

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONOMICAS**

**EFFECTO DEL ASOCIO LUPINO (*Lupinus montanus* HBK.) – MAIZ (*Zea mays* L.) EN LA
NUTRICION FOSFATADA EN UN ANDOSOL DE GUATEMALA**

TESIS

**PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

POR

WERNER ABEDAMAR MARROQUIN CABRERA

En el acto de investidura como

INGENIERO AGRÓNOMO

EN

**SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
EN EL GRADO ACADEMICO DE
LICENCIADO**

GUATEMALA, MAYO DEL 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

RECTOR

Dr. LUIS ALFONSO LEAL MONTERROSO

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA

DECANO

Dr. Ariel Abderramán Ortiz López

VOCAL PRIMERO

Ing. Agr. Alfredo Itzep Manuel

VOCAL SEGUNDO

Ing. Agr. Walter Arnoldo Reyes Sanabria

VOCAL TERCERO

Ing. Agr. Danilo Ernesto Dardón Ávila

VOCAL CUARTO

Maestro Elmer Antonio Álvarez Castillo

VOCAL QUINTO

PMP Mirian Eugenia Espinoza Padilla

SECRETARIO

Ing. Agr. Pedro Peláez Reyes

Guatemala mayo del 2006

**Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala**

Distinguidos miembros:

De conformidad con las normas establecidas en la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración, el trabajo de tesis titulado:

**EFFECTO DE ASOCIO LUPINO (Lupinus montanus HBK.) – MAIZ (Zea mays L.) EN LA
NUTRICION FOSFATADA EN UN ANDOSOL DE GUATEMALA**

Presentado como requisito previo a optar el título de Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, en el grado académico de Licenciado.

Esperando que la presente investigación llene los requisitos para su aprobación, me suscribo de ustedes.

Atentamente,

Werner Abedamar Marroquín Cabrera

ACTO QUE DEDICO

A:

- DIOS Por brindarme persistencia, conocimiento y guía en una de mis mejores metas.
- MIS PADRES Suriel Abedamar Marroquín Soto
Balvina Cabrera de Marroquín
Como regalo a sus múltiples consejos y esfuerzos por mi superación.
- MIS HERMANOS Suriel Bernabé y Néstor Eduardo, con cariño y ejemplo en su vida y carrera profesional.
- MIS ABUELOS Alejandra Soto de Marroquín{+}, Socorro Santizo de Cabrera, Bernabé Marroquín Figueroa{+} y Ruperto Cabrera Marroquín{+}.
- MIS TIOS Con respeto y admiración.
- MIS PRIMOS Con aprecio sincero, especialmente Jairo y Estuardo.
- MI NOVIA Por su apoyo persistente e incondicional.
- MI FAMILIA EN GENERAL Con honorable respeto y cariño
- LAS FAMILIAS Zelada Cabrera, Cabrera Oliva y en especial Rodas Echeverría, por abrir la puerta de sus hogares con cariño y apoyo incondicional.
- MIS AMIGOS Juan Carlos Andrade Castañeda, Luis Arturo Pérez López, Edgar Iván Aguirre Solís, Carlos Orlando Hernández López, Ramón Elías Cajtí Sula, Oscar Valenzuela Pos, José Baldomero Sandoval, Gerson Gálvez, Carlos Vela, Danilo Arriaga, Selvin Marroquín.

TESIS QUE DEDICO

A:

GUATEMALA

ACATENANGO, CHIMALTENANGO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMIA

INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGRÍCOLAS –ICTA-

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA AGRÍCOLA –
IIEA- CHIMALTENANGO

INSTITUTO MIXTO DE EDUCACIÓN BÁSICA POR
COOPERATIVA ACATENANGO –IMEBA-

ESCUELA OFICIAL MIXTA URBANA JULIO MORALES SANTIZO,
ACATENANGO

TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE CONTRIBUYERON A MI
FORMACIÓN

AGRADECIMIENTOS

A:

MIS ASESORES

Ing. Agr. MSc. Adán Obispo Rodas Cifuentes

Ing. Agr. MSc. Anibal Sacbajá Galindo

Por el apoyo, orientación y tiempo incondicional,
depositado en la presente investigación.

INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGRÍCOLAS –ICTA-

Por brindarle importancia al tema de investigación,
además por el espacio y recurso invertido en la
realización de la misma.

CONTENIDO

	Pág.
INDICE DE CUADROS	iii
INDICE DE FIGURAS	v
ABREVIATURAS	vi
RESUMEN	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
III. JUSTIFICACIÓN	4
IV. MARCO TEORICO	5
4.1 MARCO CONCEPTUAL	5
4.1.1 Generalidades sobre el lupino	5
4.1.1.1 Origen del lupino	5
4.1.1.2 Exigencias climáticas y de suelo	6
4.1.1.2.1 Temperatura	6
4.1.1.2.2 Régimen de lluvia y humedad ambiental	6
4.1.1.2.3 Condiciones de suelo	6
4.1.1.2.4 Fertilización	7
4.1.2 El fósforo del suelo	8
4.1.2.1 Origen, contenido y formas de fósforo	8
4.1.2.2 Formas de fósforo inorgánico en suelos ácidos	9
4.1.3 El fósforo en la planta	10
4.1.3.1 Forma en que es absorbido	10
4.1.3.2 Funciones fundamentales del fósforo en las plantas	10
4.1.4 Fijación del fósforo en el suelo	11
4.1.5 Retención de fósforo en andosoles	11
4.1.6 Roca fosfórica y el fósforo del suelo	13
4.1.6.1 Origen, composición e importancia de la roca fosfórica	13
4.1.6.2 Respuesta de la planta a la roca fosfórica	15
4.1.6.3 Eficiencia agronómica relativa de la mezcla roca fosfórica + Superfosfato triple	17
4.1.7 Interacción <u>Lupino</u> – fósforo	18
4.2 MARCO REFERENCIAL	20
4.2.1 Características de los materiales experimentales	20
4.2.1.1 <i>Lupinus montanus</i> HBK	20
4.2.1.2 Características de los fertilizantes químicos utilizados	21
4.2.1.3 Características generales del suelo utilizado en el experimento	22
V. OBJETIVOS	23
VI. HIPÓTESIS	24
VII. METODOLOGÍA	25
7.1 Localización del área experimental	25
7.2 Material experimental	25
7.3 Diseño de tratamientos	25
7.4 Diseño experimental	26

7.5	Modelo Estadístico	26
7.6	Variables evaluadas	27
7.7	Manejo del experimento	28
7.7.1	Preparación del suelo	28
7.7.2	Siembra	29
7.7.3	Control de malezas	29
7.7.4	Control de plagas y enfermedades	29
7.7.5	Cosecha	29
7.8	Análisis estadístico de la información	30
VIII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
8.1	VARIABLES ANALIZADAS EN MAIZ	31
8.1.1	Rendimiento de materia seca	31
8.1.2	Altura de planta	35
8.1.3	Fósforo en el tejido vegetal	38
8.1.4	Eficiencia relativa de los fertilizantes	40
8.2	VARIABLES ANALIZADAS EN LUPINO	41
8.2.1	Rendimiento de materia seca	41
8.2.2	Altura de planta	42
8.2.3	Contenido de fósforo en el tejido vegetal	43
8.2.4	Nodulación en raíces de lupino	45
IX.	CONCLUSIONES	46
X.	RECOMENDACIONES	47
XI.	BIBLIOGRAFÍA	48
XII.	APÉNDICE	51

INDICE DE CUADROS		Pág.
Cuadro 1.	Características principales del SFT y la RFBC que se utilizaron en el experimento	21
Cuadro 2.	Algunas características físicas y químicas del suelo, utilizado en el experimento	22
Cuadro 3.	Tratamientos evaluados en el experimento	26
Cuadro 4.	ANDEVA factorial para el rendimiento de materia seca (g planta^{-1}) En plantas de maíz (parte aérea) bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	31
Cuadro 5.	ANDEVA (DBCA) para el rendimiento de materia seca (g planta^{-1}) en plantas de maíz (parte aérea) bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	32
Cuadro 6.	Contrastes ortogonales en el rendimiento de materia seca (g planta^{-1}) en plantas de maíz (parte aérea) bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	33
Cuadro 7.	Rendimiento de materia seca en plantas de maíz (g planta^{-1}), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	33
Cuadro 8.	ANDEVA factorial para altura de planta de maíz (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	35
Cuadro 9.	ANDEVA (DBCA) para altura de planta de maíz (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	36
Cuadro 10.	Contrastes ortogonales para altura de planta de maíz (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	36
Cuadro 11.	Altura de plantas de maíz (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	36
Cuadro 12.	ANDEVA factorial para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en tejido vegetal aéreo de maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	38
Cuadro 13.	ANDEVA (DBCA) para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en tejido vegetal aéreo de maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	39

Cuadro 14.	Contrastes ortogonales para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en tejido vegetal aéreo de maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	39
Cuadro 15.	Contenido de fósforo en plantas de maíz (mg planta^{-1}), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	39
Cuadro 16.	Eficiencia relativa de RF y SFT+RF con respecto a SFT, en el contenido de fósforo, en el tejido vegetal aéreo de plantas de maíz	40
Cuadro 17.	ANDEVA (DBCA) para rendimiento de materia seca (g planta^{-1}) en lupino (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado	41
Cuadro 18.	Contrastes ortogonales para el rendimiento de materia seca (g planta^{-1}) en plantas de lupino (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado	41
Cuadro 19.	ANDEVA (DBCA) para altura de plantas de lupino (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado	42
Cuadro 20.	Contrastes ortogonales para altura de plantas de lupino (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado	42
Cuadro 21.	ANDEVA (DBCA) para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en lupino (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado	43
Cuadro 22.	Contrastes ortogonales para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en lupino (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado	43
Cuadro 23.	Prueba de Tukey (0.05) para las variables: biomasa (parte aérea), altura de planta y contenido de fósforo en el tejido vegetal de lupino	45
Cuadro 24.	Número de nódulos en las raíces de lupino en asocio con maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado	45
Cuadro 25 A.	Prueba de medias Tukey (0.05), para rendimiento de materia seca (g planta^{-1}) en plantas de maíz (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	52
Cuadro 26 A.	Prueba de medias Tukey (0.05), para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en plantas de maíz (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo	52
Cuadro 27 A.	Prueba de medias Tukey (0.05), para altura de planta en maíz (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo..	52

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 Interacción fuente de fertilizante por sistema de cultivo:	34
FIGURA 2 Crecimiento de maíz bajo diferentes fuentes de fertilizante fosfatado:	37
FIGURA 3 Crecimiento de Lupino asociado con Maíz:	44

ABREVIATURAS

ANDEVA	Análisis de varianza
cm	Centímetro
DBCA	Diseño bloques completos al azar
dds	Días después de la siembra
g	Gramo
ha	Hectárea
HCl	Ácido clorhídrico
ICTA	Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas
Mg	Magnesio
mg	Miligramo
ml	Mililitro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
N	Nitrógeno
P	Fósforo
kg	Kilogramo
RF	Roca fosfórica
SFT	Superfosfato triple
S*F	Sistema por fuente
°C	Grados centígrados
%	Por ciento

**EFFECTO DEL ASOCIO LUPINO (*Lupinus montanus* HBK.) – MAIZ (*Zea mays* L.) EN LA
NUTRICION FOSFATADA EN UN ANDOSOL DE GUATEMALA**

**EFFECT OF LUPINO (*Lupinus montanus* HBK.) – MAIZ (*Zea mays* L.) ASSOCIATION ON
FOSFATED NUTRITION OF A GUATEMALAN ANDOSOL**

RESUMEN

Los andosoles son suelos derivados de cenizas volcánicas, cuya principal característica es la presencia de arcillas amorfas e hidratadas del tipo del alofano; además presentan alta fijación de fósforo que por lo general supera el 70% y llega fácilmente a valores de 95% que constituye la principal limitante de estos suelos. A pesar de que no se cuenta con datos exactos, en Guatemala los andosoles representan un porcentaje significativo de la superficie total del país y están distribuidos en lo que constituye principalmente el altiplano central, occidental y parte de la llamada boca costa que corresponde fisiográficamente a la pendiente volcánica reciente. Actualmente se cultiva en ellos principalmente maíz, café y hortalizas; además de zonas de vegetación forestal. La roca fosfórica (RF) como fuente de fósforo para aplicación directa en andosoles ha demostrado ser una alternativa económicamente viable. Evaluaciones con roca fosfórica de Carolina del Norte demostraron que *Lupinus albus* y *Lupinus angustifolius*, disolvieron cantidades considerables de roca, más del 70% dentro de los tres mm alrededor de las raíces, lo que provocó un decrecimiento del pH de la rizósfera. Recientemente se demostró que bajo condiciones de limitado suministro de fósforo, algunas plantas como *Lupinus arboreus*, moviliza y solubiliza fósforo de fuentes no disponibles para la mayor parte de cultivos, autoabasteciéndose de este nutrimento y a la vez dejándolo disponible para otros cultivos que se encuentren en asociación con ella. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de *Lupinus montanus* sobre la eficiencia agronómica de tres fuentes de fósforo, para la asociación lupino-maíz en un andosol de Guatemala. El trabajo de investigación se realizó en la sección de invernaderos del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas -ICTA- ubicado en el departamento de Chimaltenango, utilizando un suelo del orden andosol del área Los Encuentros, Sololá. El diseño de tratamientos se basó en el factorial (3x2), producto de la combinación de 3 fuentes de fósforo y 2 sistemas de producción. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con 8 tratamientos y 4 repeticiones; cada unidad experimental estuvo constituida por una maceta de plástico, con un volumen de 5 litros de suelo, una planta de maíz, de lupino o de ambas, según el sistema de cultivo.

