

# **Desarrollo de bases para el manejo nutricional del cultivo de la arveja (*Pisum sativum*, var *sativum*).**

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Ciencias del Suelo*

***Gabriel María Prieto***

Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Rosario 1986

Lugar de trabajo: Agencia de Extensión Rural INTA Arroyo Seco, Santa Fe.



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



**COMITÉ CONSEJERO**

Director de tesis

**Fernando Salvagiotti**

Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.  
Magister Scientiae en Producción Vegetal - Universidad de Buenos Aires, Argentina.  
Doctor of Philosophy, Soil and Water Sciences, University of Nebraska.

Codirector de tesis

**Flavio Hernán Gutiérrez Boem**

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires, Argentina.  
Magister Scientiae en Ciencias del Suelo - Universidad de Buenos Aires, Argentina.  
Doctor of Philosophy, Soil Science Program, University of Kentucky, USA.

**JURADO DE TESIS**

Santiago Poggio

Ingeniero Agrónomo UBA, MSc UBA, Doctor UBA.

**JURADO**

Martín Díaz Zorita

Ingeniero Agrónomo UNL Pam, MSc UNS, PhD University of Kentucky (Estados Unidos de Norteamérica).

**JURADO**

Pablo Barbieri

Ingeniero Agrónomo UNMDP, Dr en Cs Ags. FCA UNMDP, Pos Doc Iowa State University (Estados Unidos de Norteamérica).

Fecha de defensa de la tesis: 16 de junio de 2021

## AGRADECIMIENTOS

A Daniela, amorosa esposa y dedicada madre de nuestros hijos, por su apoyo, paciencia y aliento permanente, en las buenas y en las malas.

A Marta y Tito, mis padres. Su ejemplo y educación fueron para mí El Camino. Dios los tenga con El.

A Eduardo Vita Larrieu, quien como pasante de la AER (ahora compañero) trabajó muy duro colaborando en la generación de los datos de esta tesis.

A Fernando Salvagiotti, por su paciencia, consejos y enseñanzas. Su calidad humana y excelencia profesional hizo más sencillo el camino.

A Flavio Gutiérrez Boem, que como codirector y profesor, siempre estuvo dispuesto, con oportunas y diligentes revisiones, lo que me permitió llegar a la meta.

Al INTA, institución que me dio la oportunidad de trabajar y formarme.

A mis compañeros de la AER Arroyo Seco y de la EEA Oliveros, y todos aquellos productores y colegas que de alguna manera u otra contribuyeron al logro del objetivo.

## **DECLARACION**

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.”

Ing. Agr. Gabriel María Prieto

# Índice General

<b>Agradecimientos</b>	<b>iii</b>
<b>Declaración</b>	<b>iv</b>
<b>Índice General</b>	<b>v</b>
<b>Indice</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xi</b>
<b>Abreviaturas</b>	<b>xiii</b>
<b>Resumen</b>	<b>xv</b>
<b>Abstract</b>	<b>xvi</b>

# Indice

Indice de Tablas .....	xi
Resumen.....	xv
Abstract .....	xvi
Capítulo 1.....	1
Introducción General, definición de objetivos y planteo de hipótesis. ....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Hipótesis .....	8
1.3 Objetivos .....	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos .....	9
Capítulo 2.....	11
Materiales y métodos general, descripción de los sitios experimentales .....	11
2.1 Materiales y métodos.....	11
2.1.1 Área de estudio .....	11
2.1.2. Diseño experimental .....	11
2.1.3. Fuentes y dosis aplicadas y tratamiento de semillas.....	13
2.1.4. Determinaciones de suelo y planta .....	13
2.1.5. Cálculo de las eficiencias de uso. ....	15
2.1.6. Análisis de la información.....	15
Capítulo 3.....	17

Producción de biomasa y generación del rendimiento en arveja por efecto de la fertilización fosforo-azufrada.....	17
3.1 Introducción.....	17
3.2 Materiales y métodos.....	19
3.2.2 Determinaciones en suelo .....	20
3.2.3 Análisis de datos .....	20
3.3 Resultados .....	21
3.3.1 Producción de biomasa .....	21
3.3.2 Producción de biomasa en floración.....	21
3.3.3 Rendimiento, producción de biomasa en madurez fisiológica, e índice de cosecha.....	22
3.3.4 Componentes numéricos del rendimiento.....	24
3.3.5 Relación entre la respuesta en rendimiento y el contenido de P en el suelo...	29
3.4 Discusión .....	30
3.5 Conclusiones .....	34
Capítulo 4.....	35
Absorción y eficiencias de uso de P, S y de otros macro y micronutrientes.....	35
4.1 Introducción.....	35
4.2 Materiales y métodos.....	39
4.2.1 Absorción total y eficiencia en el uso de nutrientes. ....	39
4.2.2 Evolución de la absorción de nutrientes .....	40
4.2.3 Análisis estadístico .....	41

