porcentaje de Fe_2O_3 en la arcilla: cuanto mayor sea este porcentaje, mayor retención habrá.
- Cantidad de aluminio intercambiable: a más cantidad más retención.

A medida que aumenta la capacidad de retención de fósforo, mayores deben ser las dosis iniciales a agregar al suelo para asegurar en el inicio un suministro adecuado de fósforo. En suelos altamente fijadores, se recomienda hacer una corrección del pH, ya que la adsorción del fósforo es especialmente alta a bajos niveles de pH. Para las condiciones de Uruguay, los suelos se agrupan en suelos con alto poder de retención (ej: derivados de basalto, derivados de basamento cristalino) y suelos con bajo poder de retención (ej: areniscas cretácicas y triásicas, planicies del este, sedimentos livianos).

2.1.3.4 Evolución a largo plazo de la disponibilidad del fósforo agregado

Luego de agregado al suelo, el fertilizante fosfatado tiene un efecto de suministro de fósforo que persiste durante más de un ciclo de crecimiento, conocido como efecto residual y que resulta de la transferencia del fósforo de los compuestos fosfatados metaestables que integran el fósforo lábil. Sin embargo, con el transcurso del tiempo la disponibilidad del fósforo agregado disminuye. Además de la transformación gradual de estos compuestos metaestables a compuestos más estables y menos reactivos, de equilibrio final con el suelo, hay cuatro factores adicionales que explican también la disminución en la disponibilidad del fósforo agregado (Rabuffetti et al, 1983):

- a) extracción de fósforo por las cosechas.
- b) pérdidas por erosión, importantes debido a la acumulación del fósforo en la parte superficial del suelo.
- c) mezclado y difusión del fósforo, este mecanismo disminuye la alta concentración de fósforo que originalmente se establece alrededor de su punto de aplicación.
- d) acumulación de fósforo orgánico, este proceso es particularmente importante en suelos bajo pasturas, donde se produce una inmovilización del fósforo por parte de la materia orgánica. La cantidad de fósforo acumulada puede ser del orden de 8 a 10 kg/ha/año en pasturas con buen crecimiento.

No obstante, debe recordarse que pese a que estos procesos contribuyen a disminuir la cantidad de fósforo, el proceso más importante en la reducción de disponibilidad de fósforo es el pasaje de fósforo lábil a fósforo fijado (Rabuffetti et al, 1983).

2.1.3.5 Reacciones lentas de retrogradación del fósforo lábil hacia fósforo fijado

Es de gran importancia agronómica poder prever, para un determinado suelo durante cuanto tiempo el fósforo del fertilizante permanecerá en forma asimilable (fósforo lábil) o más exactamente la variación del efecto de incremento del fósforo lábil logrado por la fertilización en función del tiempo. Es de esperar que los resultados que se obtengan en este tipo de estudios varíen por factores como el tipo de suelo, temperatura, fuente de fertilizante agregado y tamaño de gránulo de fertilizante entre otros (Rabuffetti et al, 1983).

En el Uruguay, Castro y col (1978) citados por Rabuffetti et al (1983), estudiaron a través del análisis de suelo la evolución del fósforo asimilable en fertilización de pasturas, caracterizando la evolución de la disponibilidad del fósforo luego de su aplicación en base a dos parámetros:

-Equivalente fertilizante. Son los kg de P_2O_5 necesarios a agregar para aumentar 1 ppm en una profundidad de 15 cm. en el momento de aplicación.

-Tasa de inmovilización anual. Los coeficientes de este parámetro miden el porcentaje del fósforo lábil aumentado por la fertilización que pasa anualmente a formas fijadas no asimilables. De acuerdo a los datos obtenidos por estos autores, estos porcentajes variarían para los suelos del Uruguay entre el 28 y el 50%, usando como fuente superfosfato.

2.1.3.6 Asimilabilidad del fósforo para las pasturas

Las plantas absorben el fósforo que está disuelto en la solución del suelo, siendo la cantidad de fósforo absorbido por una planta por unidad de tiempo función del volumen de raíces y la concentración de fósforo en la solución del suelo. Existen determinados mecanismos de reposición de fósforo desde la fase sólida a la solución, que varían con determinadas propiedades del suelo (Rabuffetti et al, 1983).

+ Factor cantidad. Se refiere al fósforo lábil en la fase sólida capaz de reponer el fósforo a la solución del suelo. Otros autores identifican al fósforo lábil con el factor capacidad.

+ Factor capacidad. Es el gradiente que se establece entre el fósforo lábil y el fósforo en solución, debido a la absorción por la planta del fósforo de la solución.

+ Factor intensidad. Se refiere a la concentración de fósforo en la solución del suelo.

+ Difusión. Movimiento por gradiente de concentración desde la solución del suelo a la raíz.

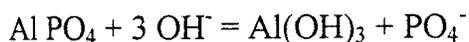
El hecho de que una concentración de fósforo en la solución en equilibrio significa más fósforo para la planta en un suelo arcilloso que en uno arenoso, puede explicarse por dos factores (Rabuffetti et al, 1983):

- El suelo arcilloso tiene más capacidad para reponer el fósforo retirado por la planta de la solución.
- El fósforo puede difundir hacia la raíz a través del agua con más facilidad en un suelo arcilloso que en uno arenoso.

La difusión aparece como el mecanismo principal por el cual el fósforo de la solución del suelo llega a la raíz. Esta opera por diferencias de concentración a pequeñas distancias. Los suelos más pesados presentan mejores condiciones para la difusión de fósforo (Rabuffetti et al, 1983).

2.1.3.7 Efecto del pH del suelo en la disponibilidad del fósforo

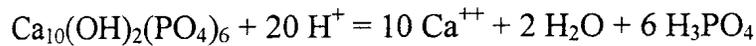
El efecto del pH sobre el comportamiento de los fosfatos de aluminio e hierro así como sobre los hidróxidos de hierro y aluminio asociados, es un efecto o serie de efectos químicos mal definidos que pueden representarse en forma muy simplificada por la ecuación convencional:



que pone énfasis en el papel del ión hidroxilo (OH⁻). Con un aumento en el pH o actividad del OH⁻, los fosfatos de aluminio e hierro liberan fosfato en forma soluble permaneciendo el aluminio y el hierro en forma insoluble como hidróxidos. A la inversa, con una disminución en el pH o actividad del ión OH⁻ o con un aumento en la actividad

del ión fosfato, aumenta la tendencia de los hidróxidos de aluminio y hierro a reaccionar con el fosfato para formar fosfatos de hierro y aluminio (Rabuffetti et al, 1983).

Otro efecto del pH tiene que ver con los fosfatos de calcio. Este efecto puede visualizarse en términos de la siguiente ecuación convencional, escrita para hidroxiapatita:



la cual enfatiza la importancia en la actividad de ambos iones, H^+ y OH^- . Los fosfatos de calcio se disuelven a medida que el pH aumenta, debido a la tendencia de los iones hidrógeno (H^+) de asociarse con los iones fosfato. Con la hidroxiapatita, que contiene iones hidroxilo, la tendencia de los iones H^+ a asociarse con los OH^- para formar agua, es otro factor en la disolución con un decremento del pH (Rabuffetti et al, 1983).

Finalmente otro efecto del pH tiene que ver con la mineralización del fósforo orgánico. El resultado de investigaciones revisadas por Black y Goring (1953) y trabajos más recientes de Halsteady et al (1963) y Kaila (1965) citados por Rabuffetti et al (1983), indican que el efecto normal es un aumento en la mineralización con un aumento en el pH del suelo. El efecto del pH del suelo en la mineralización del fósforo orgánico puede ser explicado por la teoría de que aumentando el pH se reduce la absorción de los compuestos de fósforo orgánico por los hidróxidos y por consiguiente aumenta su solubilidad y susceptibilidad a la mineralización.

2.1.3.8 Comportamiento del fósforo bajo condiciones de anegamiento

La preparación de tierras, siembra, fertilización, control de malezas, cultivos y cosecha son todos afectados por la presencia de excesos de agua. Debido a la presencia física del agua en el suelo y sobre la superficie del suelo, el anegamiento afecta las reacciones que involucran a los nutrientes de las plantas así como también aquellas que ocurren cuando se agregan fertilizantes (Patrick y Mahapatra, 1968).

2.1.3.8.1 Cambios ocurridos en el suelo como resultado del anegamiento

El cambio más importante en el suelo como resultado del anegamiento es la conversión de la zona radicular del suelo de un ambiente aeróbico a uno anaeróbico o casi anaeróbico donde el oxígeno está ausente o es limitante. Bajo las condiciones anaeróbicas varios sistemas de oxidación – reducción que usualmente están presentes en la forma oxidada son reducidos como resultado de la actividad de los microorganismos anaeróbicos facultativos y verdaderos (Patrick y Mahapatra, 1968).

Un suelo anegado difiere sustancialmente de uno bien drenado. En éste último hay generalmente suficiente oxígeno disponible desde la atmósfera para suplir las necesidades de los microorganismos y las plantas. Esta condición es cambiada totalmente cuando el suelo es inundado. El gran potencial de consumo de oxígeno comparado con la disponibilidad de abastecimiento durante la inundación resulta en dos estratos diferentes que se forman en un suelo anegado: un estrato oxidado o aeróbico donde el oxígeno está presente y un estrato reducido o anaerobio (por debajo del anterior) en donde no hay oxígeno libre (Patrick y Mahapatra, 1968).

El cambio más notable y fácilmente medible en el suelo como resultado del anegamiento es el descenso en la oxidación – reducción o potencial redox (Patrick y Mahapatra, 1968).

2.1.3.8.2 Efecto de la inundación sobre la transformación y disponibilidad del fósforo

* Efecto de la inundación continua: La ocurrencia de un marcado incremento en la disponibilidad del fósforo agregado y el nativo en suelos inundados ha sido demostrado (Aok, 1941, Beacher, 1955, Shapiro, 1958, Davide, 1960 citados por Patrick y Mahapatra, 1968). Este incremento en el fósforo ha sido atribuido a la reducción del fosfato férrico a una forma más soluble como lo es el fosfato ferroso y a la hidrólisis de los compuestos fosfatados (Patrick y Mahapatra, 1968). Davide (1960) citado por Patrick y Mahapatra (1968), concluyó que los efectos benéficos de la inundación en la disponibilidad del fósforo depende de la intensidad de la reducción y del contenido de hierro de los suelos.

* Efecto de períodos alternados de humedad y sequía: Suelos secos seguidos de inundaciones generalmente disminuyen la solubilidad del fósforo agregado y del nativo (Paul et al, 1949 citados por Patrick y Mahapatra, 1968). Durante la sequía se produce la conversión de los fosfatos solubles a formas más difícilmente extraíbles y se produce un descenso en la fracción del fósforo orgánico. La reducción biológica de hierro durante la fase de inundación seguido por la reoxidación durante el período seco resulta en un incremento en la capacidad de fijación de fósforo y por esto se produce una disminución en la solubilidad del fósforo (Patrick y Mahapatra, 1968).

* Mecanismos de liberación de fósforo en suelos inundados: Estos pueden ser explicados por (1) reducción de compuestos fosfatados con ión férrico a formas más solubles como el ferroso (Islam et al, 1954 citado por Patrick y Mahapatra, 1968), (2) liberación de fósforo ocluido desde las arcillas revestidas con óxido férrico hidratado (Chang et al, 1958, Mahapatra, 1966 citados por Patrick y Mahapatra, 1968), (3) desplazamiento del fósforo de los fosfatos de aluminio y hierro por aniones orgánicos (Bradley et al, 1953 citados por Patrick y Mahapatra, 1968), (4) hidrólisis de fosfatos de hierro y aluminio (Ponnamperuma, 1955 citado por Patrick y Mahapatra, 1968), y (5)

aniones fosfato intercambiado entre arcillas y aniones orgánicos (Russell, 1962 citado por Patrick y Mahapatra, 1968).

2.2 FUNCIÓN DEL FÓSFORO EN LAS PLANTAS

2.2.1 EL FÓSFORO EN LA FISIOLÓGÍA DE LA PLANTA

Aunque el fósforo existe en las plantas en forma inorgánica también existe en una multitud de formas orgánicas. Para una discusión más conveniente, las formas orgánicas pueden ser clasificadas en dos grupos: los compuestos estructurales y de reserva constituye los representados por la fitina, los fosfolípidos, las nucleoproteínas y ácidos nucleicos y ribonucleicos (Rabuffetti et al, 1983). El fósforo en las semillas es almacenado principalmente como fitina. Durante la germinación el compuesto es hidrolizado enzimáticamente lo cual cambia el fosfato a la forma inorgánica, el cual puede ser usado para otros propósitos por la plántula en desarrollo (Casanova et al, 1975; Mengel y Kirkby, 1982; Rabuffetti et al, 1983). Los fosfolípidos aparentemente actúan como material de reserva en semillas y en las plántulas en desarrollo presumiblemente tienen otras funciones que no han sido descubiertas. Las nucleoproteínas son importantes en la reproducción (Rabuffetti et al, 1983). La función del fósforo como constituyente de estructuras macromoleculares es más prominente en ácidos nucleicos, donde las unidades de las moléculas de ADN son las portadoras de la información genética y las unidades de ARN son las estructuras responsables de la traducción de la información genética. En ambos (ADN y ARN) el fosfato forma un puente entre las unidades de los ribonucleósidos para formar macromoléculas (Marschner, 1995).

El segundo grupo son los compuestos intermediarios del metabolismo que intervienen en las reacciones metabólicas, representando los ésteres fosfato y los fosfatos ricos en energía la maquinaria metabólica de las células, aunque se encuentran en éstas en bajas concentraciones. La mayoría de los ésteres fosfato son intermediarios en las vías metabólicas de biosíntesis y degradación (Marschner, 1995).

El fósforo existe no sólo en ciertas enzimas que catalizan las reacciones metabólicas, sino también en algunos metabolitos. El fósforo en las enzimas está presente en la porción coenzima, pero no parece estar directamente involucrado en la catálisis. En los metabolitos, el fósforo desempeña un papel directo como portador de energía. Este papel es posible por el hecho de que el fosfato, en varias uniones orgánicas, puede ser separado por hidrólisis con una liberación relativamente alta de energía. Los grupos fosfato que tienen esta propiedad se llaman fosfatos de alta energía. El más importante de los fosfatos portadores de alta energía es el adenosin trifosfato (ATP) (Rabuffetti et al, 1983). El ATP es la principal fuente de energía para la síntesis de almidón. La fosforilación de las enzimas por ATP, GTP o ADP, es otro mecanismo

por el cual los fosfatos ricos en energía pueden modular la actividad enzimática. La PEP carboxilasa es una de las enzimas claves reguladas por la fosforilación, tanto en plantas C_3 como C_4 (Tisdale et al, 1985; Marschner, 1995).

(Se menciona que el fósforo a veces estimula el crecimiento radicular de lo que se deduce que el fósforo tiene un efecto especial sobre el crecimiento de las raíces que no tiene sobre la parte aérea de la planta. Si la disponibilidad de fósforo es alta, las plantas jóvenes absorben fósforo rápidamente. Cuando han acumulado el 25% de materia seca total (MST), han absorbido ya el 75% del fósforo total. La absorción rápida de fósforo en la primera etapa de la vida de la planta conduce a un rápido desarrollo (Rabuffetti et al, 1983).

2.2.2 EFECTO DE LA DEFICIENCIA DE FÓSFORO

Los requerimientos de fósforo para un crecimiento óptimo están en el rango de 0,3 - 0,5 % de la MS de la planta durante el período vegetativo de crecimiento (Mengel y Kirkby, 1982; Marschner, 1995). Los contenidos de fósforo en plantas deficientes en éste nutriente son generalmente bajos con un 0,1 % de fósforo o menos en la MS (Mengel y Kirkby, 1982). Plantas que sufren deficiencias de fósforo reducen el área y expansión de las hojas (Fredeen et al, 1989) así como en el número de hojas (Lynch et al, 1991). La expansión de las hojas está fuertemente relacionada con la expansión de las células de la epidermis y éste proceso puede ser particularmente perjudicado en plantas deficientes en fósforo por varias razones, por ejemplo bajos contenidos de fósforo en las células de la epidermis y un decrecimiento en la conductividad hidráulica de las raíces (Radin, 1990).

(En contraposición a la severa inhibición de la expansión de hojas los contenidos de proteína y clorofila por unidad de área de hoja no son mayormente afectados según Rao y Terry (1989), mientras que Mengel y Kirkby (1982), afirman que una nutrición fosfatada inadecuada afecta varios procesos como la síntesis de proteínas y de ácidos nucleicos. La eficiencia fotosintética por unidad de clorofila es mucho más baja en hojas deficientes en fósforo (Lauer et al, 1989). Olmos (2001) menciona que al aumentar el nivel de fertilización se incrementa el contenido de proteína y también el contenido de fósforo del forraje.

Al contrario de lo que ocurre con el crecimiento de los tallos, el crecimiento de raíces es mucho menos inhibido por deficiencias de fósforo, observándose el típico disminución en la relación tallo/ raíz en peso seco. En general, el decrecimiento en dicha relación en plantas con deficiencias de fósforo está correlacionado con un incremento en

el flujo de carbohidratos hacia las raíces (Kamis et al,1990 citados por Marschner, 1995).

A pesar de estas respuestas adaptativas en incrementos de captación de fósforo por parte de las raíces, no sólo la tasa de crecimiento de tallos se retarda por limitaciones de fósforo sino que también lo hace la formación de órganos reproductivos (Mengel y Kirkby, 1982; Marschner, 1995). La iniciación floral se demora (Rossiter, 1978), disminuye el número de flores (Bould y Parfiti, 1973) y se restringe la formación de semillas (Barry y Miller, 1989; Olmos, 2001). Una prematura senescencia de hojas es otro de los factores que limitan los rendimientos de semillas en plantas con deficiencias de fósforo (Tisdale et al, 1985; Marschner, 1995).

Generalmente, los síntomas de deficiencias aparecen en las hojas viejas que frecuentemente se presentan de color verde oscuro. Los tallos de muchas especies de plantas anuales sufriendo deficiencias de fósforo se caracterizan por una coloración rojiza originada por un aumento en la formación de antocianinas (Mengel y Kirkby, 1982; Tisdale et al, 1985).

2.3 MÉTODOS PARA ESTIMAR EL CONTENIDO DE FÓSFORO

Un aspecto práctico importante en el trabajo de análisis de suelos es obtener un índice de la disponibilidad o cantidad efectiva de fósforo en los suelos. Muchos suelos son deficientes en fósforo para la producción de cultivos y consecuentemente, es necesario evaluar el status de fósforo de los suelos e interpretar los resultados en términos de las cantidades de fertilizante fosfatado requeridas (Rabuffetti y Zamalvide, 1983).

Se han propuesto una serie de técnicas de análisis de fósforo "asimilable" que varían en la solución extractiva empleada, relación suelo / solución y tiempo de extracción entre otras. Ninguna de éstas técnicas brinda un resultado absoluto sino que da un índice, cuyo mérito es estar relacionado con la cantidad de nutriente disponible para el cultivo (Casanova et al, 1975).

Cuando se pone en contacto una solución extractiva con el suelo ocurre una serie de reacciones que dependerán de algunas características del suelo que afectarán la cantidad de fósforo extraído. Las características referidas son la cantidad y formas en que se encuentra el fósforo inorgánico, poder buffer del suelo, capacidad de poder agotar la solución extractiva y pH entre otras. (Casanova et al, 1975).

La naturaleza del extractante así como otros factores que modifican la cantidad de fósforo extraído, son elegidos en forma más o menos arbitraria, de manera que los valores de fósforo "asimilable" no tienen significado absoluto. El valor de un método de análisis depende entonces de las correlaciones que se puedan establecer con respuesta o con fósforo absorbido por las plantas, de la generalización del método para distintos suelos y fertilizantes aplicados así como de la ausencia relativa de complicaciones analíticas (Zamuz y Castro, 1974).

En forma muy global se puede citar tres caminos diferentes por los cuales se han desarrollado las recomendaciones de fertilización: a) la medida directa del requerimiento de un cultivo en términos del suministro de nutrientes por medio de las curvas de respuesta, b) las evaluaciones analíticas de la fertilidad de un suelo, c) las evaluaciones analíticas del estado nutricional en plantas (Goñi, 1996).

En Uruguay, el análisis químico de suelo ha sido el método más utilizado para el diagnóstico de necesidades de fósforo tanto para cultivos como para pasturas. Dentro del análisis químico de suelo, los dos métodos más empleados han sido el método de resinas de intercambio catiónico y el método Bray I (Morón, 1996).

2.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO

2.3.1.1 Bray I

El mecanismo de extracción de este método es el siguiente: el flúor compleja al hierro y al aluminio liberando de esta forma la fracción más reactiva de los fosfatos de hierro y aluminio. El pH ácido en el cual trabaja el método solubiliza la fracción más reactiva de los fosfatos de calcio. La fórmula de este método es HCl 0,025N + FNH₄ 0,03N. Este método ha demostrado tener buen comportamiento en suelos ligeramente ácidos, con excepción de los extremadamente lixiviados (Casanova et al, 1975).

2.3.1.2 Resinas catiónicas

El mecanismo de extracción estaría dado por la fijación de cationes de hierro, aluminio y calcio por parte de resina, lo que favorece una solubilización por parte del fósforo del suelo (Casanova et al, 1975).

2.3.1.3 Ácido cítrico

El método de análisis de fósforo consta de la extracción con solución de ácido cítrico al 0,5 % en una relación suelo - solución 1: 10 y determinación colorimétrica con molibdato de amonio y ácido ascórbico. Es uno de los métodos más antiguos (Morón com. pers.).

2.3.2 CARACTERIZACIÓN DEL ANÁLISIS FOLIAR

El análisis de planta como método diagnóstico se basa en la premisa de que la concentración de un nutriente en la planta es un indicador de la disponibilidad de ese nutriente en el suelo y por tanto directamente relacionado con la cantidad. Sin embargo, las concentraciones del nutriente en la planta no siempre presentan una asociación directa con la disponibilidad en el suelo, existiendo otros factores como nivel de humedad en el suelo, aireación, compactación, déficit o exceso de otros nutrientes, que

pueden afectar la concentración del nutriente en cuestión además de la disponibilidad en el suelo (Morón, 1996).

Lagatu y Maumé (1934) citados por Rabuffetti y Zamalvide (1983), llaman diagnóstico foliar anual a una serie de estados químicos de la hoja en diversas épocas distribuidas por todo el ciclo vegetativo. De esta manera, se va determinando la concentración del nutriente en plantas sometidas a fertilizaciones diversas definiéndose así, mediante comparaciones con las cosechas obtenidas, aquella fertilización que corresponde un óptimo de producción, en las condiciones estudiadas (suelo, clima, manejo, etc.). Conocida las dosis de fertilizante que garantiza una producción considerada óptima y la composición de las hojas, correspondiente al tratamiento en cuestión, es posible corregir el estado nutricional de plantas cuyas hojas tengan una composición mineral diferente.

2.3.2.1 Para qué sirve?

A continuación se describen los posibles usos del método de análisis foliar.

2.3.2.1.1 Diagnóstico de deficiencias minerales o desórdenes nutricionales

El análisis químico de las hojas permite diagnosticar la deficiencia que está ocurriendo. Puede suceder que la misma no sea lo suficientemente aguda como para provocar la aparición de síntomas nítidos. A través de respuestas y ensayos de fertilización, o por análisis químicos de las hojas, comparados con valores standard, será posible hacer el diagnóstico de la deficiencia (Rabuffetti y Zamalvide, 1983).

2.3.2.1.2 Evaluación del estado nutricional y recomendaciones de fertilización

Las plantas altamente productivas tendrán contenidos más altos de los elementos esenciales, por lo que conocidas las cantidades de fertilizantes que permiten alcanzar tales tenores y las producciones correspondientes, será posible orientar un programa de fertilización. Para ello se vuelve necesario conocer la composición de las hojas del cultivo a fertilizar. El análisis foliar constituye así un método que permite evaluar las necesidades de fertilización (Rabuffetti y Zamalvide, 1983).

2.3.2.2 Tipos de análisis foliares

2.3.2.2.1 Análisis químico total

Se realiza en laboratorio, requiriendo definir claramente el estado de desarrollo de la planta y la parte de la planta a analizar. La limitante más importante para este tipo de análisis es la naturaleza dinámica de la concentración de fósforo, generalmente decreciente con la edad de la planta (Morón, 1996).

2.3.2.2.2 Análisis de tejidos frescos o análisis rápido

Puede ser realizado in situ, se basa en la determinación del fósforo inorgánico presente en la savia del xilema y en el contenido celular de células que sufren rotura mecánica. En los últimos años en INIA La Estanzuela se ha ajustado la técnica de análisis rápido (Fosforapid) para diferentes leguminosas (trébol blanco, alfalfa, lotus, trébol rojo). Los trabajos experimentales han demostrado que existe una buena correlación entre este tipo de análisis y los requerimientos de fertilizantes fosfatados que deben ser aplicados. La gran ventaja de esta técnica es su rapidez y la posibilidad de ser realizada en el campo (Morón, 1996). También se constata una buena asociación entre el método de análisis rápido medido en base al fósforo en savia y el contenido de fósforo total en planta (Morón, 1999).

2.3.3 EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES MÉTODOS

Casanova et al (1975), evaluaron la capacidad predictiva de algunos métodos de análisis de fósforo asimilable. Para ello utilizaron muestras que incluían una amplia variabilidad de suelos del Uruguay en los cuales era dominante la fracción fósforo - hierro (P-Fe) e importante la fracción fósforo-calcio (P-Ca) en los suelos de pH alto. La fracción que presentó mayor asimilabilidad fue el fósforo-aluminio (P-Al), luego el P-Fe, siendo muy baja la de P-Ca. Las correlaciones entre métodos y fracciones indicarían que todos los métodos extrajeron cantidades significativas de P-Al. El Bray I extrajo también algo de P-Fe y el de Resinas extrajo además P-Ca y algo de P-Fe. Considerando todos los suelos, el método que evaluó mejor la disponibilidad de fósforo fue el de Resinas catiónicas ($r = 0,90$ con fósforo total absorbido, mientras que para el Bray I la correlación fue de $0,73$). Cuando se excluyeron los suelos arenosos muy lixiviados las correlaciones fueron de $0,98$ y $0,90$ para Bray I y Resinas respectivamente. Para los suelos arenosos ningún método mostró buena capacidad de evaluar el poder de suministro de fósforo.

Zamuz y Castro (1974), estudiaron gráficamente los valores de análisis de suelo y los índices de planta y se encontró que guardan una relación lineal. A su vez, encontraron que la correlación entre los valores de los distintos métodos de análisis es tan alta que no permite establecer diferencias entre ellos para predecir la capacidad de los suelos en suministrar fósforo a un cultivo. La elección de uno u otro dependerá de su mayor o menor facilidad de rapidez de ejecución, así como del costo del análisis.

Morón (1999), estudió la relación entre el contenido de fósforo en planta y los métodos de análisis de fósforo disponible Bray I, Resinas y Ácido cítrico. El método del Ácido cítrico fue el que presentó mejor asociación con el contenido de P en planta. Los datos sugieren un valor crítico en el suelo (en lomadas del Este) de entre 12 y 15 $\mu\text{g P/g}$ por el método del Ácido cítrico. Varios autores han encontrado que el método de resinas catiónicas, al igual que Bray I, presentaron limitaciones para su utilización en suelos sobre cristalino, planosoles de zona este y vertisoles sobre basalto. Por ejemplo en suelos sobre cristalino la aplicación de distintos niveles de fertilizante fosfatado determina un importante incremento en el rendimiento y concentración de fósforo en las leguminosas, aunque los análisis de suelo mencionados reflejan muy débilmente los niveles de fertilidad.

Zamalvide (1996), también hace énfasis en que hay otras limitantes aparte de las ya mencionadas para el uso del Bray I como ser:

1. Cuando se procede a calibrar el método, aparecen diferencias entre algunos suelos del país.
2. En el caso de disponibilidad futura derivada de residualidad de fosforitas no disueltas, que estrictamente no integraría el fósforo lábil, no es posible estudiarla con este enfoque del problema. En el uso actual de fosforitas en dosis bajas este es más un problema teórico que real de la producción.
3. En los casos de mejoramientos en cobertura se planten varios problemas. Uno es que el muestreo evalúe la residualidad de fertilizaciones concentradas en 1 o 2 cm superficiales. Esto podría resolverse muestreando con calador a 7,5 cm de profundidad o hacer más de un estrato, por ejemplo 0-7,5 y 7,5-15 cm. Por otro lado la información experimental indica que los análisis de suelo muestran poca sensibilidad para detectar los cambios en disponibilidad que sí muestra la pastura. Esto podría explicarse por bajos niveles de fertilización (pero significativos para las especies utilizadas) o también por un papel importante del ciclo orgánico en el aporte de la disponibilidad de fósforo.
4. En los casos en que los suelos estén pasando por etapas de importante mineralización de materia orgánica en un caso, o acumulación en otro, esto afectará la disponibilidad de fósforo positiva o negativamente.

De acuerdo a los datos provenientes de ensayos y de situaciones comerciales de mejoramientos extensivos la información que brindan los datos de los análisis de fósforo

asimilable de los suelos son de escasa utilidad para la toma de decisiones sobre futuras fertilizaciones. La observación más frecuente es que los datos obtenidos se apartan poco de los niveles iniciales de campo natural (Zamalvide, 1998).

Algunas de las causas que pueden explicar esto son:

-Dadas las dosis bajas de fósforo que generalmente se utilizan en los mejoramientos extensivos la expectativa de incremento de los niveles de fósforo asimilable son escasas permaneciendo casi siempre los resultados en la categoría de muy bajos.

-Todas las aplicaciones de fósforo se realizan en cobertura y dada la inmovilidad de este nutriente permanecerá concentrado en los primeros 2 cm para la mayoría de los suelos. Esto por un lado provoca fuertes interacciones con la materia orgánica que también se acumula en superficie. Por otro lado complica enormemente el muestreo de los suelos y la interpretación de los resultados.

Muchos suelos tienden a aumentar su contenido de materia orgánica como consecuencia de los aumentos de producción de forraje, dentro de esa materia queda inmovilizado parte del fósforo aplicado por lo que no integrará el fósforo inorgánico que se estima en el análisis.

En los últimos años se ha adoptado por varios laboratorios de EE.UU. una nueva solución extractiva conocida como Mehlich 3. Esta solución tiene la ventaja de permitir analizar varios nutrientes (entre ellos fósforo) en el mismo extracto. De acuerdo a los resultados primarios, concordantes con algunos trabajos extranjeros, los resultados obtenidos con esta técnica serían similares a los obtenidos con Bray I. Por lo que de confirmarse estos resultados para un amplio rango de suelos sería promisorio su uso en el país dadas las ventajas operativas que presenta.

2.4 FERTILIZANTES FOSFATADOS

2.4.1 CÁLCULO DEL CONTENIDO DE FÓSFORO DE LOS FERTILIZANTES

Según Casanova y Barbazán (2002), el contenido de fósforo de los fertilizantes se ha representado en términos de su equivalente en P_2O_5 . Para obtener el contenido de fósforo expresado en % de fósforo y no en % de P_2O_5 la conversión es la siguiente:

$$\% P = \% P_2O_5 * 0,437$$

$$\% P_2O_5 = \% P * 2,32$$

2.4.2 TERMINOLOGÍA DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS

Según Rabuffetti et al (1983), se han desarrollado métodos químicos que permiten una estimación bastante rápida del contenido de fósforo soluble al agua, asimilable y total de los fertilizantes fosfatados.

A continuación se da una breve descripción de los procedimientos analíticos, así como una definición de los términos (Rabuffetti et al 1983, Casanova y Barbazán 2002).

2.4.2.1 Fósforo soluble al agua

Una muestra pequeña del material para el análisis es primero extractada con agua por un tiempo determinado. La suspensión se filtra y se determina la fracción soluble en agua en el filtrado y se expresa como porcentaje en peso de la muestra, se corresponde con el fosfato monocálcico $Ca(H_2PO_4)_2$.

2.4.2.2 Fósforo soluble al citrato de amonio

Al residuo del lavado se le agrega una solución neutra de citrato de amonio 1 N. Se extrae por agitación durante un período determinado de tiempo y se filtra la suspensión. Se determina el fósforo del filtrado y la cantidad presente expresada como

porcentaje del peso total de la muestra corresponde al fósforo soluble al citrato, que es el fosfato bicálcico CaHPO_4 .

2.4.2.3 Fósforo insoluble al citrato

Luego se analiza el residuo remanente de las extracciones con agua y citrato de amonio. La cantidad de fósforo remanente se denomina fósforo insoluble al citrato y corresponde al fosfato tricálcico $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

2.4.2.4 Fósforo asimilable

La suma del fósforo soluble al agua y el fósforo soluble al citrato de amonio constituye una estimación de la fracción rápidamente disponible para las plantas que se denomina fósforo asimilable.

2.4.2.5 Fósforo total

La suma del fósforo asimilable y del fósforo insoluble al citrato de amonio representa la cantidad total de fósforo presente en el fertilizante. El fósforo total puede ser determinado directamente sin recurrir al procedimiento paso a paso recientemente descrito.

2.4.2.6 Fósforo soluble en ácido cítrico al 2 %

En algunos fertilizantes (aquellos que contienen Fosforita natural, como una o la única fuente de fósforo) se cuantifica el contenido de fósforo soluble en ácido cítrico al 2 %, en lugar de hacerlo con una solución de citrato de amonio o con agua. En algunos países se utiliza el ácido fórmico en lugar del cítrico, lográndose una solubilización mayor de los fosfatos de la roca.

2.4.3 FUENTES DE FÓSFORO

La fuente original de fósforo en las primeras fabricaciones de fertilizantes fosfatados fueron los huesos, pero rápidamente esta fuente fue agotada. Desde hace muchos años, la fuente más importante para la fabricación de fertilizantes fosfatados es la roca fosfatada. Básicamente, el compuesto dominante en los mismos es la apatita. Este mineral aparece en distintas formas, tales como carbonatoapatita, fluorapatita, cloroapatita o hidroxapatita. Esta roca es tratada ya sea con calor o con ácidos a efectos de aumentar la solubilidad del fósforo de la misma (Rabuffetti et al, 1983).

2.4.4 FUENTES DE FÓSFORO PARA LAS PASTURAS

Según Morón (1982), las fuentes más utilizadas son el Hiperfosfato y el Superfosfato. Una de sus principales diferencias es la velocidad con la que dejan al fósforo disponible para las plantas; lo que depende de su formulación química y de los distintos procesos a los cuales son sometidos en su elaboración. El Hiperfosfato $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, proviene de fosforitas sedimentarias a las cuales se les aplica un tratamiento mecánico de molienda.

El valor fertilizante de los diferentes fosfatos está principalmente determinado por la energía de enlace entre el radical fosfato y los iones calcio. Cuanto mayor sea esta energía, menor será la solubilización del fósforo y su pasaje al fósforo disponible del suelo (Russell y Russell, 1968 citados por Morón, 1982).

Como se puede observar en su fórmula química ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), las fosforitas molidas no tienen acidez interna, o sea no tienen hidrógeno unido a su radical fosfato, por lo cual necesitan acidez para solubilizarse. A los efectos de lograr su máxima eficiencia en general se recomienda aplicarlas en suelos ácidos, finamente molidos y mezclados con el suelo. En nuestro país, en parte por los problemas que surgen en su aplicación, las fosforitas no se usan en la forma más eficiente (Morón, 1982). Lerh y McClellan (1972), coinciden con esto, mientras que Quin (1985) y Rajan et al (1992), mostraron que granulaciones muy finas de los fosfatos naturales no aumentaron la eficiencia agronómica de estos, sino que las mejores fueron las de granulaciones intermedias.

Dada su baja solubilidad, las fosforitas molidas necesitan tiempo para reaccionar con el suelo y expresar su potencial. Por lo tanto en la comparación con otras fuentes de fertilizantes fosfatados deberían ser tenidos en cuenta sus efectos en el año de aplicación y en los años siguientes (efecto residual). Mc Lean et al (1952), Weeks y Miller (1959) y

Doll et al (1960) citados por Pereira de Oliveira et al (1998), agregan que a largo plazo (mínimo 3 años) el efecto residual de la fosforita es generalmente mayor.

Khasawneh y Doll (1978) citados por Pereira de Oliveira et al (1998), coinciden con esto y agregan que ese poder residual de las rocas sedimentarias es mayor que el de las rocas ígneas y metamórficas, por poseer micro cristales con pequeños poros que le permite una mayor área de contacto interna.

La eficiencia de los fosfatos de roca está íntimamente relacionada con el grado de sustitución del ion fosfato (PO_4^{-3}) por carbonato (CO_3^{-2}), que genera una inestabilidad en la estructura cristalina de la roca. Las rocas de origen sedimentario tienen una estructura cristalina frágil, permitiendo que el fósforo quede más fácilmente disponible (Lerh y McClellan, 1972).

Según Rabuffetti et al (1983), la roca fosfatada finamente molida puede también ser utilizada directamente como fuente de fósforo para las plantas. Si bien el mineral fosfatado de todos los depósitos es la apatita, existen variaciones en cuanto a su composición química, lo cual determina la factibilidad o no de utilizar estos materiales directamente como fuente de fósforo. Por esto se han diferenciado las fosforitas duras y las fosforitas blandas. En las fosforitas duras, que pueden ser de origen sedimentario, ígneo o metamórfico, el mineral predominante es la fluorapatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$. En éstas, la apatita aparece bajo formas de cristales bien formados, siendo la roca muy estable térmicamente y de baja reactividad química. Son materiales inadecuados para su uso directo y debido a su riqueza en fosfatos pueden ser utilizados como materia prima para la fabricación de fosfatos solubles mediante tratamiento con ácidos. En las fosforitas blandas, que proceden siempre de depósitos de origen sedimentario, la roca fosfatada aparece pobremente cristalizada y su composición química difiere bastante de la fluorapatita. En estos materiales parte del PO_4^{-3} ha sido sustituido por F^{-2} y CO_3^{-2} y a su vez parte del Ca ha sido sustituido por otros cationes (Mg, Na). El resultado es un material generalmente menos rico en fósforo que las fosforitas duras, más pobres en Ca, pero térmicamente más inestable y de mayor reactividad química. La mayor reactividad química de las fosforitas blandas, resultantes de su menor estabilidad estructural, se traduce en mayor solubilidad del fósforo de la roca frente a los residuos utilizados en la caracterización de los fertilizantes fosfatados, así como en mayor solubilización de la roca una vez aplicado a los suelos.