En general la materia seca, altura de planta y contenido de fósforo, fueron mayores en el maíz monocultivo. La Roca Fosfórica respondió mejor (aunque por debajo de SFT y SFT+RF) cuando el maíz estuvo asociado con Lupino. Tanto en la Roca Fosfórica como en SFT+RF la eficiencia fue mayor en el sistema asociado, lo que denota un efecto positivo del Lupino sobre la disponibilidad del fósforo proveniente de dichas fuentes para el maíz. Por otra parte, en el sistema asociado la eficiencia relativa de la mezcla SFT+RF fue superior a la suma de los efectos individuales de ambos fertilizantes aplicados separadamente, lo que demuestra un efecto positivo del SFT sobre la solubilización de la RF. El lupino al disponer de una cantidad alta de fósforo fácilmente disponible, se comporto como cualquier cultivo y no desarrollo ningún mecanismo que permita absorber fósforo que se encuentre en formas complejas.

I. INTRODUCCIÓN

Los Andosoles son suelos poco evolucionados, desarrollados a partir de materiales piroclásticos, principalmente cenizas volcánicas; se caracterizan por tener baja densidad aparente. Son suelos muy bien estructurados que propician el buen drenaje, pero a su vez, mantienen buena retención de humedad. Presentan una mineralogía dominante de arcillas alofánicas amorfas y alta fijación de fosfatos que puede superar el 70% y llegar fácilmente a 95%, constituyéndose en su principal limitante. A pesar de que no se cuenta con datos exactos, los andosoles representan un porcentaje significativo de la superficie total del país y están distribuidos en lo que constituye principalmente el altiplano central, occidental y parte de la llamada boca costa, que corresponde fisiográficamente a la pendiente volcánica reciente. Actualmente se cultiva en ellos principalmente maíz, café, hortalizas; además de zonas de vegetación forestal (6, 32).

Dado el problema de la alta fijación cuando se utilizan fuentes comunes de fósforo como el superfosfato triple (SFT) y el superfosfato simple (SFS), surgió la necesidad de estudiar alternativas de aplicación de fuentes de fósforo que se caractericen por su lenta solubilidad, para que permitan a las raíces tomar el fósforo, antes de que éste pase a formas no aprovechables. La roca fosfórica contiene uno o más minerales de fosfato de calcio, sufre una lenta solubilización por acción de la acidez del suelo (mayor efecto residual), por lo que constituye una alternativa más económica que los superfosfatos, aunque normalmente con una eficiencia agronómica inferior a estos.

Por lo anterior, se han realizado diversos estudios tendientes a obtener mayores beneficios en el uso de la roca fosfórica, basados en favorecer la reacción química que ocurre entre las apatitas y los iones hidrógeno. Dichos estudios han comprendido varias acciones como son: acidulación parcial, mezcla de la roca con estiércol, adición de fertilizantes nitrogenados y algunos estudios de inoculación con micorrizas y su efecto sobre la absorción de fósforo, utilización de organismos que promueven un medio ácido o incrementan la capacidad de la planta para absorber fósforo (*Thiobacillus spp.*, *Lombricus rubellus*, *Allolobophora caliginosa* y *Rhizobium sp.*). Trabajos más recientes han demostrado que existen plantas del género *Lupinus* que tienen la particularidad de movilizar y solubilizar fósforo de fuentes no disponibles para la mayor parte de cultivos, autoabasteciéndose de este nutrimento (mecanismo que también poseen otras leguminosas y *Brassica napus* L.), pero además,

dejándolo disponible para cultivos que se encuentren en asociación con ellas. Evaluaciones con roca fosfórica de Carolina del Norte demostraron que *Lupinus arboreus*, *Lupinus albus* y *Lupinus angustifolius*, disolvieron cantidades considerables de roca, más del 70% presente dentro de los tres mm alrededor de las raíces, lo que provocó un decrecimiento del pH de la rizósfera (12, 19).

Con la finalidad de generar información básica que permita en un futuro el aprovechamiento eficiente de fuentes de fósforo, que se adapten a regiones con problemas de fijación del mismo, se planteó la presente investigación con el objetivo general de evaluar el efecto de una especie de lupino existente en el país (*Lupinus montanus* HBK) en asociación con maíz (*Zea mays* L.) sobre la eficiencia agronómica de tres fuentes de fósforo (SFT, RF y SFT+RF) para ambas especies en un suelo del orden Andosol, de la aldea Los Encuentros, Sololá.

II. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los Andosoles son suelos derivados de cenizas volcánicas, cuya principal característica es la presencia de arcillas amorfas e hidratadas del tipo del alofano, que aparecen en esos sistemas como producto obligatorio de la descomposición de las cenizas volcánicas en zonas húmedas, en términos generales las condiciones físicas de estos suelos son muy buenas. Así mismo pueden catalogarse como moderadamente fértiles y su potencial está definido por las características de las cenizas que los forman (6).

La alta fijación de fósforo, que por lo general supera el 70% y llega fácilmente a valores de 95%, constituye la principal limitante de los Andosoles. También el boro y el azufre por su condición de aniones, pueden ser fijados en estos suelos. Las propiedades anteriormente mencionadas conllevan generalmente a la baja productividad de los mismos (6).

En los Andosoles debido a una serie de reacciones la disponibilidad de fosfatos solubles añadidos, a través de fuente comunes como el superfosfato simple y el superfosfato triple, es rápidamente disminuida, considerándose que sólo aproximadamente entre 8 a 10% del fósforo aplicado es utilizado por las plantas (11).

III. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACION

Debido a la baja recuperación del fósforo fertilizante en los Andosoles, el problema de la fertilización con dicho elemento no ha sido resuelto completamente, Esta limitante conlleva a la necesidad de seguir investigando alternativas que permitan posteriormente manejar en forma eficiente la fertilización fosfatada en estos suelos.

Recientemente se ha demostrado que bajo condiciones de limitado suministro de fósforo, algunas plantas como *Lupinus arboreus*, movilizan y solubilizan fósforo de fuentes no disponibles para la mayor parte de cultivos, autoabasteciéndose de este nutriente y a la vez dejándolo disponible para otros cultivos que se encuentren en asociación con ellas (12).

Por lo anterior y con la finalidad de encontrar alternativas de manejo agrícola sustentables, se planteó la presente investigación, con el propósito de evaluar el efecto de una especie de lupino en asociación con maíz, sobre la eficiencia agronómica de tres fuentes de fósforo para ambas especies en un Andosol de Guatemala.

IV. MARCO TEORICO

4.1 MARCO CONCEPTUAL

4.1.1 Generalidades sobre el Lupino

4.1.1.1 Origen del Lupino

Existen dos grandes regiones genéticas para el género *Lupinus*. Una de ellas se extiende en el área del mediterráneo, es decir, desde el sur de Europa hasta Africa Central y las alturas de Etiopia. La segunda región de origen abarca todo el continente americano, exceptuando únicamente las húmedas llanuras tropicales de la cuenca del Amazonas. Mientras que la región genética mediterránea comprende escasamente una docena de especies silvestres, de las que se mejoraron las especies cultivadas *Lupinus albus*, *Lupinus luteus* y *Lupinus angustifolius*, en la región americana existen entre 100 y 150 especies; sin embargo, la única especie domesticada y cultivada es *Lupinus mutabilis* Sweet, conocida en Bolivia y en el sur de Perú como tarwi y en el Ecuador y norte del Perú como chocho (15).

La clasificación sistemática del lupino, de acuerdo con la Flora de Guatemala es la siguiente (29).

Orden: Fabales
Suborden: Leguminosinae
Familia: Fabaceae
Subfamilia: Papilionatae
Tribu: Genisteae
Subtribu: Genistinae
Genero: *Lupinus*

4.1.1.2 Exigencias Climáticas y de Suelo

4.1.1.2.1 Temperatura

Las exigencias de temperatura del lupino pueden ser muy variables de acuerdo al origen genético de la semilla. Existen especies que pueden crecer y producir al nivel del mar y otras como *Lupinus mutabilis* que se cultivan en el Perú y en Bolivia hasta en alturas de más de 4,000 msnm. Existen ecotipos que sobreviven a temperaturas por debajo de los $-9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. El *Lupinus mutabilis* en estado adulto es resistente a las heladas, mientras que la planta joven es muy susceptible al frío. El *Lupinus albus* resiste fácilmente temperaturas bajo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante el crecimiento la temperatura óptima durante el día debe oscilar entre 20 y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperaturas por encima de los $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ interfieren en el óptimo desarrollo de la planta (15).

4.1.1.2.2 Régimen de lluvia y humedad ambiental

Las exigencias de precipitaciones que tiene el lupino varían notablemente y dependen del suelo, la temperatura y la precocidad de la planta; se ha notado que puede crecer en zonas de escasa precipitación pluvial. Los ecotipos de maduración temprana necesitan como mínimo 350 mm durante su período vegetativo (15).

4.1.1.2.3 Condiciones de suelo

Si el lupino dispone de la humedad suficiente se desarrolla mejor en suelos sueltos, de baja fertilidad y de textura gruesa, que en suelos fértiles y de textura muy fina. En las laderas y faldas de los cerros su rusticidad constituye una ventaja (15).

4.1.1.2.4 Fertilización

Se ha demostrado que *Lupinus albus* y *Lupinus termis* en el área mediterránea, así como *Lupinus mutabilis* en suramérica son cultivos poco exigentes desde el punto de vista de la fertilidad del suelo. Para la fertilización de los campos hay que tener en cuenta dos particularidades de la planta (15):

- a) El lupino, por ser leguminosa, dispone de un abastecimiento propio de nitrógeno, asegurado por las bacterias noduladoras.
- b) Las profundas raíces le permiten aprovechar los nutrientes de las capas más profundas del suelo. Las raíces segregan ácidos que liberan del suelo nutrientes que normalmente se encuentran en los minerales en formas no disponibles para las plantas.**

La semilla no requiere ser inoculada con la bacteria *Rhizobium* si se siembra en suelos en donde ha crecido lupino tradicionalmente. Los rendimientos disminuyen si se siembra semilla sin inocular en terrenos donde no se ha cultivado dicha planta durante 7 ó más años.

El lupino, tanto en estado silvestre como en la mayoría de sus formas cultivadas, depende de la fijación simbiótica de nitrógeno para su nutrición con este elemento. Las plantas absorben de esta manera hasta 340 kg de N ha⁻¹. Cuando el suelo es extremadamente deficiente, la prudente aplicación de un fertilizante nitrogenado puede ser eventualmente provechosa, si se efectúa al principio del ciclo vegetativo. De este modo se refuerzan las plantas jóvenes que todavía no han iniciado el proceso simbiótico. Sin embargo, hay que impedir que la presencia del N mineral retrase la fijación simbiótica del N atmosférico que empieza 3 a 4 semanas después de la siembra; por ello, no deberá emplearse más de 20 kg de N ha⁻¹ (38). Gukova *et al.* (1971) observaron que ha medida que aumenta la aplicación de un fertilizante nitrogenado se reduce la formación de nódulos y la fijación del nitrógeno del aire por acción de las bacterias noduladoras. Si el lupino se cultiva en suelos con propiedades físicas y químicas favorables, se puede reducir la fertilización nitrogenada o incluso prescindir de ella.

La exigencia de fósforo es normalmente baja. Gross (1982) afirma que investigadores en la Universidad Goettingen de la Republica Federal Alemana demostraron mediante fósforo marcado,

como las raíces del *Lupinus mutabilis* están en condiciones de liberar el fósforo bloqueado en el suelo y hacerlo aprovechable. Las plantas poseen así mismo, la capacidad de transformar la potasa que se encuentra en el suelo y hacerla disponible para la planta. A pesar de ello se pueden observar deficiencias de potasio, siendo recomendable en tal caso, una fertilización de hasta 60 kg de K_2O ha^{-1} . Los fertilizantes potásicos no deben ser aplicados en contacto con la semilla a fin de evitar que las sales dañen las plantas jóvenes. Se recomienda fundamentalmente el uso de sulfato de potasa, debido a los requerimientos de azufre que presenta la planta.

4.1.2 El fósforo del suelo

El fósforo elemental (P) no se encuentra en estado libre en la naturaleza, porque su elevada facilidad de oxidación no lo permite. Con todo son muy comunes los compuestos de fósforo, por ejemplo, los fosfatos que se encuentran en numerosos minerales (30).

4.1.2.1 Origen, contenido y formas de fósforo

La mayor parte del fósforo se encuentra generalmente en forma inorgánica y casi todo el fósforo del suelo procede en los suelos no fertilizados, del material de origen (18).

La sustancia madre y al mismo tiempo la fuente original de todos los fosfatos, son las apatitas, tales como la *fluorapatita* $Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaF_2$ y la *hidroxilapatita* $Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH)_2$. Ambos minerales son muy estables y se identifican frecuentemente en la arena y el limo de los suelos muy lavados (18, 30, 39).