4.3 Resultados .....	41
4.3.1 Absorción e índice de cosecha de P, S y demás macronutrientes en grano y resto de estructuras en madurez fisiológica .....	41
4.3.2 Eficiencia agronómica, de recuperación e interna .....	45
4.3.2 Absorción, concentración en grano y en resto de estructuras en madurez fisiológica, e índice de cosecha de micronutrientes.....	50
4.3.4 Eficiencia interna de micronutrientes .....	52
4.3.5 Dinámica de la absorción de macro y micronutrientes.....	55
4.4 Discusión .....	60
4.4.1 Absorción total, concentración de macronutrientes, e índice de cosecha.....	60
4.4.2 Absorción total, concentración e índice de cosecha de micronutrientes. ....	66
4.4.3 Dinámica de absorción de macro y micronutrientes.....	70
4.5 Conclusiones .....	71
Capítulo 5.....	73
Conclusiones generales, aportes al conocimiento y líneas de investigación futuras. ....	73
5.1 Principales aportes al conocimiento de este trabajo .....	76
5.2 Líneas de investigación .....	77
5.2.1 Alteraciones que la nutrición pudiera tener sobre el contenido proteico de arveja y sus propiedades.....	77
5.2.2 Efectos que la nutrición del cultivo de arveja puede tener en una rotación....	77
BIBLIOGRAFIA .....	78

## Indice de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Estructura foliar de arveja. A la izquierda una estructura foliosa (variedad Facon), a la derecha, estructura foliar semi-áfila (variedad Viper).....	3
<b>Figura 2.1.</b> Ubicación geográfica de los diferentes sitios de ensayo.....	14
<b>Figura 2.2.</b> Penetrometría por el método del cono a una profundidad de 37,5 cm en estratos de 2,5 cm. Los valores están expresados en MPa. A, B, C y D Las letras corresponden a los años en que se establecieron los sitios (A: 2009, B: 2010, C: 2011, dD: 2012 y 2013). .....	16
<b>Figura 3.1.</b> Modelo representativo de las relaciones numéricas para la determinación del rendimiento en el cultivo de arveja.....	19
<b>Figura 3.2.</b> Acumulación de biomasa en diferentes estados del cultivo de arveja, afectados por la fertilización con P y S en el sitio SC10. Las flechas indican los momentos de floración y madurez fisiológica. Las barras indican el error estándar de la media de todos los tratamientos. ....	22
<b>Figura 3.3.</b> Cambios relativos promedio de los 15 sitios (el sitio GM fue descartado para este análisis) por el aporte de P en el rendimiento (R), la biomasa aérea total acumulada (MS), índice de cosecha (IC), número de plantas $m^{-2}$ (NP), frutos planta <sup>-1</sup> (FP), número de frutos $m^{-2}$ (V), número de semillas fruto <sup>-1</sup> (SF), número de semillas $m^{-2}$ (NS) y peso de semillas (PS). Los (*) indican diferencias significativas. ....	29
<b>Figura 3.4.</b> Rendimiento relativo en función del P Bray sobre 17 sitios. La línea azul presenta el umbral crítico de respuesta para lograr un 90 % del rendimiento relativo. ....	30
<b>Figura 4.1.</b> Esquema representativo de la relación entre la absorción de un nutriente y el rendimiento delimitados por la recta END= cuya pendiente representa la eficiencia para nutriente diluido, y la recta ENC= cuya pendiente representa la eficiencia para nutriente concentrado.....	37
<b>Figura 4.2.</b> Relación entre la cantidad de macronutrientes absorbidos y el rendimiento en arveja. Los números indican la Eficiencia Interna (EI) de los macronutrientes para el percentil 50 (mediana), 1 (máxima acumulación) y 99 (máxima dilución). Los modelos fueron forzados a pasar por el origen de las coordenadas. ....	48
<b>Figura 4.3.</b> Relación entre EAP y ERP (a), entre EAP y EIP (b), entre P Bray y EAP (c) y entre ERP y respuesta en rendimiento (d), en aquellos sitios donde hubo respuesta al agregado de P.....	49

- Figura 4.4.** *Relación entre la cantidad de micronutrientes absorbidos y el rendimiento en arveja (0 % MS). Los números indican la Eficiencia Interna (EI) de los micronutrientes en kg grano producido  $g^{-1}$  micronutriente absorbido, para el percentil 50 (mediana), 1 (máxima acumulación), y 99 (máxima dilución). Los modelos fueron forzados a pasar por el origen de las coordenadas..... 54*
- Figura 4.5.** *Dinámica de la acumulación de macronutrientes en función del aporte de P. Las barras indican el error estándar. Las flechas indican el estado 203 (plena floración). ..... 57*
- Figura 4.6.** *Acumulación de micronutrientes a los 58, 71 y 91 días después de emergencia (dde) en  $g\ ha^{-1}$  afectados por la fertilización con P. Las barras indican el error estándar. Las flechas indican el estado 203 (plena floración)..... 60*