El fosfato de roca es utilizado directamente en cantidades limitadas como material fertilizante. Debe ser finamente pulverizada (molida) para ser eficaz y tiene valor sólo en ciertos sistemas de cultivos que incluyen leguminosas capaces de utilizarlo en suelos ácidos. La mayor parte del fósforo de roca es sometido a un proceso, ya sea por calor o tratamiento con ácido. En ambos casos la estructura de la apatita es destruida y resulta un producto en el que el fósforo es más “fácilmente” disponible (Casanova y Barbazán, 2002).

Según Edmeades et al (1991), en experimentos realizados en Nueva Zelanda, para obtener los mismos rendimientos de forraje se requieren 3,5 veces más de roca fosfórica en el 1er año, 2 veces más en el 2do año y 1,5 en el 3er año, comparando con una fuente con fósforo soluble.

El fósforo liberado por la roca es tan efectivo como el proveniente de las fuentes solubles (Sinclair et al, 1990). Se obtienen rangos de eficiencia de entre 15 y 92 kg de MS/kg de P. Estos resultados son en suelos cuyos pH van de 5,1 – 6,3 y con un régimen anual de lluvias de 700 a 1800 mm (Smith et al, 1990).

En recientes ensayos en Northland, Nueva Zelanda, se mostró que con pH <5,0 la roca fosfatada puede resultar tan efectiva como el fertilizante soluble en el año 1 (Edmeades et al, 1991).

En Nueva Zelanda no se recomienda aplicar roca fosfórica en suelos con pH >6, y zonas donde llueva menos de 800 mm en el año (Quin et al, 1987 citados por Edmeades et al, 1991).

El grado de sustitución de PO_4^{-3} por CO_3^{-2} en la roca y la solubilidad de la misma en ácido cítrico al 2%, son criterios adecuados para caracterizar el valor agronómico relativo de distintas rocas fosfatadas (Rabuffetti et al, 1983). El fosfato procedente de Gafsa, Túnez (hiperfosfato), constituye en la actualidad una de las rocas fosfatadas de mayor eficiencia agronómica relativa. Adecuadas respuestas a su aplicación ya se pueden observar en los primeros años, por lo que no habría grandes diferencias con el superfosfato y menos si se aplica sobre suelos ácidos. El problema sería la eficiencia de aplicación de esa fosforita molida o en polvo (Morón, com. pers.).

El superfosfato de calcio, simple o común, de uso generalizado en nuestro país, se obtiene mediante la acción del ácido sulfúrico (H_2SO_4) sobre la roca fosfatada. El producto resultante es una mezcla de fosfato monocálcico [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] y de yeso (CaSO_4) que contiene 7 a 9% de fósforo (16 a 22 % de P_2O_5), del cual aproximadamente el 90 % es soluble al agua y se clasifica como asimilable. Además, contiene entre 8 y 10% de S como CaSO_4 . Con esta acidificación se logra una solubilidad en el momento de su aplicación, que permite una gran disponibilidad inicial de fósforo en el suelo para las plantas. Estas características lo hacen eficiente en un amplio rango de suelos y en cultivos anuales (Rabuffetti et al, 1983).

Los superfosfatos de calcio comunes, además de tener aplicación directa a los suelos como fuentes de fósforo, se utilizan en la industria de fertilizantes para la fabricación de mezclas de fertilizantes o fertilizantes granulados que contengan N, P y K (nitrógeno, fósforo y potasio) (Rabuffetti et al, 1983).

Los superfosfatos concentrados o superfosfatos triples contienen entre 19 y 23% de fósforo (44-52% de P_2O_5), del cual más del 90% es soluble en agua y se clasifica como asimilable. Químicamente es esencialmente $Ca(H_2PO_4)_2$ y se obtiene tratando el fósforo de roca con H_3PO_4 . Los superfosfatos triples son también fuentes adecuadas de fósforo para una amplia gama de suelos y sistemas de cultivos pudiendo ser utilizados también en la fabricación de fertilizantes compuestos NPK (Rabuffetti et al, 1983.)

A medida que transcurre el tiempo esta disponibilidad va disminuyendo debido a los procesos de inmovilización que se dan al reaccionar el fertilizante con el suelo. Estos procesos varían según el tipo de suelo involucrado. Aplicándolo en polvo disminuiría su eficiencia, ya que aceleraría los procesos de inmovilización, lo cual disminuiría su disponibilidad más rápidamente a medida que pasa el tiempo (Zamalvide et al, 1978.)

Según Rabuffetti et al (1983), los superfosfatos son fertilizantes neutros en el sentido de que no tienen efectos apreciables sobre el pH del suelo, como pueden tenerlo el ácido fosfórico o los fertilizantes que contengan amonio (NH_4).

2.4.4.1 Fosfatos de roca parcialmente acidulados

A veces, en lugar de tratar la roca fosfatada con la cantidad total de ácido necesaria para transformar todo el fósforo de la misma en soluble en agua, se agrega una cantidad menor de ácido, lo que resulta en una acidificación parcial.

Actualmente en nuestro país se está produciendo fertilizantes fosfatados parcialmente acidulados. El hyperfos (0-14-28-0) se obtiene tratando una roca fosfatada blanda con un exceso de H_2SO_4 neutralizando dicho exceso con la propia roca (Casanova y Barbazán, 2002).

2.4.4.2 Reacciones de los fertilizantes fosfatados insolubles al agua

Según Rabuffetti et al (1983), en este grupo se incluyen los fertilizantes totalmente insolubles al agua, pero parcialmente solubles en ácido cítrico al 2%, como es el caso de los fosfatos de roca o fosforitas de uso directo. Al ser insolubles al agua, las fosforitas no se disuelven rápidamente en el suelo ni forman una solución concentrada que reaccione energicamente con el suelo, tal como sucede con el $Ca(H_2PO_4)_2$.

El fósforo queda en gran parte confinado al punto de aplicación y para ser asimilable requiere su transformación a formas fosfatadas capaces de ser absorbidas por

las plantas (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}). La mayor o menor intensidad de esa transformación depende a su vez de características del material fertilizante (composición química de la roca fosfatada, estado de división o tamaño del grano) y de características del suelo, entre las cuales el pH del suelo es un factor preponderante (Rabuffetti et al, 1983).

La solubilización de las fosforitas, por lo tanto la eficiencia de las mismas como fuentes de fósforo para las plantas, será distinta según el pH del suelo.

En suelos con pH cercanos a la neutralidad, suelos con alto nivel de bases y suelos calcáreos o alcalinos, la solubilización de las fosforitas será considerablemente menor que en suelos ácidos ($\text{pH} < 5,5$), desaturados con bajo porcentaje de saturación en bases. En estos suelos la presencia de acidez aumenta la reactividad de la roca y por lo tanto la producción de compuestos fosfatados asimilables (Rabuffetti et al, 1983).

2.5 EFICIENCIA DE DIFERENTES FUENTES DE FÓSFORO

En experimentos realizados en Uruguay, analizados por Formoso y Allegri (1975) citados por Morón (1982), comparando Hiperfosfato en polvo contra Superfosfato granulado, se demostró que la eficiencia del Hiperfosfato llegaba a ser del 80% de la eficiencia obtenida con el Superfosfato.

2.5.1 FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA RELATIVA DE LOS FERTILIZANTES

2.5.1.1 Factores del suelo

Numerosos trabajos demuestran que la eficiencia relativa de las fosforitas en relación a los fosfatos solubles, aumenta al bajar el pH del suelo (Bennet et al, s/r, Joos y Black citados por Labella y Amendola, 1977; Braga et al, 1991 citados por Pereira de Oliveira et al, 1998). En ensayos realizados en La Estanzuela en la década del 60, se encontró que suelos con similares valores de pH, la eficiencia de las fosforitas variaba considerablemente atribuyendo la menor eficiencia a la presencia de calcio en abundancia, el cual disminuía la disponibilidad de las fosforitas (C.I.A.A.B., 1971).

Khasawneh y Doll (1978) citados por Pereira de Oliveira et al (1998), afirman que el fosfato de Gafsa no es soluble en agua y que sólo se solubiliza en contacto con los ácidos del suelo, principalmente ácido cítrico y fórmico. Por lo tanto, el uso de este fertilizante sería recomendado preferencialmente para pasturas perennes sobre suelos ácidos (Rocha, 1986), logrando a partir del segundo año las mejores respuestas (Goedert y Lobato, 1980 citados por Pereira de Oliveira et al, 1998).

Castro et al (1981), interpretaron que la diferencia en las eficiencias no se debía sólo al pH del suelo, por lo cual analizaron los efectos de otros factores como: contenido de materia orgánica, saturación en bases y capacidad de intercambio catiónico. Del análisis de los coeficientes de regresión, surge que la eficiencia relativa del Hiperfosfato en polvo disminuye a medida que aumenta el pH, al igual que si aumenta el contenido de materia orgánica. Según estos datos, la materia orgánica parece explicar mejor la variación de eficiencia.

2.5.1.1.1 Propiedades del suelo que pueden afectar la eficiencia relativa de los fertilizantes

Los cationes intercambiables del suelo son aquellos que estando retenidos por la fase sólida pueden intercambiarse con los cationes que existen en la solución del suelo sin alterar a los sólidos del suelo. Existe un equilibrio entre cationes retenidos en fase sólida en forma intercambiable y los cationes en solución. A medida que las plantas toman cationes de la solución del suelo, la fase sólida los repone (Morón, 1982).

Existen una serie de medidas de las propiedades de intercambio catiónico (Morón, 1982):

La capacidad de intercambio catiónico (CIC): es la cantidad total de cationes intercambiables medida en miliequivalentes cada cien gramos de suelo. El origen de las propiedades de intercambio se encuentra en la materia orgánica y en la arcilla.

Bases totales (BT): es la suma de calcio, magnesio, potasio y sodio (intercambiables) medida en miliequivalentes cada cien gramos de suelo.

% de Saturación: es el porcentaje del total de posiciones de intercambio (CIC) que se encuentran ocupadas por las Bases Totales Intercambiables (BT). El resto de las posiciones de intercambio está ocupado por hidrógeno y en algunos suelos ácidos por aluminio.

De esto se puede concluir que a menor % de saturación en bases más se solubiliza la fosforita, ya que hay más posiciones de intercambio catiónico que pueden estar ocupadas por hidrógenos, el cual dejaría el fósforo disponible.

Al pasar de una situación de alta eficiencia de liberación de fósforo a partir de la fosforita a una de baja, aumentan su tenor una serie de propiedades tales como porcentaje de arcillas, porcentaje de materia orgánica, CIC, BT, porcentaje de saturación y pH. No está claro si existe un efecto directo de la materia orgánica sobre la eficiencia. Quizás más que un efecto directo de la materia orgánica, ésta sería un indicador del tipo de suelo (Morón, 1982).

Para una disolución efectiva del fósforo, hay que tener en cuenta la estructura química de la roca, la disponibilidad de agua, pH y el poder buffer del suelo (Barbare et al, 1997; Bolland y Gilkes, 1997; Bolland et al, 1997; Sale et al, 1997).

El efecto positivo del poder buffer del suelo con el fósforo y la acidez titulable, pueden explicar la variación de las cantidades de fósforo disuelto de la roca (Barbare et al, 1997). La proporción de fósforo disuelto (proveniente de la fosforita) que se torna disponible para las plantas, decrece a medida que aumenta el poder buffer del suelo con

el fósforo (Barrow 1978, citado por Reuter, 1997). Asimismo se menciona que no se recomienda el uso de rocas en suelos con bajos niveles de fósforo, ya que el fósforo derivado de estos fertilizantes es muy poco probable que satisfaga las necesidades de las pasturas en activo crecimiento. Deberían ser usados con un criterio de mantener los niveles de fósforo presentes en el suelo y no como fertilizantes que incrementan el nivel de este nutriente en el suelo.

En ambientes donde se logran buenas disoluciones del fósforo a partir de la roca, el uso de éstas en grandes cantidades, ha mostrado ser agronómicamente (Garden et al, 1997) y económicamente (Simpson et al, 1997) factible.

2.5.1.2 Especie forrajera considerada

Existen diferencias entre las especies en la habilidad para tomar fósforo proveniente de las fosforitas.

Las raíces con alta capacidad de intercambio catiónico y alta disociación ácida podrán utilizar mejor el fósforo proveniente de las fosforitas (Labella y Amendola, 1979 citados por Morón, 1982). A su vez las especies perennes son más eficientes que las anuales.

Russell y Russell (1968) citados por Morón (1982), reportan que algunas especies como la brassica tienen capacidad considerable para utilizar fosfatos insolubles; trébol blanco, trébol rojo y alfalfa tienen capacidad intermedia; y por último cereales, gramíneas y papa tienen capacidad menor.

Diversos trabajos han mostrado que el tamaño y la forma del sistema radicular determinan la capacidad de absorción de los nutrientes poco móviles como el fósforo. Sabida es la importancia de la intercepción en la absorción de fósforo, de donde resulta claro que al aumentar la superficie de absorción de las raíces aumenta la utilización del fósforo del suelo (Castro, 1978).

2.5.1.3 Granulación y solubilidad del fósforo

Numerosos investigadores han encontrado que las respuestas tempranas de los cultivos aumentan con incrementos en el tamaño de gránulo de los fertilizantes fosfatados solubles al agua aplicados en suelos ácidos con baja disponibilidad de fósforo (efecto semejante al bandedo). Para éste tipo de fertilizantes, en gránulos mayores a los 6 mm de diámetro, la eficiencia está relacionada con la cantidad de fósforo soluble al

agua que tenga al gránulo, lo que determina el volumen de suelo afectado por el mismo (Taylor et al, 1964 citados por Engelstad y Terman, 1980). La respuesta de los cultivos a grandes gránulos depende de la probabilidad de que las raíces encuentren las pequeñas zonas de difusión (o la banda fertilizada) para obtener el fósforo aplicado (Moreno, 1959, Van Burg, 1963 citados por Engelstad y Terman, 1980). Una aplicación normal de fertilizantes solubles al agua granulados afecta el 2% o menos del suelo en la zona radicular.

Para los suelos alcalinos, granulaciones o bandeados de los fosfatos de calcio no muestran mayores ventajas agronómicas. Esto no es así para los fosfatos de amonio, que con su acidificación local desarrollada en las bandas fertilizadas, pueden temporalmente incrementar la disponibilidad del fósforo y de algunos micronutrientes (Engelstad y Terman, 1980).

Según Morón (1982), la granulación de las fosforitas perjudica su contacto con el suelo y por lo tanto su disolución y toma por las raíces. La granulación del hiperfosfato redujo notoriamente su eficiencia al compararlo con el hiperfosfato en polvo. En contraposición con los fertilizantes solubles al agua, los fertilizantes insolubles al agua deben ser finos (menores a 1 mm) y deben ser mezclados con suelos ácidos o alcalinos. La disponibilidad agronómica de los compuestos fosfatados de los fertilizantes insolubles al agua es función del área de superficie del gránulo (Bouldin et al, 1960 citados por Engelstad y Terman, 1980). Lerh y McClellan (1972), coinciden con lo antes mencionado, mientras que Quin (1985) y Rajan et al (1992), mostraron que granulaciones muy finas de los fosfatos naturales no aumentaron la eficiencia agronómica de éstos, sino que las mejores fueron las de las granulaciones intermedias. Los efectos del tamaño del gránulo – solubilidad del fósforo en general tienden a ser ocultos en suelos con altos niveles de fósforo disponible. En éstos, las respuestas en rendimiento son improbables con cualquier aplicación de fertilizantes fosfatados (Engelstad y Terman, 1980).

2.5.1.4 Método de aplicación

Casanova y Barbazán (2002), mencionan que la localización de los fertilizantes puede hacerse en forma superficial o subsuperficial así como antes, durante o después de sembrar, los mismos se describen a continuación.

2.5.1.4.1 Presiembra

A) Voleo: el fertilizante se aplica uniformemente sobre el suelo antes de sembrar el cultivo pudiendo ser incorporado mediante un arado o cultivador. En cultivos donde

no es posible incorporar, como sucede en forrajeras perennes y en sistemas de cultivos sin laboreo, los fertilizantes pueden ser esparcidos sobre la superficie. La recuperación por el cultivo del nitrógeno, potasio, fósforo y otros nutrientes puede ser incrementada con aplicaciones en bandas subsuperficiales en cultivos sin laboreo.

B) Banda subsuperficial: teóricamente, la eficiencia del fertilizante o la recuperación de nutriente por el cultivo podría incrementarse con aplicaciones en bandas subsuperficiales. La profundidad de localización variará entre 5 y 20 cm, dependiendo del cultivo y de la fuente del fertilizante.

C) Banda superficial: la banda superficial puede ser un método efectivo de aplicación de fertilizantes antes de la siembra. Sin embargo, si no se incorpora y se dan condiciones de escasa humedad en la superficie del suelo, se puede reducir la absorción de nutrientes, especialmente de nutrientes inmóviles.

2.5.1.4.2 A la siembra

A) Banda subsuperficial: el fertilizante puede localizarse cerca de la semilla, según el equipo y el cultivo. En la siembra, los fertilizantes son aplicados de 2,5 a 5 cm directamente debajo de la semilla, dependiendo del equipo.

B) Bandedo con la semilla: la aplicación de fertilizantes con la semilla también es una banda superficial, pero se usa comúnmente como aplicación starter. Esta aplicación generalmente es para realzar el vigor inicial, especialmente en suelos fríos y húmedos. El fertilizante también puede ser localizado cerca de la semilla, en lugar de con la semilla. Usualmente bajas dosis de fertilizante son aplicadas para evitar daños en la germinación o emergencia. Se pueden usar fuentes sólidas o fluidas.

C) Bandas superficiales: los fertilizantes pueden ser aplicados superficialmente o a chorrillo a la siembra, en bandas directamente en la hilera o a algunos cm al lado de la hilera. La aplicación en la hilera con un azador puede ser un método efectivo de localización de nutrientes inmóviles, porque el suelo puede, luego de desagregarse, cubrir completamente la banda de fertilizante. De modo que la banda superficial aplicada se vuelve una banda subsuperficial aplicada levemente por encima de la semilla.

2.5.1.4.3 Postsiembra

A) Cobertura: aplicaciones en cobertura de fósforo y potasio no son tan efectivas como aplicaciones presiembra.

B) Al costado de la semilla: la aplicación al costado de la semilla para nutrientes inmóviles (fósforo y potasio) no es recomendada, porque la mayoría de los cultivos

necesitan elevado suministro de fósforo y potasio en la estación temprana de crecimiento.

2.5.1.4.4 Comparación entre aplicación al voleo o en bandas

La aplicación en bandas ha resultado tener una mayor eficiencia por unidad de fósforo aplicado, comparado con el voleo. Para ensayos de diferentes cultivos se ha encontrado que el superfosfato localizado en hileras ha tenido alrededor del doble de eficiencia que cuando se lo aplicó al voleo, o su eficiencia fue mayor a dosis menores cuando fue localizado. Sin embargo algunos resultados evidencian mayores rendimientos con una combinación de bandeado y voleo. El fósforo aplicado en bandas a bajas tasas tiende a maximizar el retorno de la inversión del fertilizante fosfatado (Engelstad y Terman, 1980).

En suelos con alta retención de fósforo, aplicaciones en bandas pueden proveer más fósforo disponible para el cultivo cuando los niveles de fósforo en el suelo son bajos. Si se incrementan los niveles de fertilidad del suelo, las ventajas del bandeado disminuyen, aunque fertilizaciones “starter” resultan en mejores rendimientos debido a un mayor desarrollo en las etapas tempranas en algunos cultivos. Aplicaciones al voleo son más rápidas y baratas de aplicar, pueden proveer grandes tasas de crecimiento sin daño del cultivo y puede aumentar el desarrollo de las raíces (Hodges, s/r).

Las plantas absorben nutrientes sólo en aquellas áreas en el suelo en las cuales las raíces son activas. Las plantas no pueden absorber nutrientes en suelos secos; de aquí que los sistemas radiculares que se han modificado por aplicaciones superficiales de fertilizantes deberían ser ubicados en la porción de la zona radicular donde se quiere estimular el crecimiento radicular, por lo tanto, la localización en profundidad puede ser necesaria en suelos que frecuentemente se secan (Casanova y Barbazán, 2002).

Un temprano crecimiento del cultivo es usualmente ventajoso, por lo cual es deseable tener nitrógeno-fósforo-potasio cerca de las raíces. Es importante tener una pequeña cantidad de nutrientes cerca de las plantas jóvenes para promover un crecimiento temprano y la formación de hojas, esto es factible al realizar aplicaciones en banda. La ventaja de una estimulación temprana depende del cultivo y de las condiciones climáticas. Algunos de los factores a considerar son los siguientes: a) resistencia a pestes, bajo condiciones adversas las plantas jóvenes en activo crecimiento usualmente resisten más los ataques de insectos y enfermedades; b) competencia con malezas, un crecimiento vigoroso temprano de cultivos es importante para reducir la competencia de malezas. Una menor presión de las malezas puede mejorar la eficiencia de herbicidas o reducir el número de laboreos (Casanova y Barbazán, 2002).

Las aplicaciones al voleo normalmente involucran una gran cantidad de cal y/o nutrientes, tanto para la instalación de cultivos como para el mantenimiento de la

producción. Con la tendencia al laboreo reducido, más nutrientes permanecen cerca de la superficie. La incorporación de fertilizantes con implementos de laboreo incrementa la recuperación de nutrientes inmóviles por el cultivo (ej: fósforo y potasio), mientras que la lluvia o el riego pueden mover nutrientes móviles dentro de la zona radicular, sin incorporación. La aplicación al voleo de los nutrientes incluye las siguientes ventajas: a) aplicaciones de grandes cantidades de fertilizantes se realizan sin dañar o perjudicar las plantas; b) si se ara el suelo, la distribución de nutrientes a través de toda la capa arable estimula el enraizamiento en profundidad y mejora la exploración del suelo por agua y nutrientes; c) éste método es un medio práctico de aplicación de fertilizante para mantenimiento, especialmente en cultivos forrajeros y en sistemas intensivos de cultivos de cero laboreo (Casanova y Barbazán, 2002).

Puesto que el fósforo es inmóvil en el suelo, la localización cerca de las raíces normalmente es ventajosa. Después de la siembra, las aplicaciones superficiales no ubicarán al fósforo cerca de la zona de actividad radicular y menos aún en cultivos anuales. Sin embargo, cuando el propósito de la fertilización fosfatada es el mantenimiento de especies forrajeras, la aplicación superficial sí es un método eficiente de aplicación. Algo del fósforo se absorbe a nivel de las coronas de la planta, así como también por las raíces superficiales. Además, tales aplicaciones entran en menor contacto con el suelo que aplicaciones con disqueadas, o sea, tienen menos oportunidades de fijación. Bandas superficiales pueden ser efectivas en suelos con bajo nivel de fósforo o potasio (Casanova y Barbazán, 2002).

Cómo aplicar el fósforo ¿en bandas o al voleo?. Cuando el fósforo se aplica bajo cualquiera de los dos métodos, banda o voleo, la eficiencia relativa de ambos está relacionada a los niveles de fósforo en el suelo y a la dosis de aplicación. Cuando la dosis de fósforo se incrementa, las aplicaciones al voleo pueden ser iguales o superiores a las bandas. Cuando la aplicación está repartida entre banda y voleo, ningún punto de aplicación de la banda solo logrará el rendimiento máximo, de ahí la ventaja de elevar el nivel del fósforo del suelo. En general, cuando los niveles de fósforo disponible en el suelo son altos, no habría diferencias entre la aplicación de fósforo con la semilla y aplicación de fósforo al voleo (Casanova y Barbazán, 2002).

Cuando la superficie del suelo se seca, el fósforo localizado en superficie o a poca profundidad puede volverse no aprovechable. La localización de nutrientes a profundidades de 8 a 14 cm en suelos secos, puede mejorar su disponibilidad debido a que allí la humedad del suelo es mayor que en los primeros centímetros. Aún con localización en bandas, los cultivos generalmente recuperan sólo una pequeña fracción del fertilizante fosfatados, normalmente menos del 25%, en contraste con la recuperación de nitrógeno y potasio, las cuales pueden ser de 50 a 75%. Las localizaciones de fósforo en bandas reducen el contacto con el suelo y hay menos oportunidades de fijación que las aplicaciones al voleo y muy mezclado con el suelo, donde el fertilizante fosfatado entra en íntimo contacto con un gran volumen de suelo.

Por lo tanto, el fósforo aplicado en banda debería incrementar la recuperación por el cultivo, comparado con fósforo aplicado al voleo e incorporado (Casanova y Barbazán, 2002).

Duell (1974) citado por Mays et al (1980), realizó una revisión sobre la fertilización fosfatada en el establecimiento de pasturas. En general encontró un mismo criterio, que en la siembra las leguminosas son menos capaces de obtener el fósforo del suelo cuando el fertilizante es aplicado al voleo. El crecimiento de plántulas de leguminosas y gramíneas se ve mejorado cuando se concentra el fósforo en bandas colocándolo debajo de la semilla. Colocando el fertilizante 2 o 3 cm al costado de la semilla ya es suficiente para reducir significativamente el crecimiento de las plantas jóvenes de leguminosas. Las respuestas favorables al bandeado del fósforo han sido mayores en las alfalfas y tréboles que en los lotus. El bandeado del fósforo aumenta la concentración del fósforo en los tejidos de manera más temprana, favorece un mayor crecimiento de las plántulas. El bandeado es más importante en siembras tempranas de primavera, que en las de otoño, que usualmente se realizan sobre suelos más cálidos.

El conocimiento de las características tempranas del enraizamiento es útil en la determinación del método más efectivo de localización del fertilizante. Si se produce tempranamente un vigoroso sistema radicular superficial, las aplicaciones de fertilizante pueden ser mejor ubicadas directamente debajo de la semilla. Si muchas raíces laterales son formadas tempranamente, la localización del fertilizante al costado sería lo recomendable (Casanova y Barbazán, 2002).

Fox (1978), menciona que los mejores resultados económicos obtenidos con fertilizantes fosfatados solubles localizados en bandas angostas, se logran por tres proposiciones centrales: (i) el fósforo en la banda es protegido contra reacciones irreversibles con el suelo, (ii) el fósforo en la banda es más fácilmente accesible para las raíces de las plántulas que cuando es distribuido más lejos, (iii) una planta puede estar suplementada adecuadamente por unas pocas raíces que proliferan en la banda fertilizada.

2.5.1.4.5 Eficiencia de las aplicaciones en superficie

La aplicación en superficie de fósforo es el método menos eficiente de colocación de fósforo. La incorporación en el estrato arable conduce a la mejora en la profundidad de las raíces y una más efectiva absorción. En no laboreo la incorporación no es posible. Se recomienda buenos niveles de fósforo antes de iniciar el sistema de no laboreo (Hodges, s/r). Considerando que el fósforo es inmóvil y que la superficie del suelo se encuentra frecuentemente seca bajo sistemas convencionales durante la estación de crecimiento, es esperable que este tipo de aplicaciones no sea muy efectiva. Sin embargo, la presencia de residuos de cultivos o material muerto en la superficie en

sistemas de no laboreo, incrementan los niveles de humedad ya que se reduce la evaporación (Engelstad y Terman, 1980).

El enterrado y mezclado del fertilizante es una práctica que, por las características del fertilizante, favorece relativamente más al hiperfosfato. Por lo tanto, la eficiencia del hiperfosfato en las fertilizaciones en cobertura puede disminuir, lo que podría ser mayor si se aplica granulado (Morón, 1982). Al respecto Black (1975) citado por Morón (1982), dice que los fertilizantes fosfatados de baja solubilidad son relativamente ineficaces si su aplicación es sólo superficial, pues una mínima parte del fósforo que contiene puede pasar al perfil del suelo por acción de las lluvias.

Según Baethgen y Bozzano (1981), el efecto negativo de concentrar el fósforo en la superficie sería minimizado cuanto más superficial sea el sistema radicular involucrado (trébol blanco).

La absorción del fósforo aplicado no es afectada por el método de laboreo. El fósforo aplicado en superficie en los sistemas de no laboreo tiene la misma eficiencia que cuando éste se incorpora al suelo. Estos buenos resultados se logran siempre y cuando se logren buenos niveles de humedad en la superficie del suelo. La fuente de fósforo a utilizar para aplicaciones en superficie debe ser muy soluble en agua (Engelstad y Terman, 1980).

Por todo lo mencionado anteriormente, la decisión de la fuente de fósforo a utilizar en la fertilización de pasturas está dada por la relación entre dos variables (Morón, 1982):

- a) eficiencia relativa de las fuentes
- b) relación de precios entre la unidad de fósforo en ambas formas.

2.6 REQUERIMIENTOS Y EFICIENCIA DE LAS DIFERENTES LEGUMINOSAS FRENTE AL FÓSFORO

Las diferentes especies pueden diferir marcadamente en el grado en que su rendimiento puede aumentar por adición de un fertilizante fosfatado (Rabuffetti et al, 1983). Carámbula (1978), observó incrementos de hasta 100 % en la producción de forraje por presencia de leguminosas en las pasturas.

Comúnmente, la proporción de leguminosas en la producción total de forraje de pasturas mezcla de forrajes, aumenta con el suministro de fósforo, lo que significa que la habilidad competitiva de las leguminosas es menor bajo condiciones de baja disponibilidad de fósforo en el suelo (Rabuffetti et al, 1983). Las diferencias morfológicas de las raíces de gramíneas y leguminosas afectan la capacidad de absorción de fósforo desde el suelo. La mayoría de las gramíneas producen una densa red de raíces finas y fibrosas que se ramifican completamente dentro de los estratos del suelo a profundidades de 24 a 50 cm. Esta red de raíces explora toda la masa del suelo y es capaz de extraer suficiente fósforo desde el suelo ocurriendo lo contrario con las leguminosas u otras plantas con sistemas radiculares menos penetrantes. Las leguminosas forrajeras tienen raíz principal o ramificaciones que son de mucha menor extensión y fibrosidad que las raíces de gramíneas (Engelstad y Terman, 1980).

Varias hipótesis han sido propuestas para explicar las diferencias entre especies. Una de ellas es la hipótesis del CO₂. Algunas plantas secretan más CO₂ en el suelo que otras y como resultado de esto pueden existir diferencias en la acidez del suelo, alrededor de las raíces. A consecuencia de ellas la concentración de fósforo en la solución del suelo en torno a las raíces puede ser mayor en algunas plantas que en otras (Rabuffetti et al, 1983). De acuerdo a Gerresten (1949) citado por Rabuffetti et al (1983), los microorganismos que están en el suelo directamente alrededor de las raíces pueden jugar un importante papel en la solubilización del fosfato.

Una segunda hipótesis es llamada "absorción de calcio". Trug (1916) citado por Rabuffetti et al (1983), sugirió que la diferencia en disponibilidad para varias plantas del fósforo de roca fosfatada se debe a diferencias en la absorción de calcio. Algunas plantas absorben más calcio que otras. Desde que la concentración de fósforo en solución debe aumentar a medida que la concentración en calcio decrece, la concentración de fósforo en solución debe ser máxima con las plantas que absorben más calcio.

Una tercera hipótesis es la de la extensión radicular. La disponibilidad de fósforo del suelo debe ser mayor para plantas que tienen una gran superficie absorbente, que para las que tienen una pequeña superficie absorbente, en relación a la cantidad de fósforo requerido (Rabuffetti et al, 1983).

Una cuarta hipótesis es la de los hongos de las micorrizas. En suelos relativamente pobres en nutrientes el crecimiento de coníferas mejora cuando hongos de la micorriza infectan las raíces, en relación a cuando estos están ausentes. Una razón para el mejor crecimiento asociado con la presencia del hongo parece ser que, en alguna forma, ellos facilitan la absorción de fósforo por la planta (Mc Comb, 1938 citado por Rabuffetti et al, 1983).

2.6.1 TRÉBOL BLANCO

Trifolium repens (trébol blanco) es una leguminosa de alta calidad, constituyente de las mejores pasturas del área templada. Es conocida por sus importantes requerimientos en la fertilidad de los suelos para producir altos rendimientos (Morón, 1999). Es una especie de alto valor nutritivo y por su hábito prostrado está muy bien adaptada al pastoreo (García, 1996).

El trébol blanco puede persistir como planta anual a través de la resiembra o como perenne mediante la producción continuada de estolones. La importancia relativa de ambos mecanismos varía en función del clima. Observaciones generales parecen indicar que la persistencia por estolones de la siembra original no va más allá de los tres años, salvo en suelos bajos sin problemas de humedad. La resiembra puede ser importante en años con otoño/invierno llovedores pero en general tiene un alto componente de erraticidad (García, 1996). El nivel crítico de concentración de fósforo en planta en base a la bibliografía de Nueva Zelanda es de 3,5 mg / g. Este valor es para hojas más pecíolos en plantas en estado de crecimiento activo (Morón, 1999). El valor crítico por el cual no existe respuesta significativa al agregado de fósforo es de 90 $\mu\text{g P} / \text{ml}$ (microgramos de fósforo / mililitro) según el método rápido del Kit Fosforapid (Morón, 1997).

Los cultivares de trébol blanco se agrupan en “tipos” asociados a determinadas características. El tamaño de hoja ha sido el principal carácter de diferenciación y normalmente se reconocen tres grandes grupos, según sean de hoja pequeña, intermedia o grande (García, 1996). Dentro de los tipos de trébol blanco, el ladino (hoja grande) es el que muestra un uso más eficiente del fósforo aplicado. Produce una mayor biomasa de tallos y tiene una mayor longitud de raíces que los demás. Esa mayor eficiencia es explicada por una mayor densidad radicular (Godwin y Blair, 1991). La superioridad en rendimiento de los tipos ladinos también está asociada a una mejor persistencia vegetativa (García, 1996).

2.6.2 LOTUS

Este género tiene muy buenas características respecto a que se adapta a suelos con muy bajo pH, escasa disponibilidad de fósforo y niveles extremos de humedad; panorama que se presenta en la mayoría de las situaciones del país en que se siembran mejoramientos extensivos (Formoso y Allegri, 1982; Carámbula, 1993; Olmos, 1997). Entre las especies y variedades que pueden citarse se encuentran *Lotus corniculatus* cvs. Ganador y San Gabriel, *Lotus pedunculatus* cv. Maku, *Lotus subbiflorus* cv. Rincón y *Lotus tenuis* (Carámbula, 1993).

Si bien el lotus presenta un volumen importante de forraje total anual, similar al de trébol blanco, la distribución estacional es diferente, con una mayor producción estival y menor invernal respecto a éste. Con siembras puras o en mezclas, *Lotus corniculatus* cv. San Gabriel, mantiene un buen comportamiento agronómico (Allegri et al, 1978, Castro et al, 1979, Formoso et al, 1982, Olmos 1990, 1991 citados por Olmos, 2001). A su vez, lotus presenta una mejor implantación y posterior producción de forraje cuando se sembró con poca remoción de la pastura natural, en cambio trébol blanco lo hizo cuando la pastura natural fue removida o totalmente eliminada (disquera más vibrocultivador) (Olmos, 2001).

Lotus subbiflorus cv. El Rincón presenta características tales que colocan a esta leguminosa en una ubicación de privilegio. Se trata de una leguminosa con bajas exigencias de fósforo y excelente habilidad de simbiosis (Carámbula et al, 1994 a).

Las experiencias realizadas muestran que cuando las especies se adaptan a la situación ambiental local, la forma o el método de siembra aplicado para introducirlas no tiene mayor efecto en su persistencia a mediano plazo dependiendo luego del manejo agronómico que se haga de cada pastura (Olmos, 1990 citado por Olmos, 2001).

Sin embargo debido a la variación climática que opera muchas veces en el período de siembra, en condiciones de estrés hídrico la siembra a zapatas favorece la instalación de las especies, desapareciendo luego la diferencia al mejorar el balance hídrico (Olmos, 2001).

2.6.2.1 Estrategias adaptativas de tres especies de Lotus

El destino de los nutrientes asimilados asignados a los diferentes componentes de las plantas varía según la especie considerada. *Lotus pedunculatus* presenta una mayor proporción del peso seco en el sistema radicular que *Lotus subbiflorus*, en cambio

respecto al sistema reproductivo se observa lo inverso. *Lotus corniculatus* se encuentra en una situación intermedia en ambos casos. La relativa mejor resistencia a la sequía de las especies perennes de lotus (*L. corniculatus* y *L. pedunculatus*) estaría relacionada con la mayor proporción del sistema radicular de las plantas que le permitirá extraer agua de los horizontes más profundos del suelo. A través de este mecanismo, en veranos con déficit hídrico en el suelo, la población de la especie introducida en la comunidad natural podría mantener un número mayor de plantas con crecimiento vegetativo (Olmos, 2001).

2.6.3 COMPARACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE FÓSFORO DE ALGUNAS LEGUMINOSAS TEMPLADAS

En promedio la concentración de fósforo en los forrajes es de 2,9 g/kg MS pero es influenciada por una serie de factores. Los forrajes templados generalmente tienen más fósforo que las especies tropicales (3,5 vs. 2,3 g/kg de MS) y las leguminosas más que las gramíneas (3,2 vs. 2,7 g/kg de MS). Diferencias en la concentración de fósforo entre las especies forrajeras y cultivares son usualmente pequeñas sin notarse diferencias entre las fracciones de hojas y tallos del mismo forraje. Incrementos en rendimiento asociado a la madurez deprimen la concentración de fósforo en 0,030 g/kg MS/día. Las concentraciones de fósforo son bajas en forrajes creciendo en verano a altas temperaturas y cuando hay déficits hídricos (Minson, 1990).

La concentración de fósforo generalmente se incrementa en las diferentes especies (sobre todo en *Trifolium repens* y *Lotus pedunculatus*) al aumentar la dosis de fertilizante fosfatado. Asociado a esto, también se observa un aumento en la concentración de nitrógeno en el forraje, indicando que deficiencias de fósforo pueden limitar la fijación de este nutriente. Según Davis (1991) las concentraciones críticas de fósforo pueden situarse alrededor de:

<i>Trifolium repens</i>	0,34 %
<i>Lotus pedunculatus</i>	0,30 %
<i>Trifolium pratense</i>	0,28 %
<i>Lotus corniculatus</i>	0,23 %

El *L. corniculatus* tiene una muy baja concentración de fósforo crítica, por esto tiene una mejor performance en ambientes con bajos contenidos de fósforo. La colonización del sistema radicular de éste tipo de lotus por apropiación de los hongos micorrizales o por una lenta formación de los exudados de las raíces que solubilizan el fósforo, son posibles explicaciones. Es una de las especies más tolerantes a la sequía y se pueden lograr mayores producciones que con otras pasturas de leguminosas en suelos

con baja disponibilidad de fósforo. Sin embargo, las bajas concentraciones foliares de nitrógeno, fósforo y potasio levantan dudas sobre su conveniencia como leguminosa forrajera (Davis, 1991). A su vez, en *L. pedunculatus* se observa una menor vulnerabilidad al ataque de enfermedades de raíz y corona, aspecto que normalmente determina la corta vida de las plantas en *L. corniculatus* (Bermúdez et al, 2001).