El fósforo (P) no se presenta tan abundantemente en los suelos, como el N y el K. La concentración total varía entre 0.02 y 0.10%. Afortunadamente la cantidad total tiene muy poca o ninguna relación con la disponibilidad de fósforo para las plantas (9).

El fósforo que permanece transitoriamente como disponible después de una aplicación es también denominado “**P residual**”. Aplicaciones continuas de fósforo mantienen una cantidad cada vez más alta de P disponible para los cultivos aún en suelos altamente reactivos (9).

El fósforo del suelo puede ser dividido en tres grupos (18):

1. *Fosfatos presentes en la solución del suelo.*

Representan una mínima parte del fósforo total. En la solución del suelo la concentración suele ser del orden de 1 ppm o menos.

2. *Fosfatos presentes en la materia orgánica del suelo.*

De ésta será cedido lentamente, a medida que actúen los procesos de descomposición.

3. *Fosfatos inorgánicos.*

Incluye tanto los compuestos fosfáticos definidos como las películas superficiales de fosfatos unidos a partículas inorgánicas.

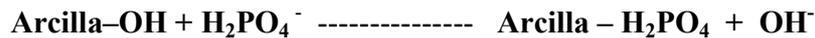
Los fosfatos inorgánicos pueden dividirse en:

1. Fosfatos definidos de calcio, aluminio y hierro.
2. Fosfatos adsorbidos en la superficie de óxidos libres y minerales arcillosos.

4.1.2.2 Formas de fósforo inorgánico en suelos ácidos

En suelos ácidos ricos en hierro y aluminio en soluciones, los fosfatos forman compuestos definidos poco solubles con estos cationes, de distinto grado de cristalización e hidratación. Como ejemplos pueden citarse la *Variscita*, $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y la *Estrengista*, $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

En la superficie de las arcillas silíceas, óxidos libres y geles amorfos se adsorben los fosfatos. La cuantía de la adsorción depende de la carga positiva del complejo de adsorción y esta última del pH y del punto isoeléctrico. Una ilustración de este fenómeno se presenta a continuación, a partir de la reacción entre la *caolinita* y los fosfatos (18).



Está constituido por una fracción inorgánica grande, que presenta diversidad de formas (P-Ca, P-Al, P-Fe, P-ocuidos), con diferente grado de insolubilidad (31).

El P inorgánico adsorbido sobre la superficie de los minerales y de las arcillas como H_2PO_4^- ó HPO_4^{2-} (P inorgánico disponible) también puede desorverse para amortiguar la disminución del fósforo en solución. Numerosos microorganismos del suelo digieren residuos vegetales conteniendo P y producen muchos compuestos orgánicos en el suelo. Estos compuestos orgánicos pueden ser mineralizados a través de la actividad microbiana para suministrar fósforo a la solución (9).

4.1.3 El Fósforo en la Planta

4.1.3.1 Forma en que es absorbido

La nutrición fosforada de las plantas se realiza a partir de los iones del ácido ortofosfórico, principalmente se absorbe como H_2PO_4^- seguido del HPO_4^{2-} (18).

4.1.3.2 Funciones fundamentales del fósforo en las plantas

La importancia del fósforo en la nutrición animal y vegetal es posiblemente bien conocida por todos. Está presente en las semillas en cantidades mayores que en cualquier otra parte de la planta; sin embargo, se encuentra en gran proporción en las partes jóvenes en crecimiento. Como el nitrógeno, es un constituyente de todas las células vivas. Forma parte también de los fosfolípidos, nucleoproteínas y de la fitina, esta última es una forma de reserva de fósforo en las semillas (14, 18).

Este elemento representa un papel muy importante en la transformación de la energía en las células, tanto de las plantas como de los animales. Por lo tanto, es necesario para las transformaciones normales de los carbohidratos en las plantas; por ejemplo, el cambio de almidones en azúcares. El fósforo es también necesario para la asimilación de las grasas, y aparentemente incrementa la eficiencia de los mecanismos cloroplásticos (14, 18).

4.1.4 Fijación del Fósforo en el suelo

Las plantas utilizan una gran cantidad de fósforo en comparación con la cantidad total presente en el suelo. El mantenimiento de una buena cantidad de fósforo disponible para el crecimiento de las plantas es un problema, tanto en suelos ácidos como alcalinos. El problema comienza desde la tendencia del fósforo a combinarse con muchos constituyentes diversos del suelo para formar compuestos insolubles por medio de un proceso llamado colectivamente “ fijación de fósforo ” (14).

Todo el fósforo que entra al suelo se transforma, generalmente en formas más insolubles, pero permanece ahí como reserva, aumentando el factor capacidad del suelo. Una buena disponibilidad de fósforo depende de una adecuada solubilización. Cualquier mecanismo que disminuya la fijación y favorezca la solubilización conducirá a un mejor uso del fósforo por las plantas (31).

4.1.5 Retención de Fósforo en Andosoles

El proceso de retención de fosfatos en el suelo se da mediante dos mecanismos: a) adsorción, y b) precipitación. En la retención por adsorción, los fosfatos se adhieren a las superficies reactivas del suelo cargadas electropositivamente. Este tipo de adsorción es dependiente del pH del suelo, observándose que dicho proceso se acentúa cuando éste se encuentra debajo del punto isoeléctrico, con bajo contenido de materia orgánica y alto contenido de minerales arcillosos e hidróxidos de hierro y aluminio (13). La retención de fosfatos por precipitación se da en los suelos cuando la concentración de fosfatos en solución es alta (mayor o igual a 1M), como por ejemplo, cerca de la partícula de fertilizante fosfatado, el fosfato se precipita como fosfatos de calcio, hierro y aluminio (5).

Según Leal *et al.* (1,994), citado por Rodas (27), dice que la precipitación de los fosfatos de hierro y aluminio es la principal causa de la retención del fósforo en el suelo, más que el de adsorción.

La alta fijación de fósforo que por lo general supera el 70% y llega fácilmente a valores de 95% constituye la principal limitante de estos suelos (6).

Los suelos de ando se caracterizan por su capacidad de retener grandes cantidades de fósforo, por lo que se disminuye rápidamente la disponibilidad de los fosfatos solubles añadidos, considerándose que sólo aproximadamente un 10% del fósforo aplicado es utilizado por las plantas (11). La alta afinidad de los suelos de ando para retener al fósforo es una consecuencia del alofano que contiene (26). Wada (1,959), encontró que el fosfato amónico reaccionaba con el alofano para formar un fosfato insoluble y que esta reacción tenía lugar rápidamente a un pH de 4. Wada y Hardward (1,974), señalan que la fuerte absorción de aniones como los fosfatos en los suelos de ando, se asocia con la presencia de aluminosilicatos amorfos e hidróxidos de hierro y aluminio .

Mizota (1,977), señala que la retención de fósforo en los suelos de ando es una reacción del fósforo con el aluminio y hierro, constituyendo fosfatos de aluminio y hierro difíciles de solubilizar; asimismo señala que el alofano, la imogolita, además de varias otras formas de óxidos de hierro y aluminio hidratadas, son las que participan mayormente en esta reacción.

Wada y Gunjicake (1,979), señalan que se han realizado trabajos en suelos de ando en donde se correlaciona la retención de fósforo con el aluminio y hierro ligado al humus, así como el aluminio y hierro ligado a los constituyentes “parecidos al alofano“ y al alofano, reportándose que la retención de fósforo es gobernada en el horizonte A₁ por el aluminio y hierro ligado al humus así como por el aluminio ligado a los constituyentes similares al alofano, mientras que la retención de fósforo en el horizonte B₁ es regulada por el aluminio ligado a los constituyentes similares al alofano y por el aluminio ligado al alofano e imogolita.

Los andosoles son suelos poco evolucionados, desarrollados a partir de materiales piroclásticos, principalmente cenizas volcánicas; se caracterizan por tener baja densidad aparente (peso específico aparente), normalmente menor de 0.90 g/cc, con una mineralogía dominante de arcilla alofánica y alta fijación de fosfato (6, 32). Los andosoles están distribuidos en el país en lo que constituye principalmente el altiplano central y occidental y parte de la llamada boca costa que corresponde fisiográficamente a la pendiente volcánica reciente. Los andosoles presentes en Guatemala son: andosoles húmicos, andosoles mólicos y andosoles vítricos (32).

Los andosoles son muy buenos suelos para las actividades agropecuarias y forestal en general, especialmente en superficies de llanas a suavemente onduladas, por ejemplo, donde se cultiva en la actualidad una gran extensión de hortalizas para exportación; sin embargo, tiene algunas limitantes especialmente de carácter químico, además, de ser bastante susceptibles a la erosión (32).

Alvarado (1982), citado por Tobías (32), reporta que en Centroamérica existen abundantes suelos volcánicos (con altos contenidos de alofano) y una de las principales limitantes para la producción agrícola la constituye la inmovilización o fijación de fosfatos, la cual tiene fuertes inconvenientes con la fertilidad de los suelos y su fertilización de tal forma que tiene consecuencias que tienen incidencias en la productividad de los suelos.

4.1.6 Roca fosfórica y el fósforo del suelo

4.1.6.1 Origen, composición e importancia de la roca fosfórica

Los yacimientos de roca fosfórica pueden tener distinta formación geológica, en este caso podrían ser: *ígneas, sedimentaria o metamórfica*. El 85% de la usada comercialmente es *sedimentaria* y el resto principalmente *ígneas* (10, 22).

La más común es la fluorapatita, $\{Ca_3(PO_4)_2\}_3.CaF_2$. Su concentración puede variar desde 18 hasta 38% de P_2O_5 según sea su origen. Normalmente para uso directo, en suelos agrícolas ácidos, específicamente, pueden variar entre 28 y 38% de P_2O_5 (10, 22).

Los fertilizantes comerciales se derivan de los depósitos naturales en los cuales el fósforo se encuentra en relativamente alta concentración. Los principales depósitos se encuentran en África del Norte, Unión Soviética y Estados Unidos. En América Latina se conocen actualmente depósitos en Venezuela (Táchira), Brasil (Araxá y Perambuco) y Perú (Sachurá) (6, 18). En estos depósitos la apatita es el principal mineral fosfórico. La roca fosfórica tiene de 5 a 17% de fósforo total soluble en ácido cítrico y nada soluble en agua. Ella además, representa el material principal para elaborar los abonos fosfóricos solubles y puede ser molida finamente para ser aplicada al suelo directamente. Su solubilidad es excesivamente baja; los resultados de experimentos de campo muestran que su efectividad para suministrar fósforo a las plantas es menor en los suelos neutros y alcalinos que en los suelos ácidos (18).

En contraste con los fertilizantes fosfóricos solubles los cuales decrecen en eficiencia con el tiempo, la roca fosfórica en suelos ácidos la aumenta; por eso se hacen aplicaciones de esta para varios años, debe incorporarse a toda la masa de la capa arable para facilitar su solubilización. Es conveniente por su proceso lento de disolución, utilizarla en plantas perennes y de sistema radicular desarrollado como la caña de azúcar y gramíneas de pastos. También parece ser que los cultivos forrajeros, en especial las leguminosas y las crucíferas, son capaces de utilizar con más eficacia que otros cultivos estos fosfatos molidos por acción directa de sus raíces (6, 18).

Aunque la roca, para su mejor efectividad debe estar finamente molida, no es económica cuando tiene un grado de trituración como para pasar por un tamiz mayor de 100 mallas. El grado de finura no es tan importante como la naturaleza de una roca fosfórica en cuanto a la determinación de su eficacia agrícola (18). En experimentación con rocas fosfóricas para la agricultura de las zonas Andinas es conveniente resaltar la diversidad de suelos, las variaciones en las características físico-químicas de las rocas fosfóricas, la variabilidad climática, los diferentes sistemas de producción y las condiciones socioeconómicas de los productores (28).

Arroyave *et al* (1979) citado por Núñez (25), trabajando con roca fosfórica cruda de Zimapán, Hidalgo, México, encontraron mayor efectividad sobre el rendimiento de grano de maíz en un andosol, al aplicar dicha roca al voleo y con 14 días de anticipación a la siembra, en comparación con la aplicación en banda y al momento de la siembra. Sin embargo, al aumentarse la solubilidad del fósforo en la roca mediante acidulación parcial, la eficiencia de la aplicación anticipada y al voleo permaneció

constante, mientras que la aplicación a la siembra y en banda aumentó progresivamente su eficiencia en tal forma que ya con 25% de acidulación resultó más efectiva la aplicación a la siembra y en banda. Alvarez *et al* (1981), encontraron que la roca de Zimapán, Hidalgo, México, acidulada al 25% logra un incremento en la eficiencia de producción de materia seca y de absorción de fósforo por *Lolium multiflorum*, igual al obtenido con acidulaciones mayores, llegando a igualar al superfosfato en un Andosol de Toluca, México; no así en un Ultisol de Novara, Veracruz, México.

Guzmán *et al* (1980) citado por Núñez (25), ensayaron el efecto de la fermentación del estiércol de bovino sobre la solubilización de roca fosfórica de Saltillo y de Baja California, sola o adicionada de azufre en dos suelos, un Mollisol y un Andosol, y su efecto sobre los rendimientos de ballico en dos cortes. El efecto de las rocas fosfóricas se elevó substancialmente al adicionárseles azufre o al fermentárseles durante 30 días con estiércol de bovino; pero el efecto más sobresaliente se obtuvo con la fermentación de la roca fosfórica en estiércol, adicionado de azufre elemental, lo cual elevó en más de 100% los rendimientos obtenidos con la sola adición de roca fosfórica.