## Indice de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Descripción de los tratamientos ensayados. ....	12
<b>Tabla 2.2.</b> Caracterización de los diferentes sitios evaluados en función del año de instalación, localidad, análisis de suelo para el estrato 0-0.2 m, variedades empleadas y antecesores. Ordenados cronológicamente. El sitio Rue13 sólo se usó para construir la Figura 3.4. ....	12
<b>Tabla 3.1.</b> Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en función de los tratamientos ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) para las etapas de emergencia a 8 nudos (E-108), 8 a 10 nudos (108-110), 10 nudos a floración (110-203), floración al llenado de grano (203-206) y de llenado a madurez fisiológica (206-209) (Knott, 1987). Test LSD al 5 %. EE= error standard de la media. ....	23
<b>Tabla 3.2.</b> Datos de biomasa acumulada en floración (estado 203) $\text{kg ha}^{-1}$ , en función de P y S en 7 sitios en 2009. Test LSD al 5%. EE= Error standard de la media. ....	24
<b>Tabla 3.3.</b> Rendimiento en grano en $\text{kg ha}^{-1}$ (R), biomasa total $\text{kg ha}^{-1}$ en madurez fisiológica (MS) e índice de cosecha (IC) en 15 Sitio-años (el sitio GM fue descartado). Los símbolos al lado de los números indican diferencias significativas menores al 5 % (*), y menores al 1% (**), Test LSD. EE= Error standard de la media. ....	25
<b>Tabla 3.4.</b> Valores medios y análisis de la varianza para los componentes numéricos del rendimiento por sitio (el sitio GM fue descartado). Número de frutos por planta (FP), número de frutos $\text{m}^{-2}$ (F), número de semillas fruto <sup>-1</sup> (SF), número de semillas $\text{m}^{-2}$ (NS), y peso de semilla $\text{mg 1000 semillas}^{-1}$ (PS). Los símbolos al lado de los números indican diferencias significativas menores al 5 % (*), y menores al 1% (**). Test LSD al 5 %. EE=Error estándar de la media. ....	28
<b>Tabla 4.1.</b> Análisis de variancia y valores medios de Absorción total (grano+resto de estructuras) de macronutrientes en 14 experimentos de fertilización con P y S. ....	42
<b>Tabla 4.2.</b> Análisis de variancia y valores medios de Índice de cosecha (IC) de macronutrientes en 14 experimentos de fertilización con P y S. ....	43
<b>Tabla 4.3.</b> Análisis de la variancia y valores medios de concentración de macronutrientes en grano y resto de estructuras (RE), en 14 experimentos de fertilización con P y S. ....	44
<b>Tabla 4.4.</b> Análisis de la variancia y valores medios de eficiencia agronómica (EAP) y de recuperación de P (ERP) en sitios con respuesta a la fertilización con P. ....	45

<b>Tabla 4.5.</b> <i>Análisis de la varianza y valores medios de eficiencia agronómica (EAS) y de recuperación de S (ERS) en sitios con respuesta a la fertilización con S.</i> .....	46
<b>Tabla 4.6.</b> <i>Eficiencia Interna (EI) de macronutrientes en arveja en kg grano kg<sup>-1</sup> nutriente absorbido en 14 experimentos. Test F al 5%.</i> .....	47
<b>Tabla 4.7.</b> <i>Relación entre la EI de macronutrientes entre las situaciones más diluidas o más concentradas.</i> .....	49
<b>Tabla 4.8.</b> <i>Concentración media de micronutrientes en grano de arveja (0% humedad) y en resto de estructuras (RE) en mg kg<sup>-1</sup>. Test F al 5%.</i> .....	50
<b>Tabla 4.9.</b> <i>Absorción total de micronutrientes (granos + resto de estructuras) afectados por la fertilización con P y S en g ha<sup>-1</sup>. Test F al 5%. EE= Error estándar de la media.</i> .....	51
<b>Tabla 4.10.</b> <i>Índice de cosecha (IC) de micronutrientes afectados por la fertilización con P y S. Test F al 5 %. EE= Error estándar de la media.</i> .....	52
<b>Tabla 4.11.</b> <i>Eficiencia Interna de micronutrientes en kg g<sup>-1</sup> afectados por fertilización fosforada. Test F al 5 %. EE= Error estándar de la media.</i> .....	53
<b>Tabla 4.12.</b> <i>Relación entre la EI de micronutrientes entre las situaciones más diluidas o más concentradas.</i> .....	55
<b>Tabla 4.13.</b> <i>Tasa de absorción (kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) de macronutrientes modificados por aporte de P. E-FL= Emergencia a Floración; FL-LL= Floración a Inicio de Llenado; LL-MF= Inicio de Llenado a Madurez Fisiológica. Test F al 5%. EE= Error estándar de la media.</i> .....	56
<b>Tabla 4.14.</b> <i>Tasa de absorción de micronutrientes (g ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) en las etapas E-FL (58 dde), FL-LL (71 dde), y LL-E (91 dde) afectados por la fertilización fosforada. E-FL= Emergencia a Floración; FL-LL= Floración a Inicio de Llenado; LL-MF= Inicio de Llenado a Madurez Fisiológica. Test F al 5%. EE= Error estándar de la media.</i> .....	59
<b>Tabla 4.15.</b> <i>Rangos de índices de cosecha de nutrientes de diferentes cultivos reportados en la bibliografía.</i> .....	64
<b>Tabla 4.16.</b> <i>Recopilación de bibliografía de EI (kg grano kg<sup>-1</sup> de nutriente absorbido) de diferentes especies.</i> .....	66
<b>Tabla 4.17.</b> <i>Valores de Ingesta Diaria Recomendada (IDR) discriminada por sexo en humanos de los principales nutrientes (FAO, 2000), y el porcentaje de IDR cubierto con una ración diaria de 100 g de arveja comparando lo hallado en este trabajo y por el de Ray et al (2014). (SD=sin dato).</i> .....	70