En condiciones de baja fertilidad el *L. pedunculatus* ha mostrado ser más productivo que *Trifolium repens*, ocurriendo lo contrario con *L. corniculatus*. Esto puede ser explicado por una mayor tolerancia a la toxicidad por aluminio o por una mayor habilidad del *L. pedunculatus* de absorber el fósforo desde el suelo (Davis, 1991). Pinkerton y Randall (1994), observaron que plantas creciendo con bajas concentraciones de fósforo tuvieron hojas pequeñas, tallos cortos y menos renuevos.

Existe una respuesta positiva a las dosis crecientes de fósforo en *Lotus subbiflorus*, superior a la registrada en *Lotus corniculatus*, promoviendo una mejor entrega de forraje en la época crítica invernal. Las recomendaciones generales, en cuanto a fertilización fosfatada inicial se refiere, indican la utilización de 20-50 unidades de P_2O_5 /ha. Sin embargo, la dosis a utilizar en cada circunstancia, dependerá de las características naturales del suelo en cuestión y del aporte de forraje esperado en el año de siembra. Si bien en la gran mayoría de los casos la implantación es exitosa y los fracasos son muy poco comunes, se debe alertar que cuando ésta se desarrolle bajo niveles muy bajos de fertilidad, las plántulas serán de vigor pobre y su contribución en forraje será baja (Carámbula et al, 1994 a).

Bajo las condiciones de muchos de los suelos del Uruguay, de reconocida acidez y carencia aguda de fósforo, el *L. pedunculatus* resulta de particular interés dada su notable capacidad para prosperar en dichas situaciones; aspecto que adquiere especial relevancia en las regiones de ganadería extensiva del país. No obstante, a pesar de que esta especie es más eficiente que el trébol blanco para utilizar el fósforo disponible del suelo, necesita de todas maneras de la fertilización fosfatada, aunque más no sea en dosis bajas a moderadas, para facilitar su nodulación, implantación y persistencia productiva. En este sentido, sería de esperar que el *L. pedunculatus* bajo tales circunstancias, sea más productivo que el trébol blanco; comportamiento que ya ha sido registrado en varios suelos del país (Carámbula et al, 1994 b).

Carámbula et al (1994 b), destacan el valor del *L. pedunculatus* en los mejoramientos de campo por ser una leguminosa que prospera en suelos ácidos y con condiciones extremas de humedad por excesos hídricos y que utiliza eficientemente el fósforo lo cual la transforma en una leguminosa satisfactoria para condiciones de extensividad. En el cuadro 2 se presenta un resumen de los atributos y del comportamiento de dos materiales de *L. pedunculatus* en INIA Treinta y Tres.

Cuadro 2. Resumen del comportamiento de los materiales de *Lotus pedunculatus* cv. Maku y LE 627 en la Unidad Experimental Palo a Pique, Treinta y Tres.

	<i>cv. Maku</i>	<i>LE 627</i>
<i>Nivel de ploidía</i>	Tetraploide (2n=24)	Diploide (2n=12)
<i>Hábito de crecimiento</i>	Rastrero	Semierecto
<i>Tamaño de hojas</i>	Grandes	Intermedias
<i>Presencia de rizomas</i>	Alta densidad	Baja densidad
<i>Tipo de canopia</i>	Muy densa, cerrada	Poco densa, abierta
<i>Competencia sobre la gramínea asociada</i>	Muy alta	Relativamente baja
<i>Tolerancia al pastoreo</i>	Alta con defoliaciones intensas pero poco frecuentes (controladas)	Alta con defoliaciones poco intensas aunque más frecuentes
<i>Respuesta a la fertilización fosfatada</i>	Muy buena, similar	Muy buena, similar
<i>Producción de forraje acumulada en 3 años</i>	Mayor	Algo menor
<i>Producción de forraje al 3er año</i>	Muy buena, similar	Muy buena, similar
<i>Persistencia depende de</i>	Rizomas	Rizomas así como semillazón y resiembra natural
<i>Presencia de tallos reproductivos (%)</i>	Significativamente menor	Significativamente mayor
<i>Producción de semilla</i>	Baja	Muy elevada
<i>Tamaño de semilla</i>	Más grande	Más chica
<i>Resistencia a la sequía</i>	Menor	Mayor

Fuente: Ayala y Carámbula, com. pers.

Trolove et al (1996 a), evaluaron el rendimiento de MS, la relación tallo / raíz, total de fósforo absorbido, crecimiento radicular, fósforo absorbido por unidad de longitud radicular, concentración de fósforo en planta, la relación nitrógeno / fósforo (N / P) y la eficiencia interna en el uso del fósforo sobre distintos tipos de trébol blanco y lotus Maku. En el cuadro 3 se presentan algunos resultados:

- Rendimiento en planta: excepto para el trébol blanco de hoja grande, la adición de fertilizante incrementa significativamente el rendimiento de las leguminosas mientras que el efecto de la fuente no fue significativo.
- Relación tallo / raíz: el agregado de fertilizante, tanto con superfosfato como con fosforita, incrementa ésta relación en todos los tipos de plantas. Lotus presentó la menor relación comparándolo con los tres tipos de trébol blanco.
- Fósforo absorbido por unidad de longitud radicular: ésta relación fue mayor en suelos fertilizados que en los no fertilizados y dentro de los primeros mayor con superfosfato que con fosforita. No hubo diferencias entre especies en ésta relación en suelos sin fertilizar. En cambio, en suelos fertilizados hubo una mayor relación a favor de los tréboles que del lotus.

Cuadro 3. Efecto de la fertilización sobre el rendimiento de MS, relación tallo / raíz y fósforo absorbido por unidad de longitud radicular sobre lotus Maku y tres tipos de trébol blanco (TB).

Leguminosa	Tipo de fertilización		
	Sin fertilizar	Superfosfato*	Fosforita*
		Rendimiento en MS (g)	
TB hoja media	0,52	1,00 (92%)	0,89 (71%)
TB hoja pequeña	0,27	0,53 (96%)	0,60 (122%)
TB hoja grande	0,66	0,86 (30%)	1,00 (52%)
Lotus Maku	0,75	2,53 (237%)	2,52 (236%)
		Relación tallo / raíz	
TB hoja media	1,7	2,6 (53%)	2,2 (29%)
TB hoja pequeña	1,9	2,6 (37%)	3,3 (74%)
TB hoja grande	1,9	2,5 (32%)	2,2 (16%)
Lotus Maku	1,4	2,4 (71%)	2,2 (57%)
		Fósforo absorbido por unidad de longitud radicular $\mu\text{g P / m}$	
TB hoja media	358	998 (179%)	824 (130%)
TB hoja pequeña	381	1011 (165%)	1262 (231%)
TB hoja grande	369	1056 (186%)	841 (128%)
Lotus Maku	377	835 (122%)	578 (53%)

* % de incrementos respecto al testigo sin fertilizar. Fuente: adaptado de Trollove et al, 1996 a.

Los resultados en cuanto a la concentración de fósforo en planta y la relación N/P, se presentan en el cuadro 4.

Cuadro 4. Efecto de la fertilización y el tipo de planta sobre la concentración de fósforo y la relación N / P.

Leguminosa	Tipo de fertilización		
	Sin fertilizar	Superfosfato	Fosforita
		Concentración de fósforo en planta (%)*	
TB hoja media	0,21	0,34 (62%)	0,29 (38%)
TB hoja pequeña	0,20	0,35 (75%)	0,30 (50%)
TB hoja grande	0,18	0,33 (83%)	0,27 (50%)
Lotus Maku	0,20	0,27 (35%)	0,21 (5%)
		Relación N/P**	
TB hoja media	16,8	9,6 (57%)	10,4 (62%)
TB hoja pequeña	24,1	9,3 (39%)	9,8 (41%)
TB hoja grande	19,0	8,0 (42%)	9,3 (49%)
Lotus Maku	13,8	10,3 (75)	14,1 (+2%)

* % de incrementos respecto al testigo sin fertilización; ** % de disminución respecto al testigo sin fertilizar, salvo para el caso de lotus con fosforita que es de aumento "+".

Fuente: adaptado de Trollove et al, 1996 a.

- Concentración de fósforo en planta: ésta no varió entre plantas en suelos sin fertilizar. En los suelos fertilizados el lotus mostró una menor concentración de fósforo que los tréboles, especialmente cuando se utilizó fosforita.
- Relación N / P: el agregado de fertilizante disminuyó ésta relación en todos los tréboles, en lotus solamente cuando se utilizó superfosfato.

Total de fósforo absorbido: la adición de fertilizante incrementó significativamente la cantidad de fósforo absorbido por tréboles y lotus. Para los tréboles no hubo diferencias entre fuentes. Con lotus sin embargo, el fósforo absorbido fue significativamente mayor cuando se utilizó el superfosfato que cuando se utilizó la fosforita (aproximadamente un 40% más).

Crecimiento radicular: los tratamientos fertilizados aumentaron el crecimiento radicular, esto se visualiza más en lotus donde se verificó el doble del crecimiento comparado con los suelos sin fertilizar.

Eficiencia interna en el uso del fósforo: en los suelos fertilizados, el lotus presentó una mayor eficiencia interna que los diferentes tipos de tréboles, especialmente cuando se utilizó fosforita (Trolove et al, 1996 a).

Para todas las especies el agregado de fertilizante aumenta el fósforo absorbido así como la relación tallo / raíz. Para el trébol blanco no se observaron diferencias entre fuentes, mientras que en lotus la mayor absorción se observó con superfosfato comparándolo con fosforita. El género lotus presentó una disminución en la relación tallo / raíz comparado con el trébol blanco en suelos sin fertilizar y en aquellos que se fertilizan se observó una mayor absorción de fósforo que el trébol blanco, esto estaría explicado por un mayor crecimiento radicular por parte del lotus en estos tipos de suelos. La relación absorción de fósforo / unidad de longitud radicular, es mayor con fuentes solubles que con fosforita y es mayor también en suelos fertilizados que en los no fertilizados. En éstos últimos suelos no hay diferencias entre especies en ésta relación, en cambio en suelos fertilizados es mayor en el trébol blanco que en el lotus (Trolove et al, 1996 a). En el cuadro 5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en este experimento.

Cuadro 5. Eficiencia relativa de *Trifolium repens* y *Lotus pedunculatus* frente al agregado de fertilizantes fosfatados.

	<i>Trifolium repens</i>	<i>Lotus pedunculatus</i>
Relación PA / PS *	Mayor en suelos fertilizados	Menor en suelos sin fertilizar
Relación absorción de fósforo / unidad de longitud radicular	Mayor en suelos fertilizados	En suelos sin fertilizar no hay diferencias con el trébol blanco
Efecto de la fuente de fertilizante	No hay efecto en la absorción de fósforo con distintas fuentes	Mayor absorción con fuentes solubles que con fosforita
Efecto de la fertilización	Aumenta la producción	Aumenta la producción
Relación N : P	Disminuye con el agregado de fósforo	Disminuye con la utilización de fuentes solubles
Total de fósforo absorbido	Menor	Mayor
Longitud de raíces	Menor	Mayor
Eficiencia interna (MS parte aérea / unidad de fósforo en planta)	Menor	Mayor, especialmente cuando se utilizó fosforita

* relación parte aérea/ parte subterránea. Fuente: Adaptado de Trollove et al, 1996a

Se observa un incremento en el rendimiento en planta y en el total de fósforo absorbido al aplicar fertilizante. El incremento en la absorción de fósforo es mayor generalmente que el incremento en el crecimiento de la planta y por esto se incrementa la concentración de fósforo en el forraje, disminuyendo la eficiencia interna en el uso del fósforo para ambas especies, esto es cierto con la excepción del lotus cuando se utilizó fosforita. En este caso el lotus es capaz de producir la misma cantidad de MS que las plantas fertilizadas con fuentes solubles, sugiriendo que tiene una menor concentración de fósforo (Trollove et al, 1996 a).

En especies del género lotus niveles iniciales de 30 a 40 unidades de P_2O_5 /ha y aplicaciones anuales de 30 unidades de P_2O_5 /ha posibilitan un buen comportamiento productivo del mejoramiento. En el otro extremo, las dosis para trébol blanco deberían ser superiores, entorno a 60-80 unidades de P_2O_5 /ha iniciales y por lo menos 40 unidades de P_2O_5 /ha anuales (Risso, 1998).

Lotus tiene una mayor eficiencia interna que el trébol blanco, debido a que puede crecer con bajas concentraciones de fósforo en planta permitiéndole fijar más nitrógeno y producir más MS que el trébol blanco por unidad de fósforo absorbido. La eficiencia externa (capacidad de absorción de fósforo) resultó mayor en lotus, debido a un mayor crecimiento radicular y no a una mayor absorción de fósforo / unidad de longitud radicular. El mayor crecimiento radicular es probablemente resultado de un mayor potencial genético que permite una más rápida tasa de crecimiento de raíces y tallos (Trollove et al, 1996 a). La composición de los diferentes sistemas radiculares se observa en el siguiente cuadro.

Cuadro 6. Composición de los sistemas radiculares de *Trifolium* y *Lotus* y su respuesta a la infección micorrizal.

	<i>Longitud de los pelos radiculares (µm)</i>	<i>Diámetro de raíces (µm)</i>	<i>Raíces con pelos radiculares (%)</i>	<i>Respuesta a la infección micorrizal</i>
<i>Trifolium</i>	213	221	79	Moderada
<i>Lotus</i>	809	229	99	Pequeña

Fuente: adaptado de Crush, 1974 citado por Andrew y Jones, 1978.

Dado que los nutrientes en su mayoría son absorbidos por las raíces, las características de dichas raíces son importantes en el desarrollo de prácticas eficientes de fertilización. Los sistemas radiculares son usualmente fibrosos o ramificados y ambos se presentan en plantas anuales, bianuales o perennes. La habilidad de las raíces para explorar el suelo en busca de nutrientes y agua es dependiente de características morfológicas y fisiológicas de las mismas. Las características morfológicas radiculares más importantes son: radio de la raíz, longitud de la raíz, relación en peso de la superficie radicular/parte aérea, y densidad de pelos radiculares. La presencia de micorrizas también juega un rol importante (Casanova y Barbazán, 2002).

Las deficiencias de fósforo, al limitar el establecimiento de las leguminosas, afectan la nodulación y fijación del nitrógeno. Estos factores son frecuentemente las principales limitantes para obtener buenos resultados en pasturas mezclas de gramíneas con leguminosas (Haynes, 1980, Mays et al, 1980 citados por Mathews et al, 1998). Esto es debido a que la baja disponibilidad del fósforo en los suelos brinda una ventaja competitiva a las gramíneas dado sus sistemas radiculares más extensos, finos y de pelos radiculares más largos (Caradus, 1980 citado por Mathews et al, 1998).

Las leguminosas acidifican su rizósfera de manera variable, permitiéndoles modificar la solubilidad del fósforo que se encuentra próximo a las raíces. En este sentido, el *Lotus pedunculatus* ha demostrado ser el de mayor habilidad en acidificar su rizósfera. Esto le permite obtener más fósforo de la fosforita ya que provoca una mayor disolución directa (Trove et al, 1996 b).

2.7 PRODUCCIÓN DE LEGUMINOSAS FRENTE AL AGREGADO DE FÓSFORO Y RESPUESTA ANIMAL

En el cuadro 7 se pueden observar las producciones de MS y carne sobre Mejoramientos realizados con diferentes fuentes, cantidades de fósforo acumulado, especies y en diferentes Regiones del país.

Cuadro 7. Resumen de información sobre Mejoramientos en diferentes regiones del país.

Exp.	Pastura	P acum (kgP ₂ O ₅ /ha)	Fuente	MS Kg/ha	Prod de carne (kg/ha/año)	Región	Autores			
1	TB + L	220	S (21-23)	8600	-----	Este	Bermúdez et al, 1997			
2	L El Rincón	120	FN (10-28)	1746	-----	Cristalino	Risso y Carámbula, 1998			
		150		2234						
		180		2731						
		240		3716						
3	L Maku	80	S (21-23)	1300	-----	Basalto profundo	Bemhaja, 1998 a.			
		140		2900						
4	TB + L	60	S (21-23)	-----		Este	Adaptado de Ayala et al, 1996; Bermúdez, sin publicar			
		120						80		
		180						542		
		220						439		
		260						435		
5	L Maku	110	S (21-23)	-----	Borregas/ha		Este	Ayala et al, 2001		
					150	10			20	
					190	256			396	
						380			327	
6	TB + L	120	-----	-----	Novillos/ha			Basalto	Risso et al, 1998	
					180	1,72	2,15			2,56
					240	361	440			529
						259	312			367
						218	218			253
7	TB +L	105	-----	-----		Este	Carámbula, 2001			
		210						230		
							470			

Con refertilizaciones del orden de los 40-60 kg de P₂O₅/ha, es posible lograr buenas producciones de MS y en muy buenas producciones de carne según diferentes trabajos que se han evaluado.

2.8 FÓSFORO EN LA NUTRICIÓN DE RUMIANTES

El fósforo ha sido reconocido como un mineral esencial en lo referente al desarrollo de huesos, crecimiento, reproducción y transferencia de energía. Los signos clínicos de deficiencia de fósforo en el ganado son disminución del crecimiento, huesos frágiles y botulismo como resultado de la masticación de huesos (Underwood, 1981 citado por Minson, 1990). Los ovinos son menos susceptibles a bajos niveles dietarios de fósforo (Minson, 1990), debido a que tienen mayores requerimientos de energía por unidad de peso vivo y a la superior habilidad de seleccionar hojas con mayores contenidos de fósforo (Underwood, 1966, McDonald, 1968 citados por Reid, 1980). Desafortunadamente, estas no son las únicas consecuencias de las deficiencias de fósforo ya que puede provocar deficiencias simultáneas de otros nutrientes como energía y proteína (Reid, 1980).

El ganado contiene aproximadamente 6,3 gramos de fósforo por kilogramo de peso vivo (ARC, 1965 citado por Minson, 1990). Se ha sostenido que el fósforo tiene más funciones conocidas que cualquier otro elemento mineral en el cuerpo del animal. En combinación con el calcio en la formación de huesos y dientes, el fósforo es encontrado en todas las células del cuerpo y es esencial en muchos procesos metabólicos incluidos el bufereado de los fluidos del cuerpo. Es requerido por la microflora ruminal para la fermentación del forraje (Komisarezuk et al, 1984 citados por Minson, 1990) y síntesis de proteína microbiana (Breves et al, 1985 citados por Minson, 1990).

2.8.1 APETITO Y DIGESTIÓN DE LA MATERIA SECA

Los forrajes que han recibido fertilizaciones fosfatadas son generalmente preferidos por ovinos y vacunos. Las deficiencias de fósforo deprimen el consumo voluntario y esto está asociado a una disminución del nivel de fósforo inorgánico en el plasma (Theiler et al, 1932; Reid, 1980 citado por Minson, 1990). El agregado de fósforo mejora la palatabilidad, ya que se incrementan los carbohidratos solubles en el tejido (Mays et al, 1980).

2.8.2 RESPUESTA ANIMAL FRENTE AL AGREGADO DE FÓSFORO

2.8.2.1 Fertilidad

Los efectos adversos de la deficiencia de fósforo en el porcentaje de vacas paridas parece deberse principalmente a un tamaño pequeño del cuerpo en las vacas con deficiencias de éste nutriente. Un bajo peso vivo es generalmente considerado como la causa de la reducción en la fertilidad en vacas con deficiencias de fósforo, pero también hay un efecto directo del fósforo en la fertilidad. (Ward, 1968, Holmes, 1981, Black et al, 1949 citados por Minson, 1990).

La concepción de las vacas se incrementa al consumir pasturas fertilizadas con superfosfato (Edye et al, 1971 citados por Minson, 1990). Esta mejora es consecuencia de un incremento en el contenido de leguminosas y nitrógeno en la dieta y un mayor peso vivo en las vacas consumiendo pasturas fertilizadas. Uno de los principales efectos de las deficiencias de fósforo es la interrupción del ciclo estral, resultando en una demora de la concepción (Reid, 1980).

Houghe (1974) citado por Reid (1980), menciona que en ovinos se incrementa el número de partos simples y múltiples, se disminuye el intervalo inter-partos y el tiempo de cría de los corderos.

2.8.2.2 Producción de leche

Deficiencias de fósforo en el ganado provocan bajas producciones de leche (Reid, 1980). La producción de leche impone severas demandas sobre las reservas de fósforo de las vacas. Vacas suplementadas con fósforo, o consumiendo pasturas con leguminosas, pueden llegar a duplicar la producción de leche (Minson, 1990).

2.8.2.3 Tasa de crecimiento

Minson (1990), sostiene que vacas suplementadas con fósforo mantienen un mayor peso corporal que aquellas sin suplementar sin embargo hay muchos estudios en los cuales no se evidencian respuestas al agregar suplementos fosfatados (Cohen, 1972, 1975, Winks et al, 1976, 1979, Holroyd et al, 1983 citados por Minson, 1990). Hay tres posibles razones para explicar estos resultados negativos: la dieta puede contener

suficiente fósforo como para satisfacer los requerimientos de los animales, el nivel de calcio en la dieta puede ser bajo llevando a una reducción en los requerimientos animales por fósforo y los animales pueden tener suficientes reservas de fósforo en los huesos pudiendo compensar los bajos contenidos de fósforo en la dieta.

Las pasturas fertilizadas con fósforo incrementan el contenido de este nutriente en la dieta. Esto permite obtener mayores ganancias de peso en vacas paridas, incrementos en las tasas de crecimiento por animal y peso vivo por hectárea, incrementando los niveles de fósforo en el forraje, la proporción de leguminosas en las pasturas y la cantidad de proteína en la dieta (Minson, 1990).

2.8.2.4 Requerimientos de fósforo

Los requerimientos minerales de todos los tipos de ganado y del hombre son afectados por varios factores. Como fue definido por Underwood (1966) citado por Reid (1980). Estos varían según: (i) especies; (ii) edad, sexo y tasa de crecimiento; (iii) tipo y tasa de crecimiento deseada; (iv) nivel y química de los minerales en la dieta; (v) balance de nutrientes y adecuación en la dieta; (vi) procesos hormonales y otros fisiológicos; (vii) clima y ambiente no dietario. Los efectos de ciertos de estos factores y sus interacciones en los requerimientos minerales pueden ser definidos con razonable exactitud, los efectos de otros pueden ser relativamente desconocidos. Los niveles de fósforo recomendados se ilustran en el cuadro 8 (Reid, 1980).

Cuadro 8. Requerimientos de fósforo para ganado en crecimiento de varios pesos.

Peso (kg)	<i>Requerimientos de fósforo y fuente</i>					
	ARC (1965)		NRC (1963)		Mitchell (1947)	
	g/día *	% de la ración **	g/día ***	% de la ración **	g/día **	% de la ración ***
100	7,3	0,29	10,1	0,40	10,8	0,43
200	9,8	0,20	11,1	0,22	13,5	0,27
300	14,6	0,20	12,3	0,16	15,0	0,20
400	23,7	0,24	13,4	0,13	16,0	0,16

* Valores publicados para mantenimiento y crecimiento de 0,5 kg/día

** Estos valores fueron calculados asumiendo un consumo diario de MS del 2,5% del peso vivo

*** Los valores publicados fueron interpolados gráficamente para éstos pesos en particular; tasas de crecimiento marginales mayores que las consideradas por el ARC (1965).

Fuente: Little, 1970 citado por Reid 1980.

Las concentraciones de fósforo que se necesitan en los forrajes para satisfacer los requerimientos dietarios de cuatro clases de rumiantes son mostrados en los cuadros 9, 10, 11 y 12.

Cuadro 9. Requerimientos de fósforo para ganado de carne alimentado ad libitum, expresado como concentraciones dietarias (g/kg MS).

Peso Vivo (kg)	Ganancia de peso vivo (kg/día)		
	0	0,5	1,0
200	0,8	1,8	2,3
400	1,4	2,0	2,5
600	1,6	2,0	2,2

Fuente: Adaptado de ARC, 1980.

Cuadro 10. Requerimientos de fósforo de vacas lactantes alimentadas ad libitum, expresado como concentraciones dietarias (g/kg MS).

Peso Vivo (kg)	Raza	Producción de leche (kg/día)			
		0	10	20	30
400	Jersey	1,4	2,8	4,3	—
500	Ayrshire	1,5	2,4	3,1	3,0
600	Friesian	1,6	2,3	3,1	2,4

Fuente: Adaptado de ARC, 1980.

Cuadro 11. Requerimiento de fósforo de corderos castrados alimentados ad libitum, expresado como concentraciones dietarias (g/kg MS).

Peso Vivo (kg)	Ganancia de peso vivo (kg/día)			
	0	0,1	0,2	0,3
20	0,8	2,0	3,3	—
30	0,8	1,5	2,1	3,0
40	0,9	1,4	1,8	2,4

Fuente: Adaptado de ARC, 1980.

Cuadro 12. Requerimientos de fósforo de ovejas lactantes alimentadas ad libitum, expresado como concentraciones dietarias (g/kg MS).

Peso Vivo (kg)	Producción de leche (kg/día)			
	0	1,0	2,0	3,0
40	1,2	2,3	3,4	—
75	1,4	2,1	2,8	3,6

Fuente: Adaptado de ARC, 1980.

Como se observa los requerimientos de fósforo son muy variables, por lo que los criterios que se deben considerar para estimarlos deben ser claros de manera de ser lo más preciso posible para lograr buenas aproximaciones.

La proteína concentrada en el alimento es una buena fuente de fósforo, en los granos de cereales son intermedios y en el forraje de los cultivos el contenido de fósforo tiende a ser bajo y variable. La habilidad de los forrajes de satisfacer los requerimientos de fósforo en rumiantes estaría relacionado directamente con el estado fisiológico del animal, la clase de forraje y el manejo agronómico de la pastura o el forraje de cultivos (Reid, 1980).

Cuando se calculan los requerimientos de fósforo, ARC (1980) asume un coeficiente de absorción de fósforo de 0,78 para el ganado mayor a 1 año, 0,58 para ganado adulto, 0,73 para corderos hasta 1 año de edad y 0,60 para ovejas maduras.

Las recomendaciones del NRC (1976), de fósforo en la dieta del ganado vacuno están basadas en estimaciones de requerimientos del cuerpo y de los requerimientos de los microorganismos del rumen. Para animales en terminación (400 kg de peso) los requerimientos dados son de 0,18% a 0,26% de fósforo en la ración, para vacas preñadas (454 kg) 0,18%, para vacas en lactación produciendo moderadas cantidades de leche (aproximadamente 7,5 kg) 0,28% y para vacas con altas producciones de leche 0,38%. Estos niveles están cerca de los mínimos requeridos para una óptima performance.

El NRC (1974) recomienda el uso de fósforo en ovinos en: (i) ovejas en las primeras ocho semanas de lactación; (ii) ovejas en las últimas ocho semanas de lactación, particularmente cuando se amamantan mellizos; (iii) corderos destetados al mes; (iv) corderos de 3 a 6 meses de edad; (v) ovejas en lactación avanzada amamantando únicos; (vi) corderos en engorde con 6 a 10 meses de vida; (vii) ovejas en mantenimiento y preñez temprana; y (viii) carneros

Se concluye que los requerimientos de fósforo pueden diferir en animales de similar tamaño y esto puede deberse a diferencias en la disponibilidad de fósforo para la movilización desde el esqueleto (Minson et al, 1990).

Las especies animales difieren en sus requerimientos minerales; en la tolerancia o susceptibilidad de deficiencias, excesos, o desbalances de elementos específicos; en la habilidad de digerir o absorber minerales de varias formas según las dietas; y frecuentemente de los sistemas de manejo impuestos por el hombre, en la elección de los componentes de la dieta de donde los minerales son captados (Reid, 1980).

2.8.2.5 Muerte

En casos extremos la deficiencia de fósforo puede provocar indirectamente botulismo, una enfermedad causada cuando el ganado consume restos de carcasas infectadas con *Clostridium botulinum* (Underwood, 1981 citado por Minson, 1990). Esto deprime el apetito como resultado directo de la deficiencia de fósforo (Minson, 1990).

Altos niveles de fósforo, especialmente en presencia de bajos niveles de calcio, pueden causar problemas de salud en ovinos. Cuando la concentración de fósforo es igual o excede a la de calcio, hay una gran incidencia de cálculos urinarios con una mortalidad del 50% cuando la concentración de fósforo es el doble que la de calcio (Emerick et al, 1963 citados por Minson, 1990).

2.8.3 PREVENCIÓN DE LAS DEFICIENCIAS DE FÓSFORO

Deficiencias de fósforo potenciales, han sido diagnosticadas desde análisis de fósforo en el forraje, heces, fluido ruminal, sangre, o huesos. Las deficiencias de fósforo en rumiantes bajo pastoreo han sido prevenidas por la utilización de fertilizantes fosfatados, suplementos fosfatados o usando una combinación de ambos. Algunos suplementos se aplican a las pasturas para aumentar su contenido de fósforo y otros se dan directamente a los animales, algunos de ellos son: harina de hueso, fosfato de calcio, rocas fosfatadas, fosfatos blandos, fosfatos tricálcicos, fosfato de sodio, fosfato monoamónico, ácido fosfórico, superfosfato y otras fuentes fosfatadas (Minson, 1990).

2.9 CONSIDERACIONES FINALES

La fertilización fosfatada es una de las principales herramientas para aumentar la producción y persistencia de los mejoramientos de campo. Para lograr dicho objetivo se deberá tener en cuenta la fuente fosfatada a utilizar (lo cual determinará la rapidez con la cual el fósforo queda disponible para la pastura), las dosis iniciales y anuales con lo cual quedará definida una estrategia de fertilización a futuro.

Manejando entonces los conceptos de solubilidad y cantidad de fósforo se podrá definir en el mejoramiento diferentes relaciones interespecíficas, ya sea por efectos aditivos y/o sustitutivos de éstas, que se traducen en mejoras afectando así la producción como en la calidad del mejoramiento y en una menor estacionalidad del forraje ofrecido. Lo antes mencionado es producto de los diferentes requerimientos y eficiencias con la cual las diferentes especies que componen el mejoramiento utilizan el fósforo que se encuentra en el suelo así como el proveniente del fertilizante.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Los trabajos fueron realizados en INIA Treinta y Tres, Unidad Experimental “Palo a Pique” (Latitud 33° 54 Sur, Longitud 54° 38 Oeste).

Los experimentos se ubicaron sobre un suelo de tipo Argisol de la Unidad Alférez. El análisis del suelo se presenta en el cuadro 13.

Cuadro 13. Análisis de suelo de la Unidad Alférez.

<i>pH (H₂O)</i>	<i>Materia Orgánica (%)</i>	<i>P Cítrico (µg/g)</i>	<i>K (meq/100g)</i>
5,3	5	4,5	0,47

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

El presente trabajo analiza información proveniente de 5 experimentos que incluyen diferentes leguminosas, fuentes y niveles de fertilización inicial y refertilización (cuadro 14).

Cuadro 26: Descripción de los cinco experimentos analizados.

Exp.	Especies	F. Siembra	Fuente	Fórmula (N-P-K)	Fert. Inicial (kg P ₂ O ₅ /ha)	Refer. (kg P ₂ O ₅ /ha)	Diseño	Duración (años)	Densidad (kg/ha)
I	Trébol Blanco Lotus San Gabriel	23/05/1995	Fosforita natural	0-10/28-0	0-40-80-160	0-40	Factorial parcelas divididas con 3 bloques	5	4,5
			Superfosfato simple	0-21/23-0				8	
II	Trébol Blanco Lotus San Gabriel	9/05/1996	Superfosfato simple	0-21/23-0	0-45-90-135	0-30-60	Factorial parcelas divididas con 4 bloques	5	4
								8	
III	Lotus El Rincón	24/04/1997	Superfosfato simple	0-21/23-0			Factorial parcelas divididas con 4 bloques	4	5
			Hyperfos	0-14/28-0	30-60-90	0-30			
			Hiperfosfato	0-12/30-0					
			Fosforita natural	0-10/28-0					
IV	Lotus Maku	3/05/2000	Hyperfos	0-14/28-0	0-30-60	30-60-90-120	Factorial parcelas al azar con 4 bloques	2	4
V	Lotus 627	27/04/2000	Superfosfato simple	0-21/23-0	0-40-80-160*	40	Parcelas al azar con 4 bloques	2	5

Nota: todos los experimentos fueron sembrados en cobertura.

3.3 DETERMINACIONES EN LA PASTURA

3.3.1 MATERIA SECA DISPONIBLE

Los cortes se realizaron con tractor experimental “Gravelly” de un metro de ancho operativo de corte cosechando 5 m²/parcela. El forraje cosechado se peso verde en el campo, luego se tomó una sub muestra representativa, que en el laboratorio fue secado en estufa a 105°C por 24 horas para calcular el porcentaje de materia seca.

3.3.2 ANÁLISIS BOTÁNICO

Fueron utilizados en el laboratorio aproximadamente 100 g de forraje verde de cada sub muestra tomada en el corte, en los que se separaron las distintas fracciones botánicas, se pesaron verdes y luego las muestras de cada fracción de cada tratamiento se secaron en estufa para calcular el porcentaje de materia seca de las mismas.

3.4 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Los ensayos analizados abarcan los años 1995-2002, por lo que se debe tener en cuenta las condiciones climáticas en que fueron realizados los mismos. En el cuadro 15 se incluyen datos de precipitaciones, temperaturas y número de días con heladas de una serie histórica de datos para la zona, entre 1995-2002.

Cuadro 15. Precipitaciones mensuales (mm), temperaturas medias mensuales (°C) y días con heladas por mes para el periodo en estudio y el promedio de la serie 1972-1999.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom
PRECIPITACIONES*													
1995	52	82	105	59	69	133	254	38	51	138	95	14	91
1996	60	58	71	208	3	33	27	69	191	59	84	69	78
1997	47	135	47	116	67	112	17	205	44	122	144	319	115
1998	147	58	98	288	128	168	213	99	57	63	71	133	127
1999	48	121	139	87	46	259	61	36	64	40	20	26	79
2000	60	124	56	242	270	148	92	52	205	53	62	105	122
2001	223	112	175	40	192	135	77	58	145	251	130	67	134
2002	160	175	400	271									252
Prom	122	153	112	107	110	118	137	96	110	99	104	96	114
TEMPERATURA**													
1995	23,2	21,4	20,1	17,2	12,9	10	11,5	11,3	13,7	14,8	19,3	22,2	16,5
1996	22,9	22,3	21,6	18,4	13,7	9,7	8,2	13,3	12,9	17,2	20,2	22,4	15,2
1997	24,9	22	20,3	17,4	14,3	11,5	12,6	13,5	13,3	16,7	19,1	20,8	17,2
1998	21	21,8	19,9	18,3	14,4	11,3	12,4	12,1	13,4	16,4	19,1	20,8	16,7
1999	21,6	21,9	22,9	16,1	12,4	10,6	11,1	12,5	13,8	16,2	18,9	21,6	16,6
2000	23,5	22,3	19,8	18,3	14,1	13	9,9	11,4	13,5	16,5	18,4	21,5	14,4
2001	23,9	23,9	23,1	17,6	14,2	13,5	11,3	10	14,1	18,3	19	20,5	17,5
2002	22,6	21,7	21,4	17,2									20,7
Prom	22,7	22,1	20,8	17,3	13,7	10,7	10,7	11,9	13,4	16,4	18,6	21,5	16,7
Nº DE DIAS CON HELADAS**													
1995	0	0	0	0	0	7	2	8	1	0	0	0	18
1996	0	0	0	0	0	9	11	0	2	0	0	0	22
1997	0	0	0	0	1	3	4	1	1	0	0	0	10
1998	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	3
1999	0	0	0	0	2	6	2	1	0	2	0	0	13
2000	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	4
2001	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3
2002	0	0	0	0									
Prom	0	0	0	0	0,6	3,7	4,1	1,8	1,1	0,1	0	0	11

* Datos de lluvia corresponden a la UEPP. Aclaración la serie promedio de lluvias es 1992-2002.

** Temperaturas y heladas corresponden a la UEPL.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis se realizó con el paquete estadístico SAS para el total de la materia seca y los diferentes componentes. Los análisis se hicieron para el total anual así como la producción total acumulada durante todo el período experimental. Para las curvas de respuesta se analizaron modelos de regresión de tipo lineal o cuadrático.

Los modelos estadísticos utilizados para los diferentes experimentos fueron:

Experimento I

$$X_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + \delta_l + \alpha\delta_{il} + \beta\delta_{jl} + \alpha\beta\delta_{ijl} + \alpha\beta\delta\gamma_{ijkl}$$

μ = media del experimento α = fuente β = fertilización inicial γ = bloque

δ = refertilización

i = fuente (1-2) j = fertilización inicial (1-4)

l = refertilización (1-2) k = bloque (1-3)

Experimento II

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \delta_k + \alpha\delta_{ik} + \alpha\beta\delta_{ijk}$$

μ = media del experimento α = inicial δ = refertilización β = bloque γ = error

i = fertilización inicial (1-4) k = refertilización (1-3) j = bloque (1-4)

Experimento III

$$X_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + \delta_l + \alpha\delta_{il} + \beta\delta_{jl} + \alpha\beta\delta_{ijl} + \alpha\beta\delta\gamma_{ijkl}$$

μ = media del experimento α = fuente β = fertilización inicial γ = bloque

δ = refertilización

i = fuente (1-4) j = fertilización inicial (1-3)

l = refertilización (1-2) k = bloque (1-4)

Experimento IV

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_k + \alpha\delta_{ik} + \alpha\beta\delta_{ijk}$$

μ = media del experimento α = fertilización inicial β = bloque δ = refertilización

i = fertilización inicial (1-3)

j = bloque (1-4)

k = refertilización (1-4)

Experimento V- $x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij}$

μ = media del experimento α = fertilización inicial β = bloque

i = fertilización inicial (1-4) j = bloque (1-4)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La información analizada se presentó en el siguiente orden:

1. Fertilización fosfatada de Mejoramientos de Campo en base a la mezcla con *Trifolium repens* cv. Zapicán y *Lotus corniculatus* cv. San Gabriel.