Dada esta diversidad de factores deben buscarse estrategias que permitan obtener resultados confiables a corto y a largo plazo, en cuanto a la roca fosfórica se refiere y que involucren factores relevantes asociados a la respuesta de cultivos a dosis y productos.

4.1.6.2 Respuesta de la planta a la roca fosfórica

Núñez (25), dice que la magnitud de la respuesta de una planta o de un cultivo a la aplicación de roca fosfórica (evaluada en términos de desarrollo vegetativo, o mejor aún, de fósforo absorbido), depende tanto de la reactividad de la roca, como de su granulometría, la dosis utilizada, las propiedades del suelo, la forma de aplicación, el clima y el tipo de planta.

Con el fin de observar la correlación existente entre los datos del laboratorio y la respuesta de plantas a los distintos tipos de roca fosfórica Adán *et al* (1980), establecieron un ensayo de invernadero desarrollando pasto italiano (*Lolium multiflorum*, cv Westerwools) en dos suelos ácidos fijadores de

fósforo, un Andosol y un Ultisol con pH de 5.3 y 5.4, y una capacidad de fijación de fósforo de 99.3 y 82.1%, respectivamente.

Para que la roca fosfórica libere fósforo disponible a las plantas es necesario que reaccione con los componentes ácidos del suelo o de la raíz y este proceso se favorece al aumentarse la superficie de contacto entre la roca fosfórica y el suelo; por ello se requiere que esté finamente molida. En efecto, cuando se aplicó superfosfato triple al Andosol, la absorción de fósforo por la planta se redujo al aumentarse la fineza del material; esto se debió a la alta capacidad de fijación de fósforo de este suelo, y tratándose de una fuente altamente soluble de fósforo, la fijación se acentuó y por lo tanto la disponibilidad se redujo al incrementarse la superficie de contacto entre el superfosfato y el suelo. En el Ultisol que es un suelo con menor capacidad de fijación de fósforo, este efecto sólo ocurrió con la mayor dosis de superfosfato. En el caso de las rocas fosfóricas hubo seis ocasiones en que el tamaño más fino de partículas superó en absorción de fósforo al más grueso; pero hubo también dos ocasiones inexplicables en que ocurrió lo contrario (25).

El fósforo es uno de los nutrimentos de mayor importancia en la fertilización agrícola, su deficiencia se presenta en todos los pisos térmicos, clima frío, medio y cálido. La casi totalidad de cultivos de importancia socioeconómica ven limitada su productividad por deficiencias de este elemento, requiriéndose de fertilización fosfatada para una adecuada producción de los cultivos (28).

La capacidad de la planta para extraer fósforo de un suelo fertilizado con roca fosfórica, varía según la especie vegetal (25). En Antioquia, Colombia, en andosoles de clima medio, bajos en fósforo, hubo respuesta positiva y significativa de la caña de azúcar a las aplicaciones de roca fosfórica, en dosis de 150 kg ha^{-1} de P_2O_5 . En el cultivo del maíz también se obtuvieron respuestas positivas a las aplicaciones de roca fosfórica (28).

En el departamento de Norte de Santander, Colombia, en suelos clasificados como andosoles, el cultivo de la papa presenta respuestas significativas a las aplicaciones de roca fosfórica en suelos bajos en fósforo (menor a 15 ppm). Se pueden obtener buenas producciones de papa (mayores a 20 toneladas ha^{-1}), con 200 kg ha^{-1} de P_2O_5 como superfosfato triple o con 300 kg ha^{-1} de P_2O_5 como roca fosfórica. Igualmente se encontró respuesta positiva del cultivo de arroz, en suelos bajos en fósforo, a la aplicación de roca fosfórica en dosis de 100 a 150 kg ha^{-1} de P_2O_5 (28).

4.1.6.3 Eficiencia agronómica relativa de la mezcla roca fosfórica + superfosfato triple

La aplicación de mezclas de roca fosfórica con superfosfato triple y superfosfato demostró, en todos los suelos, que los rendimientos se incrementaban a medida que la proporción de superfosfato incrementaba en la mezcla (28).

Experimentos de campo con papas y pastos confirmaron las tendencias arriba mencionadas, pero además, demostraron que la acidificación parcial incrementa significativamente la efectividad de la roca fosfórica (28).

Desde 1972 se han realizado estudios comparativos de la eficiencia agronómica de rocas fosfóricas de distintos orígenes, pero a partir de 1980 estos trabajos se han orientado preferencialmente a la roca fosfórica de la península de Baja California (RFBC), por ser los yacimientos de mayor importancia y porque dicho material muestra una reactividad elevada y por lo tanto una eficiencia aceptable en suelos ácidos. En numerosos estudios de invernadero y campo conducidos para evaluar la eficiencia agronómica de la roca fosfórica de Baja California, se han encontrado resultados muy variables dependiendo de las condiciones de cada ensayo; pero en más del 80% de los casos, la eficiencia de la roca fosfórica de BC supera al 40% de la obtenida con superfosfato triple (SFT), lo cual se considera ventajoso, ya que el costo del fósforo en la roca fosfórica es de sólo el 30% del correspondiente al SFT (28).

Aún cuando la eficiencia agronómica de las rocas fosfóricas es normalmente inferior a la de fuentes altamente solubles de fósforo, aún en suelos ácidos, es de esperarse que la eficiencia relativa de las rocas fosfóricas frente al superfosfato sea mayor en suelos altamente fijadores de fósforo que en suelos sin este inconveniente, ya que al solubilizarse lentamente, da mayor oportunidad a las raíces de las plantas a tomar el fósforo, antes de que éste pase a formas no aprovechables (25).

Mishra *et al.* (1980), en suelos deficientes en fósforo y usando trigo como planta indicadora, encontraron que la mezcla de roca fosfórica de Mussoorie y superfosfato triple (relación 1:1) produjo un rendimiento de grano estadísticamente superior al que se obtuvo con la adición de la roca sola, pero además, fue similar al obtenido con superfosfato triple en los dos años de estudio.

Gupta y Mishra (1978), evaluaron la roca fosfórica cruda en combinación con superfosfato como una fuente alternativa de fósforo sobre molisoles relativamente ricos en materia orgánica. Los efectos de las diferentes combinaciones de fertilizantes sobre el rendimiento de materia seca, peso de plantas, contenido de fósforo y disponibilidad de fósforo sobre maíz y *Trifolium alexandrinum*. Los resultados demostraron que la aplicación de la mezcla de roca fosfórica y superfosfato ofreció una alternativa viable por el bajo costo de la roca fosfórica.

4.1.7 Interacción lupino – fósforo

Aguilar (1981), citado por Núñez (25), señala que las leguminosas en plena actividad de fijación simbiótica de nitrógeno absorben del suelo selectivamente cationes básicos, lo cual tiende a abatir el pH en la vecindad de las raíces, favoreciendo con ello la solubilización de la roca fosfórica.

Braum y Helmke (1995) en trabajos con *Lupinus albus* cv. Ultra y soya cv. Elgin sembradas sobre un suelo ácido, con bajo contenido de fósforo disponible, midieron la capacidad de cada especie para absorber el fósforo del suelo. El resultado mostró que *L. albus* usó fósforo del suelo de una fuente normalmente no disponible para la soya.

Bolland (1995) en suelos ácidos de Australia Occidental midió la relación entre rendimiento y el nivel de fósforo aplicado en *Lupinus cosentinii* cv. Chapman y *L. angustifolius* cv. Merrit. El fósforo (superfosfato simple) fue aplicado solamente una vez para separar las parcelas en 1985, 1986, 1987 y 1993. El rendimiento fue medido en 1993. Los resultados consistentemente demostraron que *L. cosentinii* produjo más materia seca y semilla en el nivel más alto de fósforo aplicado. En cada nivel de fósforo la concentración del mismo en el punto más alto de producción de materia seca fue más alta en *L. cosentinii*. Se concluyó que la diferencia en el sistema radicular pudieron darle mayor habilidad para utilizar niveles bajos de aplicación de fósforo más eficientemente y producir rendimientos altos.

Jungk *et al.* (1993), estudiando la movilización de diferentes fracciones de fosfato en la rizósfera encontraron que las plantas movilizan P del suelo por desorción vía desviación de la solución de P concentrado alrededor de las raíces.

En un Oxisol el proceso fue realizado por el uso de N-nitrato en la nutrición de *Lolium perenne*, lo que aumentó el pH del suelo, y fue por liberación de carboxilato por *Lupinus albus*. Intercambios

ligados y solubilización de Fe/Al fueron supuestamente los mecanismos. La nutrición de *L. perenne* con N-amoniaco disminuyó el pH y permitió movilización de P en un Luvisol pero no tuvo tal efecto en un Oxisol, debido a la solubilidad ácida de P en estos suelos. El P orgánico disuelto en la solución del suelo contribuyó en 1/3 al P tomado por el cultivo de cebada en un Luvisol. Experimentos de laboratorio sugirieron que el fósforo orgánico fue hidrolizado a fosfatos en la superficie radical y reaprovisionado por microorganismos.

Hinsinger y Gilkes (1995), evaluaron en cámaras de crecimiento, la disolución de roca fosfórica (RF) de California del Norte en la rizósfera de *Lupinus albus* y *L. angustifolius*. Las plantas fueron cultivadas por 8 a 13 días en arena alúmina pura y pH alcalino para eliminar la posible disolución de roca fosfórica debido a su reacción con el suelo. Como única fuente de P y Ca se aplicó RF en dos niveles (0.1 y 1 mg P g⁻¹ suelo). Se encontró que ambas especies disolvieron cantidades considerables de RF, más de 70% presente dentro de los tres mm alrededor de las raíces. Fósforo extraído del suelo con NaOH 0.5M mostró que arriba de 69% de P disuelto acumulado en la rizósfera de ambas especies se debió a sorción por el suelo, particularmente en el nivel alto de aplicación. Solamente *L. albus* utilizó cantidades significativas de Ca. El P y Ca tomados por la planta no estuvieron influenciados fuertemente por la disolución de RF inducida por la raíz.

En ambas especies la disolución probablemente se debió a la excreción de protones que provocaron un decrecimiento del pH de la rizósfera. *L. albus* disolvió más de dos veces RF que *L. angustifolius*. Esto pudo estar relacionado a la biomasa de raíces grandes de la primera de ellas o a la actividad particular de excreción de sus raíces.

Se dice que la asociación de cultivos presenta una serie de ventajas respecto al monocultivo, las ventajas están referidas a que en algunos estudios realizados han demostrado que la incidencia de plagas, enfermedades y malezas es menor (4). Espinosa (1997), encontró que bajo condiciones de limitado suministro de fósforo, *Lupinus arboreus* puede excretar iones H⁺ que disminuyen el pH en la rizósfera. La habilidad de varias especies se dió en el orden: *Lupinus arboreus* > *Trifolium subterraneum* > *Stylosanthes hamata* > *Medicago sativa*. *Urtica dioica* no mostró mucha habilidad.

Comparando la respuesta de *L. arboreus* y *U. dioica* a fosfatos de sodio y calcio confirmó que *L. arboreus* por acidificación de la rizósfera puede liberar fósforo de fosfatos de calcio, lo cual estimula el desarrollo de raíces en esa zona. *L. arboreus* y *U. dioica* fueron sembradas ambas en

monocultivo y en asociación para investigar si la habilidad de *L. arboreus* para explotar una fuente “no disponible” de fosfato tenía implicaciones para el crecimiento de una especie asociada.

Se encontró que *U. dioica* incrementó su producción de materia seca cerca de 4 a 5 veces en asociación con *L. arboreus* comparado con su monocultivo. Es probable que *U. dioica* tomara nutrientes producidos o hechos disponibles por la asociación con *L. arboreus* y en particular fósforo. Este experimento permitió explicar la alta producción de materia seca de *Avena sativa* en mezclas con *L. arboreus* en un experimento previo en el que pudieron estar involucrados incrementos similares en la disponibilidad del fósforo suministrado.

4.2 MARCO REFERENCIAL

4.2.1 Características de los Materiales Experimentales

4.2.1.1 *Lupinus montanus* HBK (29).

Es una especie de lupino descubierta principalmente dentro de bosques de las montañas superiores, muchas veces se le encuentra en sitios alpinos rocosos, 2,400 – 4,000 msnm. En los departamentos de Sacatepéquez, Chimaltenango, Sololá, Huehuetenango, Quetzaltenango, San Marcos, y el Sur de México. Antiguamente reportada desde Guatemala como *L. vaginatus* Cham & Schlecht. Es una planta común descubierta en los bosques de los altos volcanes y cuando florece es hermosa y espléndida.

Sus características principales son:

- a) Planta perenne, robusta, erguida, un metro de alto o más.
- b) Semillas de cuatro mm de largo.
- c) Hojas sueltas en número de 8 a 15.
- d) Flores de 1.5 cm de largo, de color púrpura a azul o violeta.