## Índice de abreviaturas

ADN	Acido desoxiribonucleico
ARN	Acido ribonucleico
ATP	Adenosina de trifosfato
B	Boro
C	Carbono
Ca	Calcio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Cu	Cobre
dde	Días después de emergencia
EA	Eficiencia agronómica
EAP	Eficiencia agronómica de fósforo
EAS	Eficiencia agronómica de azufre
E-FL	Etapas de emergencia a floración
EI	Eficiencia interna
EIN	Eficiencia interna de nitrógeno
EIP	Eficiencia interna de fósforo
ENC	Eficiencia de nutriente concentrado
END	Eficiencia de nutriente diluído
ER	Eficiencia de recuperación
ERP	Eficiencia de recuperación de fósforo
ERS	Eficiencia de recuperación de azufre
F	Frutos por m <sup>2</sup>
Fe	Hierro
FL-LL	Etapas de floración a llenado
FP	Frutos por planta
IC	Índice de cosecha
ICN	Índice de cos. de nitrógeno
ICP	Índice de cosecha. de fósforo
IDR	Ingesta recomendada diaria
K	Potasio
LL-MF	Etapas llenado a mad. fisiológica
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
Mpa	Megapascal
MS	Materia seca
N	Nitrógeno
NS	Número de semillas
P	Fósforo
PS	Peso de las semillas
R	Rendimiento
RE	Resto de estructuras
RP	Rendimiento con fósforo
RR	Rendimiento relativo

RT	Rendimiento parcelas testigo
S	Azufre
SF	Semillas por fruto
TCC	Tasa de crec. de cultivo
Zn	Cinc

## ***Resumen***

### **Desarrollo de bases para el manejo nutricional del cultivo de la arveja (*Pisum sativum*, var *sativum*).**

El cultivo de arveja en Argentina se concentra en el sudeste de Santa Fe y nordeste de Buenos Aires, cuya producción se destina principalmente a la exportación, y en menor medida al consumo interno como grano seco rehidratado enlatado, congelado, harinas, o forraje. Se trata de un área afectada por procesos de erosión hídrica y degradación, en los cuales interesa conocer el efecto del aporte de fósforo (P) y azufre (S) sobre el cultivo. Los objetivos fueron i) evaluar los efectos de los aportes de P y S sobre el rendimiento y sus componentes, ii) estudiar la dinámica de absorción de macro y micronutrientes ante la fertilización fosforada y azufrada y determinar las eficiencias de uso, y iii) relacionar la respuesta en rendimiento con P-Bray del suelo. Entre 2009 y 2013, se condujeron 16 experimentos a campo con dos niveles de P (0 y 20 kg ha<sup>-1</sup>) y dos de S (0 y 18 kg ha<sup>-1</sup>). El P incrementó el rendimiento en 11 de los 16 sitios evaluados, mientras que S sólo en dos de ellos. El número de vainas por planta fue componente de rendimiento modificado por P. Las diferencias de generación de biomasa se produjeron desde las etapas iniciales, y fueron debidas al P, promoviendo mayor absorción de macro y micronutrientes, aunque no fueron alterados los índices de cosecha. Entre los sitios con respuesta a rendimiento por P se determinaron eficiencias agronómicas (EAP) entre 11 y 60 kg de grano kg<sup>-1</sup> de P agregado, estando ligada más a la eficiencia de recuperación que a la eficiencia interna. Se obtuvo un umbral de respuesta por debajo de 14.7 mg kg<sup>-1</sup> de P por el método Bray 1. Por otro lado S no modificó la generación de biomasa, ni los componentes de rendimiento, y sólo alteró el rendimiento en dos de los 16 sitios evaluados con eficiencias agronómicas (EAS) de 10 y 28 kg grano kg<sup>-1</sup> S. Tampoco afectó la tasa de crecimiento (TCC) ni la absorción de otros macro y micronutrientes.

## ***Abstract***

### **Development of bases for the nutritional management of dry pea crop (*Pisum sativum*, var *sativum*).**

Field pea crop in Argentina is concentrated in the southeast of Santa Fe and northeast of Buenos Aires provinces, and the production is mainly for export. Soils in this area are affected by erosion and degradation, so there is interest to know about the effect of P and S on the crop performance. The objectives were i) quantify the magnitude of yield response to the application of P and S, and determine the yield components affected; ii) to study the dynamics of macro and micronutrients uptake due to P and S fertilization, and the use efficiency; and iii) make a relation between soil test P (Bray 1) and yield response. Between 2009 and 2013, 16 trials were conducted evaluating two levels of P (0 and 20 kg ha<sup>-1</sup>), and two levels of S (0 and 18 kg ha<sup>-1</sup>). P had effect on grain yield on 11 over 16 trials, meanwhile S had effect only in two of them. The yield component affected by P addition was the number of fruits per plant. Differences in plant growth were measured from the beginning of crop cycle due to P fertilization, promoting more macro and micronutrients uptake. However no modification were observed in the crop harvest index. Among the trials with yield response to P were determined phosphorus efficiency use (PUE) between 11 and 60 kg grain kg<sup>-1</sup> of P added, this efficiency being more related to the recovery efficiency than the internal efficiency. A threshold was obtained in soil P test at 14.7 mg kg<sup>-1</sup> soil test P (Bray 1). On the other hand, S had no effect on dry matter accumulation, or yield components, and only modified yield in two of 16 trials, with sulphur efficiency use (SAE) of 10 and 28 kg grain kg<sup>-1</sup> S applied. No modification was observed in dry matter accumulation or macro and micronutrients uptake.