Experimento I. Estudio de dosis iniciales y de refertilización con Fosforita natural y Superfosfato simple.

Experimento II. Estudio de dosis iniciales y de refertilización con Superfosfato Simple.

2. Fertilización fosfatada de Mejoramientos de Campo en base a *Lotus subbiflorus* cv. El Rincón.

Experimento III. Estudio de dosis iniciales y de refertilización con Superfosfato simple, Hiperfosfato, Hyperfos y Fosforita natural.

3. Fertilización fosfatada de Mejoramientos de Campo en base a *Lotus pedunculatus* cv. Grasslands Maku.

Experimento IV. Estudio de dosis iniciales y de refertilización con Hyperfos.

4. Fertilización fosfatada de Mejoramientos de Campo en base a *Lotus pedunculatus* LExperimental 627.

Experimento V. Estudio de dosis iniciales y una misma refertilización con Superfosfato simple.

4.1 EXPERIMENTO I: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A LA MEZCLA CON *Trifolium repens* cv. Zapicán Y *Lotus corniculatus* cv. San Gabriel

Se presenta la información correspondiente a 5 años de evaluación de un mejoramiento, manejando 4 dosis iniciales (0, 40, 80 y 160 kg de P_2O_5 /ha), 2 dosis de refertilización (0 y 40 kg de P_2O_5 /ha) y 2 fuentes fosfatadas (Superfosfato simple y Fosforita natural). Los resultados se presentan para cada año y para el total acumulado de los 5 años. Dado que la fracción maleza constituye sólo el 6% del total de la materia seca, los datos de ésta fracción no se presentan en la discusión.

4.1.1 AÑO 1

Para trébol blanco (TB) se detectó efecto significativo tanto para fuentes ($P<0,01$) como para dosis inicial ($P<0,01$) (Cuadro 16). Al aumentar la dosis inicial se obtuvo respuesta positiva hasta la mayor dosis evaluada (160 kg de P_2O_5 /ha), superando ésta última al promedio de 80 y 40 kg de P_2O_5 /ha en un 114%. Resultados similares fueron reportados por Risso et al (2002), sobre suelos de cristalino, mostrando la alta capacidad de respuesta al agregado de fósforo por parte de esta especie. Se obtuvo un 112% más de producción al aplicar Fosforita natural (FN) que con Superfosfato simple (S) resultado de mayor magnitud que los obtenidos por Risso et al (2002). La respuesta que se observó en TB fue de 10,4 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha para el promedio de las dos fuentes (Anexo 1), mientras que Risso et al (2002), reportaron valores entre 2,5 y 1,8 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha agregado para S y FN respectivamente.

Para lotus (L) se observó una baja producción en general, detectándose un efecto de la dosis inicial ($P<0,01$) y de la fuente ($P<0,05$) (Cuadro 16). Se observó respuesta positiva al aumentar la dosis inicial hasta el nivel de 80 kg de P_2O_5 /ha. Este comportamiento es similar al reportado por Risso et al (2002), pero de menor magnitud ya que estos autores obtuvieron respuesta hasta el nivel más alto (160 kg de P_2O_5 /ha). Las mayores dosis iniciales (80 y 160 kg de P_2O_5 /ha) superan en promedio en un 62% a la de 40 kg de P_2O_5 /ha. La producción fue un 30% superior cuando fue fertilizado con FN que con S. La regresión muestra una respuesta cuadrática para L (Anexo 1) en la cual se observa que en el pasaje de 0 a 40 kg de P_2O_5 /ha existe una respuesta de 3,5 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado, entre 40 y 80 kg de P_2O_5 /ha ésta fue de 1,9 y finalmente entre 80 y 160 kg de P_2O_5 /ha fue de -1 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado. Risso et al (2002), encontraron respuestas lineales en L de 4,1 y 7,5 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado para FN y S respectivamente, manejando estrategias similares de fertilización en suelos de cristalino.

Cuadro 16. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su primer año frente a diferentes fuentes y dosis iniciales de fertilización fosfatada en kg de P₂O₅/ha.

<i>Fuente</i>	<i>Inicial</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
<i>Control</i>	<i>0</i>	2722	17	107	2428
<i>FN</i>	<i>40</i>	4323	913	274	2996
	<i>80</i>	4637	1432	343	2809
	<i>160</i>	4939	2180	411	2314
<i>S</i>	<i>40</i>	3278	313	155	2708
	<i>80</i>	3813	563	362	2841
	<i>160</i>	4728	1262	276	2990
<i>SEM</i>		586	264	46	344
<i>F</i>		NS	**	*	NS
<i>I</i>		**	**	**	NS
<i>F x I</i>		NS	NS	NS	NS

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S); fuente (F); dosis inicial (I).

Es evidente que el L tuvo problemas en este primer año, ya que en el rango de dosis de fósforo evaluado, no se registran las producciones esperadas siendo menores que las encontradas por Carámbula et al, 1994 b; Bemhaja, 1998 b y Risso et al, 2002. Las posibles explicaciones pueden ser: fallas en la implantación producto de la fecha de siembra, excesos de lluvias y efectos nocivos producidos por las bajas temperaturas registradas.

La fecha en la cual fue sembrado el mejoramiento puede ser considerada tardía (23/05), lo que pudo haber perjudicado al L por ser una especie de lento crecimiento inicial. Al ser ésta una especie estival, las bajas temperaturas invernales y las heladas, perjudican de manera diferencial a las plántulas en comparación con las de TB. Cuando ocurren temperaturas muy bajas y/o heladas intensas y frecuentes, los procesos de germinación y primer crecimiento de plántulas de las especies de L son seriamente afectados (Ayala y Carámbula, s/p), esto puede ser otra posible explicación ya que en los meses de junio a agosto se registraron 17 días con heladas (Cuadro 15).

Otro factor que pudo haber afectado los resultados son los excesos de lluvias ocurridas, muy comunes en ésta época del año. En efecto, luego de realizada la siembra, en el mes de julio llovió un 85% más que la media histórica (Cuadro 15) y según Ayala y Carámbula, s/p, el L muestra en general una mejor adaptación a suelos altos y bien drenados, por lo que en ambientes anegados o en ocasiones de períodos extensos de lluvias sus rendimientos pueden ser reducidos sensiblemente.

Para la GN no se detectaron efectos significativos de la fuente ni de las diferentes dosis iniciales en la producción de materia seca.

Para la MS total se encontraron efectos de las dosis iniciales ($P < 0,01$), alcanzando respuesta positiva hasta el agregado de 80 kg de P_2O_5/ha . No hubo diferencias significativas entre fuentes a pesar de que con FN produjo en promedio un 18% más que con S. Las diferencias entre fuentes disminuyen a medida que aumentan las dosis iniciales con valores de 32, 22 y 4% para las dosis de 40, 80 y 160 kg de P_2O_5/ha respectivamente. La respuesta que se observó en MS total fue de 12,3 kg de MS por cada kg de P_2O_5/ha aplicado (Anexo1).

El aumento en la producción de MS total al aumentar las dosis de fertilización inicial esta explicado principalmente por el aumento de la fracción leguminosa, ya que la GN frente a las diferentes dosis permaneció relativamente constante. Dentro de la fracción leguminosa si bien el TB y L aumentan, el incremento en magnitud del TB es mayor que el del L.

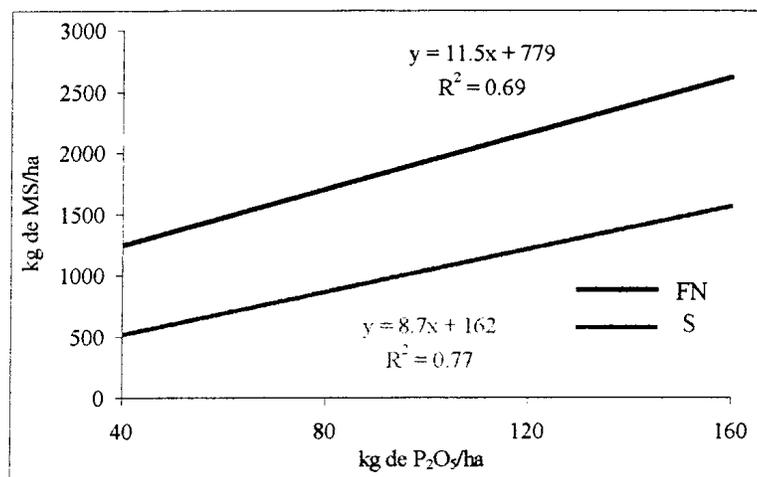


Figura 2. Producción de la fracción leguminosa en kg de MS/ha frente a diferentes fuentes (Fosforita natural, FN; Superfosfato simple, S) y dosis de fertilización inicial en kg de P_2O_5/ha .

Dado que no se registró interacción fuente por dosis, la respuesta promedio observada para ambas fuentes incluyendo el testigo sin fertilización en la fracción leguminosa fue de 11,8 kg de MS por cada kg de P_2O_5/ha agregado (Anexo 1). Estos resultados son superiores a los reportados por Risso et al (2002) del orden de 6,0 y 10,8 g de MS por cada kg de P_2O_5/ha para FN y S respectivamente. Para el rango de fertilización inicial 40-160 kg de P_2O_5/ha la respuesta en kg de MS/ kg de P_2O_5/ha aplicado fue de 11,5 y 8,7 para FN y S respectivamente. Para la fracción leguminosa el haber fertilizado con FN produjo en promedio un 89% más que el haberlo hecho con S. Dentro de los tratamientos que tuvieron FN, al que se le aplicó 160 kg de P_2O_5/ha al

inicio tuvo un 52% de leguminosa, lo cual es un porcentaje considerable para un mejoramiento en su primer año (Figura 2).

4.1.2 AÑO 2

Para TB se detectó interacción fuente por dosis inicial ($P < 0,05$) y fuente por refertilización ($P < 0,05$) (Cuadro 17). En ambas fuentes se detectó respuesta significativa y positiva a la fertilización inicial hasta el nivel mayor (160 kg de P_2O_5 /ha). La FN no se diferenció del S en los niveles más bajos (0, 40 y 80 kg de P_2O_5 /ha) siendo un 37% mayor solamente en el nivel más alto (160 kg de P_2O_5 /ha) en los tratamientos no refertilizados. La refertilización con FN incrementó la producción un 35% mientras que con S la producción se incrementó en un 110%. Para los tratamientos refertilizados no hubieron diferencias entre fuentes. Se observó una residualidad importante en ambas fuentes, tanto en los tratamientos refertilizados y no refertilizados. Observando las regresiones, se detectó que en los tratamientos sin refertilizar, por cada kg de P_2O_5 ha aplicado a la siembra con FN y S, la producción se incrementa en 24,1 y 17,6 kg de MS/ha respectivamente. En los tratamientos que fueron refertilizados, dicho incremento fue de 26,6 y 19,5 kg MS/ha (Anexo 2).

Para L, se detectó interacción entre la fuente, la dosis inicial y la refertilización ($P < 0,05$). En los tratamientos que no fueron refertilizados se encontró una respuesta significativa y positiva a la fertilización inicial hasta los 80 kg de P_2O_5 /ha no mostrando diferencias entre 80 y 160 kg de P_2O_5 /ha, no detectándose diferencias significativas entre fuentes. En los tratamientos refertilizados se detectó un menor efecto de la fertilización inicial que en los tratamientos no refertilizados, a su vez no se detectaron diferencias significativas entre fuentes en los niveles bajos, observándose un patrón errático entre fuentes para los niveles altos de fertilización inicial. Se detectó un efecto de la refertilización hasta el nivel de 40 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial. En los tratamientos sin refertilizar se observó una respuesta de 7,9 y 9 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha aplicado a la siembra, para los tratamientos manejados con FN y S respectivamente. En los que fueron refertilizados, la respuesta a la fertilización inicial con FN fue de 5,1 kg MS/ha, mientras que no se encontró un modelo que ajuste significativamente para aquellos refertilizados con S (Anexo 2).

Para la GN hubo efecto de la dosis inicial ($P < 0,05$). Los tratamientos fertilizados inicialmente con 80 y 160 kg de P_2O_5 /ha produjeron en promedio un 17% menos de GN comparándolo con los de 0 y 40 kg de P_2O_5 /ha, mostrando el efecto de la competencia de las especies introducidas por efecto de la fertilización fosfatada. Se detectó una respuesta de -6,2 kg de MS/ha por cada kg de P_2O_5 /ha de FN aplicado a la siembra,

mientras que no se encontró un modelo que ajuste significativamente para aquellos refertilizados con S (Anexo2).

Cuadro 17. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su segundo año frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P_2O_5 /ha.

	<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
<i>Control</i>	0	0	2841	49	321	2107
	0	40	3958	282	1106	2247
	40	0	4271	683	917	2381
	40	40	5468	1430	1545	2281
<i>FN</i>	80	0	6067	1968	1751	2054
	80	40	6109	2508	1577	1831
	160	0	7113	3792	1582	1581
	160	40	8106	4548	1993	1335
	0	40	4549	440	1260	2515
	40	0	3689	316	818	2269
	40	40	6129	1985	1428	2476
<i>S</i>	80	0	4880	1004	1554	2047
	80	40	6558	2481	2086	1754
	160	0	7401	2766	1747	2606
	160	40	7162	3767	1273	1958
<i>SEM</i>			121	355	210	322
<i>F</i>			NS	*	NS	NS
<i>I</i>			**	**	**	*
<i>FxI</i>			NS	*	NS	NS
<i>R</i>			**	**	**	NS
<i>FxR</i>			NS	*	NS	NS
<i>IxR</i>			**	NS	**	NS
<i>FxIxR</i>			**	NS	*	NS

NS= No Significativo; * = $P < 0,05$; ** = $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S); fuente (F); dosis inicial (I); refertilización (R).

Para la MS se detectó interacción entre la fuente, la dosis inicial y la refertilización ($P < 0,01$). En los tratamientos no refertilizados se obtuvo respuesta significativa y positiva a la fertilización inicial hasta el nivel más alto analizado (160 kg de P_2O_5 /ha), observando diferencias solamente entre fuentes para el nivel inicial de 80 kg de P_2O_5 /ha, superando en un 24% la FN al S. Para los tratamientos refertilizados se obtuvo un menor efecto de la fertilización inicial que en los tratamientos no refertilizados, con diferencias solo entre fuentes en la dosis de 160 kg de P_2O_5 /ha en la cual la FN superó en un 13% al S. Se registró un efecto de las refertilizaciones hasta el nivel de 40 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial. Para ambas fuentes se observa una residualidad importante. La respuesta de la MS total frente a las diferentes estrategias de

fertilización se puede atribuir a la fracción leguminosa ya que las producciones de GN no fueron sustancialmente diferentes en magnitud. En los tratamientos sin refertilización se observó una respuesta de 26,7 y 29 kg de MS/ha por cada kg de P_2O_5 /ha de FN y S aplicados a la siembra, respectivamente. En aquellos que fueron refertilizados, esa respuesta fue de 25 y 14,9 kg de MS/ha para FN y S respectivamente (Anexo 2).

Para el total de la fracción leguminosa, el haber fertilizado con FN produjo en promedio un 9% más que el haberlo hecho con S. En todos los tratamientos que fueron fertilizados al inicio y tuvieron refertilización la leguminosa superó el 50% de la MS total, independientemente de con que fuente se haya fertilizado. Es importante destacar que dicho porcentaje se alcanza también en aquellos tratamientos de 80 y 160 kg de P_2O_5 /ha que no fueron refertilizados. Esto marca la importancia de la estrategia de fertilización ya que en caso de no tener certeza de poder refertilizar en el segundo año el partir de una dosis alta de fertilización inicial aseguraría tener una producción de forraje en el segundo año con un alto porcentaje de leguminosas (Figura 3).

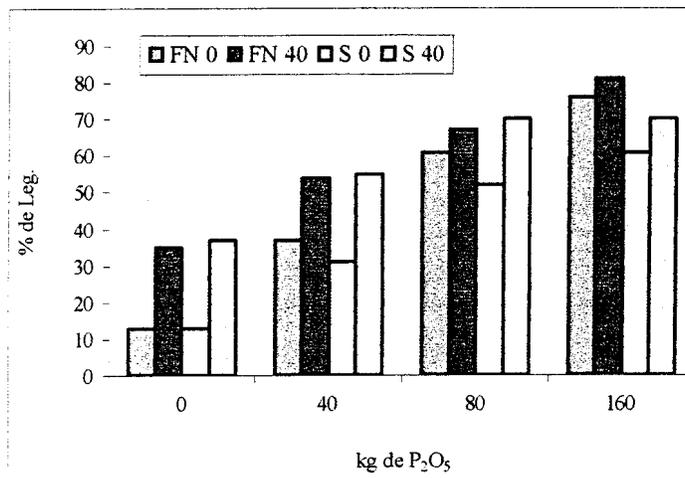


Figura 3. Porcentaje de la fracción leguminosa (TB+L) frente a las diferentes estrategias de fertilización en un mejoramiento en su segundo año. Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S).

Las diferentes estrategias de fertilización originaron diferentes relaciones gramínea:leguminosa, que variaron desde 67:33 para el tratamiento S 40-0, hasta 17:83 para el tratamiento con FN 160-40. Se deberá buscar aquel balance gramínea:leguminosa que posibilite cumplir con los objetivos de producción deseados y combinar diferentes manejos para poder mantenerlo en el tiempo, sin perjudicar la producción y calidad de los Mejoramientos de Campo, ya que dependiendo de las decisiones que se tomen, se va a afectar la relación L, TB y GN.

4.1.3 AÑO 3

Para el TB (trébol blanco) se detectó interacción entre la fuente, la dosis inicial y la refertilización ($P < 0,05$). Para los tratamientos no refertilizados, no hubo respuesta a la fertilización inicial, a excepción del tratamiento fertilizado con 160 kg P_2O_5 /ha de FN (fosforita natural) al inicio, en el cual la respuesta fue positiva. A su vez no se detectaron diferencias entre fuentes, salvo para este último tratamiento. En los tratamientos refertilizados con S, no se detectó respuesta a la fertilización inicial, mientras que para los tratados con FN se detectó respuesta hasta 160 kg P_2O_5 /ha. Hubo efecto positivo de la refertilización para ambas fuentes, siendo sustancialmente mayor cuando fueron tratados con FN (Cuadro 18).

En el caso de L (lotus) se detectó interacción dosis inicial por fuente ($P < 0,01$) y dosis inicial por refertilización ($P < 0,01$). En los tratamientos que no fueron refertilizados, solamente hubo respuesta positiva a la fertilización inicial en los tratamientos que fueron tratados con FN, difiriendo las fuentes únicamente en el nivel de 160 kg P_2O_5 /ha aplicados al inicio, siendo un 114% superior el tratado con FN. En los tratamientos refertilizados, no se detectó respuesta a la fertilización inicial, ni diferencia entre fuentes, salvo para el tratamiento que fue fertilizado al inicio con 160 kg P_2O_5 /ha, en el cual la FN supera al S (superfosfato simple) en un 54%. Se detectó efecto positivo de la refertilización para ambas fuentes y en todos los niveles iniciales analizados.

Para la GN (gramínea nativa) se detectó interacción dosis inicial por fuente ($P < 0,01$) y fuente por refertilización ($P < 0,05$). Se observó respuesta significativa y positiva a la refertilización solamente en aquellos tratamientos que fueron fertilizados con S.

Es importante destacar en este tercer año del mejoramiento las producciones de la GN, ya que cualquiera sea el tratamiento, alcanzan a superar los 3000 kg de MS/ha, pudiendo ser explicado este comportamiento por una mejora en la fertilidad a través de las sucesivas fertilizaciones, así como también de la fijación de nitrógeno lo que permitirá el aumento de la frecuencia de gramíneas (sobre todo anuales invernales) según Carámbula et al (1994 a), que aumentan la producción con respecto a lo que lo hacían en los primeros años del mejoramiento.

Cuadro 18. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su tercer año frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P_2O_5 /ha.

	<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
<i>Control</i>	0	0	3689	12	495	2920
	0	40	7795	1009	3252	3167
	40	0	4443	11	583	3593
	40	40	7954	1691	2477	3389
<i>FN</i>	80	0	4878	67	1171	3308
	80	40	8461	1795	2591	3576
	160	0	6994	790	2141	3665
	160	40	9579	3020	3046	3234
	0	40	7531	810	2817	3576
	40	0	3918	9	555	3180
	40	40	7281	595	2698	3631
<i>S</i>	80	0	4540	3	944	3091
	80	40	7662	850	2507	3711
	160	0	6524	90	999	5130
	160	40	8901	1269	1974	5408
<i>SEM</i>			562	146	200	328
<i>F</i>			*	**	**	**
<i>I</i>			**	**	**	**
<i>FxI</i>			NS	**	**	**
<i>R</i>			**	**	**	NS
<i>FxR</i>			NS	**	NS	*
<i>IxR</i>			NS	**	**	NS
<i>FxIxR</i>			NS	*	NS	NS

NS= No Significativo; * = $P < 0,05$; ** = $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S); fuente (F): dosis inicial (I); refertilización (R).

Con fertilizaciones de 80 y 40 kg de P_2O_5 /ha con S se obtienen producciones similares a las obtenidas con FN, pero al fertilizar inicialmente con 160 kg de P_2O_5 /ha, el componente que pasa a dominar es la GN con producciones de más de 5000 kg de MS/ha. Esto podría estar explicado por una caída muy importante de la fracción leguminosa con respecto al año anterior, el rastrojo de ésta tiene una alta concentración de nitrógeno lo que mejora la relación C/N del mismo, permitiendo una fácil y rápida descomposición, que será aprovechado por las GN que se encuentran en el tapiz, además las nuevas plántulas que aparezcan encontrarán un ambiente con una disponibilidad de nutrientes muy favorable (fósforo proveniente del fertilizante y nitrógeno proveniente de la fijación simbiótica realizada por las leguminosas previamente y posterior descomposición de los residuos), lo que permitirá una implantación menos dificultosa.

Para la MS total se detectó efecto de la dosis inicial ($P < 0,01$), de la fuente ($P < 0,05$), y de la refertilización ($P < 0,01$). No se detectó un efecto residual de la fertilización inicial entre 0 y 80 kg de P_2O_5/ha , superando en un 34% el nivel de 160 kg de P_2O_5/ha al promedio de 0, 40 y 80 kg de P_2O_5/ha . La FN superó al S en un 7% y finalmente la refertilización incrementó la producción de forraje en un 69%.

Observando la fracción leguminosa se detecta tanto para S como para FN que no hay efecto residual de la fertilización inicial, se haya refertilizado o no, excepto para el caso de la FN en el pasaje de 80 a 160 kg de P_2O_5/ha en que se registró un 38 y 37% de la fracción leguminosa para refertilizados y no refertilizados respectivamente.

Se observan los buenos resultados de las refertilizaciones en la fracción leguminosa, principalmente si es con FN ya que en ningún caso bajó del 50% de la MS total, mientras que ningún tratamiento con S superó el 50% en el total de MS (Figura 4). Los tratamientos que tuvieron FN como fuente fosfatada produjeron un 47% más de fracción leguminosa que cuando se utilizó S.

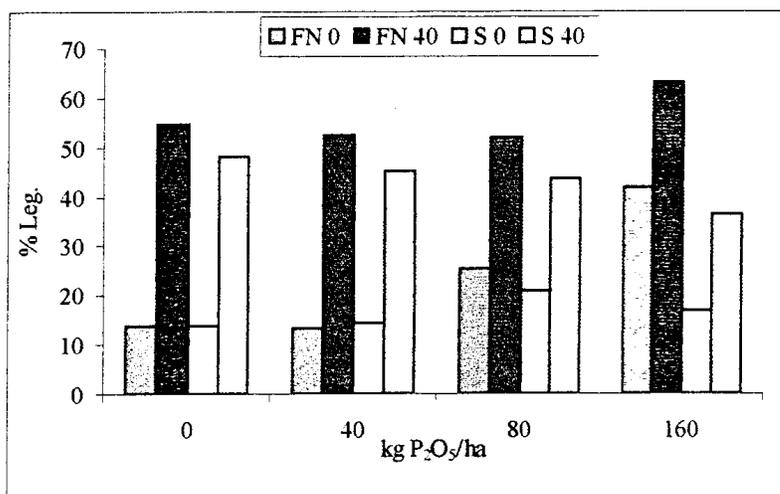


Figura 4. Porcentaje de la fracción leguminosa (TB-L) frente a las diferentes estrategias de fertilización en un mejoramiento en su tercer año. Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S).

4.1.4 AÑO 4

Para TB se detectó interacción entre dosis inicial, fuente y refertilización ($P < 0,05$). Para los tratamientos que no fueron refertilizados, no se encontró respuesta a la fertilización inicial ni diferencias entre fuentes. En los tratamientos refertilizados se detectó efecto residual de la fertilización inicial solamente para aquellos fertilizados con FN, pero de baja magnitud. Los tratamientos refertilizados con FN fueron significativamente superiores a los que lo fueron con S en todos los niveles iniciales evaluados, siendo la menor diferencia de 163% (Cuadro 19).

En el caso de L, se detectó interacción entre dosis inicial, fuente y refertilización ($P < 0,01$). Para los tratamientos que no fueron refertilizados, se observó una respuesta significativa y positiva a la fertilización inicial solamente en los tratados con FN en el pasaje de 80 a 160 kg P_2O_5 /ha, no habiendo diferencias entre fuentes. Para los tratamientos refertilizados, se detectó una respuesta significativa y negativa hasta 80 kg P_2O_5 /ha de fertilización inicial en aquellos que fueron tratados con FN. Mientras que en los que se fertilizaron con S no se observó una tendencia definida. Se detectó un efecto significativo y positivo de la refertilización para ambas fuentes hasta el nivel inicial de 80 kg P_2O_5 /ha.

Para GN se detectó interacción fuente por dosis inicial ($P < 0,01$) y un efecto de la refertilización ($P < 0,01$). Se detectó efecto positivo de la fertilización inicial hasta 80 kg P_2O_5 /ha para FN y hasta 160 kg P_2O_5 /ha para S. La producción de GN fertilizada con S supera a la lograda con FN en los niveles de 40 y 160 kg P_2O_5 /ha. Los tratamientos refertilizados produjeron un 35% más que aquellos que no la tuvieron.

Para la MS total se detectó interacción dosis inicial por refertilización ($P < 0,01$). Para los tratamientos que no fueron refertilizados se detectó efecto significativo y positivo de la fertilización inicial al pasar de 80 a 160 kg P_2O_5 /ha, no habiendo diferencias entre fuentes. Para los refertilizados no hubo efecto de la fertilización inicial, no existiendo diferencias entre fuentes en todos los niveles de fertilización inicial. Se observó un efecto significativo y positivo de la refertilización para las diferentes dosis iniciales.

Cuadro 19. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su cuarto año frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P_2O_5 /ha.

	<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
<i>Control</i>	0	0	2074	3	206	1762
<i>FN</i>	0	40	4955	594	1551	2678
	40	0	2518	5	373	1989
	40	40	4507	684	1318	2281
	80	0	2657	7	251	2197
	80	40	4821	956	655	3005
	160	0	3185	13	588	2206
	160	40	4447	949	537	2504
<i>S</i>	0	40	4223	226	1431	2376
	40	0	2465	5	332	2010
	40	40	4755	228	995	3287
	80	0	2469	11	292	1901
	80	40	5006	279	1384	2880
	160	0	3648	3	427	2900
	160	40	4646	289	441	3645
<i>SEM</i>			349	52	81	256
<i>F</i>			NS	**	NS	**
<i>I</i>			*	**	**	**
<i>FxI</i>			NS	*	**	**
<i>R</i>			**	**	**	**
<i>FxR</i>			NS	**	NS	NS
<i>IxR</i>			**	**	**	NS
<i>FxIxR</i>			NS	*	**	NS

NS= No Significativo; * = $P < 0,05$; ** = $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S); fuente (F); dosis inicial (I); refertilización (R).

Con respecto a la fracción leguminosa ésta realizó un muy bajo aporte cuando los tratamientos no fueron refertilizados a lo largo de los cuatro años independientemente de la dosis inicial o la fuente. En los tratamientos refertilizados los porcentajes de la fracción leguminosa fueron mayores en los tratamientos con FN salvo en aquel que tuvo 80 kg de P_2O_5 /ha en la dosis inicial, en que fueron similares. En ninguno de los tratamientos la fracción leguminosa supera el 50% de la MS total (Figura 5).

Para los diferentes componentes del mejoramiento, se observa que en el cuarto año pasa a ser más importante la refertilización que la fertilización inicial, ya que el hecho de haber refertilizado produjo un aumento en producción para todos los tratamientos independientemente de la fuente y la dosis inicial a los que fueron tratados.

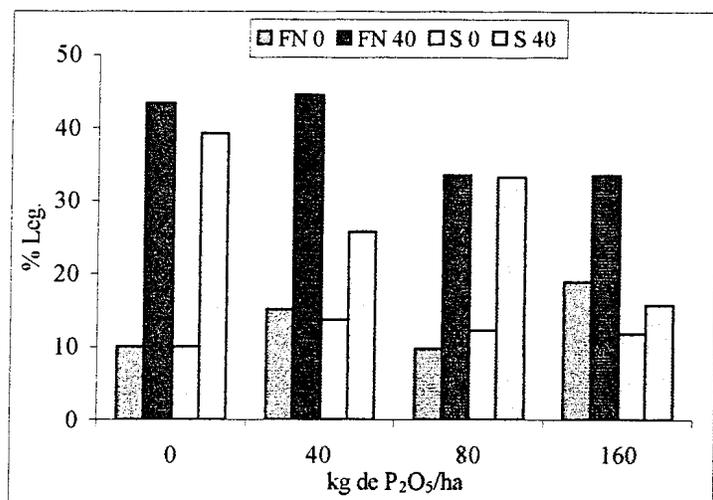


Figura 5. Porcentaje de la fracción leguminosa (TB+L) frente a las diferentes estrategias de fertilización en un mejoramiento en su cuarto año. Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S).

4.1.5 AÑO 5

Este año se caracterizó por una sequía importante desde setiembre a marzo, repercutiendo de manera negativa en el mejoramiento. La reducción en producción fue muy importante, siendo solamente un tratamiento (S 0-40) el que superó los 1000 kg/ha de MS total. Por esto no sería válido hacer un análisis de los resultados provocados por las diferentes estrategias de fertilización, debido a las condiciones climáticas adversas.

Para TB se observó interacción fuente por refertilización ($P < 0,01$) (Cuadro 20). En los que no tuvieron refertilización la producción fue nula. Dentro de los refertilizados, a los que se les aplicó S produjeron más que los que lo fueron con FN, pero las producciones promedio fueron de muy bajo aporte (118 y 45 kg de MS/ha respectivamente).

Cuadro 20. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su quinto año frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P₂O₅/ha.

	<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
<i>Control</i>	0	0	366	0	31	316
	0	40	751	58	196	468
	40	0	374	0	16	337
	40	40	657	40	140	440
<i>FN</i>	80	0	435	1	24	383
	80	40	614	39	115	444
	160	0	351	0	26	313
	160	40	571	43	78	403
	0	40	1072	114	437	496
	40	0	381	1	27	341
	40	40	973	140	317	484
<i>S</i>	80	0	386	1	40	326
	80	40	922	132	251	508
	160	0	426	0	28	384
	160	40	701	87	128	451
<i>SEM</i>			114	13	40	62
<i>F</i>			**	**	**	NS
<i>I</i>			NS	NS	**	NS
<i>FxI</i>			NS	NS	NS	NS
<i>R</i>			**	**	**	**
<i>FxR</i>			**	**	**	NS
<i>IxR</i>			NS	NS	**	NS
<i>FxIxR</i>			NS	NS	NS	NS

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S); fuente (F); dosis inicial (I); refertilización (R).

Para L se detectó interacción fuente por refertilización (P<0,01) y dosis por refertilización (P<0,01). No se observaron diferencias al variar las dosis iniciales ni al utilizar distintas fuentes. En los tratamientos refertilizados existió una tendencia a disminuir la producción cuando se aumenta la dosis inicial. Los que tuvieron refertilización mostraron mayor producción con S que con FN. Los tratamientos refertilizados tuvieron mayor producción que los sin refertilizar.

Para GN hubo efecto de la refertilización (P<0,01), siendo superiores los tratamientos refertilizados.

Para la MS total se detectó interacción fuente por refertilización (P<0,01). Los tratamientos sin refertilización no presentaron diferencias entre sí. Los refertilizados con S superaron a los que lo fueron con FN.

4.1.6 TOTAL ACUMULADO

Para TB (trébol blanco) se observó interacción fuente por dosis inicial ($P < 0,01$), fuente por refertilización ($P < 0,05$) y dosis inicial por refertilización ($P < 0,05$). Para los tratamientos que no fueron refertilizados se observó una respuesta positiva a la fertilización inicial para ambas fuentes, registrándose mayores producciones en aquellos que fueron fertilizados con FN (fosforita natural) que con S (superfosfato simple). Para los tratamientos refertilizados se observó la misma tendencia de los que no lo fueron, pero de menor magnitud. Se observó un efecto significativo y positivo de la refertilización. La refertilización con FN incrementó la producción en un 103% mientras que con S incrementó la producción un 147% (Cuadro 21). Observando las regresiones, se detectó que en los tratamientos sin refertilizar, por cada kg de P_2O_5 /ha de FN y S aplicados a la siembra, la producción se incrementa en 42,2 y 25,8 kg de MS/ha respectivamente (Anexo 3). En los tratamientos refertilizados se dieron incrementos de 53,9 y 31,0 kg MS/ kg de P_2O_5 /ha agregado con FN y S respectivamente.

Para L (lotus) se observó interacción entre dosis inicial, refertilización y fuente ($P < 0,05$). Para los tratamientos que no fueron refertilizados se encontró respuesta positiva a la fertilización inicial para ambas fuentes. Entre 0 y 80 kg de P_2O_5 /ha no se detectaron diferencias entre fuentes, pero para 160 kg de P_2O_5 /ha aplicados a la siembra, la FN produjo un 37% más que el S. Para los tratamientos refertilizados con FN no se observa un efecto claro de la fertilización inicial, mientras que en el nivel inicial de 80 kg de P_2O_5 /ha, el S supera a la FN en un 25%, en el nivel inicial de 160 kg de P_2O_5 /ha la FN superó al S en un 48%. Se detectó un efecto de la refertilización, siendo éste cada vez menor y poco claro a medida que se aumenta la dosis inicial. Al fertilizar con FN, los tratamientos sin refertilizar tienen una respuesta de 22,6 kg de MS/ha por cada kg de P_2O_5 /ha aplicados al inicio, mientras que al fertilizar con S, ésta respuesta es de 14,8 kg de MS/ha (Anexo 3). En los que fueron refertilizados, la respuesta fue de -11,2 kg de MS/ha por cada kg de P_2O_5 /ha de S aplicado a la siembra (Anexo 3), mientras que no se encontró un modelo que ajuste significativamente para aquellos refertilizados con FN.

Para GN (gramínea nativa) se detectó interacción de fuente por dosis inicial ($P < 0,01$) y fuente por refertilización ($P < 0,05$). Se observó una respuesta poco clara a la fertilización inicial. La mayor diferencia entre fuentes se observó en el tratamiento con 160 kg P_2O_5 /ha al inicio, en el cual el S fue un 43% superior que la FN. Se detectó una respuesta de 27,2 y 17,3 kg de MS/ha por cada kg de P_2O_5 /ha de S aplicado al inicio, para los tratamientos sin refertilizar y refertilizados respectivamente (Anexo 3), mientras que no se encontró un modelo que ajuste significativamente para aquellos fertilizados con FN.

Cuadro 21. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en el total acumulado durante cinco años frente a diferentes fuentes, dosis iniciales y anuales de fertilización fosfatada en kg de P₂O₅/ha.

	<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
<i>Control</i>	0	0	11692	82	1161	9534
<i>FN</i>	0	40	20181	1960	6213	10988
	40	0	15929	1612	2163	11296
	40	40	22907	4759	5754	11388
	80	0	18675	3475	3541	10751
	80	40	24642	6730	5282	11665
	160	0	22583	6777	4748	10080
	160	40	27641	10741	6066	9791
	<i>S</i>	0	40	20097	1607	6054
40		0	13732	644	1885	10510
40		40	22417	3263	5592	12587
80		0	16089	1581	3192	10206
80		40	23961	4305	6590	11694
160		0	22727	4122	3477	14010
160		40	26137	6674	4093	14451
<i>SEM</i>				1131	453	373
<i>F</i>			*	**	*	**
<i>I</i>			**	**	**	**
<i>FxI</i>			NS	**	**	**
<i>R</i>			**	**	**	**
<i>FxR</i>			NS	*	NS	*
<i>LxR</i>			**	*	**	NS
<i>FxLxR</i>			NS	NS	*	NS

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S); fuente (F); dosis inicial (I); refertilización (R).

Para MS total se observó efecto de la fuente (P<0,05) y se detectó interacción dosis inicial por refertilización (P<0,01) (Cuadro 21). Para los tratamientos no refertilizados, se observó respuesta significativa y positiva de la fertilización inicial para ambas fuentes, siendo superior con FN que con S en los tratamientos con 40 y 80 kg P₂O₅/ha. Para los que fueron refertilizados se detectó efecto positivo de la fertilización inicial no observándose diferencias entre fuentes. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización para ambas fuentes, siendo ésta respuesta cada vez menor a medida que se incrementa la dosis inicial. Los tratamientos a los cuales se les aplicó FN produjeron un 5% más que a los que se les aplicó S. Según las regresiones, en los tratamientos sin refertilizar, la respuesta fue de 65,9 y 69,7 kg de MS/ha por cada kg de P₂O₅/ha de FN y S aplicados a la siembra. En aquellos que fueron refertilizados, ésta respuesta fue de 45,3 y 36,6 kg de MS/ha respectivamente (Anexo 3).

En un ensayo gemelo realizado por Risso et al (2002) en la Región de Cristalino comenzado en 1996, en la MS total se encontraron resultados similares en cuanto a la

residualidad de la fertilización inicial y al efecto de la refertilización. Dichos autores encontraron únicamente superioridad de la FN con respecto al S en los tratamientos refertilizados. Mientras que en el presente trabajo esa diferencia a favor de la FN se encontró en los no refertilizados.