4.2.1.2 Características de los fertilizantes químicos utilizados

Roca fosfórica

La más común es la fluorapatita. Su concentración puede variar desde 18 hasta 37% de P_2O_5 según sea su origen. Su granulometría es fina y se usa en suelos ácidos específicamente. Para que reaccione más rápido, se puede acidular parcialmente antes de aplicarla al suelo o bien aplicarla conjuntamente con fertilizante de reacción ácida (22).

Super fosfato triple

Se obtiene de la reacción de la roca fosfórica con el ácido fosfórico. Su concentración es de 46% de P_2O_5 con un 85% de fosfato monocálcico hidrosoluble y asimilable. Su presentación es en forma de granulado lo cual hace que sea de fácil manejo, transporte y distribución (22).

Las características principales de la roca fosfórica de Baja California y el superfosfato triple utilizados en el presente experimento se describen en el cuadro 1.

Cuadro 1. Características principales del SFT y la RFBC que se utilizaron en el experimento.

Mat	Present	% P_2O_5	% de P hidrosoluble	P soluble en citrato (%)	P insoluble en citrato (%)	Otros Nutrimientos
SFT	Granulado	46	85	15	N.D.*	Ca, S
RF	Polvo	27.7	Trazas	8.7	91.3	Ca

*No Determinado

Fuente: Laboratorio de Suelo, Agua y Planta. ICTA.

4.2.1.3 Características generales del suelo utilizado en el experimento

El suelo utilizado en el experimento fue recolectado en la aldea Los Encuentros del municipio de Sololá del departamento del mismo nombre, dicho lugar se encuentra a una altitud de 2,587 msnm. Está clasificado como un Andosol, por lo que se considera un suelo poco evolucionado, desarrollado a partir de materiales piroclásticos, principalmente cenizas volcánicas; se caracteriza por tener baja densidad aparente.

Es un suelo muy bien estructurado que propicia el buen drenaje, pero a su vez, una buena retención de humedad. Con una mineralogía dominante de arcillas alofánicas y alta fijación de fosfatos (cuadro 2).

Cuadro 2. Algunas características físicas y químicas del suelo, utilizado en el experimento.

Característica	Unidad	Valor
pH	----	6.2
P	mg kg ⁻¹	1.16
K	mg kg ⁻¹	115
Ca	cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹	7.8
Mg	cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹	1.13
Cu	mg kg ⁻¹	0.05
Zn	mg kg ⁻¹	2.50
Fe	mg kg ⁻¹	3.50
Mn	mg kg ⁻¹	10.0
Materia orgánica	%	6.05
CIC	%	53.33
SB	%	26.7
Arcilla	%	8.08
Limo	%	27.46
Arena	%	64.45
Clase textural	Francoarenoso	Francoarenoso
Densidad aparente	g/cc	0.909
Fijación de fósforo	%	97

Fuente: Laboratorio de suelo, planta y agua, Salvador Castillo. FAUSAC.

V. OBJETIVOS

General

Generar información básica que permita diseñar opciones para el manejo de la fertilización fosfatada del maíz en un Andosol de Guatemala

Específicos

1. Evaluar el efecto de *Lupinus montanus* HBK en la absorción de fósforo proveniente de roca fosfórica, superfosfato triple y la mezcla de ambos, aplicados en un Andosol de la aldea Los Encuentros, Sololá.
2. Determinar la eficiencia agronómica relativa de la roca fosfórica en comparación con el superfosfato triple y la mezcla de ambos, como fuentes de fósforo para el monocultivo de maíz y para la asociación maíz con lupino.

VI. HIPÓTESIS

1. El desarrollo del maíz y su nutrición fosfatada se favorecen al estar asociado con lupino, independientemente de la fuente de fósforo aplicada.
2. La eficiencia agronómica de las fuentes roca fosfórica y SFT+RF aplicadas al maíz aumenta cuando éste se encuentra en asociación con lupino.

VII. METODOLOGÍA

7.1 Localización del área experimental

El presente trabajo de investigación se realizó en las instalaciones del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA), la Alameda, Chimaltenango. Geográficamente se localiza a 14° 38' 18" latitud norte y 90° 48' 44" longitud oeste con respecto al meridiano de Greenwich. Con una altitud de 1,750 msnm. (20).

7.2 Material experimental

En la presente investigación se utilizaron tres fuentes de fósforo (superfosfato triple, roca fosfórica de baja California, superfosfato triple + roca fosfórica); un suelo del orden Andosol (Los Encuentros Sololá); y una especie de lupino (*Lupinus montanus* HBK).

7.3 Diseño de tratamientos

El diseño de tratamientos del presente trabajo de investigación se basó en el factorial 3x2 considerando los factores siguientes:

- a) Fuentes de fósforo (FF): superfosfato triple (SFT), roca fosfórica de Baja California (RF) y mezcla de ambas fuentes en proporciones de 50% de fósforo cada una.
- b) Sistema de cultivo (SC): monocultivo de maíz, y asociación de maíz con lupino.

Se adicionaron dos tratamientos testigos: maíz monocultivo y maíz asociado con lupino; ambos sin aplicación de fósforo.

7.4 Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar (**DBCA**) con ocho tratamientos (seis producto del factorial 3x2, y dos testigos) y cuatro repeticiones (ver cuadro 3), para dar un total de 32 unidades experimentales. Cada unidad experimental estuvo constituida por una maceta plástica con cinco litros de suelo y una planta de maíz, de lupino, o de ambas, según el sistema de cultivo.

Cuadro 3. Tratamientos evaluados en el experimento

Tratamiento	Fuente de fósforo	Sistema de cultivo
1	SFT	Maíz
2	SFT	Maíz + Lupino
3	RF	Maíz
4	RF	Maíz + Lupino
5	SFT + RF	Maíz
6	SFT + RF	Maíz + Lupino
7	0	Maíz
8	0	Maíz + Lupino

7.5 Modelo Estadístico

El diseño de bloques completos al azar a utilizar presenta el siguiente modelo estadístico

$$Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = valor de la variable de respuesta.

μ = media general.

T_i = efecto del tratamiento.

B_j = efecto del bloque.

E_{ij} = efecto del error experimental.

7.6 Variables Evaluadas

Las variables de respuesta que se analizaron en el experimento, fueron las siguientes:

A. Características morfológicas y biomasa

a) Altura de planta

Al momento de la cosecha, se cuantificó la variable altura de planta (en cm), se midió del cuello de la raíz, hacia arriba (ultima hoja o brote de la planta).

b) Peso seco de la planta (parte aérea)

El material cosechado, se colocó en un horno a 72 °C por 48 horas y posteriormente se cuantificó el peso seco.

c) Número de nódulos en las raíces de lupino

Una vez cosechado el material, en los tratamientos de asocio maíz + lupino, se procedió a cuantificar los nódulos presentes en las raíces de este último.

B. Análisis químico de material vegetal

Se cuantificó el contenido nutricional de P en la parte aérea de las plantas, de acuerdo a la metodología empleada en el Laboratorio de Análisis Químico de Suelo y Tejido Vegetal de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se pesaron 0.5 g de muestra foliar homogeneizada en una balanza analítica, y se colocó en un crisol de porcelana de 50 ml de capacidad. El crisol que contenía la muestra se introdujo en una mufla a una temperatura entre 450 °C a 500 °C por espacio de cuatro horas, hasta su incineración. El crisol se extrajo de la mufla, se esperó su enfriamiento, se le agregaron 25 ml de HCl 1N y se mezcló con las cenizas de la muestra. La mezcla se recuperó y se filtró utilizando un filtro whatman # 1. Luego se tomaron 2 ml de la alícuota del filtrado en un erlenmeyer de 50 ml de capacidad, se le agregaron 10 ml de agua destilada y 10 ml de solución de color, se agitó y se dejó reposar por 20 minutos. Luego de los 20 minutos se procedió a su lectura en el espectrofotómetro.

C. Análisis químico de suelo

Este análisis se determinó previo al experimento, tomando en cuenta la metodología empleada por el laboratorio anteriormente mencionado. Se tomaron 5 ml de suelo de la muestra con la cucharilla medidora de suelo. Se colocaron los 5 ml de suelo en un frasco de plástico de 50 ml de capacidad. A los 5 ml de suelo se le agregaron 25 ml de la solución extractora (HCl 0.05N + H_2SO_4 0.025N). Se agitó el frasco con la mezcla por 5 minutos a 180 revoluciones por minuto en el agitador mecánico horizontal. Luego de agitada la mezcla se trasvasó a un frasco de plástico de 50 ml de capacidad, pasándola a través de un filtro whatman No.2.

Este procedimiento se realizó por un periodo de 30 minutos. Si la solución estaba muy turbia se pasó nuevamente a través del papel filtro hasta que salió lo más claro posible. Si la turbidez persistía, se agregó carbón activado al extracto. Se tomaron 2 ml del extracto de la muestra medidos con la pipeta volumétrica, se colocaron en un erlenmeyer de 50 ml de capacidad y se le agregaron 10 ml de agua destilada más 8 ml de solución de color. El extracto se agitó manualmente por espacio de un minuto y se dejó reposar durante 20 minutos. Luego se leyó en el Espectrofotómetro de Colorimetría a 880 nanómetros (nm).

7.7 Manejo del Experimento

7.7.1 Preparación del suelo

Previo a la siembra se aplicaron los tratamientos de fertilización fosfatada; en este caso el suelo de la maceta fue colocado en bolsas de plástico juntamente con el fertilizante, se procedió a agitarlo con el fin de lograr homogeneización. La dosis de fósforo que se aplicó fue de $300 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ($652.17 \text{ kg ha}^{-1}$ de SFT ó 1111 kg ha^{-1} de RF ó $326.09 \text{ kg ha}^{-1}$ de SFT + $541.52 \text{ kg ha}^{-1}$ de RF). Para prevenir deficiencias de N se aplicaron a todos los tratamientos, $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$, dividiendo la misma en dos fases, quince y treinta días después de la siembra del maíz.

7.7.2 Siembra

La siembra de lupino se realizó el dos de enero de 2003, colocando tres semillas en cada maceta de los tratamientos que incluían asociación. A los 20 días después de la siembra se hizo un raleo, para dejar una planta por maceta; simultáneamente se sembró el maíz, colocando dos semillas por maceta, efectuando un raleo 12 días después para dejar una planta.

La razón de sembrar antes el lupino fue para permitir que desarrollara su sistema radicular, el cual pudiera favorecer la solubilización y absorción del fósforo, mismo que requeriría el maíz desde sus primeras etapas de crecimiento. Desde la siembra hasta la cosecha de las plantas, se proporcionaron los riegos necesarios para mantener el suelo a capacidad de campo.

7.7.3 Control de malezas

Durante el ciclo de evaluación para ambas especies, se realizaron tres controles de malezas, en forma manual.

7.7.4 Control de plagas y enfermedades

Se monitoreo continuamente para identificar plagas y enfermedades; sin embargo, durante el experimento las plantas de maíz y lupino presentaron un estado sano, por lo que no fue necesario realizar ningún control fitosanitario.

7.7.5 Cosecha

Las plantas de maíz fueron cosechadas 50 días después de la siembra, en esta misma fecha también se procedió a cosechar el lupino sembrado al inicio del experimento (70 dds). En ambas especies se cosechó tanto la parte aérea como la raíz, manejándose en forma independiente.

7.8 Análisis estadístico de la información

Para conocer el efecto de cada uno de los factores y las interacciones entre los mismos, los datos que se registraron para las variables evaluadas se organizaron y analizaron de acuerdo al diseño de tratamientos mencionado anteriormente (factorial). El efecto de cada tratamiento con relación a testigos absolutos se analizó utilizando la técnica estadística de un diseño de bloques completos al azar (DBCA), agrupando los tratamientos de acuerdo a su sistema de producción. Cuando las diferencias entre fuentes de variación fueron estadísticamente significativas (5% probabilidad de error), se procedió a efectuar comparaciones múltiples de medias, utilizando para ello la prueba de Tukey al 5% de probabilidad. Así también se realizaron contrastes ortogonales entre fuentes y sistemas.

La eficiencia relativa de la RF y de la mezcla SFT+RF, se determinó para cada sistema, comparando el contenido de P de las plantas de los distintos tratamientos donde se aplicaron las fuentes anteriores, con los correspondientes a SFT, considerando a éstos como 100% eficientes. Previamente a los tratamientos se les restó el contenido de P que se encontró en las plantas del testigo sin fertilización fosfatada.

La información del número de nódulos en las raíces de lupino, se analizó por medio de gráficas.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSION

8.1 VARIABLES ANALIZADAS EN MAÍZ

8.1.1 Rendimiento de materia seca

Las fuentes evaluadas afectaron significativamente el rendimiento de materia seca; SFT superó a SFT+RF, que a su vez fue superior a RF (cuadros 4, 6 y 7).

La interacción S*F fue estadísticamente significativa (Cuadro 4 y Figura 1a). La respuesta a la aplicación de SFT ó SFT+RF fue superior en el sistema monocultivo; mientras que la RF dio un efecto superior en el sistema asociado (Cuadros 7 y Figura 1a). De lo anterior se deduce que el lupino al disponer de una fuente de fósforo altamente hidrosoluble se comportó como cualquier cultivo y provocó un efecto de competencia al maíz asociado a él. Entre los efectos positivos que conlleva una buena disponibilidad de fósforo, se tiene que hay un mayor desarrollo radicular, mayor crecimiento y desarrollo general de la planta y una mayor resistencia a las condiciones adversas (37).