## **Capítulo 1.**

### ***Introducción General, definición de objetivos y planteo de hipótesis.***

#### *1.1 Introducción*

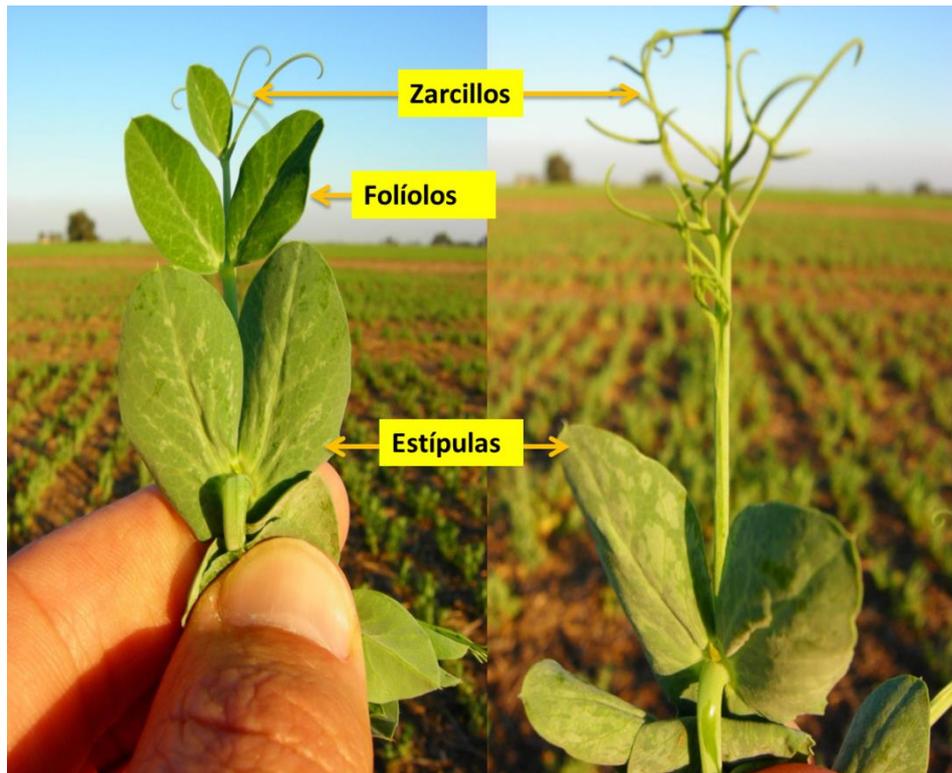
La arveja (*Pisum sativum* L.) es una legumbre de ciclo invierno-primaveral perteneciente a la familia de las Fabáceas (subfamilia Papilionoidea, tribu Viciae). Según la taxonomía botánica, la tribu Viciae contiene los géneros *Lathyrus* (“conejo”, ornamental), *Vicia* (vicia), *Lens* (lenteja), *Lupinus* (lupino), *Cicer* (garbanzo), *Phaseolus* (poroto), entre otras especies menos conocidas. El nombre vulgar en los países de habla hispana es “arveja”, “alverja”, “guisante”, “chícharo”, mientras que en inglés es “pea” o “dry pea”.

El comercio mundial es de poco más de 8 M tn, siendo Canadá el principal productor mundial, con más de 4 M tn, siguiendo en importancia China, Francia y Estados Unidos (FAOSTAT, 2018; Statistics Canadá, 2016). Su uso principal es el consumo humano, siendo los más grandes importadores India, China y Bangladesh (FAOSTAT, 2018).

En Argentina, la arveja se cultiva de forma extensiva desde hace más de 70 años, concentrándose la producción en el sudeste de la provincia de Santa Fe y el nordeste de la provincia de Buenos Aires (Amma et al, 1987). En la campaña 2017-2018, sólo en esa región, el cultivo alcanzó las 37.000 ha, aunque en años de mejores precios de mercado se llegó a las 70.000 ha (Prieto y Vita, 2017). Se estima que entre un 20 y 30 % del total producido son de variedades de cotiledón amarillo y el resto de cotiledón verde, cuyo destino principal es la exportación (INASE, 2019). Este dato posee una gran variación interanual en función de los precios de mercado de cada tipo de arveja. El comercio exterior de Argentina ha crecido en forma sostenida, desde el año 2002 con 7500

toneladas, a más de 127.000 toneladas en 2012, siendo actualmente de 80.000 tn (SENASA, 2018). Brasil es el destino principal de las exportaciones argentinas, representando aproximadamente el 30 % del mercado, mientras que el resto se exporta a India, Bangladesh y Senegal, entre otros destinos. El consumo interno es escaso (aproximadamente  $120 \text{ g habitante}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) (Brescia y Rabaglio, 2015). De la producción total de arvejas verdes, aproximadamente un 60 % se exporta como grano seco, mientras que el mercado interno representa aproximadamente un 20 %, fundamentalmente como grano seco rehidratado en latas o cajas, o secas enteras o partidas en góndolas de supermercado en envases de 400 g. Aproximadamente un 10 % se destina a semilla, y el resto se distribuye entre la producción de harinas, industria del congelado (menos del 1%), mercado fresco producida en los cinturones hortícolas del país para venta directa al menudeo, y también una parte importante es usada como forraje para cerdos y bovinos de carne y leche.