Para la fracción leguminosa, los tratamientos a los cuales se les aplicó FN incrementaron su porcentaje dentro de la MS total a medida que aumentaba la dosis inicial independientemente de si fueron refertilizados o no (Figura 6). Los tratamientos refertilizados en comparación con aquellos que no lo fueron, frente a iguales dosis iniciales, siempre representaron un mayor porcentaje de la MS total, nunca estando por debajo del 40%. El único tratamiento sin refertilizar que superó el 40% fue el FN 160-0. En los tratamientos refertilizados, al utilizar S como fuente fosfatada no se observa una respuesta a la fertilización inicial tan marcada como sucede al utilizar FN, en donde el porcentaje de ésta fracción va desde 41% (FN 0-40) hasta 61% (FN 160-40) de la MS total. Los tratamientos sin refertilizar, si bien aumentan frente a mayores dosis iniciales, estos porcentajes son de menor magnitud al compararlo con FN. La relación gramínea:leguminosa varió desde 80:20 para el tratamiento S 40-0, hasta 37:63 para el tratamiento con FN 160-40.

Para la leguminosa se encontraron resultados similares a los reportados por Risso et al (2002), en cuanto al efecto de las dosis iniciales y de la refertilización. En lo referente a las fuentes los resultados son distintos, lo que se podría atribuir a que dichos autores encontraron problemas en el establecimiento del TB, mientras que en este trabajo los problemas se dieron con el L, por lo que las relaciones de competencia entre estas dos leguminosas mostraron tener comportamientos diferentes.

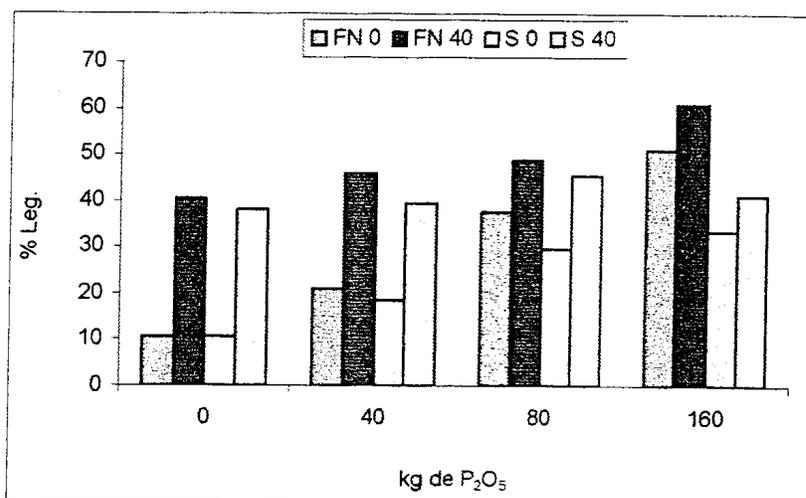


Figura 6. Porcentaje de la fracción leguminosa (TB+L) frente a las diferentes estrategias de fertilización en un mejoramiento en sus cinco años. Fosforita natural (FN); Superfosfato simple (S).

4.1.7 COMPORTAMIENTO DE LAS FUENTES DE FÓSFORO

Como fue explicado anteriormente la producción de MS del mejoramiento no se diferenció en gran medida al agregar FN o S, pero en ésta sí se registraron diferencias en la composición de la misma, a través de la contribución de la fracción leguminosa y estas son explicadas por el TB que al tener mayores requerimientos por fósforo (Davis, 1991) es más sensible a las variaciones que ocurren con la fertilización fosfatada, resultando ser un muy buen indicador de la disponibilidad de fósforo en el suelo.

Las leguminosas durante las tres primeras semanas de vida son muy eficientes en captar el fósforo proveniente del fertilizante, tal es así que durante este período el 75% de fósforo que contienen es aportado por la fertilización, producto de la absorción que realizan a través de sus raíces seminales, por lo que durante éste período se necesitaría una fuente de fósforo de alta solubilidad para poder satisfacer dichos requerimientos (Carámbula, com. pers.). Es dable esperar que con el S durante éste período se haya logrado un mejor desarrollo inicial. Pero en éstos suelos de alta fijación de fósforo, a lo largo de todo el primer año, el uso de fuentes de lenta liberación como las fosforitas, resulta más efectivo para el desarrollo de las plantas que el obtenido con la utilización de fuentes solubles.

Para los tratamientos sin refertilización la respuesta a la fertilización inicial en producción de forraje generadas en el primer año se mantienen al segundo pero se pierden al tercero con ambas fuentes, salvo para el tratamiento FN 160, mostrando la mayor residualidad que tiene esta fuente al compararlo con S en este tipo de suelos,

resultados que son similares a los reportados por Morón (1982) y Rabuffetti et al (1983) y opuestos a los de Edmeades et al (1991), que afirman que cualquiera sea la edad de la pastura se deberán aplicar más kg de P_2O_5 /ha de FN para obtener los mismos resultados que los que se logran con S.

Esta mayor residualidad puede ser atribuida al propio fertilizante (cantidad y solubilidad), a un mejor stand de plantas, a un mayor tamaño de plantas, a la especie o especies que se utilicen en el mejoramiento o a una combinación de todas las anteriores.

Con respecto al fertilizante, es claro que a mayor cantidad de fósforo agregado a la siembra mayor es el efecto residual con el correr del tiempo. La eficiencia con que pueden ser utilizadas las diferentes fuentes varía según el medio en el cual se lo aplique. En este sentido, Smith et al (1990) y Quin et al (1987) citados por Edmeades et al (1991), lo relacionan al pH del suelo y al régimen hídrico, Edmeades et al (1991) lo relaciona al pH del suelo. Morón (2002), menciona que se logra una mayor eficiencia relativa de la FN con respecto al S en la Región Este producto de las características del suelo que se dan en esta región, sosteniendo que el mejor comportamiento de la FN se da en suelos con: $pH_{(agua)} \leq 5,6$, meq Ca intercambiable /100 g ≤ 10 y un $V(\%)_{pH 7} \leq 70$ (porcentaje de saturación en bases). Tomando en cuenta estas pautas la Región Este sería la que presentaría las mayores ventajas para la utilización de la FN, en segundo lugar sería la Región de Cristalino Central y por último la Región Basalto. Morón (1982) concluye que a menor porcentaje de saturación en bases, más se solubiliza la FN, ya que hay más posiciones de intercambio catiónico que pueden ser ocupadas por iones hidrógeno, el cual dejaría al fósforo disponible. Consideraciones similares fueron realizadas por Rabuffetti et al (1983), los cuales afirman que la solubilización de la FN será considerablemente mayor en suelos ácidos desaturados con bajo porcentaje de saturación en bases. Castro et al (1981), relacionan las diferencias entre las eficiencias entre fuentes al pH, contenido de materia orgánica, saturación en bases y CIC.

En lo referente a la pastura, se han detectado diferencias entre las especies de leguminosas que se introducen en un mejoramiento en la capacidad con que pueden llegar a captar el fósforo proveniente de diferentes fuentes (Russell y Russell, 1968; Labella y Améndola, 1979 citados por Morón, 1982).

Morón (2002), menciona que parecen existir diferencias importantes entre especies. TB además de ser una especie altamente sensible a la disponibilidad del fósforo del suelo parece ser una especie con mayor capacidad de utilizar fósforo de la FN que el L.

En el cuarto año del mejoramiento definitivamente se pierde el efecto residual del tratamiento FN 160 (el del S se había perdido el año anterior en todas las dosis, siempre hablando de la fracción leguminosa sobre todo TB).

Para el total acumulado, se observó una mayor producción en aquellos tratamientos fertilizados al inicio con FN en todas las dosis y ésta diferencia se incrementa a medida que la dosis aumenta. Los resultados podrían ser explicados por dos factores fundamentales, el primero sería las reacciones que ocurren entre la fuente y el suelo según las características químicas de los perfiles modales que lo componen (fundamentalmente los más superficiales ya que son aplicaciones en cobertura), Morón (2002), sintetiza las condiciones que favorecen la disolución de la FN en: a) aumento de la concentración de hidrógenos o sea pH ácido, b) baja concentración de calcio en solución y en forma intercambiable, y c) baja concentración de fósforo en solución. Un segundo factor que podría explicar los resultados es por la diferente eficiencia que tiene las especies de captar el fósforo proveniente de diferentes fuentes fosfatadas.

Para los tratamientos refertilizados las diferencias entre fuentes por efecto de la residualidad son menores producto de la propia fertilización anual que solapa el efecto residual. De todas maneras se observa este efecto con la mayor dosis inicial aplicada (FN 160) y esta diferencia sería explicada con los mismos argumentos que se utilizaron para describir los análisis de los tratamientos sin refertilización.

4.1.8 EFICIENCIA DE LAS DIFERENTES FUENTES UTILIZADAS

Se estimó la eficiencia de las diferentes fuentes fosfatadas para el total acumulado de 5 años del mejoramiento, a través del *cociente entre los kg de MS producidos a una dosis "x" de FN sobre lo que se registró con S a esa misma dosis "x" (a ambas producciones se les descuenta la producción registrada en el testigo)*, utilizando como referencia el S (S=100, Cuadro 22). Se puede observar que para la MS total en los tratamientos sin refertilización a menor dosis inicial mayor eficiencia se obtiene al aplicar FN. En la mayor dosis analizada, se obtuvieron las mismas eficiencias, mostrando que a dosis elevadas los efectos que se producían por las diferentes solubilidades de las fuentes empleadas pierden relevancia. A dosis menores se dan los efectos ya justificados de las diferencias entre fuentes y de los procesos de retención-liberación del fósforo que ocurren en el suelo. Para los tratamientos refertilizados al aumentar la dosis inicial se logra una mayor eficiencia con FN pero de una baja magnitud, reafirmando lo antes mencionado de la disminución en el efecto de la dosis inicial como consecuencia de las refertilizaciones.

Cuadro 22. Eficiencia de las diferentes fuentes fosfatadas en la producción de la MS total y la fracción leguminosa (TB +L)

Fuente	Tratamiento (Dosis Inicial – refertilización)						
	MS total						
	40 – 0	80 – 0	160 – 0	0 – 40	40 – 40	80 – 40	160 – 40
FN	208	159	99	101	105	106	110
S	100	100	100	100	100	100	100
	Fracción leguminosa (TB + L)						
	40 – 0	80 – 0	160 – 0	0 – 40	40 – 40	80 – 40	160 – 40
FN	197	163	162	108	122	116	163
S	100	100	100	100	100	100	100

Fosforita natural (FN); Superfosfato Simple (S).

Para la fracción leguminosa (Cuadro 22) se visualiza que en general hay una mayor eficiencia lograda al utilizar FN como fuente fosfatada, es por esto también que se reafirma que la fuente que se utiliza modifica principalmente la composición del mejoramiento.

4.1.9 CONCLUSIONES

- ✓ Para la fracción leguminosa (TB+L) hubo efecto residual de la fertilización inicial hasta el segundo año al utilizar S y hasta el tercer año al utilizar FN como fuente fosfatada.
- ✓ A mayor cantidad de fósforo aplicado el TB realiza un mayor aporte en la MS total.
- ✓ Para L hubo efecto residual de la fertilización inicial en los tratamientos que no fueron refertilizados, éste efecto fue hasta el tercer año cuando se los trató con FN y hasta el segundo cuando fue con S.
- ✓ Para la MS total en los tratamientos sin refertilizar el efecto residual de la fertilización inicial se dio hasta el cuarto año sin diferencias entre fuentes. En los que fueron refertilizados ésta respuesta se dio hasta el tercer año.
- ✓ Para la MS total y fracción leguminosa hubo efecto de la refertilización en todos los años y todas las dosis iniciales analizadas.
- ✓ La superioridad de la FN se encontró principalmente en los tratamientos sin refertilizar.

4.2 EXPERIMENTO II: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A LA MEZCLA CON *Trifolium repens* cv. Zapicán Y *Lotus corniculatus* cv. San Gabriel

Se presenta la información correspondiente a 5 años de evaluación de un mejoramiento, manejando 4 dosis iniciales (0, 45, 90 y 135 kg de P₂O₅/ha) y 3 niveles de refertilización (0, 30 y 60 kg de P₂O₅/ha) en base a superfosfato simple. Los resultados se presentan para cada año y para el total acumulado de los 5 años, no presentándose los resultados de la fracción maleza dado que en el promedio representaron el 5% del total de la materia seca producida.

4.2.1 AÑO 1

Para trébol blanco (TB) se detectó efecto de la dosis inicial (P<0,01). Se observó diferencias significativas entre el testigo sin fertilizar y los que recibieron fertilización. Dentro de los que fueron fertilizados, si bien no hubo diferencias significativas entre ellos, hay una tendencia a aumentar la producción en la medida que se incrementa la dosis inicial (Cuadro 23). Por cada kg de P₂O₅ agregado a la siembra la producción de TB se incrementó en 14,2 kg de MS/ha (Figura 7) (Anexo 4).

Cuadro 23. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) (kg de MS/ha) de un mejoramiento de primer año frente al agregado de diferentes niveles iniciales de Superfosfato simple (kg de P₂O₅/ha).

<i>Inicial</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
0	1954	13	47	1520
45	4249	987	816	1984
90	5243	1680	1252	1715
135	5426	1916	1455	1633
<i>SEM</i>	134	109	63	79
<i>I</i>	**	**	**	NS

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); dosis inicial (I).

Para L (lotus) se detectó efecto de la dosis inicial (P<0,01), observándose respuesta significativa hasta los 90 kg de P₂O₅/ha. La regresión muestra una respuesta

lineal, por cada kg de P_2O_5 /ha agregado a la siembra la producción de L se incrementó en 10,3 kg de MS/ha (Figura 7) (Anexo 4).

Aún cuando existen forrajeras como el género Lotus, con una baja demanda por fósforo, todas las leguminosas recomendadas en el país responden a dosis crecientes de fertilización inicial con éste nutriente (Ayala y Bermúdez, 1992 citados por Ayala et al, 1999). No obstante, la eficiencia de utilización inicial del fósforo es menor a medida que se incrementa la dosis. En estudios efectuados en INIA Treinta y Tres, el mejor impacto alcanzado en la implantación de las leguminosas se obtuvo elevando la fertilización hasta 60 kg de P_2O_5 /ha, particularmente en especies exigentes en fertilidad como los tréboles y de 40 kg de P_2O_5 /ha en los lotus, cualquiera fuera la época de siembra (Ayala et al, 1999).

Para la GN (gramínea nativa) no se detectó efecto de la fertilización inicial.

Para MS total se detectó efecto de la dosis inicial ($P < 0,01$) hasta los 90 kg de P_2O_5 /ha. Por cada kg de P_2O_5 /ha agregado a la siembra la producción de MS se incrementó en 25,3 kg de MS/ha (Figura 7) (Anexo 4). En los niveles de fertilización de 0, 45, 90 y 135 kg de P_2O_5 /ha, se vieron proporciones de leguminosas de 3, 42, 56 y 62 % respectivamente. Estos resultados reafirman lo reportado por Casanova et al, 1975; Mengel y Kirkby, 1982; Rabuffetti et al, 1982 sobre las ventajas de plantas que se desarrollan en ambientes sin limitaciones de fósforo, favoreciendo la germinación.

Debido a que el aumento en producción de la GN frente al agregado de fósforo no fue significativo, se puede decir que todos los aumentos en producción de MS total son explicados por la producción de la fracción leguminosa.

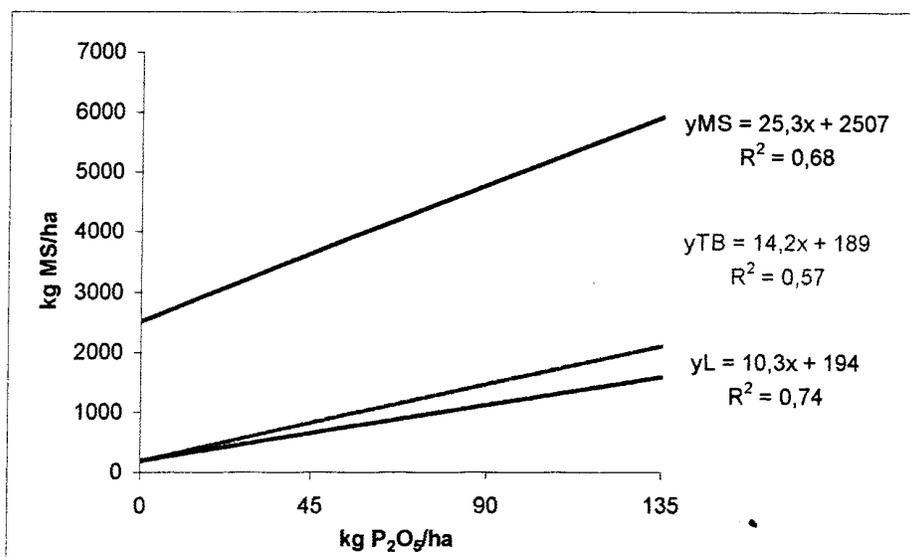


Figura 7. Respuesta a la fertilización inicial con Superfosfato simple (kg de P₂O₅/ha) para el total de MS y los distintos componentes en su primer año (TB y L).

Se debe tener en cuenta que el fósforo no solamente contribuye a una buena implantación y posteriormente asegura la persistencia productiva y el buen balance entre las especies introducidas del mejoramiento, sino que además permite remover los impedimentos que normalmente afectan una eficiente simbiosis leguminosa-rizobio (Ayala et al, 1999).

4.2.2 AÑO 2

En la producción total de materia seca y las diferentes fracciones (TB, L y GN) del segundo año se detectó una interacción significativa entre las dosis iniciales aplicadas el primer año y refertilizaciones ($P < 0,01$ para todos), es decir que los kg de MS producidos por cada kg de P₂O₅/ha agregado a la siembra varía según los niveles de fertilización anual que hayan recibido (Cuadro 24).

Para TB, en los tratamientos sin refertilizar se detectó respuesta significativa a la dosis inicial a partir de 45 kg de P₂O₅/ha aplicados a la siembra. Para los refertilizados con 30 kg de P₂O₅/ha se detectó efecto residual significativo y positivo de la fertilización inicial para todas las dosis analizadas. Esto mismo sucede para los que fueron refertilizados con 60 kg de P₂O₅/ha. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización para todas las dosis iniciales, salvo en los que no fueron fertilizados al

inicio. La mayor respuesta a la refertilización se observó con 90 kg de P_2O_5 /ha agregados al inicio. Las regresiones mostraron respuestas lineales con valores de 12,8, 27 y 36,3 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado para los tratamientos que no tuvieron fertilizaciones anuales y aquellos con 30 y 60 kg de P_2O_5 /ha de refertilización, respectivamente (Anexo 5).

El TB requiere adecuada fertilización inicial y posteriores refertilizaciones para lograr buenas producciones, es decir que si bien bajas fertilizaciones iniciales y altas refertilizaciones logran altas respuestas, la producción no llega a optimizarse. Mientras que sin fertilización inicial por más que se lo refertilice, su producción es insignificante marcando claramente la necesidad de esta leguminosa de un buen suministro de dicho nutriente desde la implantación (Cuadro 24).

No fertilizar los mejoramientos en los sucesivos años lleva inexorablemente a la pérdida de productividad de las leguminosas y en algunos casos a la desaparición de las mismas como es el caso del TB. Por lo tanto la fertilización fosfatada en los años siguientes a la siembra es una herramienta de fundamental importancia para potencializar la persistencia productiva de los mejoramientos en la Región Este del país (Bermúdez et al, 1998).

Cuadro 24. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su segundo año frente a diferentes dosis iniciales y refertilizaciones en base a Superfosfato simple (kg de P_2O_5 /ha).

<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
0	0	3653	2	241	3159
0	30	4856	9	978	3622
0	60	5659	30	1902	3295
45	0	4889	80	898	3605
45	30	7183	588	2258	3806
45	60	8949	1974	3459	3120
90	0	6859	655	1799	4076
90	30	8007	2154	2071	3405
90	60	9239	4214	1899	2619
135	0	7933	1724	2261	3261
135	30	8823	3546	1930	2773
135	60	9870	4733	1829	2730
<i>SEM</i>		262	76	94	154
<i>I</i>		**	**	**	**
<i>R</i>		**	**	**	**
<i>I*R</i>		**	**	**	**

NS= No Significativo; * = $P < 0,05$; ** = $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); dosis inicial (I); refertilización (R).

En el caso de L en los tratamientos sin refertilizar se detectó efecto residual significativo y positivo de la fertilización inicial para todo el rango de dosis analizadas. Para los refertilizados con 30 kg de P_2O_5 /ha, éste efecto se dio hasta los 45 kg de P_2O_5 /ha aplicados a la siembra. Mientras que a dosis iniciales mayores no se registraron diferencias en producción. Para los refertilizados con 60 kg de P_2O_5 /ha se observó efecto significativo de la fertilización inicial solamente en el tratamiento que fue fertilizado a la siembra con 45 kg de P_2O_5 /ha. Se detectó efecto significativo y positivo de los diferentes niveles de refertilización en aquellos tratamientos que fueron fertilizados a la siembra con 0 y 45 kg de P_2O_5 /ha. Mientras que para dosis iniciales superiores no se registró efecto de la refertilización. Las regresiones mostraron respuestas lineales con valores de 15,5 y 5,9 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado a la siembra para los tratamientos que no tuvieron fertilizaciones anuales y aquellos con 30 kg de P_2O_5 /ha de refertilización, respectivamente (Anexo 5). Al analizar la mayor dosis de refertilización (60 kg de P_2O_5 /ha), la regresión mostró una respuesta cuadrática, se observó que en el pasaje de 0 a 45 kg de P_2O_5 /ha existe una respuesta de 14 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado. Entre 45 y 90 kg de P_2O_5 /ha ésta fue de -4 y finalmente entre 90 y 135 kg de P_2O_5 /ha fue de -22 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado (Anexo 5).

El lotus responde a mayores niveles de fertilización, si bien cuando se encuentra en mezcla el trébol blanco este comienza a ejercerle competencia a mayores dosis de fertilización inicial y refertilización. A diferencia del trébol blanco, el lotus sin fertilización inicial pero con buenas refertilizaciones mostró una producción considerable marcando los bajos requerimientos de esta especie

Para la GN, no se observa una tendencia marcada en su producción frente a las diferentes estrategias de fertilización. Las menores producciones de gramínea se observan en los tratamientos en los cuales se optimiza la producción de lotus o trébol blanco, ya que en estos casos las leguminosas desplazan a la gramínea (Cuadro 24). Las regresiones mostraron respuestas lineales con valores de -6,6 y -4,9 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado para los tratamientos que tuvieron fertilizaciones anuales con 30 y 60 kg de P_2O_5 /ha de refertilización respectivamente (Anexo 5). La regresión mostró una respuesta cuadrática para los tratamientos que no tuvieron refertilización, se observó que en el pasaje de 0 a 45 kg de P_2O_5 /ha existe una respuesta de 15,5 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado. Entre 45 y 90 kg de P_2O_5 /ha ésta fue de 1,1 y finalmente entre 90 y 135 kg de P_2O_5 /ha fue de -13,3 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado.

Para la MS total, en los tratamientos sin refertilización se detectó efecto residual significativo y positivo de la fertilización inicial para todos los niveles estudiados. Para los que fueron refertilizados con 30 kg de P_2O_5 /ha, se detectó respuesta a la fertilización inicial hasta 135 kg de P_2O_5 /ha, pero de menor magnitud que los tratamientos sin refertilizar. Para los refertilizados con 60 kg de P_2O_5 /ha se detectó la misma tendencia que los refertilizados con 30 kg de P_2O_5 /ha. Se observó efecto significativo y positivo de la refertilización para todos los niveles de fertilización inicial analizados. Las

regresiones mostraron respuestas lineales con valores de 32,9, 28,3 y 28,7 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado para los tratamientos que no tuvieron fertilizaciones anuales y aquellos con 30 y 60 kg de P_2O_5 /ha de refertilización, respectivamente (Anexo 5).

El hecho de aumentar la fertilización inicial y/o las refertilizaciones provoca un aumento considerable en el porcentaje de la fracción leguminosa. Con refertilizaciones de 60 kg de P_2O_5 /ha en cualquiera de los tratamientos que tuvieron fertilización inicial se logran porcentajes superiores al 60% de dicha fracción (Cuadro 25).

Cuadro 25. Porcentajes de la fracción leguminosa frente a las diferentes estrategias de fertilización fosfatada en base a Superfosfato simple.

Refertilización (kg de P_2O_5 /ha)	Inicial (kg de P_2O_5 /ha)			
	0	45	90	135
0	7	20	36	50
30	20	40	53	62
60	34	61	66	67

4.2.3 AÑO 3

Para TB (trébol blanco) se detectó interacción dosis inicial por refertilización ($P < 0,01$). En los tratamientos sin refertilización no se detectó efecto de la fertilización inicial, además las producciones fueron despreciables. Para los que fueron refertilizados con 30 kg de P_2O_5 /ha se observó efecto de la fertilización inicial, pero las producciones no llegaron a superar los 400 kg de MS/ha. Para los refertilizados con 60 kg de P_2O_5 /ha se detectó efecto residual significativo y positivo en el pasaje de 0 a 45 y 90 a 135 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial, dándose las mayores producciones en los tratamientos con la mayor dosis inicial. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización en todos los tratamientos que fueron fertilizados al inicio, dándose la mayor respuesta a la refertilización con 135 kg de P_2O_5 /ha aplicados a la siembra (Cuadro 26).

Para L (lotus) se detectó interacción dosis inicial por refertilización ($P < 0,01$). En los tratamientos sin refertilización no se observó respuesta a la fertilización inicial. Para los que fueron refertilizados con 30 kg de P_2O_5 /ha se observó una respuesta negativa al aumento de la fertilización inicial. Para los refertilizados con 60 kg de P_2O_5 /ha se detectó una respuesta significativa y negativa a la fertilización inicial. Se observó efecto de la refertilización a bajas dosis de fertilización inicial (0 y 45 kg de P_2O_5 /ha).

Para la fracción GN (gramínea nativa) se detectó efecto significativo del nivel inicial y la refertilización ($P < 0,01$ para ambos). No se observa una tendencia clara de esta fracción frente al aumento de la dosis inicial. Las mayores producciones se observaron en los tratamientos con mayores dosis inicial (90 y 135 kg de P_2O_5/ha), lo que se puede atribuir al gran descenso de la fracción leguminosa a estas dosis con respecto al año anterior.

Cuadro 26. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su tercer año frente a diferentes niveles iniciales y refertilizaciones en kg de P_2O_5/ha .

<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
0	0	3052	3	545	2360
0	30	4214	30	1090	2915
0	60	5311	287	1820	2873
45	0	2877	3	406	2322
45	30	4524	151	1110	2900
45	60	5244	606	1233	3055
90	0	3379	7	572	2402
90	30	4320	220	759	3194
90	60	4924	583	546	3250
135	0	3788	27	407	3105
135	30	4915	354	576	3649
135	60	5388	1199	362	3014
<i>SEM</i>		243	41	52	170
<i>I</i>		*	**	**	**
<i>R</i>		**	**	**	**
<i>I*R</i>		NS	**	**	NS

NS= No Significativo; * = $P < 0,05$; ** = $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); dosis inicial (I); refertilización (R).

Para la MS total se observó efecto de la dosis inicial ($P < 0,05$) y efecto de la refertilización ($P < 0,01$). Para los tratamientos sin refertilizar se observó una tendencia a aumentar la producción a medida que se incremento la fertilización inicial, mientras que para los tratamientos refertilizados con 30 y 60 kg de P_2O_5/ha no se detectó efecto significativo de la fertilización inicial. Se observó efecto significativo de la refertilización para todas las dosis iniciales, pero el pasar de 30 a 60 kg de P_2O_5/ha de fertilización anual no tuvo efecto significativo para ninguna de las dosis iniciales analizadas. Se observa una disminución muy importante en la producción de MS total de los tratamientos que recibieron fertilización inicial, comparándolos con los del segundo año.

Para la fracción leguminosa, en general se observó un descenso de la producción con respecto al año anterior. Se observó una tendencia a aumentar el porcentaje de dicha fracción en la MS total, en la medida que se incrementó el nivel de fertilización anual.

Como fue mencionado anteriormente, la producción del mejoramiento en éste año, cae de manera muy importante. Las condiciones climáticas del año en cuestión pudieron perjudicar las especies introducidas y nativas que componen el mejoramiento (Cuadro 15). Este año se caracterizó por presentar un invierno llovedor y una primavera con precipitaciones superiores al histórico. Condiciones de anegamiento en el invierno, seguidas de un período seco no sólo afectan la performance individual de cada una de las especies, sino que también favorece la aparición de enfermedades que atacan a los lotus y los tréboles. García (1996), observó en trébol blanco que la persistencia por estolones de la siembra original no va más allá de los tres años, salvo en suelos bajos sin problemas de humedad. Bermúdez et al (2001), destacan al L por presentar una mayor vulnerabilidad al ataque de enfermedades de raíz y corona.

4.2.4 AÑO 4

Este año se caracterizó por una importante sequía desde setiembre a marzo, repercutiendo de manera negativa sobre el mejoramiento.

Para el TB se detectó interacción entre dosis inicial y refertilización ($P < 0,05$). Para 0 y 30 kg de P_2O_5 /ha de fertilización anual, no solo no hubo efecto significativo de la fertilización inicial sino que además las producciones fueron muy bajas. Para los refertilizados con 60 kg de P_2O_5 /ha, si bien hay un efecto significativo de la fertilización inicial al pasar de 0 a 45 y de 90 a 135 kg de P_2O_5 /ha al inicio, las producciones apenas superan los 1000 kg/ha de MS de TB en este último tratamiento. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización al pasar de 30 a 60 kg de P_2O_5 /ha para todas las dosis iniciales analizadas (Cuadro 27).

Para L se detectó interacción dosis inicial por refertilización ($P < 0,01$). Para los tratamientos con 0 y 30 kg de P_2O_5 /ha no se detectó efecto de la fertilización inicial. Mientras que en los refertilizados con 60 kg de P_2O_5 /ha se observó un efecto significativo y negativo de la fertilización inicial. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización hasta los 90 kg de P_2O_5 /ha aplicados a la siembra.

Olmos (2001), menciona que las especies perennes de L tienen una mayor resistencia a la sequía debido a un mayor sistema radicular que permite extraer agua de los horizontes más profundos del suelo. A través de este mecanismo, en veranos con déficit hídrico del suelo, la población de la especie introducida en la comunidad natural

podría mantener un número mayor de plantas con crecimiento vegetativo. Andrews y Jones (1978), encontraron que el género *Lotus* presenta una mayor longitud de los pelos radiculares, un mayor diámetro de raíces y un mayor porcentaje de raíces con pelos radiculares, al compararlo con la composición del sistema radicular del género *Trifolium*.

Cuadro 27. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su cuarto año frente a diferentes dosis iniciales y refertilizaciones en kg de P_2O_5 /ha.

<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
0	0	1915	2	97	1791
0	30	2951	76	524	2296
0	60	4059	584	1255	2092
45	0	2066	2	63	1963
45	30	2650	144	294	2142
45	60	4320	835	551	2603
90	0	1900	2	82	1779
90	30	2898	167	236	2435
90	60	4588	650	362	3340
135	0	1961	2	67	1853
135	30	3097	271	342	2402
135	60	4240	1043	211	2851
<i>SEM</i>		201	68	38	124
<i>I</i>		NS	**	**	**
<i>R</i>		**	**	**	**
<i>I*R</i>		NS	*	**	**

NS= No Significativo; * = $P < 0,05$; ** = $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); dosis inicial (I); refertilización (R).

Para GN se detectó interacción dosis inicial por refertilización ($P < 0,01$). Para los tratamientos refertilizados con 0 y 30 kg de P_2O_5 /ha no hubo efecto de la fertilización inicial. Mientras que para los refertilizados con 60 kg de P_2O_5 /ha se observó efecto de la fertilización inicial hasta los 90 kg de P_2O_5 /ha aplicados a la siembra. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización en los tratamientos fertilizados a la siembra con 90 y 135 kg de P_2O_5 /ha.

Para la MS total se detectó efecto de la refertilización ($P < 0,01$). Para ninguno de los niveles de refertilización se detectó efecto de la fertilización inicial. Se observó efecto significativo y positivo de la refertilización en todas las dosis iniciales analizadas. El haber refertilizado con 30 y 60 kg de P_2O_5 /ha provocó aumentos en producción de 48 y 119% respectivamente, con respecto a los tratamientos que no fueron refertilizados.

4.2.5 AÑO 5

Se ve claramente el drástico efecto de la sequía en el mejoramiento ya que provocó la desaparición casi total de la fracción leguminosa, siendo explicada la producción de MS total prácticamente en su totalidad por la gramínea. Comparando con el año anterior se observa un aumento en la producción de gramínea que se puede atribuir a las mejores condiciones climáticas que provocan aumentos de producción y aparición de nuevas plantas (Cuadro 28).

El TB desapareció totalmente del mejoramiento.

Para L si bien se detectó interacción dosis inicial por refertilización ($P < 0,01$), las producciones fueron insignificantes.

Para GN se detectó efecto de la dosis inicial y de la refertilización ($P < 0,01$ para ambos). Para los tratamientos que no fueron refertilizados no hubo efecto de la fertilización inicial. Para los refertilizados con 30 y 60 kg de P_2O_5 /ha se observó una tendencia a aumentar la producción a medida que se aumentaba la dosis inicial. Se detectó un efecto de la refertilización en los niveles de 90 y 135 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial.

Para la MS total se detectó efecto de la dosis inicial y de la refertilización ($P < 0,01$ para ambos). Debido a que el TB y el L no tuvieron incidencia en la MS total, esta última se comporta de igual manera que la GN.

Cuadro 28. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su quinto año frente a diferentes dosis iniciales y refertilización en kg de P₂O₅/ha.

<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
0	0	3905	0	4	3851
0	30	4510	0	6	4310
0	60	4524	0	13	4386
45	0	4859	0	2	4746
45	30	5045	0	2	4963
45	60	5370	0	47	5234
90	0	4521	0	2	4341
90	30	5517	0	9	5431
90	60	6022	0	55	5816
135	0	4360	0	2	4295
135	30	5064	0	39	4929
135	60	6127	0	4	5983
<i>SEM</i>		255	-	2	250
<i>I</i>		**	-	**	**
<i>R</i>		**	-	**	**
<i>I*R</i>		NS	-	**	NS

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); dosis inicial (I); refertilización (R).

4.2.6 TOTAL ACUMULADO

Para TB (trébol blanco) se detectó interacción dosis inicial por refertilización (P<0,01). Se observó que hay respuesta positiva de la fertilización inicial para todos los niveles de fertilización anual analizados, siendo la respuesta cada vez mayor en la medida que se incremento la refertilización (Cuadro 29). Las regresiones mostraron respuestas lineales con valores de 29,7, 43,2 y 58,4 kg de MS por cada kg de P₂O₅/ha agregado para los tratamientos que no tuvieron fertilizaciones anuales y aquellos con 30 y 60 kg de P₂O₅/ha de refertilización, respectivamente (Anexo 6).

Se verifica que la producción de trébol blanco sin fertilización inicial realiza aportes de muy baja magnitud a la producción de MS total. Observando el cuadro 29 se reafirma la necesidad por fósforo tanto al inicio como en las refertilizaciones dado sus altos requerimientos por éste nutriente para lograr una buena implantación y mantener una alta persistencia vegetativa a lo largo del mejoramiento.

Para L (lotus) se detectó interacción dosis inicial por refertilización (P<0,01). En los tratamientos sin refertilizar se detectó efecto significativo y positivo de la

fertilización inicial para todo el rango de dosis analizados. Para los refertilizados con 30 kg de P_2O_5/ha , éste efecto se dio hasta los 45 kg de P_2O_5/ha aplicados a la siembra. Mientras que a dosis iniciales mayores no se registraron diferencias en producción. Para los refertilizados con 60 kg de P_2O_5/ha se observó efecto significativo de la fertilización inicial solamente en el tratamiento que fue fertilizado a la siembra con 45 kg de P_2O_5/ha . Se detectó efecto significativo y positivo de los diferentes niveles de refertilización en aquellos tratamientos que fueron fertilizados a la siembra con 0 y 45 kg de P_2O_5/ha , mientras que para dosis inicial superiores no se registró efecto de la refertilización. Las regresiones mostraron respuestas lineales con valores de 23,5, 11,8 y -11,5 kg de MS por cada kg de P_2O_5/ha agregado para los tratamientos que no tuvieron fertilizaciones anuales y aquellos con 30 y 60 kg de P_2O_5/ha de refertilización, respectivamente (Anexo 6).

El comportamiento del lotus se debe principalmente a que en los tratamientos con mayores niveles de fósforo, la importante presencia de trébol blanco compite con el lotus, provocando que este último no obtenga diferencias significativas en producción al aumentar las refertilizaciones.

Para la GN (gramínea nativa) se registró efecto de la fertilización inicial y de la refertilización ($P < 0,01$ para ambos). Para los que fueron refertilizados con 0 y 30 kg de P_2O_5/ha no se detectó efecto de la fertilización inicial. Para los refertilizados con 60 kg de P_2O_5/ha se detectó efecto significativo y positivo de la fertilización inicial al pasar de 0 a 90 kg de P_2O_5/ha aplicados a la siembra. Se detectó un efecto de la refertilización para todos los niveles iniciales analizados. La gramínea en todos los casos realiza un importante aporte al total de MS total, no solo por el porcentaje que ocupa dentro de ésta sino también por la nueva composición de la gramínea que se encuentra en los mejoramientos.

Cuadro 29. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes trébol blanco (TB), lotus (L) y gramínea nativa (GN) en kg de MS/ha de un mejoramiento en sus cinco años frente a diferentes dosis iniciales y refertilizaciones en kg de P₂O₅/ha.

<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>TB</i>	<i>L</i>	<i>GN</i>
0	0	14750	30	956	12888
0	30	18308	124	2638	14544
0	60	21415	909	5024	14081
45	0	19320	1360	2258	14609
45	30	23350	1741	4384	15693
45	60	28055	4244	6130	16107
90	0	21749	2160	3670	14322
90	30	25689	4175	4187	16103
90	60	30467	7358	4291	16808
135	0	23860	4223	4007	14198
135	30	27105	5798	4470	15362
135	60	30880	8630	3917	16185
<i>SEM</i>		696	258	200	448
<i>I</i>		**	**	**	**
<i>R</i>		**	**	**	**
<i>I*R</i>		NS	**	**	NS

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); dosis inicial (I); refertilización (R).

En la MS total se observa que hay un efecto de la dosis inicial y de la refertilización (P<0,01 para ambos). Se registró respuesta a la fertilización inicial para todos los niveles de refertilización analizados. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización para todos los niveles de fertilización inicial analizados. Las regresiones mostraron respuestas lineales con valores de 66,1, 63,8 y 68,5 kg de MS por cada kg de P₂O₅/ha agregado para los tratamientos que no tuvieron fertilizaciones anuales y aquellos con 30 y 60 kg de P₂O₅/ha de refertilización, respectivamente (Anexo 6).