Cuadro 4. ANDEVA factorial para rendimiento de materia seca (g planta^{-1}) en plantas de maíz (parte aérea) bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Fuente de variación	G.L.	C.M.	Valor F	Probabilidad
Repeticiones	3	0.59652926	1.83	N.S.
Sistemas	1	0.93181004	2.86	N.S.
Fuente de fertilizante	2	9.90358779	30.42	**
Sistema x Fuente	2	2.63575004	8.10	**
Coefficiente de Variación	10.5%			

N.S. No Significativo

** Altamente Significativo

El análisis de varianza incluyendo la totalidad de tratamientos (DBCA) muestra que la diferencia entre tratamientos fue altamente significativa (cuadro 5), lo que es congruente con el análisis factorial (cuadro 4).

Con relación a los testigos absolutos se puede apreciar que SFT superó a éstos en ambos sistemas de producción. Situación similar se observó en el caso de la aplicación de la mezcla SFT+RF. Sin embargo, cuando se aplicó RF se tuvo como resultado que ésta no tuvo una reacción significativa en el monocultivo de maíz, pero sí en el sistema asociado; esto resulta interesante, toda vez que puede atribuirse dicho comportamiento a que el lupino desempeñó un papel fundamental en permitir la solubilidad del fósforo proveniente de dicha fuente y que el mismo estuviera en disposición para ser absorbido por las plantas de maíz (cuadro 7). Aguilar y Diest (2) señalan que las leguminosas en plena actividad de fijación simbiótica de nitrógeno absorben del suelo selectivamente cationes básicos, lo cual tiende a abatir el pH en la vecindad de las raíces, favoreciendo la solubilización de la roca fosfórica.

Cuadro 5. ANDEVA (DBCA) para rendimiento de materia seca (g planta^{-1}) en plantas de maíz (parte aérea) bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Fuente de variación	G.L.	C.M.	Valor F	Probabilidad
Repeticiones	3	0.50497995	2.01	N.S.
Tratamientos	7	10.17255596	40.41	**
Coefficiente de Variación	10.6%			

N.S. No Significativo

** Altamente Significativo

Dado el comportamiento anteriormente descrito, se tuvo que en promedio ambos sistemas de producción de maíz (monocultivo y asociado con lupino) fueron estadísticamente similares (Cuadros 6 y 7).

Cuadro 6. Contrastes ortogonales en el rendimiento de materia seca (g planta^{-1}) en plantas de maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Contraste	CM	Valor F	Probab.	Significancia
Monocultivo sin fertilizante vs Monocultivo con fertilizante	25.10112	99.72	0.0001	**
Maíz-lupinus sin fertilizante vs Maíz-lupinus con fertilizante	20.20986	80.29	0.0001	**
Maíz monocultivo vs Maíz-lupinus	0.81824	3.25	0.0858	N.S.
SFT vs RF	19.15594	76.10	0.0001	**
SFT vs SFT+RF	2.21861	8.81	0.0073	**
RF vs SFT+RF	8.33621	33.12	0.0001	**

** = Significativo al 1% de probabilidad

NS = No significativo

Cuadro 7. Rendimiento de materia seca en plantas de maíz (g planta^{-1}), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Fuente	Sistema de Producción		Promedio Fuentes
	Monocultivo	Asociado	
Superfosfato triple	7.148 m	5.677 m	6.412 x
Roca Fosfórica	3.817 n	4.631 n	4.224 z
SFT + RF	5.930 m	5.405 m	5.668 y
Promedio Sistemas	5.632 a	5.238 a	
Testigo Absoluto	2.740 n	2.642 o	

* Cifras seguidas de las mismas letras son iguales estadísticamente (Tukey 0.05)

DSH Fuentes = 0.741 DSH Sistemas = 0.4965 DSH tratamientos dentro del sistema monocultivo = 1.3412, DSH tratamientos dentro del sistema asociado = 0.8597 Letras a,b = Sistemas, x,y,z = Fuentes, m,n,o = tratamientos dentro del sistema.

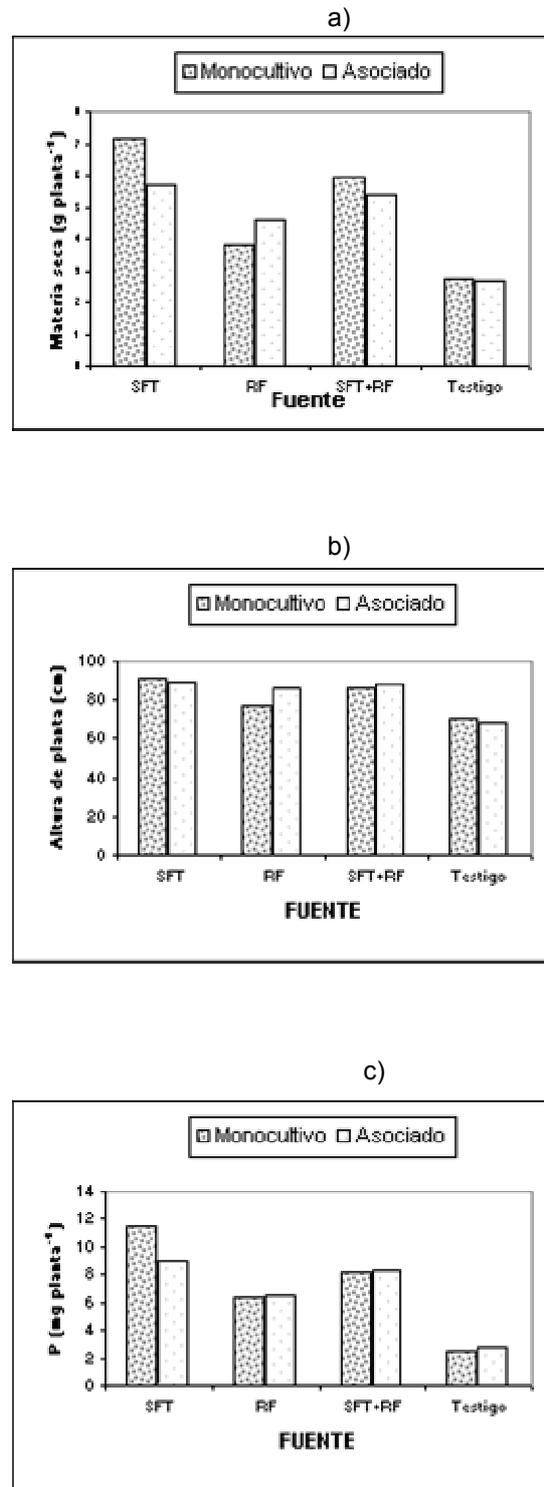


Figura 1. Interacción fuente por sistema en maíz para:
 a) Biomasa parte aérea (DSH = 1.048)
 b) Altura de planta (DSH = 10.62)
 c) Contenido de fósforo (DSH = 2.505)

8.1.2 Altura de planta

Las fuentes afectaron significativamente la altura de las plantas; SFT y SFT+RF, con efectos estadísticamente iguales, superaron a la RF (Cuadros 8, 10 y 11).

La RF respondió mejor (aunque por debajo de SFT y SFT+RF) cuando el maíz estuvo asociado con lupino. En el sistema monocultivo no hubo diferencia estadísticamente significativa entre aplicar RF y no aplicar fertilizante (Cuadro 11 y Figura 2). Este comportamiento nuevamente muestra un efecto positivo del lupino para acelerar la reacción de la roca fosfórica.

Para esta variable no se encontró significancia estadística entre sistemas y en la interacción S*F (Cuadro 8).

Cuadro 8. ANDEVA factorial para altura de planta de maíz (cm) bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Fuente de variación	G.L.	C.M.	Valor F	Probabilidad
Repeticiones	3	21.16666667	0.63	N.S.
Sistemas	1	66.66666667	1.99	N.S.
Fuentes de fertilizante	2	153.37500000	4.59	*
Sistemas x Fuentes	2	65.04166667	1.95	N.S.
Coefficiente de Variación	6.7%			

N.S. No Significativo

* Significativo

Cuando se analizaron la totalidad de tratamientos se encontró diferencia estadística altamente significativa entre ellos (Cuadro 9).

Cuadro 9. ANDEVA (DBCA) para altura de plantas de maíz bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Fuente de variación	G.L.	C.M.	Valor F	Probabilidad
Repeticiones	3	34.69791667	2.01	N.S.
Tratamientos	7	324.17410714	40.41	**
Coefficiente de Variación	6.85%			

N.S. No Significativo

** Altamente Significativo

Cuadro 10. Contrastes ortogonales para altura de plantas de maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistema de cultivo.

Contraste	CM	Valor F	Probab.	Significancia
Monocultivo sin fertilizante vs Monocultivo con fertilizante	638.0208	20.25	0.0002	**
Maíz-lupinus sin fertilizante vs Maíz-lupinus con fertilizante	1160.3333	36.83	0.0001	**
Maíz monocultivo vs Maíz-lupinus	34.0312	1.08	0.3105	N.S.
SFT vs RF	2.975625	9.44	0.0058	**
SFT vs SFT+RF	36.0000	1.14	0.2972	N.S.
RF vs SFT+RF	126.5625	4.02	0.0481	*

** = Significativo al 1% de probabilidad

* = Significativo entre 1% y 5% de probabilidad

N.S. = No significativo

Cuadro 11. Altura de plantas de maíz (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Fuente	Sistema de Producción		Promedio Fuentes
	Monocultivo	Asociado	
Superfosfato triple	91.0 m	89.2 m	90.1 x
Roca Fosfórica	76.8 n	86.2 m	81.5 y
SFT + RF	86.0 m	88.2 m	87.1 x
Promedio Sistemas	84.6 a	87.9 a	
Testigo Absoluto	70.0 n	68.2 n	

* Cifras seguidas de las mismas letras son iguales estadísticamente (Tukey 0.05)

DSH Fuentes = 7.51 DSH Sistemas = 5.03 DSH tratamientos dentro del sistema monocultivo = 14.02, DSH tratamientos dentro del sistema asociado = 11.35. Letra a = Sistemas, x,y = Fuentes, m,n = tratamientos dentro del sistema.

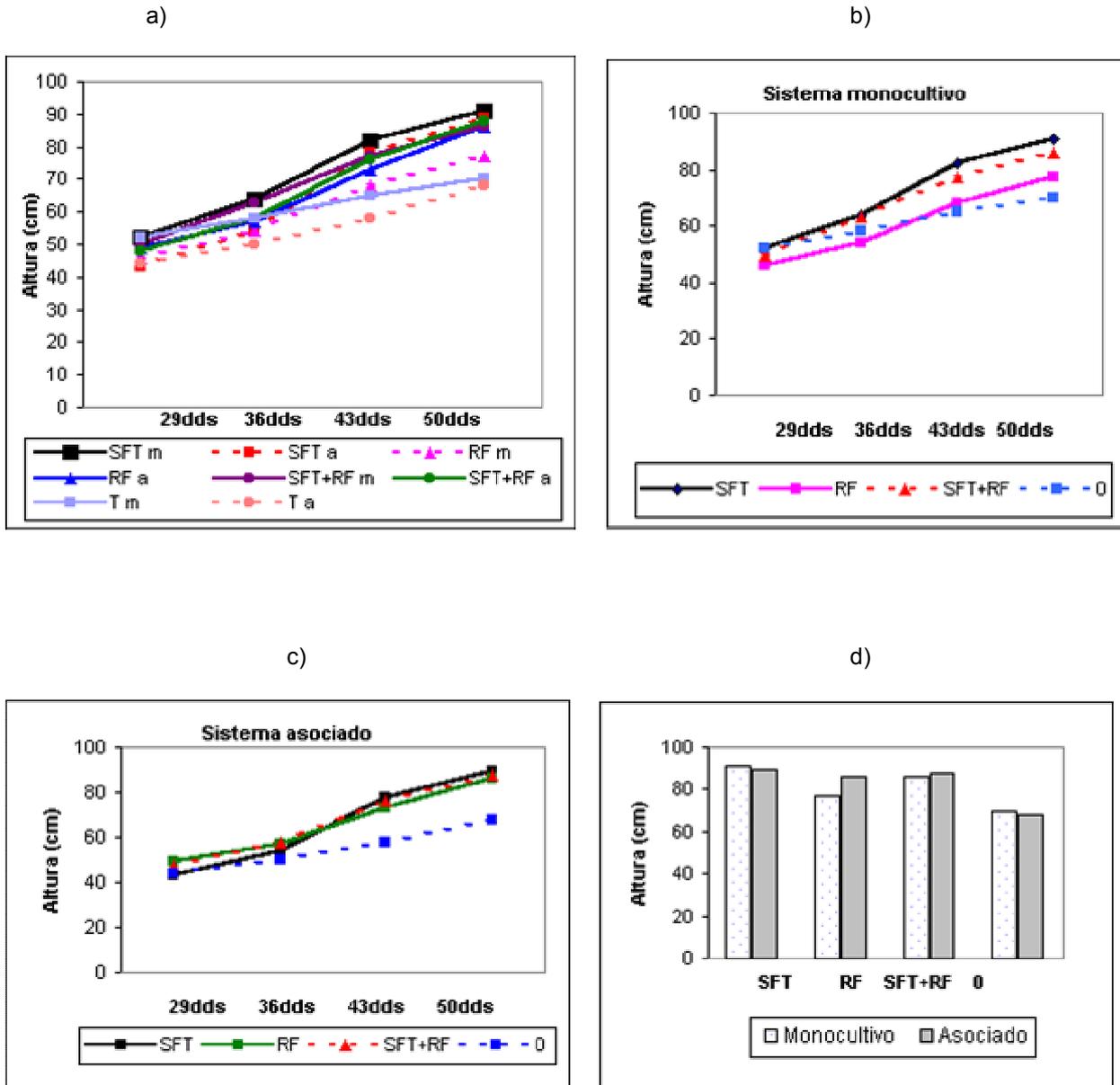


Figura 2. Crecimiento de maíz bajo diferentes fuentes de fertilizante fosfatado
a) Comportamiento de los distintos tratamientos durante el tiempo del experimento.
b) Comportamiento de los tratamientos de maíz en monocultivo.
c) Comportamiento de los tratamientos de maíz asociados con lupino.
d) Comparación entre sistemas de producción.