En el país se hallan inscriptas más de 80 variedades, (INASE, 2018) entre las que se encuentran principalmente dos tipos clasificadas según su morfología foliar: las variedades foliosas y las semi-áfilas. Las hojas de las primeras se caracterizan por poseer estípulas, que abrazan el tallo, folíolos y zarcillos terminales, mientras que en las semi-áfilas solo presentan zarcillos en lugar de zarcillos (Figura 1.1). Esta característica le confiere al cultivo de variedades semi-áfilas una estructura más erecta.



**Figura 1.1.** Estructura foliar de arveja. A la izquierda una estructura foliosa (variedad *Facon*), a la derecha, estructura foliar semi-áfila (variedad *Viper*).

Además, presenta variación en cuanto al color de las semillas, y así tenemos variedades de semillas color verde, amarillo y maple. El color verde es conferido por la pigmentación de clorofilas (Steet y Tong, 1996), altamente degradable por las enzimas de la misma semilla al momento de hidratarse. Otra diferenciación es la textura de grano, pudiendo ser liso (semillas esféricas) o rugoso (semillas poliédricas sin forma definida). Las variedades de semillas amarillas son las menos numerosas entre las disponibles comercialmente en Argentina. Finalmente, las variedades con semilla maple son aquellas que poseen una coloración castaña, moteada o jaspeada, cuyo principal mercado es Asia.

El tamaño de las semillas es una característica genética, pero fuertemente influenciada por las condiciones del ambiente (condiciones edafoclimáticas y nutrición) (Prieto et al, 2018). Las variedades más difundidas en el país son *Viper* (Cebeco,

Holanda), de cotiledón verde, semi-áfila, con un peso de semilla 170 mg, y Facon (Seminis, Estados Unidos), también de cotiledón verde, pero de estructura foliosa, y peso de semillas promedio de 160 mg. Dentro de las de cotiledón amarillo hay tres variedades difundidas, dos de origen francés, Yams y Reussite, (Florimon Desprez, Francia) y otra de origen canadiense, Meadow (CDC Canadá), las tres con mayor peso de semillas que Viper y Facon.

El ciclo de cultivo es invierno-primaveral, similar a las variedades de trigo de ciclo corto, cebada o colza, aunque se cosecha entre 15 días antes que el trigo.

Las semillas tienen preformados 5 nudos, y a emergencia, entre 8 y 9 nudos ya están diferenciados (Turc y Lecoeur, 1997). La diferenciación de nudos vegetativos prosigue hasta que el ápice, una vez cumplido los requerimientos fotoperiódicos, comienza a diferenciar las estructuras florales.

Las variedades de arveja tipo primaverales, tienen una respuesta fotoperiódica cuantitativa a días largos (Guilioni y Lecoeur, 2010). El período crítico para la determinación del rendimiento es, a nivel de nudo reproductivo, desde fecundación hasta límite de aborto de semillas, tiempo en el que el embrión tiene un proceso de división celular sin incremento importante de la biomasa (Ney et al, 1993). Al final de este estado es poco probable que la semilla aborte (Duthion y Pigeaire, 1991). De aquí en más comienza el período de llenado de semillas por acumulación de almidones y proteínas (Ney y Turc, 1993). A nivel de planta, el período crítico se extiende desde la apertura de la flor del primer nudo reproductivo, hasta que el último nudo reproductivo haya alcanzado el estado final de aborto de semilla. En esta etapa se dan las mayores reducciones del rendimiento ante restricciones en la oferta de recursos (Poggio et al, 2005).

Los suelos de esta área presentan un importante grado de deterioro físico-químico y los contenidos de materia orgánica, nitrógeno orgánico y fósforo han tenido un brusco descenso, asociado a falta de rotación con pasturas, el monocultivo de soja, procesos de erosión hídrica, labranzas y el balance negativo de nutrientes (Cruzate y Casas, 2003; Michelena et al, 1989; García, 2009; Ciampitti et al, 2010). El grado de deterioro físico puede ser resumido mediante la resistencia a la penetración de esos perfiles en capacidad de campo (Gerster y Bacigalupo, 2004; Malmantile et al., 2018),

El fósforo, en los suelos de la región Pampeana se encuentra en fracciones orgánicas (materia orgánica) y minerales (arcillas, óxidos e hidróxidos), siendo muy reducida la proporción de fósforo soluble sobre el fósforo total (Sims y Pierzinsky, 2005). Es uno de los 17 elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, cuyas principales funciones están ligadas a la transferencia y almacenaje de energía, constituyente de ATP y otros compuestos fosforados relacionados con los procesos energéticos. Además es parte esencial del ADN y ARN, responsables de la transmisión genética y de la biosíntesis proteica respectivamente. También forma parte de los fitatos (principal forma de reserva de P) en las semillas (Vance et al, 2003). Los síntomas de deficiencia más habituales están relacionados con menor expansión del área foliar, aunque la tasa de fotosíntesis es afectada en menor medida (Mollier y Pellerin, 1999).

En región pampeana existen muchos trabajos que abordan la respuesta a rendimiento a la fertilización con P y la estimación de eficiencias de uso del mismo en soja, maíz o trigo (Ferrari et al, 2005; García, 2009; Salvagiotti et al, 2017). Sin embargo, son escasos los antecedentes en la región pampeana con fertilización fosforada en arveja, limitándose sólo a recomendaciones de uso de fertilizante en función del niveles de fósforo en suelo (Amma et al, 1987), pero ningún otro aporte en cuanto a curvas de respuesta, componentes de rendimiento modificados, dinámica de absorción, y eficiencias

agronómicas, de recuperación e internas, y cómo son afectadas las eficiencias de uso de otros nutrientes por mayor disponibilidad de fósforo.