Observando los cuadros 29 y 30 se ve que manejando 60 kg de P₂O₅ en la refertilización en los tratamientos que tuvieron fertilización inicial, el aumento de ésta no provocó aumentos significativos en la producción de MS total ni en el porcentaje de la fracción leguminosa, pero si lo hizo en la composición de ésta última.

Cuadro 30. Porcentajes de la fracción leguminosa frente a las diferentes estrategias de fertilización fosfatada en base a Superfosfato simple.

Refertilización (kg de P ₂ O ₅ /ha)	Inicial (kg de P ₂ O ₅ /ha)			
	0	45	90	135
0	7	19	27	35
30	15	26	33	38
60	28	37	38	41

Ayala et al (1999), señalan que otros elementos a considerar a la hora de decidir la refertilización son el número de plantas por metro cuadrado y vigor de la leguminosa, que se puede determinar por el tamaño de hojas y en el caso de las estoloníferas o rizomatosas por el diámetro de estolones y rizomas. Si la población y vigor de la leguminosa es muy pobre no tiene sentido refertilizar con dosis altas, dado que el potencial de respuesta se va a ver limitado, a no ser que se apueste a la regeneración del mejoramiento a través del banco de semillas o por el agregado de la misma nuevamente. Si el stand y vigor de la leguminosa es bueno cobra sentido refertilizar ya que el potencial de respuesta se maximiza. Cuando estos parámetros son excepcionales se podría pensar en niveles de refertilización moderados.

4.2.7 CONCLUSIONES

- ✓ Para la fracción leguminosa (TB +L) y MS total hubo efecto residual de la fertilización inicial hasta el segundo año. Hubo efecto de la refertilización hasta el cuarto año (quinto año con sequía).
- ✓ Las mayores producciones de TB se obtuvieron cuando se aplicaron las mayores dosis iniciales y anuales (135-60 kg de P₂O₅/ ha).
- ✓ Para L al aumentar las dosis de fertilización la producción disminuye debido a la competencia que le ejerce el TB a esas dosis.

4.3 EXPERIMENTO III: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A *Lotus subbiflorus* cv. El Rincón

Se presenta la información correspondiente a 4 años de evaluación de un mejoramiento, manejando 3 dosis iniciales (30, 60 y 90 kg de P₂O₅/ha), 2 niveles de refertilización (0 y 30 kg de P₂O₅/ha) y 4 fuentes fosfatadas (Fosforita natural, Hiperfosfato, Hyperfos y Superfosfato simple). Los resultados se presentan para cada año y para el total acumulado de los 4 años.

4.3.1 AÑO 1

Para lotus El Rincón (LR) no se registraron diferencias significativas entre fuentes ni niveles iniciales sin embargo, se observó una tendencia a aumentar la producción hasta el agregado de 60 kg de P₂O₅/ha para todas las fuentes salvo para Hyperfos (PA) que disminuye su producción a medida que se incrementa la dosis inicial (cuadro 31). Al pasar de 60 a 90 kg de P₂O₅/ha al inicio, se detectó una tendencia a disminuir la producción con todas las fuentes salvo para Fosforita natural (FN). Con respecto a las fuentes, no se observó una superioridad de alguna fuente en particular para las diferentes dosis iniciales analizadas.

Cuadro 31. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus El Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento de primer año frente al agregado diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P₂O₅/ha.

<i>Fuente</i>	<i>Inicial</i>	<i>MS</i>	<i>LR</i>	<i>Resto</i>
<i>FN</i>	<i>30</i>	2250	651	1599
	<i>60</i>	2861	1279	1583
	<i>90</i>	2881	1380	1501
<i>PA</i>	<i>30</i>	2919	1698	1226
	<i>60</i>	3183	1547	1636
	<i>90</i>	2822	1270	1552
<i>H</i>	<i>30</i>	2832	1282	1550
	<i>60</i>	3343	1948	1395
	<i>90</i>	2981	1393	1588
<i>S</i>	<i>30</i>	2345	640	1704
	<i>60</i>	2992	1556	1435
	<i>90</i>	2717	1216	1501
<i>SEM</i>		406	475	173
<i>F</i>		NS	NS	NS
<i>I</i>		*	NS	NS
<i>F*I</i>		NS	NS	NS

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Hyperfos (PA); Hiprfosfato (H); Superfosfato simple (S); fuente (F); dosis inicial (I).

Para la fracción Resto, no se observó una respuesta definida al aumento de las dosis iniciales, ni tampoco se detectó una superioridad de una fuente en particular con respecto a las otras.

Para la MS total hay efecto de la dosis inicial ($P < 0,05$) (Cuadro 31), con incrementos hasta los 60 kg de P_2O_5/ha para luego descender cuando se sigue aumentando la dosis inicial, salvo para los manejados con FN (fosforita natural) como fuente fosfatada. Se observó una tendencia a la superioridad de PA (hyperfos) y H (hiperfosfato) hasta 60 kg de P_2O_5/ha , por encima de esta dosis no hay una tendencia clara.

4.3.2 AÑO 2

Para LR se detectó interacción entre dosis inicial, fuente y refertilización ($P < 0,01$). Para los tratamientos sin refertilización, la única fuente que tuvo efecto significativo y positivo de aumentar la dosis inicial hasta 60 kg de P_2O_5/ha fue la FN (cuadro 32). Al pasar de 60 a 90 kg de P_2O_5/ha al inicio, la única fuente que presentó efecto significativo y positivo fue S. Para los tratamientos refertilizados, no hubo efecto significativo al aumentar la dosis inicial hasta 60 kg de P_2O_5/ha para ninguna de las fuentes. Al pasar de 60 a 90 kg de P_2O_5/ha se detectó efecto significativo y positivo al utilizar PA y S como fuente fosfatada. Tanto para los tratamientos refertilizados como para los que no lo fueron, se detectó una tendencia a la superioridad de la FN respecto al resto de las fuentes. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización para todas las fuentes utilizadas y todas las dosis iniciales analizadas.

Para la fracción Resto se detectó interacción entre fuente, dosis inicial y refertilización ($P < 0,05$) (Cuadro 32). Para los tratamientos sin refertilizar, la única fuente que presentó efecto significativo y positivo para todas las dosis iniciales analizadas fue H. Para los tratamientos que fueron refertilizados, se detectó efecto significativo y positivo solamente para FN al pasar de 30 a 60 kg de P_2O_5/ha aplicados a la siembra. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización para todas las dosis iniciales analizadas para los tratamientos que recibieron FN y S como fuente fosfatada.

Para la MS total se detectó interacción entre la fuente, dosis inicial y refertilización ($P < 0,01$). Se detectaron exactamente las mismas tendencias que para la fracción Resto, siendo ésta explicada por la poca incidencia que tiene el LR en la MS total del mejoramiento (Cuadro 32).

Cuadro 32. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento de segundo año frente a diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P₂O₅/ha.

<i>Fuente</i>	<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>LR</i>	<i>Resto</i>
<i>FN</i>	30	0	3067	50	3017
	30	30	4981	630	4351
	60	0	4615	232	4383
	60	30	6139	639	5500
	90	0	4637	313	4324
	90	30	5530	564	4967
<i>PA</i>	30	0	3710	33	3677
	30	30	4020	195	3825
	60	0	4444	91	4353
	60	30	4626	239	4387
	90	0	3626	100	3528
	90	30	4926	616	4309
<i>H</i>	30	0	2839	51	2787
	30	30	4683	441	4242
	60	0	3734	77	3657
	60	30	5193	379	4814
	90	0	4480	158	4322
	90	30	5096	358	4738
<i>S</i>	30	0	3469	24	3445
	30	30	4775	234	4541
	60	0	3279	37	3242
	60	30	5336	310	5026
	90	0	4915	268	4647
	90	30	5927	530	5398
<i>SEM</i>			230	40	215
<i>F</i>			**	**	**
<i>I</i>			**	**	**
<i>F*I</i>			**	**	**
<i>R</i>			**	**	**
<i>F*R</i>			**	**	**
<i>I*R</i>			NS	NS	NS
<i>F*I*R</i>			**	**	*

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Hyperfos (PA); Hiperfosfato (H); Superfosfato simple (S); fuente (F); dosis inicial (I).

4.3.3 AÑO 3

Este año se caracterizó por una sequía muy importante la cual ocurrió desde setiembre a marzo, repercutiendo de manera importante en la producción estival del

mejoramiento, pero no eliminando al LR (lotus El Rincón) debido a que al ser anual pasa el verano como semilla y no de forma vegetativa como es el caso de un mejoramiento con especies perennes.

Cuadro 33. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus El Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento de tercer año frente a diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P_2O_5 /ha.

<i>Fuente</i>	<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>LR</i>	<i>Resto</i>
<i>FN</i>	30	0	565	18	547
	30	30	2070	1070	1000
	60	0	838	41	796
	60	30	2398	1296	1101
	90	0	746	133	614
	90	30	2404	1136	1268
<i>PA</i>	30	0	742	32	710
	30	30	2154	1039	1114
	60	0	657	44	613
	60	30	1734	847	891
	90	0	674	90	584
	90	30	1996	970	1027
<i>H</i>	30	0	642	16	626
	30	30	1744	735	1010
	60	0	664	77	587
	60	30	1839	830	1008
	90	0	865	180	686
	90	30	2024	946	1078
<i>S</i>	30	0	832	25	806
	30	30	1652	637	1015
	60	0	639	41	599
	60	30	1855	836	1019
	90	0	796	103	693
	90	30	1974	804	1170
<i>SEM</i>			135	60	82
<i>F</i>			*	**	NS
<i>I</i>			NS	**	NS
<i>F*I</i>			NS	NS	NS
<i>R</i>			**	**	**
<i>F*R</i>			*	**	NS
<i>I*R</i>			NS	NS	NS
<i>F*I*R</i>			NS	NS	NS

NS= No Significativo; * = $P < 0,05$; ** = $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Hyperfos (PA); Hiperfosfato (H); Superfosfato simple (S); fuente (F); dosis inicial (I).

Para LR (lotus El Rincón) se observó interacción fuente por refertilización ($P < 0,01$) y efecto de la dosis inicial ($P < 0,01$). Para los tratamientos que no fueron

refertilizados, la producción fue insignificante para todas la dosis y fuentes analizadas (Cuadro 33). Para los tratamientos refertilizados no se observó un patrón determinado al aumentar la dosis inicial para ninguna de las fuentes. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización para todas la fuentes y dosis iniciales analizadas.

Para la fracción Resto se registró efecto de la refertilización ($P < 0,01$) (Cuadro 33). Para los tratamientos que no fueron refertilizados, no se observa una respuesta clara a la fertilización inicial de ninguna de las fuentes, ni tampoco una superioridad definida entre ellas. Para los tratamientos refertilizados se observó una tendencia a aumentar la producción al pasar de 60 a 90 kg de P_2O_5/ha al inicio para todas las fuentes. Se detectó un efecto significativo y positivo de la refertilización para todas las fuentes y las dosis iniciales analizadas.

Para la MS total se detectó interacción fuente por refertilización ($P < 0,01$) (Cuadro 33). Los tratamientos sin refertilizar registraron un comportamiento similar que el mencionado al analizar la fracción Resto. Para los tratamientos refertilizados no se detectó un efecto claro de la fertilización inicial para ninguna de las fuentes. A partir de los 60 kg de P_2O_5/ha , las producciones registradas utilizando FN (fosforita natural) como fuente fosfatada fueron significativamente superiores que las obtenidas con las demás fuentes. Se detectó un efecto significativo y positivo de la refertilización para todas las fuentes y las dosis iniciales analizadas.

4.3.4 AÑO 4

Para LR se detectó interacción fuente por refertilización ($P < 0,05$). Para los tratamientos que no fueron refertilizados la producción fue insignificante para todas la dosis y fuentes analizadas (cuadro 34). Para los que recibieron refertilización, no se observó un aumento significativo de la producción al aumentar la dosis inicial para ninguna de las fuentes analizadas. A partir de los 60 kg de P_2O_5/ha aplicados a la siembra se registró una superioridad en producción de forraje de los tratamientos que fueron tratados con H y S. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización para todas las fuentes y dosis iniciales analizadas.

Para la fracción Resto se detectó interacción fuente por dosis inicial ($P < 0,05$) y un efecto de la refertilización ($P < 0,01$) (Cuadro 34). Para los tratamientos sin refertilizar se observó una tendencia a aumentar la producción a medida que aumenta la dosis inicial para todas las fuentes salvo para PA en donde el comportamiento es inverso. Para los tratamientos refertilizados se detectó efecto positivo de la fertilización inicial al pasar de 30 a 60 kg de P_2O_5/ha para todas las fuentes, mientras que al pasar de 60 a 90 kg de P_2O_5/ha al inicio hay un efecto negativo en producción para todas las fuentes, salvo para

H que aumenta. Se registró una tendencia a la superioridad de la FN en producción de forraje frente a las otras fuentes para todas las dosis iniciales analizadas. En general se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización para todas las fuentes y dosis iniciales analizadas.

Cuadro 34. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus El Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento de cuarto año frente a diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P₂O₅/ha.

<i>Fuente</i>	<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>LR</i>	<i>Resto</i>
<i>FN</i>	30	0	3546	351	3195
	30	30	6800	2159	4641
	60	0	4466	475	3991
	60	30	7853	1885	5968
	90	0	4597	525	4072
	90	30	7112	1845	5268
<i>PA</i>	30	0	4672	514	4158
	30	30	5723	1639	4085
	60	0	4118	672	3447
	60	30	6558	1825	4734
	90	0	3499	549	2950
	90	30	6042	1726	4316
<i>H</i>	30	0	2989	335	2654
	30	30	6095	2442	3653
	60	0	3506	575	2932
	60	30	7021	2386	4635
	90	0	4470	653	3817
	90	30	7480	2364	5115
<i>S</i>	30	0	3324	450	2874
	30	30	6555	2175	4381
	60	0	3892	639	3252
	60	30	7496	2324	5171
	90	0	4738	746	3992
	90	30	7119	2392	4727
<i>SEM</i>			347	217	365
<i>F</i>			*	*	*
<i>I</i>			**	NS	**
<i>F*I</i>			*	NS	*
<i>R</i>			**	**	**
<i>F*R</i>			*	*	NS
<i>I*R</i>			NS	NS	NS
<i>F*I*R</i>			NS	NS	NS

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Hyperfos (PA); Superfosfato simple (S); Hiperfosfato (H); fuente (F); dosis inicial (I).

Para MS total se encontró interacción fuente por refertilización ($P<0,05$) y fuente por dosis inicial ($P<0,05$) (Cuadro 34). Se detectó la misma tendencia que para la fracción Resto, salvo que en los tratamientos refertilizados la FN no se diferenció tanto de las otras fuentes y el efecto de la refertilización es más marcado que lo que ocurrió en la fracción antes mencionada.

4.3.5 TOTAL ACUMULADO

Para LR (lotus El Rincón) se detectó efecto de la refertilización ($P<0,01$). Para los tratamientos que no fueron refertilizados, se observó que al aplicar la menor dosis inicial (30 kg de P_2O_5 /ha) la mayor producción de LR se registró al aplicar PA (hyperfos) a la siembra seguido por H (hiperfosfato), FN (fosforita natural) y por último S (superfosfato simple) (cuadro 35). Al aumentar la dosis inicial este comportamiento no se mantiene y al aplicar 90 kg de P_2O_5 /ha no hay diferencias entre fuentes. Los tratamientos con FN fueron los que siempre aumentaron su producción al aumentar la dosis inicial. Para los tratamientos refertilizados se observó un efecto positivo de la fertilización inicial al pasar de 30 a 60 kg de P_2O_5 /ha para todas las fuentes. Al pasar de 60 a 90 kg de P_2O_5 /ha no mantiene un comportamiento definido.

Para la fracción Resto se detectó interacción fuente por dosis inicial ($P<0,01$) y un efecto de la refertilización ($P<0,01$) (Cuadro 25). En los tratamientos que no fueron refertilizados no hay un efecto claro de la fertilización inicial para ninguna de las fuentes, ni una superioridad definida de alguna de éstas. Para los tratamientos refertilizados, aquellos que tuvieron como fuente fosfatada FN (fosforita natural) y PA (hyperfos) registraron un efecto positivo al pasar de 30 a 60 kg de P_2O_5 /ha y negativo al pasar de 60 a 90 kg de P_2O_5 /ha. H (hiperfosfato) y S (superfosfato simple) mostraron un efecto positivo en todo el rango de dosis analizadas. La dosis en donde se registró una superioridad a favor de una de las fuentes fue con 60 kg de P_2O_5 /ha, y ésta fue a favor de la FN. Se detectó efecto significativo y positivo de la refertilización para todas las dosis iniciales analizadas y las fuentes, salvo para PA en el cual a la menor dosis inicial no hay un efecto tan marcado de la refertilización.

Para la MS total se detectó interacción fuente por dosis inicial ($P<0,01$) y fuente por refertilización ($P<0,01$) (Cuadro 25). Para los tratamientos sin refertilizar, se detectó efecto positivo de la fertilización inicial para todas las fuentes, salvo para PA en el cual el comportamiento fue inverso. No se observó una superioridad de ninguna de las fuentes fosfatadas empleadas frente a las dosis iniciales analizadas. Para los tratamientos refertilizados se observó las mismas tendencias que para la fracción Resto. Al analizar la MS total sí se observó que las producciones de forraje obtenidas con PA fueron inferiores con respecto a las registradas con el resto de las fuentes en todo el rango de

dosis analizados. Se detectó un efecto significativo y positivo de la refertilización para todas las fuentes y todas dosis iniciales analizadas, dándose la mayor respuesta a la refertilización con la dosis de 60 kg de P₂O₅/ha aplicados a la siembra con FN como fuente fosfatada

Cuadro 35. Producción total de materia seca (MS) y de sus componentes Lotus Rincón (LR) y Resto en kg de MS/ha de un mejoramiento en sus cuatro años frente a diferentes dosis iniciales y fuentes en kg de P₂O₅/ha.

<i>Fuente</i>	<i>Inicial</i>	<i>Refert.</i>	<i>MS</i>	<i>LR</i>	<i>Resto</i>
<i>FN</i>	<i>30</i>	<i>0</i>	9707	1334	8371
	<i>30</i>	<i>30</i>	15823	4244	11578
	<i>60</i>	<i>0</i>	12499	1706	10793
	<i>60</i>	<i>30</i>	19531	5419	14113
	<i>90</i>	<i>0</i>	12753	2272	10481
	<i>90</i>	<i>30</i>	18036	5003	13033
<i>PA</i>	<i>30</i>	<i>0</i>	12327	2590	9737
	<i>30</i>	<i>30</i>	14530	4247	10283
	<i>60</i>	<i>0</i>	12256	2121	10135
	<i>60</i>	<i>30</i>	16253	4692	11561
	<i>90</i>	<i>0</i>	10764	2180	8583
	<i>90</i>	<i>30</i>	15644	4409	11235
<i>H</i>	<i>30</i>	<i>0</i>	9234	1986	7248
	<i>30</i>	<i>30</i>	15422	4599	10824
	<i>60</i>	<i>0</i>	11238	2688	8550
	<i>60</i>	<i>30</i>	17406	5531	11874
	<i>90</i>	<i>0</i>	12312	1985	10327
	<i>90</i>	<i>30</i>	18064	5460	12605
<i>S</i>	<i>30</i>	<i>0</i>	9723	860	8864
	<i>30</i>	<i>30</i>	15571	3966	11606
	<i>60</i>	<i>0</i>	10844	2373	8471
	<i>60</i>	<i>30</i>	17635	4926	12709
	<i>90</i>	<i>0</i>	12810	2028	10782
	<i>90</i>	<i>30</i>	18093	5246	12848
<i>SEM</i>			653	604	571
<i>F</i>			*	NS	**
<i>I</i>			**	NS	**
<i>F*I</i>			**	NS	**
<i>R</i>			**	**	**
<i>F*R</i>			**	NS	NS
<i>I*R</i>			NS	NS	NS
<i>F*I*R</i>			NS	NS	NS

NS= No Significativo; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); Fosforita natural (FN); Hyperfos (PA); Hiperfosfato (H); Superfosfato simple (S); fuente (F); dosis inicial (I).

4.3.6 CONCLUSIONES

- ✓ En LR en el primer año el pasar de 30 a 60 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial produjo una respuesta de 25 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha agregado para el promedio de FN, S, y H. En los años sucesivos no se encontró un patrón de respuesta a la fertilización inicial.
- ✓ Hubo efecto de la refertilización para todas las fuentes, tanto para LR como para MS total, siendo dicha respuesta superior en LR.
- ✓ La FN fue la fuente fosfatada con la cual se registraron las mayores producciones de forraje de MS total en comparación con el resto de las fuentes analizadas. Al realizar esta comparación en LR, la fuente con la cual las producciones fueron mayores fue con H.

4.4 EXPERIMENTO IV: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A *Lotus pedunculatus* cv. Grasslands Maku

Se presenta la información correspondiente a los dos primeros años (2000-2001) de un mejoramiento en base a *Lotus pedunculatus* cv. Grasslands Maku, manejando tres niveles iniciales (0, 30 y 60 kg de P₂O₅/ha) y cuatro estrategias de fertilización anual al segundo año (30, 60, 90 y 120 kg de P₂O₅/ha) en base a Hyperfos. Los resultados se presentan para cada año y para el total acumulado de los dos años.

4.4.1 AÑO 1

En el cuadro 36 se observa una respuesta significativa ($P < 0,01$) de la fertilización inicial tanto para materia seca total (MST) como para materia seca de Maku (MSM). En la MST el hecho de agregar 30 y 60 kg de P₂O₅/ha producen un 34 y un 44% más respectivamente con relación al testigo sin fertilización. Mientras que para MSM el mismo pasaje provoca aumentos de 465 y 853% respectivamente. Se demuestra así la necesidad que tienen los mejoramientos de ser fertilizados a la implantación adecuadamente, de forma de promover un rápido establecimiento de la leguminosa sembrada que le permita competir y sustituir a las especies nativas del tapiz.

Cuadro 36. Respuesta a la fertilización inicial (kg de P₂O₅/ha) en la producción total de materia seca (MST) y de la fracción de Lotus Maku (MSM) para un mejoramiento de primer año.

<i>Fertilización inicial</i>	<i>MST (kg/ha)</i>	<i>MSM (kg/ha)</i>
0	5487	322
30	7356	1818
60	7873	3068
<i>SEM</i>	298	64
<i>I</i>	**	**

NS= no significativo; *= $P < 0,05$; **= $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); nivel inicial (I).

La MST como la fracción Lotus Maku respondieron en forma lineal y positiva frente a dosis crecientes de fertilización inicial, registrándose incrementos de 39,8 y 45,8 kg de MS/ha por cada kg de P₂O₅/ha agregado para MST y MSM respectivamente (Figura 8) (Anexo 7). La respuesta de MSM fue superior que la encontrada por Carámbula et al (1994 b), con valores de 19,6 kg de MS/ha por cada kg de P₂O₅/ha entre

40 y 80 kg de P_2O_5/ha , y también fue superior a la encontrada por Bemhaja (1998 a) con 16,3 kg de MS/ha por cada kg de P_2O_5/ha con 80 kg de P_2O_5/ha .

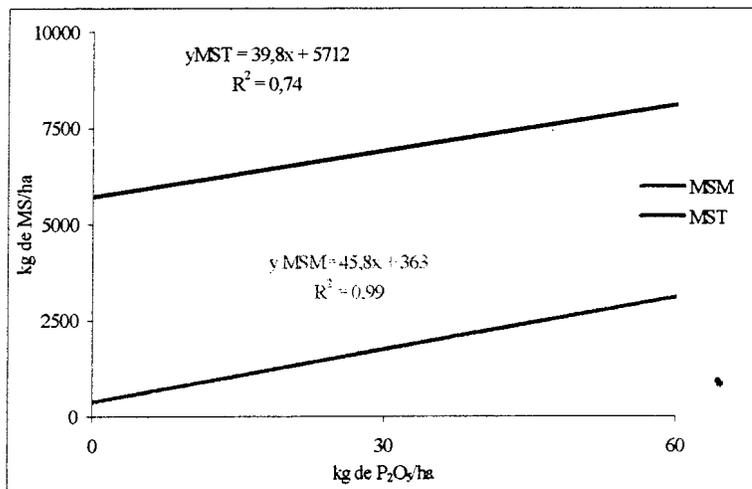


Figura 8. Respuesta a la fertilización inicial de la materia seca total (MST) y de la fracción leguminosa (MSM) de un mejoramiento con Lotus Maku de primer año.

4.4.2 AÑO 2

Tanto para MST como MSM (Cuadro 37) se encontró respuesta significativa y positiva a la fertilización inicial entre 30 y 60 kg de P_2O_5/ha para MST y MSM ($P < 0,01$ para ambos). El hecho de pasar de 30 a 60 kg de P_2O_5/ha produce incrementos para MST y MSM de 11 y 24% respectivamente, mostrando un efecto residual de la fertilización aplicada a la siembra.

Cuadro 37. Respuesta a la fertilización inicial y anual (kg de P_2O_5 /ha) en la producción total de materia seca (MST) y de la fracción de Lotus Maku (MSM) para un mejoramiento de segundo año.

<i>Fertilización Inicial</i> (kg P_2O_5 /ha)	<i>MST</i> (kg/ha)	<i>MSM</i> (kg/ha)
30	8025	4971
60	8916	6168
<i>SEM</i>	516	123
<i>I</i>	**	**
<i>Fertilización Anual</i> (kg P_2O_5 /ha)	<i>MST</i> (kg/ha)	<i>MSM</i> (kg/ha)
30	7424	3918
60	8065	4742
90	9063	6335
120	9331	7282
<i>SEM</i>	730	175
<i>R</i>	**	**
<i>R*I</i>	NS	NS

NS= no significativo; *= $P<0,05$; **= $P<0,01$; error estándar de la media (SEM); nivel inicial (I); refertilización (R).

Respecto a la fertilización anual, se registró una respuesta significativa tanto en MST como en MSM ($P<0,01$) (Cuadro 37). No se encontraron diferencias significativas en MST entre las dosis de 30 y 60 o de 90 y 120 kg de P_2O_5 /ha, aunque las dosis bajas (30 y 60 kg de P_2O_5 /ha) produjeron en promedio un 19% menos que las dosis altas (90 y 120 kg de P_2O_5 /ha). Para MSM los tratamientos que recibieron los niveles anuales de 120 kg de P_2O_5 /ha superaron a los de 90, 60 y 30 kg de P_2O_5 /ha en un 15, 54 y 86% respectivamente. Las producciones de MSM fueron superiores a las encontradas por Bemhaja (1998 a), en donde se obtuvieron 2900 kg de MST/ha con 60 kg de P_2O_5 /ha de fertilización anual.

A medida que se incrementa el nivel de fósforo anual entre 30 y 120 kg de P_2O_5 /ha el porcentaje de Lotus en el total de forraje aumenta de un 53 a un 78%. Esto demuestra que a pesar de que ésta especie esta adaptada a prosperar en suelos con bajos tenores de fósforo, la misma responde de forma importante al agregado de éste nutriente (Bermúdez et al, 2002).

La regresión muestra respuestas lineales de 22,4 y 38,9 kg/ha de MST y MSM por cada kg de P_2O_5 /ha agregado en la refertilización respectivamente (Figura 9) (Anexo 8).

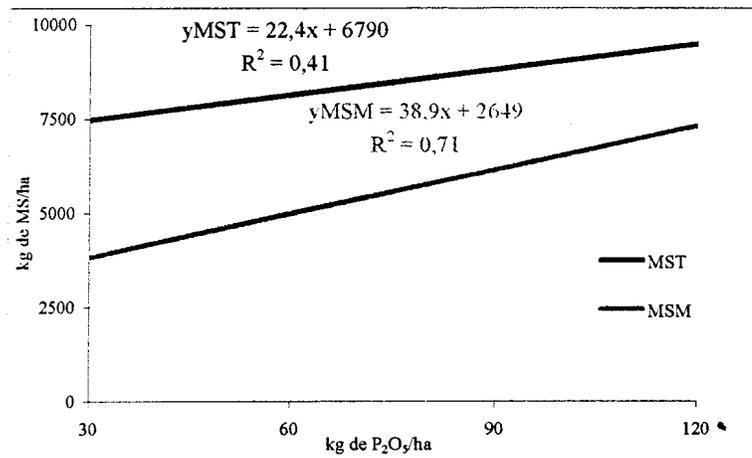


Figura 9. Respuesta a la fertilización anual de la materia seca total (MST) y de la fracción leguminosa (MSM) de un mejoramiento con Lotus Maku de segundo año.

La producción del testigo sin fertilizar fue escasa en magnitud (707 kg de MSM/ha), representando un 14% de la MST del testigo. Es decir que aunque no fue fertilizado nunca, el Lotus tuvo una implantación aceptable, pasó de ser el 6% de la MST el primer año, al 14% por lo que se podría esperar que si se lo fertilizara a partir de este segundo año, no sería de extrañar que su producción se incrementara de forma importante, equiparándose al resto de los tratamientos.

Igualmente no sería aconsejable desperdiciar la excelente respuesta de esta especie frente al agregado de altas dosis iniciales de fósforo, ya que a densidades bajas de siembra, duplicar la dosis de fertilizante equivale a ahorrar la mitad de semilla (Carámbula et al, 1994 b), lo que no es nada despreciable tomando en cuenta el costo actual de ésta. Además, de no usarse fertilizante fosfatado, un incremento en la densidad de siembra significa aumentos mínimos de área cubierta por el Lotus Maku, lo cual indica la necesidad ineludible de efectuar las siembras junto al agregado de fósforo (Carámbula et al, 1994 b).

4.4.3 TOTAL ACUMULADO

Para la producción total acumulada en los dos primeros años se observó un efecto significativo de las dosis iniciales y anuales tanto para MST (materia seca total) como para MSM (materia seca de Lotus Maku) ($P < 0,01$) en ambos casos (Cuadro 38). El total acumulado en los dos años mostró un patrón similar a lo ocurrido en el segundo año. Los tratamientos fertilizados inicialmente con 60 kg de P_2O_5/ha produjeron un 9% y un 36% más de MST y MSM respectivamente que los que recibieron 30 kg de P_2O_5/ha . Para los niveles anuales, fertilizaciones de 30 y 60 kg de P_2O_5/ha así como 90 y 120 kg de P_2O_5/ha no mostraron diferencias en MST, siendo en promedio las dosis más altas (90 y 120 kg de P_2O_5/ha) un 9% más productivas que las dosis bajas (30 y 60 kg de P_2O_5/ha).

Cuadro 38. Respuesta a la fertilización inicial y anual (kg de P_2O_5/ha) en la producción total de materia seca (MST) y de la fracción de Lotus Maku (MSM) para un mejoramiento en el total acumulado de los dos primeros años.

<i>Fertilización Inicial</i> (kg P_2O_5/ha)	<i>MST</i> (kg/ha)	<i>MSM</i> (kg/ha)
30	15381	6789
60	16789	9236
<i>SEM</i>	214	139
<i>I</i>	**	**
<i>Fertilización Anual</i> (kg P_2O_5/ha)	<i>MST</i> (kg/ha)	<i>MSM</i> (kg/ha)
30	15038	6362
60	15679	7185
90	16677	8778
120	16945	9725
<i>SEM</i>	302	196
<i>R</i>	**	**
<i>R*I</i>	NS	NS

NS= no significativo; *= $P < 0,05$; **= $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); nivel inicial (I); refertilización (R).

Para el total acumulado de MSM se encontró un aumento significativo de la leguminosa en la medida que se manejaban dosis anuales crecientes con incrementos de 13, 38 y 53% sobre la dosis anual de 30 kg de P_2O_5/ha para 60, 90 y 120 kg de P_2O_5/ha respectivamente.

En el cuadro 39 se visualiza el gran aporte que realiza la fracción leguminosa en el total de la MST del segundo año para las diferentes estrategias de fertilización. Además de un incremento sustancial en la producción de forraje, la fracción leguminosa

también permite obtener un aumento en el valor nutritivo de la pastura, concordando con los datos obtenidos por Carámbula et al (1994 b) y Risso (1998).

Cuadro 39. Porcentaje de Lotus Maku (%MSM) en la materia seca total (MST) en el segundo y en el total de los años (año 1 + año 2).

<i>Fertilización Inicial (kg P₂O₅/ha)</i>	<i>% MSM segundo año</i>	<i>%MSM total</i>
30	62	44
60	69	55
<i>Fertilización Anual (kg P₂O₅/ha)</i>	<i>% MSM segundo año</i>	<i>% MSM total</i>
30	53	42
60	59	46
90	70	53
120	78	57

La producción de MST fue similar en los dos años (7442 y 7742 kg de MS/ha para el año 1 y año 2 respectivamente). Para el caso de MSM se observa en el promedio de los tratamientos un mayor aporte del segundo año (2264 y 4553 kg de MS/ha para el año 1 y año 2 respectivamente), fundamentalmente por las dosis de refertilización y la capacidad colonizadora de Lotus Maku que se expresa luego del primer año.

Cuadro 40. Porcentaje de Lotus Maku (%MSM) del segundo año sobre la producción total (MSM año 1+ MSM año 2) y porcentaje de la materia seca total (%MST) en el segundo año en la materia seca total (MST año 1 + MST año 2).

<i>Fertilización Inicial (kg P₂O₅/ha)</i>	<i>% MST segundo año en MST (MST 1 + MST 2)</i>	<i>% MSM segundo año en MSM (MSM 1 + MSM 2)</i>
30	52	73
60	53	67
<i>Fertilización Anual (kg P₂O₅/ha)</i>	<i>% MST segundo año en MST (MST 1 + MST 2)</i>	<i>% MSM segundo año en MSM (MSM 1 + MSM 2)</i>
30	49	62
60	51	66
90	54	72
120	55	75

La contribución de la MST en el segundo año estuvo entre el 49-55% del total de la MST producida. La leguminosa producida en el segundo año resultó entre el 62 al

75% del total de los dos años, incrementándose su aporte cuando se hacían políticas de fertilización más intensas (Cuadro 40).

El Lotus Maku a pesar de ser eficiente a bajos niveles de fósforo muestra una alta respuesta al agregado de éste, ya sea inicial como anual. A fertilizaciones anuales mayores, los aumentos en MSM (materia seca Lotus Maku) son de mayor magnitud que los de MST (materia seca total). Trollove et al (1996 a y b), encontraron que el hecho de fertilizar el Lotus Maku produce aumentos en su rendimiento, en la relación tallo/raíz, en la cantidad de fósforo absorbido (lo que aumenta la concentración de fósforo en el forraje) y en el crecimiento radicular, parámetros que no se midieron en el presente trabajo. A su vez, señalan que las leguminosas acidifican su rizósfera, permitiéndoles modificar la solubilidad del fósforo. En este sentido el *Lotus pedunculatus* ha demostrado ser la leguminosa de mayor habilidad para obtener más fósforo a partir de fuentes de baja solubilidad ya que provoca una mayor disolución directa.

En mejoramientos de éste tipo, una correcta estrategia de fertilización determinará la cantidad y calidad de la pastura que permitirán cumplir los objetivos deseados según los diferentes sistemas de producción.

4.4.4 CONCLUSIONES

- ✓ *Lotus pedunculatus* cv. Grasslands Maku a demostrado un excelente comportamiento en los suelos de la Región Este cuando se lo fertiliza con fósforo.
- ✓ Es posible duplicar la producción del mejoramiento en el segundo año, fertilizando a la siembra y refertilizando.
- ✓ Se puede afirmar que hay respuesta a la fertilización inicial hasta 60 kg de P_2O_5 /ha, y anual hasta los 120 kg de P_2O_5 /ha tanto para MST como para MSM, llegando a producir en el segundo año, con ésta estrategia de fertilización, por encima de los 9000 kg MS/ha y con un 78% de Lotus Maku.

4.5 EXPERIMENTO V: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EN BASE A *Lotus pedunculatus* cv. L Experimental 627

Se presenta la información correspondiente a los dos primeros años (2000-2001) de un mejoramiento con una línea experimental de *Lotus pedunculatus* (LE 627), la cual está siendo seleccionada por INIA por mayor producción de semillas respecto al cultivar Grasslands Maku. Se compararon cuatro niveles iniciales de fertilización fosfatada (0, 40, 80 y 160 kg de P₂O₅/ha) y una misma fertilización anual al segundo año (40 kg de P₂O₅/ha) en base a Superfosfato simple. Los resultados se presentan para cada año y para el total acumulado de los dos años.

4.5.1 AÑO 1

En el cuadro 41 se observa que hay efecto de la fertilización inicial para la producción total de materia seca (MST) y para la fracción lotus 627 (MS 627) (P<0,01 para ambos). Mientras que para la MST se registraron respuestas significativas y positivas hasta los 80 kg de P₂O₅/ha, para MS627 se registraron hasta el nivel más alto evaluado (160 kg de P₂O₅/ha).

Cuadro 41. Respuesta a la fertilización inicial (kg de P₂O₅/ha) en la producción total de materia seca (MST) y de la fracción Lotus 627 (MS627) para un mejoramiento de primer año.

<i>Fertilización inicial</i>	<i>MST</i>	<i>MS627</i>
<i>0</i>	4935	478
<i>40</i>	6434	1865
<i>80</i>	7518	3234
<i>160</i>	7678	4214
<i>SEM</i>	134	46
<i>I</i>	**	**

** = P < 0,01; error estándar de la media (SEM); nivel inicial (I).

Durante el primer año del mejoramiento, la MST de los tratamientos con 80 y 160 kg de P₂O₅/ha al inicio registraron producciones en promedio un 18% y un 54% superiores que los tratamientos que fueron fertilizados inicialmente con 40 y 0 kg de P₂O₅/ha respectivamente.

Para la MS627, el tratamiento fertilizado con 160 kg de P_2O_5 /ha, superó en un 30%, 126% y 782% a los tratamientos que fueron fertilizados con 80, 40 y 0 kg de P_2O_5 /ha respectivamente.

En el cuadro 42 puede observarse como se modifica la composición del mejoramiento por efecto de la fertilización inicial, detectándose incrementos sustanciales de la fracción leguminosa con el agregado de dosis crecientes de Superfosfato simple, lo que se traduce en una mejora de la calidad del total del forraje del mejoramiento.

Cuadro 42. Porcentaje de la MS627, en la MST en un mejoramiento de primer año, según diferentes niveles de fertilización inicial (kg de P_2O_5 /ha).