8.1.3 Fósforo en el tejido vegetal

Los resultados muestran que en promedio el contenido de fósforo en el tejido vegetal fue afectado significativamente por las fuentes fertilizantes; el mismo fue mayor cuando se aplicó SFT, estadísticamente superior a SFT+RF y RF (Cuadros 12, 14 y 15 y Figura 1). Esto se explica por el alto contenido de fósforo hidrosoluble presente en el SFT. No se encontró diferencia estadísticamente significativa entre sistemas y en la interacción S*F (Cuadro 12).

Dentro de cada sistema de producción (monocultivo y asocio) el efecto de aplicar SFT ó SFT+RF fue estadísticamente similar, superando a la RF, la cual a su vez fue superior al testigo absoluto, lo que denota respuesta positiva a la fertilización. En promedio, en ambos sistemas el contenido de fósforo fue estadísticamente similar (Cuadro 15).

Cuadro 12. ANDEVA factorial para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en tejido vegetal aéreo de maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Fuente de variación	G.L.	C.M.	Valor F	Probabilidad
Repeticiones	3	1.25280242	0.67	N.S.
Sistemas	1	2.98743984	1.61	N.S.
Fuente de fertilizante	2	28.87004201	15.52	**
Sistema x Fuente	2	4.26122981	2.29	N.S.
Coefficiente de Variación	16.4%			

N.S. No Significativo

** Altamente Significativo

El análisis de varianza incluyendo la totalidad de tratamientos (DBCA) muestra que la diferencia entre tratamientos fue altamente significativa (Cuadro 13), lo que es coherente con el análisis factorial (Cuadro 12)

Cuadro 13. ANDEVA (DBCA) para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en tejido vegetal aéreo de maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Fuente de variación	G.L.	C.M.	Valor F	Probabilidad
Repeticiones	3	1.17847010	0.86	N.S.
Tratamientos	7	38.22849406	27.74	**
Coefficiente de Variación	17.0%			

N.S. No Significativo

** Altamente Significativo

Cuadro 14. Contrastes ortogonales para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en tejido vegetal aéreo de maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de producción.

Contraste	CM	Valor F	Probab.	Significancia
Monocultivo sin fertilizante vs Monocultivo con fertilizante	116.5206	84.55	0.0001	**
Maíz-lupinus sin fertilizante vs Maíz-lupinus con fertilizante	83.0988	60.30	0.0001	**
Maíz monocultivo vs Maíz-lupinus	1.7174	1.25	0.2769	N.S.
SFT vs RF	57.6252	41.81	0.0001	**
SFT vs SFT+RF	16.7209	12.13	0.0022	**
RF vs SFT+RF	12.2640	8.90	0.0071	**

** = Significativo al 1% de probabilidad

NS = No significativo

Cuadro 15. Contenido de fósforo en plantas de maíz (mg planta^{-1}), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

Fuentes	Sistemas de Producción		Promedio Fuentes
	Monocultivo	Asociado	
Superfosfato triple	11.47 m	9.08 m	10.27 x
Roca Fosfórica	6.38 n	6.57 n	6.48 z
SFT + RF	8.19 m	8.27 m	8.23 y
Promedio Sistemas	8.68 a	7.97 a	
Testigo Absoluto	2.45 o	2.71 o	

* Cifras seguidas de las mismas letras son iguales estadísticamente (Tukey 0.05)

DSH Fuentes = 1.74 DSH Sistemas = 1.19 DSH tratamientos dentro del sistema monocultivo = 3.37, DSH tratamientos dentro del sistema asociado = 1.57 Letras a,b = Sistemas, x,y,z = Fuentes, m,n,o = tratamientos dentro del sistema.

8.1.4 Eficiencia relativa de los fertilizantes

La eficiencia relativa promedio de la RF con respecto a SFT (asumiendo para SFT una eficiencia de 100%) fue de 50.7%, variando entre 43.6% para el sistema monocultivo y 60.7% para el sistema asociado. La eficiencia relativa promedio de la mezcla SFT+RF con respecto a SFT fue de 73.4%, siendo superior en ambos sistemas a la RF (63.6% en monocultivo y 87.3% en asocio) (Cuadro 16).

Tanto en la RF como en SFT+RF la eficiencia fue mayor en el sistema asociado, lo que denota un efecto positivo del lupino sobre la disponibilidad del fósforo proveniente de dichas fuentes para el maíz (Cuadro 16).

Por otra parte, en el sistema asociado la eficiencia relativa de la mezcla SFT+RF fue superior a la suma de los efectos individuales de ambos fertilizantes aplicados separadamente ($\frac{1}{2}$ de 100% de SFT + $\frac{1}{2}$ de 60.7% de RF), lo que denota un efecto positivo del SFT sobre la solubilización de la RF (Cuadro 16).

Cuadro 16. Eficiencia Relativa de RF y SFT+RF con respecto a SFT, en el contenido de fósforo en el tejido vegetal aéreo de plantas de maíz.

Sistema	Eficiencia Relativa de RF (%)	Eficiencia Relativa de RF+SFT (%)
Monocultivo	43.6	63.6
Asociado	60.7	87.3
Promedio	50.7	73.4

8.2 VARIABLES ANALIZADAS EN LUPINO

8.2.1 Rendimiento de materia seca

De acuerdo a los resultados del ANDEVA, existieron diferencias altamente significativas entre tratamientos. La aplicación de SFT+RF (tratamiento 6) superó al SFT (tratamiento 2) (1.934g vs 1.199g), que a su vez fue superior a la aplicación de RF (tratamiento 4) (0.365g); ésta última provocó una respuesta estadísticamente similar al testigo absoluto (Cuadros 17, 18 y 23).

Cuadro 17. ANDEVA (DBCA) para rendimiento de materia seca (g planta⁻¹) en lupino (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado.

Fuente de variación	G.L.	C.M.	Valor F	Probabilidad
Repeticiones	3	0.20451223	1.91	N.S.
Tratamientos	3	2.42436606	22.68	**
Coefficiente de Variación	34.6%			

N.S. No Significativo

** Altamente Significativo

Cuadro 18. Contrastes ortogonales para rendimiento de materia seca (g planta⁻¹) en plantas de lupino (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado.

Contraste	CM	Valor F	Probab.	Significancia
Lupino sin fertilizante vs Lupino con fertilizante	2.3430	21.92	0.0011	**
SFT vs RF	1.3911	13.02	0.0057	**
SFT vs SFT+RF	1.0804	10.11	0.0112	*
RF vs SFT+RF	4.9235	46.06	0.0001	**

** = Significativo al 1% de probabilidad

* = Significativo entre 1% y 5% de probabilidad

De lo anterior se desprende que las plantas de lupino no fueron capaces de absorber fósforo en cantidades adecuadas cuando la fuente aplicada fue RF; por lo que se infiere que para las condiciones en que se llevó el presente experimento (período del experimento y especie de lupino principalmente) no se presentó totalmente el mecanismo que naturalmente se reporta para algunas especies de lupino de poder asimilar el fósforo aunque en el medio ambiente sólo existan formas complejas y poco solubles del mismo, tal es el caso de la roca fosfórica.

Sin embargo, *Lupinus montanus* si contribuyó a que el maíz asociado con él pudiera obtener fósforo proveniente de dicha fuente.

8.2.2 Altura de planta

Al igual que con la variable rendimiento de materia seca, la altura de planta fue afectada significativamente por la fuente de fósforo aplicada. La misma fue mayor en aquellos tratamientos fertilizados con SFT+RF ó SFT, con efectos estadísticamente iguales. No se tuvo respuesta a la aplicación de RF (Cuadros 19, 20 y 23 y Figura 3).

Cuadro 19. ANDEVA (DBCA) para altura de plantas de lupino (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado.

Fuente de variación	G.L.	C.M.	Valor F	Probabilidad
Repeticiones	3	5.698333333	1.92	N.S.
Tratamientos	3	88.66500000	29.82	**
Coefficiente de Variación	17.83%			

N.S. No Significativo

** Altamente Significativo

Cuadro 20. Contrastes ortogonales para altura de plantas de lupino (cm), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado.

Contraste	CM	Valor F	Probab.	Significancia
Lupino sin fertilizante vs Lupino con fertilizante	98.6133	33.17	0.0003	**
SFT vs RF	84.5000	28.42	0.0005	**
SFT vs SFT+RF	10.8112	3.64	0.0889	N.S.
RF vs SFT+RF	155.7612	52.39	0.0001	**

** = Significativo al 1% de probabilidad

N.S. = No significativo

8.2.3 Contenido de fósforo en el tejido vegetal

El contenido de fósforo en el tejido vegetal del lupino estuvo influido significativamente por la fuente de fósforo aplicada al mismo. El contenido fue mayor cuando las plantas fueron fertilizadas con SFT+RF ó SFT, los cuales a su vez fueron superiores a RF y al testigo absoluto, éstos últimos estadísticamente iguales (Cuadros 21, 22 y 23).

Cuadro 21. ANDEVA (DBCA) para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en lupino (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado.

Fuente de variación	G.L.	C.M.	Valor F	Probabilidad
Repeticiones	3	1.32621051	1.67	N.S.
Tratamientos	3	19.44580343	24.49	**
Coefficiente de Variación	43.96%			

N.S. No Significativo

** Altamente Significativo

Cuadro 22. Contrastes ortogonales para contenido de fósforo (mg planta^{-1}) en lupino (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado.

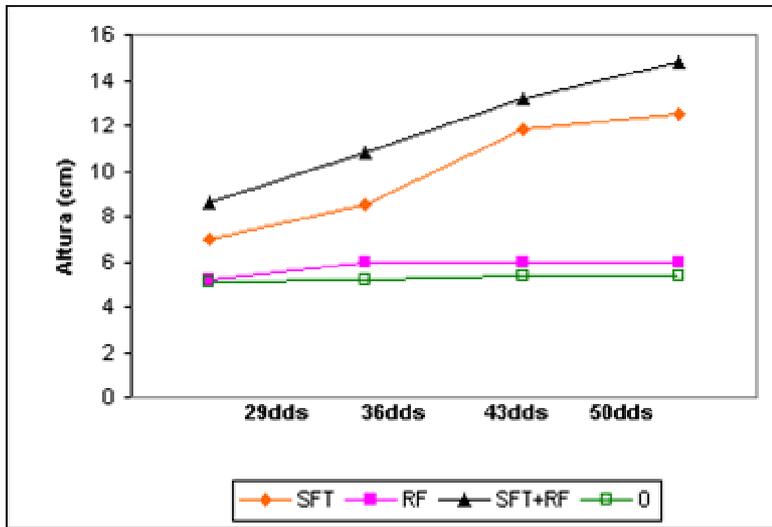
Contraste	CM	Valor F	Probab.	Significancia
Lupino sin fertilizante vs Lupino con fertilizante	18.2852	23.03	0.0010	**
SFT vs RF	15.6786	19.75	0.0016	**
SFT vs SFT+RF	5.2704	6.64	0.0299	*
RF vs SFT+RF	39.1294	49.29	0.0001	**

** = Significativo al 1% de probabilidad

* = Significativo entre 1% y 5% de probabilidad

Esto muestra que el lupino al disponer de una cantidad alta de fósforo fácilmente disponible, se comporta como cualquier cultivo y no desarrolla completamente algún mecanismo que permita absorber fósforo que se encuentre en formas complejas. Al comparar el contenido de fósforo en el testigo con el tratamiento que fue fertilizado con RF, se observa que hubo poca reacción y aprovechamiento de la misma, lo que podría deberse al relativo corto tiempo del experimento y al tamaño pequeño de maceta utilizado.

a)



b)

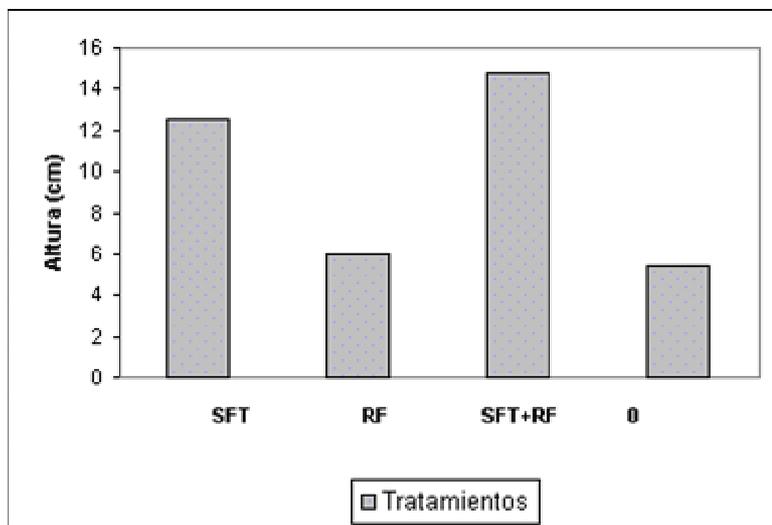


Figura 3. Crecimiento de lupino asociado con maíz:
 a) Comportamiento a través del tiempo durante el experimento.
 b) Comportamiento final de los distintos tratamientos.