El azufre se encuentra en el suelo principalmente en forma orgánica, ligado a los ácidos fúlvicos y húmicos, huminas, y también en aminoácidos (cistina, cisteína y metionina), siendo la reserva más importante de azufre en el suelo (Mc Claren y Swift, 1977). Las formas inorgánicas, se encuentra en los suelos productivos principalmente como sulfato ( $(\text{SO}_4)^{-2}$ ) formando parte de diversas sales en solución. Apenas absorbido bajo la forma de  $(\text{SO}_4)^{-2}$  es incorporado en compuestos orgánicos como cisteína, cistina y metionina, (Hoefgen y Hesse, 2008). La deficiencia de azufre se manifiesta como clorosis en los tejidos más jóvenes, con una menor tasa de crecimiento, producto de acumulación de aminoácidos no azufrados y disminución de la biosíntesis proteica (Hoefgen y Hesse, 2008). Numerosos estudios han demostrado el efecto del agregado de azufre sobre el rendimiento, sus componentes y las eficiencias de uso de otros nutrientes en trigo, soja y maíz (Gutiérrez Boem et al, 2007; Salvagiotti et al, 2004; Salvagiotti et al, 2017), pero en Argentina la magnitud de la respuesta en arveja no ha sido explorada. Tampoco es conocida la interacción que pudiere haber entre fósforo y azufre sobre el rendimiento, sus componentes y las eficiencias de uso.

El diagnóstico de la fertilización es la base de las buenas prácticas de fertilización de los cultivos. El desarrollo de herramientas para hacer este diagnóstico implica conocer tanto la relación entre la respuesta a la fertilización del cultivo con indicadores del suelo y/o cultivo asociados a la disponibilidad del nutriente bajo estudio, incluyendo el conocimiento de la dinámica de absorción, movilización y eficiencia de uso del nutriente. Esta información es extensa en cultivos de mayor producción en el mundo como maíz, trigo o arroz (Setiyono et al, 2010; Witt et al, 1999; Dobermann, 2007; Liu et al, 2006;

van Duivenbooden et al., 1996). Sin embargo, los estudios en arveja son menos abundantes.

En la actualidad, la fertilización fosforada en legumbres se basa en recomendaciones basadas en análisis de suelos que se formularon cuando el cultivo se hacía bajo labranza convencional, y sin inoculación de semillas con cepas específicas (Amm, 1987). En contraste, hoy una gran proporción de la superficie implantada con esta especie se realiza en sistema de siembra directa, con adopción de inoculantes comerciales, y con variedades de mayor potencial de rendimiento.

En cuanto a indicadores de suelo en Argentina se ha adoptado con éxito la metodología Bray1 para estimar umbrales de respuesta a la fertilización con P en maíz, trigo y soja (Echeverría et al, 2001; Calviño y Redolatti, 2004; Senigaliesi et al, 1984; Darwich, 1984; García 2003), pero la validez de este indicador para cultivos como arveja no ha sido estudiada con la misma profundidad.

El manejo integrado de nutrientes tiene como objetivo el aporte balanceado de nutrientes al cultivo. Algunas de las aproximaciones realizadas pueden ser las desarrolladas por Janssen (1998) para encontrar relaciones entre nutrientes o través de relaciones estequiométricas (Niklas, 2006). La primera aproximación incluye conocer no solo el requerimiento de nutrientes de los cultivos, sino también la eficiencia de uso de los mismos (de Wit, 1992). El conocimiento de las eficiencias agronómicas de P (EAP) y de S (EAS) es necesario a fin de determinar dosis económicas para los cultivos comerciales. Por otro lado, la eficiencia agronómica (EA) tiene dos componentes, uno es la eficiencia de recuperación (ER) que relaciona cuánto de un nutriente aplicado es absorbido, y la eficiencia interna (EI) que relaciona cuanto de ese nutriente absorbido produjo incremento de rendimiento.

En el caso de la EAP, existen valores de referencia en trigo, soja o maíz, sin embargo no ha sido explorada en la misma profundidad la EAS (Salvagiotti 2004; Vivas et al 2009, Vivas et al, 2008). En el caso de arveja, no hay estudios que hayan cuantificado EAP y EAS, y tampoco relacionada con la ER y la EI de esos nutrientes. A través de las relaciones estequiométricas, es esperable que en situaciones de deficiencia, la relación de nutrientes se desvíe de la relación teórica que maximiza el crecimiento y puedan servir como indicadores de deficiencia para el diagnóstico de la fertilización.

## *1.2 Hipótesis*

1) La fertilización fosforada tiene efectos relativos mayores que los de azufre, incrementando la producción de biomasa y el rendimiento por un aumento en el número de semillas por metro cuadrado.

2) La mayor disponibilidad de P y de S incrementará el crecimiento del cultivo de arveja y, de esta forma, aumentará la absorción de ambos nutrientes, como así también la de otros macro y micronutrientes.

3) La mayor Eficiencia Agronómica (EA) de P y S en los sitios con respuesta, está ligado más a la Eficiencia de Recuperación (ER) que a la Eficiencia Interna (EI).