<i>Fertilización inicial</i>	<i>% Lotus 627</i>
0	10
40	29
80	43
160	55

Se debe destacar las muy buenas producciones del Lotus 627 y del mejoramiento en general, ya en su primer año. Se observa la mayor respuesta del Lotus 627 al aumentar las dosis de fósforo en comparación con los aumentos que se producen en la MST, explicándose el aumento de ésta, por aumentos de la MS627 y no por aumentos de otras fracciones. Se observa que al pasar de 0 a 80 kg de P_2O_5 /ha hay un efecto de adición ya que el resto se mantiene relativamente constante y la MST aumenta. Mientras que el pasar de 80 a 160 kg de P_2O_5 /ha no provoca aumentos en la MST pero sí de MS627, reflejándose un efecto de sustitución de especies (Cuadro 41).

Si bien el género Lotus es eficiente a bajos niveles de fósforo (Carámbula et al, 1994 b), se observa la buena respuesta de ésta especie sembrada en cobertura hasta los niveles más altos de fósforo.

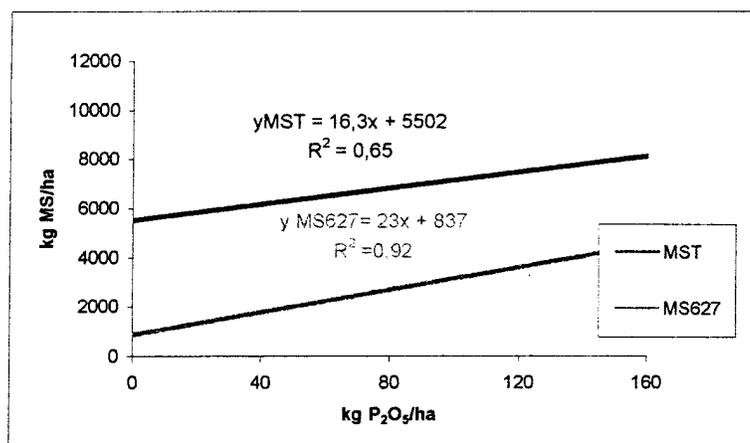


Figura 10. Respuesta a la fertilización fosfatada inicial con Superfosfato simple (kg de P₂O₅/ha) de materia seca total (MST) y Lotus 627 (MS627) en un mejoramiento en su primer año.

Observando las regresiones se ve que se producen incrementos de 16,3 y 23,0 kg de MS/ kg de P₂O₅/ha agregado para MST y MSM respectivamente (Figura 10) (Anexo 9).

4.5.2 AÑO 2

En el cuadro 43 se observa que hay efecto en la producción del segundo año frente a los diferentes niveles de fertilización inicial en el año previo para MST y MS627 ($P < 0,01$ para ambos). Se detectaron respuestas significativas y positiva hasta los 40 kg de P₂O₅/ha para MST y hasta 80 kg de P₂O₅/ha para MS627.

Cuadro 43. Producción total de materia seca (MST) y Lotus 627 (MS627) en kg de MS/ha de un mejoramiento en su segundo año frente a diferentes niveles iniciales y 40 kg de P₂O₅/ha anuales de fósforo.

Fertilización inicial	MST	MS627
0	6672	475
40	9141	3060
80	10176	4301
160	10238	4711
SEM	395	161
I	**	**

** = $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); nivel inicial (I).

Los tratamientos a los cuales se les aplicó fósforo tanto el primer como el segundo año, produjeron en promedio un 48% más de MST que el que solamente fue refertilizado. La producción del Lotus 627 en los niveles más altos de fertilización inicial (80 y 160 kg de P_2O_5 /ha) fue en promedio un 47 y 849% superior con respecto a la de 40 y 0 kg de P_2O_5 /ha respectivamente.

Los tratamientos que tuvieron fertilización inicial incrementaron la producción de MST, a igual nivel inicial en más de 2500 kg de MS/ha, con relación al primer año. La MS627, registró incrementos importantes de más de 1000 kg de MS/ha en aquellos tratamientos que fueron fertilizados con 80 y 40 kg de P_2O_5 /ha al momento de la siembra, siendo muy similares las producciones en los dos años en el tratamiento que tuvo 160 kg de P_2O_5 /ha. Esto último puede deberse a que el nivel de refertilización utilizado no permita aumentar la producción de MS627 como sí ocurre en los demás tratamientos que tuvieron fertilización inicial, o que el Lotus no responda a esa cantidad de fósforo total fraccionado de esa manera. Al observar el porcentaje de Lotus 627 en la MST, se observa que a medida que aumenta la dosis de fertilización inicial comienzan a dominar los procesos de sustitución de especies del tapiz más que los de adición (Cuadro 44).

El tratamiento que no tuvo fertilización inicial no provocó un aumento en la producción de la MS627 con respecto al primer año. Esto puede ser explicado en primera instancia por el exceso de lluvias ocurrido inmediatamente después de la siembra (mayo-junio) que pudo provocar un gran índice de muerte de plántulas durante la germinación, lo cual produciría una pobre implantación (Cuadro 15). Asimismo, el déficit de fósforo puede haber afectado el proceso de nodulación y posterior baja persistencia productiva (Carámbula et al, 1994 b). Al no haber fertilizado al inicio al Lotus 627 el stand y desarrollo de las plantas de ésta especie no es suficiente como para poder aprovechar eficientemente el fósforo aplicado en la refertilización.

La composición del mejoramiento en el segundo año se ve afectada por los niveles de fertilización en el año previo (Cuadro 44), con contribuciones de la leguminosa entre 33 y 46%, valores sustancialmente superiores de los presentes en el testigo sin fertilización.

Cuadro 44. Porcentaje de la MS627, en la MST en un mejoramiento de segundo año, según diferentes estrategias de fertilización inicial y una misma fertilización anual de 40 kg de P_2O_5 /ha.

<i>Fertilización inicial</i>	<i>% Lotus 627</i>
0	7
40	33
80	42
160	46

En la figura 11 se observan incrementos de 20,1 y 22,1 kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha agregado para MST y MSM respectivamente (Anexo 10).

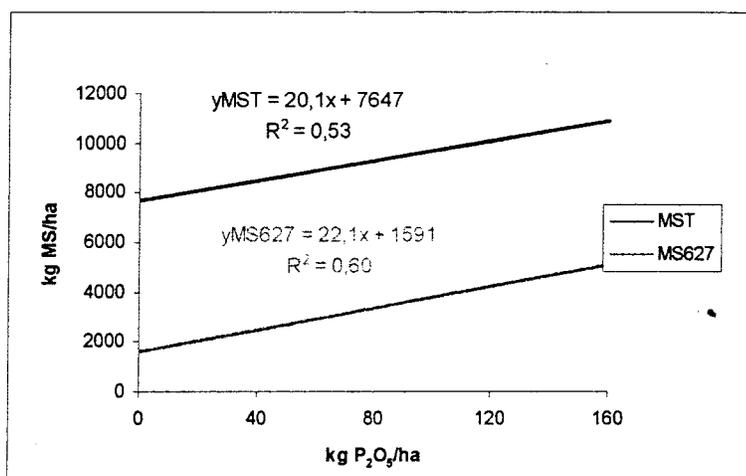


Figura 11. Respuesta a la fertilización fosfatada inicial con Superfosfato simple (kg de P_2O_5 /ha) de materia seca total (MST) y Lotus 627 (MS627) en un mejoramiento en su segundo año.

4.5.3 TOTAL ACUMULADO

En el cuadro 45 se observa que hay efecto en la producción de forraje acumulada en los dos primeros años por efecto de la fertilización inicial ($P < 0,01$ para ambos). Se obtuvieron respuestas significativas y positivas hasta los 80 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial tanto para MST (materia seca total) como para MS627 (lotus 627).

Cuadro 45. Producción total de materia seca (MST) y Lotus 627 (MS627) en kg de MS/ha de un mejoramiento en sus dos años frente a diferentes niveles iniciales y 40 kg de P_2O_5 /ha anuales de fósforo.

Fertilización inicial	MST	MS627
0	11607	954
40	15575	4925
80	17693	7945
160	17916	8514
SEM	574	224
I	**	**

** = $P < 0,01$; error estándar de la media (SEM); nivel inicial (I).

Para la suma de los dos años de producción del mejoramiento, los tratamientos que tuvieron los niveles más altos de fertilización inicial (80 y 160 kg de P_2O_5 /ha) produjeron en promedio un 14% y 53% más de MST al compararlos con aquellos que tuvieron 40 y 0 kg de P_2O_5 /ha. El aumento en la MS627 fue de un 67 y 763% en promedio al comparar los mayores niveles (80 y 160 kg de P_2O_5 /ha) contra la de 40 y 0 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial respectivamente.

En el cuadro 46 se observa que, si bien en promedio el año 2 produce un 16% más que el primero para las dos fracciones analizadas, éstas tienen un comportamiento distinto frente al aumento en la fertilización inicial. Mientras que en la MST (materia seca total) el hecho de aumentar la fertilización inicial provocó aumentos y disminuciones graduales e iguales en porcentaje, para el año 1 y 2 respectivamente, en la MS627 (lotus 627) el hecho de aumentar las dosis iniciales provocó aumentos crecientes en porcentaje en el primer año, llegando a producir prácticamente la misma cantidad el primer año y el segundo (160 kg de P_2O_5 /ha), producto de un aumento en producción en el primer año, la cual mantiene en el segundo. Para la MST todos los tratamientos produjeron más el segundo año que el primero. Para MS627 esta tendencia se dio para los tratamientos de 40 y 80 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial, mientras que el tratamiento con 160 kg de P_2O_5 /ha al inicio, produjo prácticamente lo mismo los dos años.

Cuadro 46. Porcentajes de producción de un mejoramiento con Lotus 627, durante el primer y segundo año para la MST y MS627, según diferentes estrategias de fertilización inicial (kg de P_2O_5 /ha).

	<i>Fertilización inicial</i>	<i>AÑO 1</i>	<i>AÑO 2</i>
<i>MST</i>	<i>40</i>	41	59
	<i>80</i>	42	58
	<i>160</i>	43	57
<i>MS627</i>	<i>40</i>	38	62
	<i>80</i>	41	59
	<i>160</i>	49	51

La regresión muestra respuestas lineales tanto para MST como para MS627 (Figura 12), para el primero los incrementos en kg de MS por cada kg de P_2O_5 /ha es de 36,4 para el segundo esta respuesta es de 45,1 (Anexo 11).

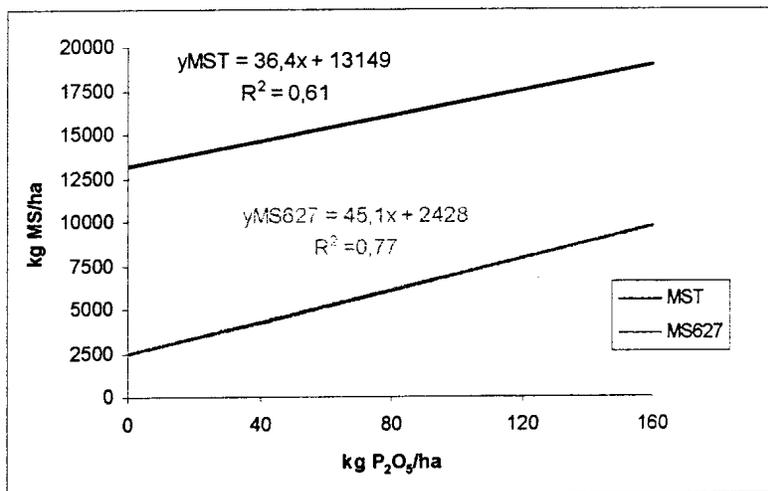


Figura 12. Respuesta a la fertilización fosfatada inicial con Superfosfato simple (kg de P₂O₅/ha) de materia seca total (MST) y Lotus 627 (MS627) en un mejoramiento en sus dos años.

4.5.4 CONCLUSIONES

- ✓ En el primer año se detectó que hay respuesta a la fertilización inicial en la MST y MS627 hasta 160 kg de P₂O₅/ha.
- ✓ El haber aumentado las dosis iniciales provocó que las producciones del segundo año aumentarían para un mismo nivel de refertilización, lo que refleja un efecto residual provocado por la fertilización aplicada a la siembra.
- ✓ El manejo de estrategias de fertilización moderadas tanto al establecimiento como en las refertilizaciones (40 kg de P₂O₅/ha), permitió obtener rendimientos superiores a los 9000 kg MS/ha en el segundo año, con un 34% de leguminosa, lo que muestra un potencial de producción destacado de esta especie.

5. DISCUSIÓN GENERAL DE LOS EXPERIMENTOS ANALIZADOS

En esta sección se realiza una discusión general de los experimentos analizados previamente. La misma esta estructurada en la siguiente sección:

5.1 Análisis de Suelo

5.2 Respuesta a la fertilización inicial

5.3 Estrategias de refertilización

5.4 Comportamiento de las diferentes fuentes fosfatadas

5.5 Respuesta a la fertilización de las diferentes especies forrajeras evaluadas

5.1 ANÁLISIS DE SUELO

Como fue descrito en la sección 2.3, el análisis de suelo es una herramienta en la toma de decisiones para definir los planes de fertilización.

De la información existente sobre análisis de suelos de los experimentos analizados, se interpretaron algunos a los efectos de evaluar la utilidad de los mismos.

La información se presenta para el cuarto y quinto año del Experimento I (Cuadro 47), para el tercer y cuarto año del Experimento II (Cuadro 48) y para el segundo y tercer año del Experimento III (Cuadro 49). Los datos que se presentan se corresponden con los primeros 7,5 cm de suelo.

Cuadro 47. Resultados del contenido de fósforo en suelo ($\mu\text{g/g}$) estimado por el método del ácido cítrico para el cuarto y quinto año de un Mejoramiento de TB+L manejado con distintos planes de fertilización con diferentes fuentes fosfatadas.

Experimento I

Treatamientos #	S 40-0	FN 40-0	S 80-0	FN 80-0	S 0-40	FN 0-40	S 160-0	FN 160-0	S 40-40	FN 40-40	S 80-40	FN 80-40	S 160-40	FN 160-40
Testigo	40	40	80	80	120	120	160	160	160	160	200	200	280	280
<i>P</i> acumulado 4to. año	4,6	6,4	6	6,4	8,2	7,8	7,7	7,4	7,4	9,4	8,2	9,8	8,4	10,5
<i>P</i> acumulado 5to. año	0	40	80	80	160	160	160	160	200	200	240	240	320	320
Cítrico ($\mu\text{g/g}$)	2,5	3,5	3,6	3	4	8,8	4,3	4,6	5,4	5,2	3,7	8,4	4,4	10,1

La primer cifra hace referencia a la dosis inicial, la segunda a la dosis anual. Superfosfato simple (S); Fosforita natural (FN).

Cuadro 48. Resultados del contenido de fósforo en suelo ($\mu\text{g/g}$) estimado por el método del ácido cítrico para el tercer y cuarto año de un Mejoramiento de TB+L manejado con distintos planes de fertilización con una fuente fosfatada.

Treatamientos #	S 45-0	S 0-30	S 90-0	S 45-30	S 0-60	S 135-0	S 90-30	S 45-60	S 135-30	S 90-60	S 135-60
Testigo	45	60	90	105	120	135	150	165	195	210	255
<i>P</i> acumulado 3er. año	4,4	5,4	5,2	7,1	6,7	6,6	7,4	7,1	6,1	7,3	9,9
Cítrico ($\mu\text{g/g}$)	4,4	5,4	5	7,1	6,7	6,6	7,4	7,1	6,1	7,3	9,9
Testigo	45	90	90	135	135	180	180	225	225	270	315
<i>P</i> acumulado 4to. año	0	45	90	135	135	180	180	225	225	270	315
Cítrico ($\mu\text{g/g}$)	4	5,9	6	6,3	6,6	8,7	9,9	10,7	9,9	10,3	10,5

La primer cifra hace referencia a la dosis inicial, la segunda a la dosis anual. Superfosfato simple (S).

Cuadro 49. Resultados de contenido de fósforo en suelo ($\mu\text{g/g}$) estimado por el método del ácido cítrico para el segundo y tercer año de un Mejoramiento con LR manejado con distintos planes de fertilización en base a diferentes fuentes.

Experimento III					
<i>Tratamientos*</i>	P acumulado 2do. año	Cítrico ($\mu\text{g/g}$)	<i>Tratamientos*</i>	P acumulado 3er. año	Cítrico ($\mu\text{g/g}$)
<i>Testigo</i>	0	5	<i>Testigo</i>	0	3,9
<i>S 30-0</i>	30	3,9	<i>S 30-0</i>	30	4,4
<i>H 30-0</i>	30	5,3	<i>H 30-0</i>	30	4,6
<i>PA 30-0</i>	30	4,2	<i>PA 30-0</i>	30	4,3
<i>FN 30-0</i>	30	4	<i>FN 30-0</i>	30	4,9
<i>S 60-0</i>	60	5,7	<i>S 60-0</i>	60	5
<i>H 60-0</i>	60	6	<i>H 60-0</i>	60	3,5
<i>PA 60-0</i>	60	5,7	<i>PA 60-0</i>	60	4,6
<i>FN 60-0</i>	60	5	<i>FN 60-0</i>	60	4,4
<i>S 30-30</i>	60	4,7	<i>S 30-30</i>	90	4,7
<i>H 30-30</i>	60	5,2	<i>H 30-30</i>	90	4,4
<i>PA 30-30</i>	60	6,4	<i>PA 30-30</i>	90	5,7
<i>FN 30-30</i>	60	5,6	<i>FN 30-30</i>	90	3,7
<i>S 90-0</i>	90	5,9	<i>S 90-0</i>	90	5,6
<i>H 90-0</i>	90	5,4	<i>H 90-0</i>	90	5,4
<i>PA 90-0</i>	90	6,1	<i>PA 90-0</i>	90	9,2
<i>FN 90-0</i>	90	5,4	<i>FN 90-0</i>	90	5,4
<i>S 60-30</i>	90	9,4	<i>S 60-30</i>	120	4,9
<i>H 60-30</i>	90	6,3	<i>H 60-30</i>	120	3,7
<i>PA 60-30</i>	90	6,7	<i>PA 60-30</i>	120	7,4
<i>FN 60-30</i>	90	5,2	<i>FN 60-30</i>	120	5,2
<i>S 90-30</i>	120	7,8	<i>S 90-30</i>	150	7,3
<i>H 90-30</i>	120	5,7	<i>H 90-30</i>	150	4,9
<i>PA 90-30</i>	120	7,4	<i>PA 90-30</i>	150	5,7
<i>FN 90-30</i>	120	7,8	<i>FN 90-30</i>	150	6

* La primer cifra hace referencia a la dosis inicial, la segunda a la dosis anual. Superfosfato simple (S); Hiperfosfato (H); Hyperfos (PA); Fosforita natural (FN).

En términos generales, se puede observar que método del ácido cítrico es más sensible a refertilizaciones recientes que a los niveles iniciales para el tercer, cuarto y quinto año luego de instalada la pastura.

Existe una variación importante en el fósforo disponible entre años, aún para los tratamientos testigo sin fertilización, lo que induce a pensar en la existencia de factores que no se tienen en cuenta probablemente al momento de la toma de muestras que hacen variar al fósforo disponible. Esto determina limitaciones en la toma de decisiones para refertilizaciones futuras cuando se tienen datos puntuales en base a este método, así como la determinación de un nivel crítico.

En aquellos años que fueron más lluviosos en el período previo a la toma de las muestras los niveles de fósforo disponible registrados fueron superiores, en concordancia con lo reportado por Patrick y Mahapatra (1968).

En base a estas variaciones, la estimación del fósforo en planta aparecería como un indicador más confiable del nivel de fósforo disponible para las plantas. Tanto a través de análisis de laboratorio (análisis químico) o por análisis de campo (Fosforapid) se podría estimar el mismo.

5.2 RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN INICIAL

Se estudió un rango de dosis iniciales que variaron desde 0 hasta los 160 kg de P_2O_5 /ha, en éstos se analizaron las respuestas en kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha aplicado para cada una de las fracciones que componen el mejoramiento en los años donde se detectó efecto de la fertilización inicial en los tratamientos en los cuales se utilizó S como fuente fosfatada. De ésta manera se puede observar el comportamiento de las especies que se sembraron en los diferentes ensayos (Figura 13).

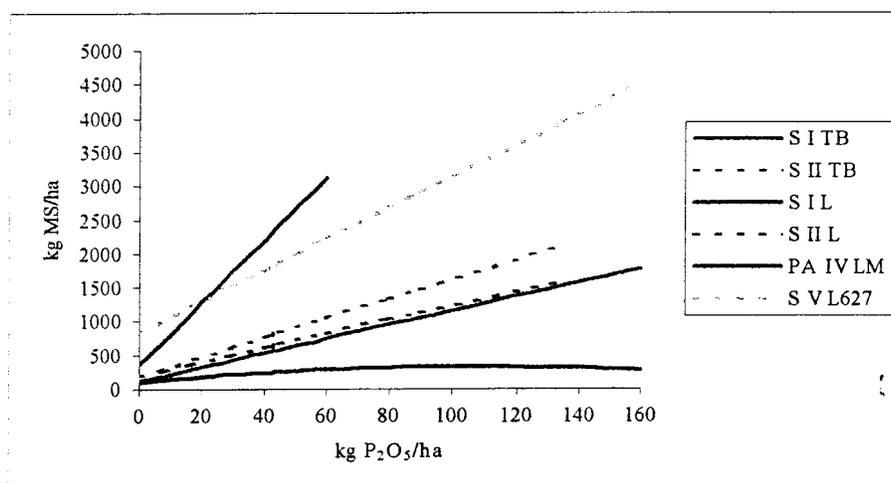


Figura 13. Respuesta a la fertilización fosfatada inicial de diferentes leguminosas en mejoramientos de primer año. Superfosfato simple (S); Hyperfos (PA); Experimento I, II, IV y V ; Trébol blanco (TB); Lotus (L), Lotus Maku (LM); Lotus LE627 (L627).

Dado que el comportamiento de la MS es explicado principalmente por la fracción leguminosa es que esta discusión se basa en las respuestas obtenidas para TB y

L (Experimentos I y II), LR (Experimento III), MSM (Experimento IV) y L627 (Experimento V).

Para el TB en el primer año se obtuvieron respuestas que variaron entre 10,4 y 14,2 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha. En el segundo año en los tratamientos sin refertilización se obtuvieron respuestas de 17,6 y 12,8 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha, mientras que al refertilizar con 60 kg de P_2O_5 /ha ésta respuesta se incrementa hasta 36,3 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha. Estos resultados indican que la respuesta a la fertilización inicial del TB se potencializa al aumentar el nivel de refertilización entre 0 y 60 kg de P_2O_5 /ha.

Para el L la respuesta observada fue de 10,3 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha. En el segundo año en los tratamientos sin refertilización se obtuvieron respuestas de 9 y 15,5 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha.

En LR en el primer año el pasar de 30 a 60 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial produjo una respuesta de 25 kg de MS/kg de P_2O_5 /ha agregado para el promedio de FN, S y H. En los años sucesivos no se encontró un patrón de respuesta a la fertilización inicial.

Para L. Maku en el primer año, la respuesta observada fue de 45,8 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha, mientras que para el segundo año fue de 40,0 kg de MS/kg de P_2O_5 /ha para estratos que abarcaron entre 0 y 60 kg de P_2O_5 /ha el primer año, 30 y 60 kg de P_2O_5 /ha el segundo.

Para L627 en el primer año, la respuesta observada fue de 23,0 y 22,1 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha para el primer y segundo año respectivamente, entre 0 y 160 kg de P_2O_5 /ha.

Analizando la fracción leguminosa en cada uno de los mejoramientos se observa que el lotus Maku es el que presentó la mayor eficiencia en el primer año con 45,8 kg de MS/kg de P_2O_5 /ha (fertilizado con PA), seguido de LR con 30,5, la mezcla de TB + L con 24,5 y por último L627 con 23,0 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha (fertilizados con S).

Los valores de eficiencia en LR muestran la importancia, aún en el caso de una especie anual, de la fertilización inicial dado que como cada año debe establecerse, ésta o en su defecto la refertilización mejoran las condiciones de cada año. En las especies perennes la fertilización inicial es la que determina como será su establecimiento, mientras que en las anuales esto depende de cómo será la fertilización inicial y anual, ya que al provenir de semilla todos los años necesita fósforo disponible en la cecanía de la semilla para favorecer un desarrollo temprano.

La fertilización fosfatada inicial es fundamental en los Mejoramientos de Campo de la Región Este, ya que a partir de ésta se mejorarán las condiciones de implantación y establecimiento de la o las leguminosas introducidas. De esta manera, al mejorarse dichas condiciones es posible obtener un buen stand de plantas, el cual será el punto de partida para la producción de forraje a través de los años de la vida del mejoramiento.

La potencialización de la producción de forraje, así como de su persistencia, no dependerá exclusivamente de la dosis aplicada a la siembra, estando involucrado otros factores de manejo de la pastura al igual que las condiciones climáticas que se presenten.

A medida que se incrementa la dosis se producen aumentos en la MS total, siendo explicados los mismos mayoritariamente por aumentos de la fracción leguminosa. La respuesta al agregado de fósforo de dicha fracción es cada vez mayor que la que se obtiene en la MS total, esto se refleja en un incremento de la proporción de la leguminosa en el total del forraje producido por el mejoramiento.

5.3 ESTRATEGIAS DE REFERTILIZACIÓN

Como se puede observar en el cuadro 50 la respuesta promedio a la refertilización para el segundo año en el TB aumentó en la medida que se incrementó la dosis inicial, siendo el mayor aumento al pasar de 0 a 40-45 kg de P_2O_5 /ha inicial. En el tercer y cuarto año las respuestas a la refertilización del TB no variaron sustancialmente al aumentar las dosis iniciales, es decir que se perdió efecto la fertilización inicial en este año.

Para L en el segundo año las mayores respuestas a la refertilización se dieron con los niveles iniciales de 0 y 40-45 kg de P_2O_5 /ha, para luego a mayores dosis bajar por la competencia que le ejerce el TB a esos niveles.

Cuadro 50. Respuesta promedio a la refertilización de los Experimentos I y II para diferentes dosis iniciales para el segundo, tercer y cuarto año de un Mejoramiento en base a la mezcla de TB y L.

Año	Inicial 0 kg de P_2O_5 /ha		Inicial 40-45 kg de P_2O_5 /ha		Inicial 80-90 kg de P_2O_5 /ha	
	TB	L	TB	L	TB	L
2	5,2	25,6	36,4	29,1	47,9	7,7
3	12,3	39,6	12,3	33,9	15,4	19,6
4	7,5	24,9	9,6	12,4	8,7	16

La respuesta a la refertilización del TB fue superior a la del L solamente en el segundo año en los tratamientos 40-45 y 80-90 kg de P_2O_5 /ha aplicados a la siembra. Este comportamiento no se mantuvo en el tercer y cuarto año debido a que son respuestas promedio de dos experimentos con un año problemático en diferentes edades de los Mejoramientos.

La respuesta de LR (lotus rincón) a la refertilización no mostró un patrón definido para ninguna de las fuentes y dosis iniciales, presentando respuestas a la refertilización entre 5 y 19 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha para el segundo año, entre 20 y 42 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha para el tercer año y finalmente entre 38 y 70 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha para el cuarto año para los diferentes niveles de fertilización inicial y fuentes.

La respuesta del lotus Maku a la refertilización en el segundo año fue de 38,9 kg de MS/kg de P_2O_5 /ha (PA) para los dos niveles iniciales analizados (30-60 kg de P_2O_5 /ha), siendo solamente superado por el TB con 80-90 kg de P_2O_5 /ha de fertilización inicial (S).

La refertilización o no del mejoramiento se traduce en la expresión del potencial generado por la fertilización inicial, lo que permitirá una mayor vida útil del mismo.

La respuesta a la fertilización anual dependerá de la dosis aplicada a la siembra, en este sentido se podrían resaltar dos fraccionamientos diferentes de la fertilización. Un primer tipo de fraccionamiento sería niveles de fertilización inicial moderados y refertilizaciones todos los años. La segunda se basa en altas dosis de fertilización inicial, la cual permitirá obviar alguna refertilización en los primeros tres años. Cualquiera de éstos dos tipos de fraccionamiento permitirá obtener las mayores eficiencias a la refertilización. Esto promoverá una estabilidad en la producción del mejoramiento a lo largo de los años.

5.4 COMPORTAMIENTO DE LAS DIFERENTES FUENTES FOSFATADAS

Observando el cuadro 51 se detectó que las producciones de leguminosa registradas al fertilizar con FN fueron superiores a las observadas cuando se fertilizó con S, salvo en el segundo año que ocurrió lo opuesto.

Cuadro 51. Producción de la fracción leguminosa (TB+L) en kg de MS/ha, para dos estrategias de fertilización del Experimento I.

<i>Fuente</i>	<i>Estrategia</i>	<i>1er año</i>	<i>2do año</i>	<i>3er año</i>	<i>4to año</i>	<i>5to año</i>	<i>Acumulado</i>
<i>FN</i>	40-40	1187	2975	4168	2002	180	10512
<i>S</i>	40-40	468	3413	3293	1223	457	8855
<i>FN</i>	80-40	1775	4085	4386	1611	154	12012
<i>S</i>	80-40	925	4567	3357	1663	383	10895

En el Experimento I para el total acumulado de cinco años la respuesta a la fertilización inicial del TB en los tratamientos con y sin refertilización fue mayor con FN que con S (Anexo 3). Risso et al (2002) encontró esta superioridad solamente en los tratamientos refertilizados en el total acumulado de cuatro años.

Las magnitudes de las respuestas para TB a la fertilización inicial en el experimento I fueron superiores a las encontradas por Risso et al (2002) para ambas fuentes y ambas refertilizaciones.

Para L la respuesta a la fertilización inicial fue mayor con FN que con S en los tratamientos sin refertilizar. Para los refertilizados ningún modelo ajusto al utilizar FN, mientras que con S la respuesta fue negativa (Anexo 3).

Al comparar el EI en las dos regiones, se ve que se obtuvieron respuestas similares a la fertilización inicial y a la refertilización, no se encontraron diferencias entre fuentes, pero sí se evidenciaron tendencias contrastantes.

Como fue mencionado anteriormente, el uso de diferentes fuentes fosfatadas prácticamente no refleja diferencias en las producciones de MS de los mejoramientos, pero sí se ven diferencias en la composición de ésta, para la Región Este, con el uso de FN se obtuvieron mayores producciones de la fracción leguminosa que cuando se aplicó S, un comportamiento opuesto se dio en la Región de Cristalino.

En Mejoramientos con LR, la FN fue la fuente fosfatada con la cual se registraron las mayores producciones de forraje de MS total en comparación con el resto de las fuentes analizadas. Al realizar ésta comparación en LR la fuente con la cual las producciones fueron mayores fue con H.

El uso de FN se debería realizar en suelos que presenten bajos contenidos de arcilla, MO, CIC, MO, bajos % saturación y bajo pH de manera de obtener la mayor eficiencia posible del fósforo proveniente de la fosforita. La FN se deberá aplicar o no según las características edáficas predominantes.

Los suelos de la Región Este se clasifican en general como de alta retención por fósforo, a su vez presentan bajos valores de pH, de Ca intercambiable y de % saturación, con lo cual al agregar una fuente soluble como el S [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{SO}_4\text{Ca}$], el fósforo libre reaccionará con otros cationes que se encuentran en la solución del suelo (hierro y aluminio) formando compuestos de baja solubilidad ocurriendo el fenómeno conocido como precipitación. Otro fenómeno que explica la retención en suelos ácidos es la adsorción en hidróxidos de hierro y aluminio, y en arcillas aluminosilicatadas (caolinita) debido a la mayor cantidad de cationes retenedores de fósforo en la superficie de los coloides.

Los fenómenos que explican la retención también ocurren al aplicar fuentes de lenta liberación como la FN, pero al ser el S una fuente soluble, se da una gran disponibilidad inicial de fósforo para las plantas, para luego ir siendo retenido con el correr del tiempo hasta que se forman complejos insolubles. La superioridad de la FN se da ya que si bien hay retención de fósforo, al ir liberándolo de manera más lenta, siempre queda fósforo disponible, lo que se traduce en mayores producciones de forraje de las leguminosas en los suelos de ésta Región.

Fundamentado el uso de la FN, en el cuadro 52 se muestran los kg de MS total que se producen por cada dólar invertido (kg de MS total/U\$S), cuyos cálculos se detallan en el anexo 12. En él se puede observar que realizando la misma inversión/ha, se logran mayores producciones con la FN.

Cuadro 52. Kilos de MS total producidos por cada dólar invertido por hectárea según la fuente fosfatada que se utilice.

<i>Fuente (Inicial-Anual)</i>	<i>Región Este</i>		
	<i>Experimento I</i>		<i>Experimento II</i>
	FN (40-40)	S (40-40)	S (45-60)
<i>Kg de MS total/U\$S</i>	137	103	90

En resumen, con la utilización de FN se obtienen mayores producciones de forraje de las leguminosas en los Mejoramientos de Campo, a lo cual se le debe sumar la ventaja de un menor costo del kg de P_2O_5 /ha agrgado, por todo esto es que queda demostrado los beneficios que se obtienen al optar por la FN como fuente fosfatada en los suelos de la Región Este.

A nivel práctico se debe considerar que la aplicación de la FN debe hacerse con menos espaciamiento (bandeado) y un mayor desgaste de la maquinaria de tipo pendular debido a la presentación física de ésta fuente que obliga a realizar más pasadas para cubrir la misma área.

5.5 RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN DE LAS DIFERENTES ESPECIES FORRAJERAS

5.5.1 CONCLUSIONES DE LOS MEJORAMIENTOS EN BASE A *LOTUS CORNICULATUS* Y *TRIFOLIUM REPENS*

- ✓ La información generada en la EPP es consistente y permite afirmar que éste tipo de Mejoramientos de Campo es una alternativa que deberá ser tenida muy en cuenta al momento de pensar con que especies realizar los mismos, dadas las producciones de forraje que se registraron (con dos años problemáticos).
- ✓ Para la MS total y fracción leguminosa (TB+L) hubo respuesta a la fertilización inicial hasta las dosis más altas evaluadas (160 kg de P₂O₅/ha).
- ✓ Esta respuesta en la MS total disminuyó en la medida que se incrementó el nivel de refertilización.
- ✓ Para el TB hubo respuesta a la fertilización inicial hasta la dosis más alta evaluada, siendo ésta cada vez mayor en la medida que aumentó el nivel de refertilización.
- ✓ Para el L la respuesta a la fertilización inicial fue disminuyendo, hasta hacerse negativa, cuando se aumentó la dosis de fertilización anual, lo cual refleja la competencia que a alta dosis le ejerce el TB.
- ✓ La diferencia entre fuentes no se refleja del todo en la MS total, pero sí en la fracción leguminosa en donde las respuestas de TB y L a la fertilización inicial fueron mayores con FN que con S independientemente de si fueron refertilizados o no.

5.5.2 CONCLUSIONES DE LOS MEJORAMIENTOS EN BASE A *LOTUS PEDUNCULATUS*

- ✓ A pesar de ser una especie que se adapta a suelos ácidos, de baja fertilidad, con muy bajos contenidos de fósforo y tolerante a excesos hídricos temporales, queda demostrada su gran capacidad de respuesta a la fertilización fosfatada.
- ✓ Para mejoramientos que se realicen con ésta especie, se ha encontrado respuesta a la fertilización inicial hasta las máximas dosis analizadas (60 y 160 kg de P₂O₅/ha para MSM y MS627 respectivamente).

5.5.3 COMPARACIÓN ENTRE ESPECIES

Las diferencias entre especies son explicadas principalmente por la composición de los sistemas radiculares que determina la capacidad de absorción de los nutrientes poco móviles como el fósforo (Castro, 1978; Caradus, 1980 citado por Mathews et al, 1998) y por el grado en que las leguminosas acidifican su rizósfera, este efecto es atribuido a la fijación biológica de nitrógeno que provoca la liberación de hidrógenos y dependiendo de la especie de leguminosa considerada entre 37 y 49 mg de hidrógenos son producidos por cada g de nitrógeno fijado. Las leguminosas que obtiene nitrógeno de la fijación biológica tienen mayor capacidad de utilizar fósforo proveniente de la FN (Marschner, 1995). También debe tenerse presente que la alta demanda de calcio y fósforo que normalmente presentan las leguminosas favorece la solubilización de la FN. Rajan et al (1996) citados por Morón (2002), enumeran los factores de las plantas que afectan la disolución de las FN: a) secreción de hidrógenos, b) absorción de grandes cantidades de calcio, c) producción de agentes quelatantes como ácidos orgánicos (cítrico, málico) que forman complejos con el calcio, y d) disminuyen la concentración de fósforo en la solución del suelo. Esto modifica la solubilidad del fósforo que se encuentra próximo a las raíces (Trollove et al, 1996 b; Marschner, 1995).

6. RESUMEN

Entre los años 1995-2002 se realizaron cinco ensayos sobre fertilización fosfatada en Mejoramientos de Campo en la Región Este en la Unidad Experimental Palo a Pique perteneciente a INIA Treinta y Tres. Los objetivos fueron: determinar la respuesta a la fertilización fosfatada de diferentes leguminosas sembradas en cobertura; determinar la eficiencia relativa de diferentes fuentes de fósforo en la producción de forraje; y determinar la residualidad del fósforo. En el experimento I se evaluaron fuentes (Fosforita natural, FN 0-10-28-0 y Superfosfato simple, S 0-21-23-0), niveles iniciales (0, 40, 80 y 160 kg de P_2O_5 /ha) y refertilización (0 y 40 kg de P_2O_5 /ha) en una mezcla de *Trifolium repens* cv. Zapicán (TB) y *Lotus corniculatus* cv. San Gabriel (L). En el experimento II se evaluaron niveles iniciales (0, 45, 90 y 135 kg de P_2O_5 /ha) y niveles de refertilización (0, 30 y 60 kg de P_2O_5 /ha) con S en una mezcla de *Trifolium repens* cv. Zapicán y *Lotus corniculatus* cv. San Gabriel. En el experimento III se evaluaron fuentes (FN, S, Hyperfos, PA 0-14-28-0 e Hiperfosfato, H 0-12-30-0), niveles iniciales (30, 60, y 90 kg de P_2O_5 /ha) y refertilización (0 y 30 kg de P_2O_5 /ha) en *Lotus subbiflorus* cv. El Rincón (LR). En el experimento IV se evaluaron niveles iniciales (0, 30 y 60 kg de P_2O_5 /ha) y niveles de refertilización (30, 60, 90 y 120 kg de P_2O_5 /ha) con PA en *Lotus pedunculatus* cv. Grasslands Maku (L.Maku). Por último, en el experimento V se evaluaron niveles iniciales (0, 40, 80 y 160 kg de P_2O_5 /ha) y refertilización (40 kg de P_2O_5 /ha) con S en *Lotus pedunculatus* cv. L. Experimental 627 (LE627). Para TB, L.Maku y LE627 se encontraron respuestas lineales y positivas hasta las dosis iniciales y anuales más altas en cada caso. Para L las respuestas fueron disminuyendo en la medida que aumentaron las dosis iniciales y anuales por estar en mezcla con TB, por la competencia que le ejerció éste último a elevadas dosis de fósforo. Las respuestas a la fertilización inicial para el total acumulado de cinco años fueron entre 25,8 y 58,4 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha para TB y entre 23,5 y -11,5 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha para L. Para L.Maku las respuestas a la fertilización inicial fueron de 45,8 y 40,0 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha para el primer y segundo año respectivamente. Para LE627 estas respuestas fueron de 23,0 y 22,1 kg de MS/ kg de P_2O_5 /ha para el primer y segundo año respectivamente. En lo referente a eficiencia relativa de las diferentes fuentes fosfatadas, la FN fue superior al resto de las fuentes con las que se la comparó. La residualidad del fósforo para la fracción leguminosa (TB+L) se encontró hasta el segundo año con S y hasta el tercer año con FN.