Cuadro 23. Prueba de Tukey (0.05) para las variables: biomasa (parte aérea), altura de planta y contenido de fósforo en el tejido vegetal de lupino.

Tratamiento	Materia seca (g planta ⁻¹) *	Altura de planta (cm) *	Contenido de fósforo (mg planta ⁻¹) *
6	1.934 a	14.8 a	4.66 a
2	1.199 b	12.5 a	3.04 a
4	0.365 c	6.0 b	0.24 b
8	0.282 c	5.4 b	0.17 b

* Medias con la misma letra son estadísticamente iguales.

8.2.4 Nodulación en raíces de lupino

En general se observó buena nodulación en las raíces de lupino, debido probablemente a la presencia de inóculo de *Rhizobium lupini* en el suelo utilizado en el presente experimento.

Un mayor número de nódulos se encontró cuando las plantas se fertilizaron con SFT ó SFT+RF (Cuadro 24). Esto probablemente se debió al mayor desarrollo de las raíces en estos tratamientos, dada la buena interacción fósforo-nitrógeno, lo que permitió más área para la infección por *Rhizobium*.

Cuadro 24. Número de nódulos en las raíces de lupino en asocio con maíz, bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado.

Tratamiento	Fuente de Fósforo	Número de nódulos de <i>Rhizobium</i>
2	SFT	67
4	RF	23
6	SFT+RF	48
8	0	17

IX. CONCLUSIONES

1. *Lupinus montanus* HBK estimuló el rendimiento de materia seca del maíz asociado a él, cuando la fuente de fertilizante fosfatado fue roca fosfórica (monocultivo 3.817 g planta⁻¹; asocio 4.631 g planta⁻¹). Cuando se utilizó superfosfato triple, el efecto fue negativo (monocultivo 7.148 g planta⁻¹; asocio 5.677 g planta⁻¹); situación similar se dio cuando se fertilizó con SFT+RF (monocultivo 5.930 g planta⁻¹; asocio 5.405 g planta⁻¹). Por lo anterior se acepta la primera hipótesis para roca fosfórica y se rechaza para las otras fuentes.
2. El contenido de fósforo del maíz no fue afectado al asociarse con lupino, cuando se aplicó RF (monocultivo 6.38 mg planta⁻¹; asocio 6.57 mg planta⁻¹) ó SFT+RF (monocultivo 8.19 mg planta⁻¹; asocio 8.27 mg planta⁻¹). En el caso de la aplicación de SFT se tuvo un efecto negativo (monocultivo 11.47 mg planta⁻¹; asocio 9.08 mg planta⁻¹); lo anterior denota competencia entre ambas especies. Por lo que para esta variable se rechaza la primera hipótesis.
3. La eficiencia relativa de la roca fosfórica fue superior en el sistema maíz+lupino (monocultivo 43.6% y asocio 60.7%); un comportamiento similar se observó para la fuente SFT+RF (monocultivo 63.6% y asocio 87.3%). Esto se atribuye a la acción del lupino y del superfosfato triple para acelerar la reacción de la roca fosfórica. Por lo anterior se acepta la segunda hipótesis planteada.
4. Para el caso del maíz asociado con lupino, la eficiencia agronómica de la mezcla de SFT+RF fue menor que SFT, pero mayor que la suma de los efectos individuales de sus componentes ($\frac{1}{2}$ SFT + $\frac{1}{2}$ RF).
5. El rendimiento de lupino fue favorecido cuando se fertilizó con SFT+RF ó SFT (SFT+RF = 1.934 g planta⁻¹; SFT = 1.199 g planta⁻¹; RF = 0.365 g planta⁻¹); lo que se atribuye a la inmediata disponibilidad del fósforo proveniente del superfosfato triple, y a la acidez que se da cuando reacciona en el suelo, que contribuye a la reacción de la RF y al efecto residual de esta última. Un comportamiento similar se observó para la variable contenido de fósforo (SFT+RF = 4.66 mg planta⁻¹; SFT 0 3.04 mg planta⁻¹; RF = 0.24 mg planta⁻¹)

X. RECOMENDACIONES

1. En futuras investigaciones relacionadas con el tema, considerar un mayor período de experimentación para dar oportunidad a que ocurra una mayor reacción de la RF.
2. Evaluar otras especies de lupinos presentes en Guatemala.
3. Evaluar sistemas de asocio maíz-lupino a nivel de campo, para medir el rendimiento de grano comercial comparado con maíz monocultivo.

XI. BIBLIOGRAFIA

1. Adán, H; Cajuste L, J; Nuñez, R. 1980. Caracterización química, mineralogía y evaluación agronómica de roca fosfórica. *Agrociencia* 41:95-112. (Serie Agua-Suelo-Clima).
2. Aguilar S, A; Diese, A. 1981. Rock-phosphate mobilization induced by the alkaline uptake pattern of legumes utilizing symbiotically fixed nitrogen. *Plant and Soil* 61:27-42.
3. Alvarez, V; Nuñez, R; Cajuste L, J; Ferrera-Cerrato, R. 1981. Eficiencia de rocas fosfóricas crudas y parcialmente aciduladas por métodos químicos y biológicos. *Agrociencia* 45:25-52. (Serie Agua-Suelo-Clima).
4. Arriola R, JF. 1984. Evaluación de la asociación soya-maíz (*Glycine max* – *Zea mays*), en diferentes arreglos espaciales, bajo condiciones de laboreo de suelo. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC. 97 p.
5. Barber, A. 1984. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York, US, John Wiley. 45 p.
6. Bertsch, HF. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, CR. 157 p.
7. Bolland, MDA. 1995. *Lupinus cosentinii* more effectively utilizes low levels of phosphorus from superphosphate than *Lupinus angustifolius*. *Journal of Plant Nutrition* 18:3, 421-435.
8. Braum, S; Helmke, P. 1995. White lupin utilizes soil phosphorus that is unavailable to soybean. *Plant and Soil* 176:1, 95-100.
9. Chapingo Colegio de Postgraduados, MX. 1998. Dinámica del P y corrección de deficiencias. Montecillo, Texcoco, México. 20 p.
10. Curso de Postgrado: tecnología de fertilizantes de lenta liberación. 2000. Guatemala. USAC, Facultad de Agronomía. 120 p.
11. Egawa, T. 1977. Properties of soils derived from volcanic ash. In *Soils derived from volcanic ash in Japan*. Edited by Ishizuka, Y. And Black, CA. México, CIMMYT. p. 10-63.
12. Espinosa, V. 1977. Nutritional ecology of legume species with particular reference to phosphorus. Thesis PhD. Oxford, England, University Oxford. 235 p.
13. Fassbender, HW. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, IICA. 398 p.
14. Foth, HD. 1975. Fundamentos de la ciencia del suelo. México, CECOSA. 454 p.

15. Gross, R. 1982 El cultivo y la utilización del tarwi (Lupinus mutabilis Sweet). Roma, Italia, FAO. 209 p. (Estudio FAO: Producción y protección vegetal 36).
16. Gukova, MM; Lavrova, EK; Ageeve, VS. 1971. Utilization of N from atmosphere and fertilizers by lupine. Referativnyi Zhurnal 55:589.
17. Gupta, RP; Mishra, B. 1978. Phosphorus availability from rock phosphate as influenced by pyrites: wheat straw and superphosphate to maize-clover on a mollisol. Scientiarum Hungaricae 27(1-2): 126-132.
18. Herrera, FO; Pina, AN; Armas, M de J. 1979. Agroquímica. Habana, Cuba, Pueblo y Educación. p. 110-120.
19. Hinsinger, P; Gilkes, RJ. 1995. Root-induced dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of lupins grown in alkaline soil. Australian Journal of Soil Research 33:3, 477-489.
20. IGN (Instituto Geográfico Nacional. GT). 1978. Diccionario geográfico de Guatemala. Comp. Francis Gall. Guatemala. tomo 1, p. 54.
21. Jungk, A; Seeling, B; Gerke, J; Barrow, NJ. 1993. Mobilization of different phosphate fractions in the rhizosphere. Plant and Soil 54:91-94, 155-156.
22. Ligorria, LAE. 2000. Curso, fertilidad de suelos y fertilizantes. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 35 p.
23. Mishra, B; Sharma, RD; Mishra, NP. 1980. Use of mussoorie rock phosphate mixed with superphosphate or low-grade pyrites as alternative phosphorus source for wheat on neutral soils. Indian Journal of Agricultural Science 50:346-351.
24. Mizota, C. 1977. Phosphate fixation by ando soil different in their clay mineral composition. Soil Sci. Plant Nutr. 23(3):311-318.
25. Núñez, ER. 1983. Aplicación directa de rocas fosfóricas a suelos agrícolas en México. In Conferencia Latinoamericana de Roca Fosfórica (1., 1983, BO). Memorias. Cochabamba, Bolivia, ADIFAL. 34 p.
26. Pardo, MT; Guadaliux, ME. 1990. Phosphate sorption in allophane soil and release of sulphate, silicate and hydroxyl. J. Soil Sci. 41:607-612.
27. Rodas, AO. 2000. Interacción Lupinus mutabilis – Zea mays L. En la nutrición fosfatada en un andosol. Montecillo, Texcoco, México, Chapingo Colegio de Postgraduados. 153 p.
28. Simposio Latinoamericano: alternativas sobre el uso como fertilizantes de fosfatos nativos en América tropical y subtropical. 1987. Cali, Colombia, CIID, IFDC, CIAT. Documento de trabajo. 41 p.
29. Standley, P; Steyermark, J. 1946. Flora de Guatemala. Chicago, US, Chicago Natural History Museum, Fieldiana: Botany. v. 24, pte. 5, p. 287-290.

30. Teuscher, H. 1987. El suelo y su fertilidad. México, CECSA. p. 249-251.
31. Tisdale, LS; Nelson, LW. 1988. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. México, UTEHA. 454 p.
32. Tobías, HA. 1992. Suelos de Guatemala, según la clasificación FAO / UNESCO. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. p. 78-81.
33. Villarroel, J. 1986. El cultivo de tarwi (Lupinus mutabilis Sweet), fijación y aporte de nitrógeno al suelo y su efecto residual en cebada (Hordeum vulgare). Cochabamba, Bolivia, UMSS – COTESU - IIAB. 19 p.
34. Wada, K. 1959. Reaction of phosphate with allophane and alloysite. Soil Sci. 87:325-330.
35. Wada, K; Hardward, ME. 1974. Amorphous clay constituents of soils. Advances in Agronomy 26:211-259.
36. Wada, K; Gunjicake, N. 1979. Active aluminum and iron and phosphate adsorption in ando soils. Soil Science 128(6):331-336.
37. Yagodin, BA. 1982. Agroquímica. Trad. por Ramiro Rincón. Moscú, Mir. 464 p.
38. Yagodina, MS; Verevkin, EL. 1978. Intensity of nitrogen fixation in presence of different doses of mineral nitrogen. Biol. Bull. Acad. Sci. USSR. 5:610-616.
39. Yúfera, EP. 1973. Química agrícola. Madrid, Barcelona, España, Bilbao. p. 168-169.

APÉNDICE

Cuadro 25. Prueba de medias Tukey (5%) para rendimiento de materia seca (g planta¹) en plantas de maíz (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

TRATAMIENTO	RENDIMIENTO PROM.	TUKEY *
1	7.1483	A
5	5.9305	B
2	5.6773	B C
6	5.4055	B C
4	4.6313	C D
3	3.8175	D E
7	2.7395	E
8	2.6425	E

* = Medias con la misma letra son estadísticamente iguales.

Cuadro 26. Prueba de medias Tukey (5%) para contenido de fósforo (mg planta¹) en plantas de maíz (parte aérea), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistemas de cultivo.

TRATAMIENTO	RENDIMIENTO PROM.	TUKEY *
1	11.4671	A
2	9.0772	A B
6	8.2681	B
5	8.1872	B
4	6.5727	B
3	6.3806	B
8	2.7096	C
7	2.4461	C

* = Medias con la misma letra son estadísticamente iguales.

Cuadro 27. Prueba de medias Tukey (5%) para altura de planta en Maíz (última medición), bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado y sistema de cultivo.

TRATAMIENTO	ALTURA PROMEDIO.	TUKEY *
1	91.000	A
2	89.250	A B
6	88.250	A B
4	86.250	A B
5	86.000	A B
3	76.750	C B
7	70.000	C
8	68.250	C

* = Medias con la misma letra son estadísticamente iguales.