7. SUMMARY

During the period between 1995-2002 a series of five experiments about phosphate fertilization in improves pastures were conducted at Palo a Pique research unit, INIA Treinta y Tres. The objectives were: to determine the phosphate fertilizers response of diferents leguminous sown in surface; to determine the relative effectiveness of diferents phosphate fertilizers in forage production; and to determine the phosphorus residuality. In experiment I two phosphate fertilizers (Phosphate Rock, FN 0-10-28-0, and Single Superphosphate, S 0-21-23-0), phosphorus initials levels (0, 40, 80 and 160 kg P₂O₅/ha) and annual levels (0 and 40 kg P₂O₅/ha) in mix sward with *Trifolium repens* cv. Zapicán (TB) and *Lotus corniculatus* cv. San Gabriel (L) were evaluated. In experiment II initials levels (0, 45, 90 and 135 kg P₂O₅/ha) and annual levels (0, 30 and 60 kg P₂O₅/ha) with S, in mix sward with *Trifolium repens* cv. Zapicán and *Lotus corniculatus* cv. San Gabriel were evaluated. In experiment III four phosphate fertilizer (FN, S, Partially Acidulated Phosphate Rock, PA 0-14-28-0 and Powder Phosphate Rock, H 0-12-30-0), initial levels (30, 60 and 90 kg P₂O₅/ha) and annual levels (0 and 30 kg P₂O₅/ha) in *Lotus subbiflorus* cv. El Rincón (LR) were evaluated. In experiment IIII initial levels (0, 30 and 60 kg P₂O₅/ha) and annual levels (30, 60, 90 and 120 kg P₂O₅/ha) with PA in *Lotus pedunculatus* cv. Grasslands Maku (L Maku) were evaluated. Finally in experiment V initial levels (0, 40, 80 and 160 kg P₂O₅/ha) and one annual level (40 kg P₂O₅/ha) with S in *Lotus pedunculatus* cv. L. Experimental 627 (LE 627) were evaluated. For TB, L Maku and LE 627 a lineal and positive responses were found in the highest inicial and annual phosphate levels analized in each case. In the case of L these responses were decreasing while initial and annual doses increased. This was due to the fact that they were mixed with TB, which offered resistance when containing high levels of phosphorous. For the whole period of five years the responses to the initial levels were between 25,8 and 58,4 kg MS/ kg P₂O₅/ha for TB and between 23,5 and -11,5 kg MS/ kg P₂O₅/ha for L. In the case of L Maku the responses to the initial levels were of 45,8 and 40,0 kg MS/ kg P₂O₅/ha for the first and second year respectively. In the case of LE 627 this responses were of 23,0 and 22,1 kg MS/ kg P₂O₅/ha for the first and second year respectively. Regarding the relative efficiency of the different phosphate fertilizers the FN was above the rest of the fertilizers which it was compared to. The residuality of the phosphato for the leguminous fraction (TB +L) was found with S until the second year and with FN up to the third year.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ANDREW, C.S.; JONES, R.K. 1978. The phosphorus nutrition of tropical forage legumes. In: Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils. Eds. Andrew, C.S.; Kamprath, E.J. CSIRO, Brisbane, Australia. pp. 295-311.
2. ARC. 1980. The nutrient requirements of ruminant livestock. Commonw. Agriculture Bureau, Farnham Royal, England.
3. AYALA, W ; BERMÚDEZ, R; CARÁMBULA, M; RISSO, D; TERRA, S. 1999. Diagnóstico, propuestas y perspectivas de pasturas en la región este. En: Producción Animal. Unidad Experimental Palo a Pique. INIA. Actividad de Difusión N° 195. pp. 1-42.
4. _____ ; _____ ; QUINTANS, G; ROVIRA, P. 2000. Algunas alternativas de producción sobre lotus Maku. En: Producción Animal. Unidad Experimental Palo a Pique. INIA. Actividad de Difusión N°225. pp. 25-30.
5. BAETHGEN, W.E.; BOZZANO, A.S. 1981. Efecto comparativo de la fertilización inicial y las refertilizaciones en alfalfa y trébol blanco. Estación Experimental La Estanzuela. Miscelánea N° 37. pp. 1-16.
6. BARBARE, A.M.; GILKES, R.J.; SALE, P.W.G. 1997. The effect of phosphate buffering capacity and other soil properties on North Carolina phosphate rock dissolution, availability of dissolved phosphorus and relative agronomic effectiveness. In: The Role of Reactive Phosphate Rock Fertilisers for Pastures in Australia. Eds Sale, P.W.G.; Simpson, P.G.; Anderson, C.A.; Muir, L.L. CSIRO Publishing, Melbourne. pp. 1037-1049.
7. BARROW, N.J. 1980. Evaluation and utilisation of residual phosphorus in soils. In: The Role of Phosphorus in Agriculture. Eds. Khasawneh, F.E.; Sample, E.C.; Kamprath,E.J. pp. 333-359.
8. BARROW, J. 1989. Surface reactions of phosphate in soil. Journal of Agricultural Science 2: 33-38.
9. BARRY, D.A.; MILLER, M.H. 1989. Phosphorus nutritional requirement of maize seedlings for maximum yield. Agronomy Journal 81: 95-99.
10. BEMHAJA, M. 1998 a. Mejoramiento de campos en basalto profundo. Evaluación de leguminosas: género, especies y variedades. En: Seminario de Actualización en tecnologías para basalto. INIA. Serie técnica N°102. pp. 33-42.

11. _____. 1998 b. Mejoramiento de campo: fertilización fosfatada. En: Seminario de Actualización en tecnologías para basalto. INIA. Serie técnica N°102. pp. 75-82.
12. BERMÚDEZ, R.; CARÁMBULA, M.; AYALA, W. 1997. Utilización de mejoramientos extensivos con novillos y borregos. En: Producción Animal. Unidad Experimental Palo a Pique. INIA. Actividad de Difusión N°136. pp. 27-34.
13. _____; _____; _____. 2001. Manejo de implantación de lotus Maku. En: Lotus Maku: Manejo, utilización y producción de semillas. INIA. Serie técnica N° 119. pp. 3-8.
14. _____; AYALA, W; FERRÉS, S; QUEHEILLE, P; RIET, I. 2002. Respuesta a la fertilización fosfatada de un mejoramiento de segundo año. En: XIX Reunión de Grupo Técnico en Forrajeras del Cono Sur. Zona Campos. Eds. Altuve, S. M. y Pizzio, R. M. Octubre 2002. pp 190.
15. BOLLAND, M.D.A.; GILKES, R.J. 1997. The agronomic effectiveness of reactive phosphate rocks. 2. Effect of phosphate rock reactivity. In: The Role of Reactive Phosphate Rocks Fertilisers for Pastures in Australia. Eds Sale, P.W.G.; Simpson, P.G.; Anderson, C.A.; Muir, L.L. CSIRO Publishing, Melbourne. pp. 937-946.
16. _____; LEWIS, D.C.; GILKES, R.J.; HAMILTON, L.J. 1997. Review of Australian phosphate rock research. In: The Role of Reactive Phosphate Rock Fertilisers for Pastures in Australia. Eds Sale, P.W.G.; Simpson, P.G.; Anderson, C.A.; Muir, L.L. CSIRO Publishing, Melbourne. pp. 845-859.
17. BOULD, C.; PARFITI, R.I. 1973. Leaf analysis in a guide to the nutrition of fruit crops. X. Magnesium and phosphorus sand culture experiments with apple. Journal of Science Food Agriculture 24: 175-185.
18. CARÁMBULA, M. 1978. Producción de pasturas. Pasturas IV. Montevideo, Uruguay. CIAAB. Miscelánea N° 18. pp. 5-7.
19. _____. 1993. Cultivos forrajeros de alta eficiencia. INIA. Boletín de divulgación N° 38. 21p.
20. _____; AYALA, W.; CARRIQUIRY, E. 1994 a. Mejoramiento de campo con *Lotus subbiflorus* cv El Rincón. INIA. Boletín de divulgación N° 44. 24p.
21. _____; _____; _____. 1994 b. *Lotus pedunculatus*. Adelantos sobre una forrajera que promete. INIA. Serie técnica N° 45. 14p.

22. _____. 2001. Pasturas para sistemas de producción ecológicamente “amigables”. INIA. Boletín de divulgación N° 75. pp. 24-28.
23. CASANOVA, O., GENTA, H., MALLARINO, A. 1975. Evaluación del comportamiento de cinco métodos para estimar fósforo asimilable en suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 55p.
24. _____.; BARBAZÁN, M. 2002. Fertilizantes. Montevideo, Facultad de Agronomía, 76 p.
25. CASTRO, J.L. 1978. Fertilización de pasturas. En: Pasturas IV. CIAAB 2ª ed. Miscelánea N° 18: pp. 123-132
26. _____.; ZAMUZ, E.M.; BARBOZA, S. 1981. Fertilización de pasturas en el litoral oeste del Uruguay. Investigaciones Agronómicas 2 (1): 56-67.
27. CIAAB 1971. Fertilización de pasturas. La Estanzuela. Boletín de divulgación N°5. 40 p.
28. COSTIN, A.B.; WILLIAMS, C.H. 1983. Phosphorus in Australia. Centre of Resources and Environmental Studies, A.N.U., Canberra, Australia.
29. DALAL, R.C. 1977. Soil organic phosphorus. Advances in Agronomy 29: 83-117.
30. DAVIS, M.R. 1991. The comparative phosphorus requirements of some temperate perennial legumes. Plant and Soil 133: 17-30.
31. EDMEADES, D.C.; WATKINSON, J.H.; PERROT, K.W.; SINCLAIR, A.G.; LEDGARD, S.F.; RAJAN, S.S.S.; BROWN, M.W.; ROBERTS, A.H.; THORROLD, B.T.; O'CONNOR, M.B.; FLOATE, M.J.S.; RISK, W.H.; MORTON, J. 1991. Comparing the agronomic performance of soluble and slow release phosphate fertilisers: the experimental basis for RPR recommendations. Proceedings of the New Zealand Grassland Association 53: 181-190.
32. ENGELSTAD, O.P.; TERMAN, G.L. 1980. Agronomic effectiveness of phosphate fertilizers. In: The role of phosphorus in agriculture. Eds. Khasawneh, F.E.; Sample, E.C.; Kamprath, E.J. pp. 311-332.
33. FORMOSO, F.; ALLEGRI, M. 1982. Evaluación de mezclas forrajeras en la zona noreste. II. Comportamiento agronómico sobre una pradera parda. En: Investigaciones agronómicas, 3: 52-56.

34. FREDEEN, A.L.; PAO, I.M.; TERRY, N. 1989. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glycine max*. *Plant Physiology* 89: 225-230.
35. FOX, R.L. 1978. Studies on phosphorus nutrition in the tropics. In: Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils. Eds. Andrew, C.S.; Kamprath, E.J. CSIRO, Brisbane, Australia. pp. 169-187.
36. GARCÍA, J.A. 1996. Variedades de trébol blanco. INIA. Serie técnica N° 70. 13p.
37. GARCÍA PRÉCHAC, F. 1992. Conservación de suelos. INIA. Serie técnica N° 26. 63 p.
38. GARDEN, D.L.; WARD, G.N.; SALE, P.W.G.; TENNAKOON, S.; HINDELL, R.P.; GARDINER, B. 1997. The agronomic effectiveness of reactive phosphate rocks. 3. A comparison of application strategies for soluble phosphorus and reactive phosphate rock fertilisers. In: The Role of Reactive Phosphate Rock Fertilisers for Pastures in Australia. Eds. Sale, P.W.G.; Simpson, P.G.; Anderson, C.A.; Muir, L.L. CSIRO Publishing, Melbourne. pp. 947-956.
39. GODWIN, D.C.; BLAIR, G.J. 1991. Phosphorus efficiency in pasture species. V. A comparison of white clover accessions. *Australian Journal of Agricultural Research* 42: 531-540.
40. GOÑI, C. 1996. El uso del análisis foliar: potencialidades y limitantes. INIA. Serie técnica N° 76. pp. 27-32.
41. HODGES, S.C. (s/r) Phosphorus, Soil Fertility Basics, Soil Science Extension, North Carolina State University. Chapter 3. pp. 19-22.
42. HOLFORD, I. C. R. 1983. Differences in the efficiency of various soil phosphate test for white clover between very acidic and more alkaline soils. *Australian Journal Soil Research* 21: 173-182.
43. _____. 1989. Phosphate behaviour in soils. *Journal of Agricultural Science* 2: 15-21.
44. KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. 1978. The use of phosphate rock for direct applications to soils. *Advances in Agronomy* 30: 159-206.
45. LABELLA, S.J.; AMENDOLA, L.A. 1977. Eficiencia relativa de algunas fuentes de fósforo para la fertilización directa de cultivos de verano. Estación Experimental del Norte. INIA. Boletín técnico N° 24. 16p.

46. LAUER, M.S.; BLEVINS, D.G.; SIERZPUTOWSKA – GRACZ, H. 1989. ^{31}P nuclear magnetic resonance determination of phosphate compartmentation in levels of reproductive soy beans. (*Glycine max. L.*) as affected by phosphate nutrition. *Plant Physiology* 89: 1331-1336.
47. LEHR, J.R.; McCLELLAN, G.H. 1972. A revised laboratory reactive scale for evaluating phosphate rock for direct application. Muscle Shoals, Alabama, National Fertilizer Development Center. Bulletin Y-43. 36p.
48. LINDSAY, W.L.; FRAZIER, A.W.; SETEPHENSON, H.F. 1962. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils. *Proceedings of the American Soil Science Society* 26: 321-326.
49. LITTLE, D. A. 1970. Factors of importance in the phosphorus nutrition of beef cattle in Northern Australia. *Australian Veterinary Journal* 46: 241-248.
50. LUTZ, J.F.; HAQUE, I. 1975. Effects of phosphorus on some physical and chemical properties of clays. *Proceedings of the American Soil Science Society* 39: 33-36.
51. LYNCH, J.; LÄUCHLI, A.; EPSTEIN, E. 1991. Vegetative growth of the common bean in response to phosphorus nutrition. *Crop Science* 31: 380-387.
52. MAENE, L.M. 2001. Direct application of phosphate rock: a global perspective of the past, present and future. In: *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Kuala Lumpur, Malasia. pp. 2-14.
53. MARSCHNER, H. 1995. Functions of mineral nutrients: macronutrients. In: *Mineral nutrition of higher plants*. 2^a ed. pp. 229-312.
54. MATHEWS, B.W.; TRITSCHLER, I.I.; MIYASAKA, S.C. 1998. Phosphorus management and sustainability. In: *Grass of dairy cattle* Eds. Cherrney, J.H.; Cherrney, D.J.R. CABI Publishing. pp. 193-222.
55. MAYS, D.A.; WILKINSON, S.R.; COLE, C.V. 1980. Phosphorus nutrition of forages. In: *The role of phosphorus in agriculture*. Eds. Khasawneh, F.E.; Sample, E.C.; Kamprath, E.J. pp. 805-846.
56. MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. 1982. Phosphorus. In: *Principles of plant nutrition*. 3^a ed. pp. 387-409.
57. MINSON, D.J. 1990. Phosphorus. In: *Forage in ruminant nutrition*. pp. 230-264.

58. MORÓN, A. 1982. Fuentes de fósforo para pasturas. CIAAB. Miscelánea N° 42. pp. 1-24.
59. _____; KHIEL, J.C. 1992. Dinámica del fósforo en tres sistemas agrícolas en el suroeste de Uruguay. En: Revista INIA Investigaciones Agronómicas (Eds. Morón, A.; Baethgen, W.) 1(1): pp. 61-84.
60. _____. 1992. El fósforo en el sistema suelo-planta. Revista INIA Investigación Agronómica N°1 Tomo I. pp. 45-60.
61. _____. 1996. El fósforo en los sistemas productivos: dinámica y disponibilidad en el suelo. INIA. Serie técnica N° 80. pp. 33-40.
62. _____. 1997. Phosphorus requirements in legumes: calibration of a rapid simple tissue test. In: Proceedings XVIII International Grasslands Congress. Canadá. Session 10 Soil Fertility. pp. 10-15.
63. _____. 1999. Relevamiento del estado nutricional y la fertilidad del suelo en cultivos de Trébol blanco. INIA. Serie actividades de difusión N° 200. pp. 1-14.
64. _____. 2002. Posibles usos de fosforitas para mejoramientos de pasturas en zonas ganaderas tradicionales en Uruguay. En: Mejoramientos de campo en la Región de Cristalino. INIA. Serie técnica N°129. Pp. 97-113.
65. NASH, D.M.; HALLIWELL, D.J. 1999. Fertilisers and phosphorus loss from productive grazing systems. Australian Journal of Soil Research 37: 403-429.
66. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1974. Feed phosphorus shortage. Levels and sources of phosphorus recommended for livestock and poultry. National Academy of Science, Washington, D.C.
67. _____. 1976. Nutrient requirements of domestic animals. 4. Nutrients requirements of beef cattle. 5ª ed. National Academy of Science, Washington, D.C.
68. _____. 1984. Nutrient requirements of domestic animals. 4. Nutrients requirements of beef cattle. 6ª revised ed. National Academy of Science, Washington, D.C. 84 p.
69. OLMOS, F. 1997. Efectos climáticos sobre la productividad de pasturas en la región noreste. INIA. Boletín de divulgación N° 64. 22p.
70. _____. 2001. Mejoramiento de pasturas con lotus en la región noreste. INIA. Serie técnica N° 124. 48p.

71. OLSEN, S.R.; WATANABE, F. S. 1957. A method to determine a phosphorus absorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *American Journal Soil Science Society* 21: 144-149.
72. PATRICK JR, WM. H.; MAHAPATRA, I.C. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Advances in Agronomy* 20: 323-359.
73. PEREYRA DE OLIVEIRA, O.L.; BATISTA VIVIAN ACUÑA, J.; ARTECHE DO COUTO, A.C.; NEVES MUNIZ, E.; DE AQUINO FALLEIROS, B. 1998. Avaliação da eficiência agrônômica do fosfato natural de Gafsa em relação ao superfosfato simples. In: XVII Reunião do grupo técnico em forrajeiras do cone sul-zona campos. pp. 95.
74. PINKERTON, A.; RANDALL, P.J. 1994. Internal phosphorus requirements of six legumes and two grasses. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 34: 373-379.
75. QUIN, B.F. 1985. Alternatives to water soluble phosphate – Why, where and when? Ministry of Agriculture and Fisheries, Ruakura Soil and Plant Research Station, Hamilton, New Zealand. pp. 345-359.
76. RABUFFETTI, A.; ZAMALVIDE, J.P. 1983. Respuesta vegetal al suministro de nutrientes. Evaluación de la fertilidad del suelo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 114 p.
77. _____ ; _____ ; MALLARINO, A. 1983. Fósforo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 106 p.
78. RADIN, J.W. 1990. Responses in nitrogen and phosphorus deficient cotton seedlings. *Plant Physiology* 92: 855-857.
79. RAJAN, S.S.S. 1976. Phosphate reactions with soils constituents and prospects for manipulation. In: "Prospects for Improving Efficiency of Phosphorus Utilization" Ed. Blair; G.J. Univ. Of New England, Armidale, Australia. pp. 35-39.
80. _____ ; BROWN, M.W.; BOYES, M.K. 1992. Extractable phosphorus to predict agronomic effectiveness of ground and unground phosphate rocks. *Fertilizer Research* 32: 291-302.

81. RAO, I.M.; TERRY, N. 1989. Leaf phosphate status, photosynthesis, and carbon partitioning in sugar beet. I. Changes in growth, gas exchange, and Calvin cycle enzymes. *Plant Physiology* 92: 29-36.
82. REID, R. L. 1980. Relationship between phosphorus nutrition of plants and the phosphorus nutrition of animals and man. In: *The Role of Phosphorus in Agriculture*. Eds. Khasawneh, F.E.; Sample, E.C.; Kamprath, E.J. pp. 847-884.
83. REUTER, D.J. 1997. An appraisal of the National Reactive Phosphate Rock Project. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 37: 1085-1090.
84. RISSO, D.F. 1998. Mejoramientos extensivos en el Uruguay. INIA. Serie técnica N° 94. pp. 23-29.
85. _____; BEMHAJA, M; ZAMIT, W; CARRACELAS, G. 1998. Intensificación del engorde en la región basáltica: II) Efecto de la dotación en el engorde de novillos y la productividad de un campo mejorado. En: *Seminario de Actualización en tecnologías para basalto*. INIA. Serie técnica N°102. pp. 165-174.
86. _____; CARÁMBULA, M. 1998. Lotus El Rincón. Producción y utilización de los mejoramientos. INIA. Boletín de divulgación N° 65. 31p.
87. _____; MORÓN, A.; ZARZA, A. 2002. Fuentes y niveles de fósforo para mejoramientos de campo en suelos de la Región de Cristalino. En: *Mejoramientos de campo en la Región de Cristalino*. INIA. Serie técnica N° 129. pp. 115-134.
88. ROCHA, G.L. 1986. Perspectivas e problemas de adubação de pastagens no Brasil. En: *Simpósio sobre calagem e adubação de pastagens, 1985, Nova Odessa, SP. Anais*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa de Potássio e do Fósforo: pp. 145-174.
89. ROSSITER, R.C. 1978. Phosphorus deficiency and flowering in subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.). *Annals of Botany* 42: 325-329.
90. RUSSELL, E. W. 1980. *Soil Conditions & Plant Growth*. 10th ed. Longman, London.
91. SALE, P.W.G.; SIMPSON, P.G.; LEWIS, D.C.; GILKES, R.J.; BOLLAND, M.D.A.; RATKOWSKY, D.A.; GILBERT, M.A.; GARDEN, D.L.; CAYLEY, J.; JOHNSON, D. 1997. The agronomic effectiveness of reactive phosphate rocks. 1. Effect of the pasture environment. In: *The Role of Reactive Phosphate Rock Fertilisers for Pastures in Australia*. Eds Sale, P.W.G.; Simpson, P.G.; Anderson, C.A.; Muir, L.L. CSIRO Publishing, Melbourne. pp. 921-936.

92. SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RAEZ, G. J. 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: The Role of Phosphorus in Agriculture. Eds. Khasawneh, F. E.; Sample, F. C.; Kamprath, E. J. pp. 263-310.
93. SINCLAIR, A.G.; BOWDITCH, M.; PERROTT, K.W.; WATKINSON, J.H. 1990. A new approach to the economic evaluation of reactive phosphate rock as a replacement for single superphosphate. In: Proceedings of New Zealand fertilizer manufacturers research association conference. pp. 249-252.
94. SIMPSON, P.G.; SALE, P.W.G.; TENNAKOON, S.B. 1997. An economic analysis of the field performance of North Carolina reactive phosphate rock compared with single superphosphate for selected sites from the National Reactive Phosphate Rock Project. In: The Role of Reactive Phosphate Rock Fertilisers for Pastures in Australia. Eds Sale, P.W.G.; Simpson, P.G.; Anderson, C.A.; Muir, L.L. CSIRO Publishing, Melbourne. pp. 1061-1076.
95. SMITH, L.C.; JOHNSTONE, P.D.; SINCLAIR, A.G.; SHANNON, P.W.; O'CONNOR, M.B.; PERCIVAL, N.; ROBERTS, A.H.; SMITH, R.G.; MANSELL, G.; MORTON, J.D.; NGUYEN, L.; DYSON, C.B.; RISK, W.H. 1990. Final Report on the MAF "National Series" Forms of Phosphate Fertilisers Trials. Part 1. Description of the trials and annual herbage dry matter production. Ministry of Agriculture and Fisheries New Zealand.
96. STEVENSON, F. J. 1986. Cycles of Soil, Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. Wiley, New York.
97. TERRA, J.A. y GARCÍA PRÉCHAC, F. 2001. Efecto sobre la intensidad de uso y laboreo sobre el recurso suelo y su calidad. En: Siembra directa y rotaciones forrajeras en las lomadas del este: síntesis 1995-2000. INIA. Serie técnica N° 125. pp. 8-19.
98. TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. 1985. Soil fertility and fertilizers. 4ª ed. pp. 62-66.
99. TROLOVE, S.N.; HEDLEY, M.J.; CARADUS, J.R.; MACKAY, A.D. 1996 a. Uptake of phosphorus from different sources by *Lotus pedunculatus* and three genotypes of *Trifolium repens*. 1. Plant yield and phosphate efficiency. Australian Journal of Soil Research 34, 1015-1026.
100. ____; ____; ____; ____ . 1996 b. Uptake of phosphorus from different sources by *Lotus pedunculatus* and three genotypes of *Trifolium repens*. 2. Forms of

- phosphate utilised and acidification of the rhizosphere. *Australian Journal of Soil Research* 34, 1027-1040.
101. WHITELAW, M.A. 2000. Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Advances in Agronomy* 69: 99-106.
102. ZAMALVIDE, J.P.; ESCUDERO, J.; MORON, A. 1978. Caracterización de la capacidad de fijación de fósforo de suelos del Uruguay. En: Primera Reunión Técnica de la Facultad de Agronomía Tomo 2, sección departamento de suelos. pp. 1-36.
103. _____. 1992. Dinámica del fósforo en los suelos con especial referencia a la disponibilidad en rotaciones de cultivos y pasturas. Eds. Morón, A; Baethgen, W. En: *Revista INIA Investigaciones Agronómicas*. 1 (1): 85-93.
104. _____. 1996. El fósforo en los sistemas productivos: dinámica y disponibilidad en el suelo (II). INIA. Serie técnica N° 76. pp. 45-49.
105. _____. 1998. Fertilización de pasturas. INIA. Serie técnica N° 94. pp. 97-107.
106. ZAMUZ, E. M.; CASTRO, J. L. 1974. Evaluación de métodos de análisis de suelo para determinar fósforo asimilable. CIAAB. Boletín técnico N°15. 15p.

9. ANEXOS

Regresiones obtenidas en los análisis de los ensayos de fertilización fosfatada, con las significancias de los términos lineales y cuadráticos de los modelos utilizados con sus respectivos coeficientes de regresión.

EXPERIMENTO I

Anexo 1

AÑO 1

Componente	Modelo	R ²	Significancia (C; L)
MS	$y = 3032 + 12,3x$	0,52	0,0001
TB	$y = 111 + 10,4x$	0,67	0,0001
L	$y = 97 + 4,3x - 0,02 x^2$	0,70	0,0025; 0,0001
FL	$y = 263 + 11,8x$	0,68	0,0001

MS = materia seca; TB = trébol blanco; L = lotus; FL = fracción leguminosa; R² = coeficiente de regresión; C; L = significancia del término cuadrático; significancia del término lineal.

Anexo 2

AÑO 2

Componente	Fuente	Refert	Modelo	R ²	Significancia (L)
MS	FN	0	$y = 3204 + 26,7x$	0,88	0,0001
		40	$y = 4163 + 25x$	0,87	0,0001
	S	0	$y = 2676 + 29x$	0,95	0,0001
		40	$y = 5060 + 14,9x$	0,57	0,0047
TB	FN	0	$y = -62 + 24,1x$	0,93	0,0001
		40	$y = 333 + 26,6x$	0,95	0,0001
	S	0	$y = -197 + 17,6x$	0,93	0,0001
		40	$y = 801 + 19,5x$	0,74	0,0004
L	FN	0	$y = 593 + 7,9x$	0,54	0,0068
		40	$y = 1198 + 5,1x$	0,47	0,0134
	S	0	$y = 481 + 9x$	0,68	0,0010
GN	FN	40	$y = 2360 - 6,2x$	0,42	0,0227

MS = materia seca; TB = trébol blanco; L = lotus; GN = gramínea nativa; R² = coeficiente de regresión; (L) = significancia del término lineal; FN = Fosforita natural; S = Superfosfato simple.

Anexo 3

TOTAL ACUMULADO

<i>Componente</i>	<i>Fuente</i>	<i>Refert</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>	<i>Significancia (L)</i>
<i>MS</i>	<i>FN</i>	0	$y = 12605 + 65,9x$	0,90	0,0001
		40	$y = 20672 + 45,3x$	0,69	0,0008
	<i>S</i>	0	$y = 11180 + 69,7x$	0,90	0,0001
		40	$y = 20590 + 36,6x$	0,70	0,0007
<i>TB</i>	<i>FN</i>	0	$y = 34 + 42,2x$	0,97	0,0001
		40	$y = 2278 + 53,9x$	0,95	0,0001
	<i>S</i>	0	$y = -201 + 25,8x$	0,93	0,0001
		40	$y = 1795 + 31x$	0,86	0,0001
<i>L</i>	<i>FN</i>	0	$y = 1320 + 22,6x$	0,93	0,0001
	<i>S</i>	0	$y = 1393 + 14,8x$	0,72	0,0005
		40	$y = 6369 - 11,2x$	0,44	0,0188
<i>GN</i>	<i>S</i>	0	$y = 9164 + 27,2x$	0,65	0,0016
		40	$y = 11319 + 17,3x$	0,55	0,0060

MS = materia seca; TB = trébol blanco; L = lotus; GN = gramínea nativa; R² = coeficiente de regresión; (L) = significancia del término lineal; FN = Fosforita natural; S = Superfosfato simple.

EXPERIMENTO II

Anexo 4

AÑO I

<i>Componente</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>	<i>Significancia (L)</i>
<i>MS</i>	$y = 2507 + 25,3x$	0,68	0,0001
<i>TB</i>	$y = 186 + 14,2x$	0,57	0,0001
<i>L</i>	$y = 194 + 10,3x$	0,73	0,0001

MS = materia seca; TB = trébol blanco; L = lotus; R² = coeficiente de regresión; (L) = significancia del término lineal.

Anexo 5

AÑO 2

<i>Componente</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>	<i>Significancia (C; L)</i>
<i>MS</i>	0	$y = 3612 + 32,9x$	0,90	0,0001
	30	$y = 5309 + 28,3x$	0,85	0,0001
	60	$y = 6491 + 28,7x$	0,70	0,0001
<i>TB</i>	0	$y = -246 + 12,8x$	0,86	0,0001
	30	$y = -252 + 27x$	0,96	0,0001
	60	$y = 286 + 36,3x$	0,94	0,0001
<i>L</i>	0	$y = 255 + 15,5x$	0,94	0,0001
	30	$y = 1409 + 5,9x$	0,33	0,02
	60	$y = 2133 + 23x + 0,2 x^2$	0,39	0,0526; 0,0218
<i>GN</i>	0	$y = 3094 + 22,7x - 0,16 x^2$	0,41	0,0101; 0,0124
	30	$y = 3844 - 6,6x$	0,48	0,0028
	60	$y = 3270 - 4,9x$	0,43	0,0058

MS = materia seca; TB = trébol blanco; L = lotus; GN = gramínea nativa; R² = coeficiente de regresión; C; L = significancia del término cuadrático; significancia del término lineal.

Anexo 6

TOTAL ACUMULADO

<i>Componente</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>	<i>Significancia (L)</i>
<i>MS</i>	0	$y = 15455 + 66,1x$	0,75	0,0001
	30	$y = 19303 + 63,8x$	0,69	0,0001
	60	$y = 23083 + 68,5x$	0,66	0,0001
<i>TB</i>	0	$y = -63,6 + 29,7x$	0,80	0,0001
	30	$y = 41,3 + 43,2x$	0,95	0,0001
	60	$y = 1344 + 58,4x$	0,92	0,0001
<i>L</i>	0	$y = 1138 + 23,5x$	0,87	0,0001
	30	$y = 3125 + 11,8x$	0,46	0,02
	60	$y = 5615 - 11,5x$	0,39	0,0218

MS = materia seca; TB = trébol blanco; L = lotus; GN = gramínea nativa; R² = coeficiente de regresión; (L) = significancia del término lineal.

EXPERIMENTO IV

Anexo 7

AÑO 1

<i>Componente</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>	<i>Significancia (L)</i>
<i>MST</i>	5272+39,8x	0,74	0,0003
<i>MSM</i>	363+45,8x	0,99	0,0001

MST = materia seca total; MSM = materia seca Maku; R² = coeficiente de regresión; (L) = significancia del término lineal

Anexo 8

AÑO 2

<i>Componente</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>	<i>Significancia (L)</i>
<i>MST</i>	6790+22,4x	0,41	0,0001
<i>MSM</i>	2649+38,9x	0,71	0,0001

MST = materia seca total; MSM = materia seca Maku; R² = coeficiente de regresión; (L) = significancia del término lineal.

EXPERIMENTO V

Anexo 9

AÑO 1

<i>Componente</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>	<i>Significancia (L)</i>
<i>MST</i>	5502+16,3x	0,65	0,0002
<i>MS627</i>	837+23,0x	0,92	0,0001

MST = materia seca total; MS627 = materia seca lotus 627; R² = coeficiente de regresión; (L) = significancia del término lineal.

Anexo 10

AÑO 2

<i>Componente</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>	<i>Significancia (L)</i>
<i>MST</i>	7647+20,1x	0,53	0,0013
<i>MS627</i>	1591+22,1x	0,60	0,0004

MST = materia seca total; MS627 = materia seca lotus 627; R² = coeficiente de regresión; (L) = significancia del término lineal.

Anexo 11

TOTAL ACUMULADO

<i>Componente</i>	<i>Modelo</i>	<i>R²</i>	<i>Significancia (L)</i>
<i>MST</i>	13149+36,4X	0,61	0,0004
<i>MS627</i>	2428+45,1X	0,77	0,0001

MST = materia seca total; MS627 = materia seca lotus 627; R² = coeficiente de regresión; (L) = significancia del término lineal.

Anexo 12

Para realizar el análisis económico se tomaron como precios de los fertilizantes, según datos aportados por ISUSA, los siguientes:

Fosforita natural: 114 U\$\$/tonelada
 Superfosfato simple: 120 U\$\$/tonelada.

Luego se calcularon los costos por kg MS/ha y por año para cada fuente, y los kg producidos cada dólar invertido, también para ambas fuentes.

El razonamiento empleado fue el siguiente:

Para FN (10-28), por lo que en 1 tonelada hay 280 kg de P₂O₅
 El precio por kg de P₂O₅ será:

$$114\text{U}\$\$ * 1 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 / 280 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 = 0,41 \text{ U}\$\$/ \text{ kg de P}_2\text{O}_5$$

Para S (21-23), por lo que en 1 tonelada hay 230 kg de P₂O₅
 El precio por kg de P₂O₅ será:

$$120 \text{ U\$\$} * 1 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 / 230 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 = 0,52 \text{ U\$$/ kg de P}_2\text{O}_5$$

Entonces, para la recomendación realizada, que fue la de 40 kg de P₂O₅/ha aplicados a la siembra y 40 kg de P₂O₅ como refertilización, se realizaron los siguientes cálculos:

FN 40-40 → al ser cinco años, son 40 + (40 * 4) = 200 kg de P₂O₅ totales/ha, al pasarlo a anual queda 200 kg de P₂O₅/ha / 5 años = 40 kg de P₂O₅ /ha/año.

El costo sería 40 kg de P₂O₅/ha/año * 0,41 U\\$\$/ kg de P₂O₅ = 16,4 U\\$\$/ha/año

MST incremental en el total acumulado es 11215 kg de MST/ha, al pasarlo a anual queda 11215 kg de MST/ha / 5 años = 2243 kg de MST/ha/año

Entonces 16,4 U\\$\$/ha/año / 2243 kg de MST/ha/año = 0,0073 U\\$\$/kg de MST producida.

También 2243 kg de MS/ha/año / 16,4 U\\$\$/ha/año = 136,8 kg de MS/U\\$\\$

S 40-40 →

El costo será 40 kg de P₂O₅/ha/año * 0,52 U\\$\$/kg de P₂O₅ = 20,8 U\\$\$/ha/año

MST incremental en el total acumulado es 10725 kg de MST/ha, al pasarlo a anual queda 10725 kg de MST/ha / 5 años = 2145 kg de MST/ha/año.

Entonces 20,8 U\\$\$/ha/año / 2145 kg de MST/ha/año = 0,0097 U\\$\$/kg de MST producida.

También 2145 kg de MST/ha/año / 20,8 U\\$\$/ha/año = 103,1 kg de MST/U\\$\\$

El costo del kg de P₂O₅ con S es 0,52 U\\$\$.

Entonces, para la recomendación realizada de 45 kg de P₂O₅/ha aplicados a la siembra y 60 kg de P₂O₅/ha aplicados anualmente, los cálculos realizados fueron los siguientes:

S 45-60 → 285 kg de P₂O₅/ha / 5 años = 57 kg de P₂O₅/ha/año

57 kg de P₂O₅/ha/año * 0,52 U\\$\$/ kg de P₂O₅/ha = 29,64 U\\$\$/ha/año

La MS total incremental del total acumulado en los cinco años es 13306 kg de MS/ha.

Entonces 13306 kg de MS total/ha / 5 años = 2661,2 kg de MS/ha/año

Por lo tanto 29,64 U\\$\$/ha/año / 2661,2 kg de MS/ha/año = 0,011 U\\$\$/kg de MS producida.

También 2661,2 kg de MS/ha/año / 29,64 U\\$\$/ha/año = 89,8 kg de MS/U\\$\\$ invertido.