## *1.3 Objetivos*

### *1.3.1 Objetivo general*

Determinar los efectos de la fertilización con P y S sobre el rendimiento de arveja y sus componentes numéricos, la dinámica de absorción de macro y micronutrientes, y cambios en las eficiencias de uso de P, S y otros nutrientes.

### *1.3.2 Objetivos específicos*

1. Cuantificar la magnitud de la respuesta en rendimiento y sus componentes numéricos al agregado de P y S en arveja en diferentes sitios y medir posible interacción entre P y S.
2. Estudiar la dinámica de absorción de macro y micronutrientes por efecto del agregado de P y S y cuantificar la eficiencia de uso de P y S.
3. Determinar la relación estequiométrica entre N, P y S en semilla y planta en arveja en respuesta a la fertilización con P y S
4. Relacionar la respuesta del cultivo con indicadores de la fertilidad química del suelo.



## ***Capítulo 2.***

### ***Materiales y métodos general, descripción de los sitios experimentales***

#### *2.1 Materiales y métodos*

##### *2.1.1 Área de estudio*

Los experimentos fueron implantados en el sudeste de la provincia de Santa Fe, en los departamentos Rosario y Constitución, caracterizado por un paisaje ondulado, surcado por afluentes del Río Paraná tales como el Arroyo Saladillo, Arroyo Pavón, y Arroyo del Medio. Las pendientes son suaves, en el rango de 0,5 y 1 %, pudiendo llegar en algunos casos al 1,5 %. Los suelos en general son de textura arcillo limosos, con una historia agrícola muy intensa y prolongada, y graves procesos erosivos en las cuencas mencionadas.

##### *2.1.2. Diseño experimental*

Se instalaron 16 ensayos a campo, 7 sitios en 2009, 6 sitios en 2010, 2 sitios en 2011, 1 sitio en 2012 (Tabla 2.1; Figura 2.1). Los tratamientos fueron la combinación de aplicación de P y S: testigo (P0 S0), fósforo (P1 S0), azufre (P0 S1), y fósforo + azufre (P1 S1) (Tabla 2.1), bajo un diseño en bloques completos aleatorizados con 3 repeticiones. El ancho de las parcelas varió en función de la sembradora empleada, entre 4 y 4,5 m de frente por 15 m de largo.

**Tabla 2.1.** Descripción de los tratamientos ensayados.

Tratamientos	Nivel de nutrientes	
	P	S
<b>P0 S0</b>	0	0
<b>P1 S0</b>	1	0
<b>P0 S1</b>	0	1
<b>P1 S1</b>	1	1

**Tabla 2.2.** Caracterización de los diferentes sitios evaluados en función del año de instalación, localidad, análisis de suelo para el estrato 0-0.2 m, variedades empleadas y antecesores. Ordenados cronológicamente. El sitio Rue13 sólo se usó para construir la Figura 3.4.

Año	Localidad	ID	N- NO3 <sup>-</sup>	P	S- SO4 <sup>=</sup>	pH	MO	Var	Serie Suelo	Antecesor
			mg kg <sup>-1</sup>				%			
2009	S. Cabral	LC	13,6	15,0	3,3	5,93	2,9	Facon	Peyrano	Soja 1°
2009	C. Bogado	GM	13,4	13,5	1,7	5,97	3,0	Facon	Peyrano	Soja 1°
2009	S. Cabral	SC	15,2	11,0	2,5	5,85	3,1	Viper	Peyrano	Soja 1°
2009	J.B. Molina	LP	17,5	9,7	3,2	5,80	2,9	Viper	Peyrano	Soja 1°
2009	Albarellos	VA	19,8	8,5	2,7	5,77	3,0	Facon	Peyrano	Soja 1°
2009	J.B. Molina	AT	16,6	11,0	3,3	5,85	3,0	Viper	Peyrano	Soja 1°
2009	Alcorta	AL	10,5	8,5	1,3	6,03	3,0	Facon	Bigand	Maíz
2010	Oliveros	OL	9,5	14,0	2,7	6,06	2,9	Facon	Oliveros	Maíz
2010	J.B. Molina	MO	15,7	13,7	4,3	5,77	2,7	Facon	Peyrano	Soja 2°
2010	P. Arriba	PA	10,2	14,0	1,0	6,15	2,3	Viper	Peyrano	Soja 2°
2010	Rueda	RD	13,0	9,5	1,8	5,79	2,2	Facon	Ramallo	Soja 1°
2010	S. Cabral	SC10	14,3	11,5	2,0	5,89	2,9	Facon	Peyrano	Soja 1°
2010	Albarellos	VA10	19,1	10,0	3,3	5,86	3,3	Viper	Peyrano	Soja 1°
2011	C. Bogado	bog	11,6	4,0	3,7	5,63	2,3	Facon	Peyrano	Soja 1°
2011	J.B. Molina	Mol	13,6	14,0	3,0	5,75	2,8	Facon	Peyrano	Soja 1°
2012	Rueda	Rue	10,0	7,8	2,3	5,75	2,3	Facon	Ramallo	Soja 2°
2013	Rueda	Rue13	6	35	0,7	5,86	2,3	Facon	Ramallo	Soja 1°

### *2.1.3. Fuentes y dosis aplicadas y tratamiento de semillas*

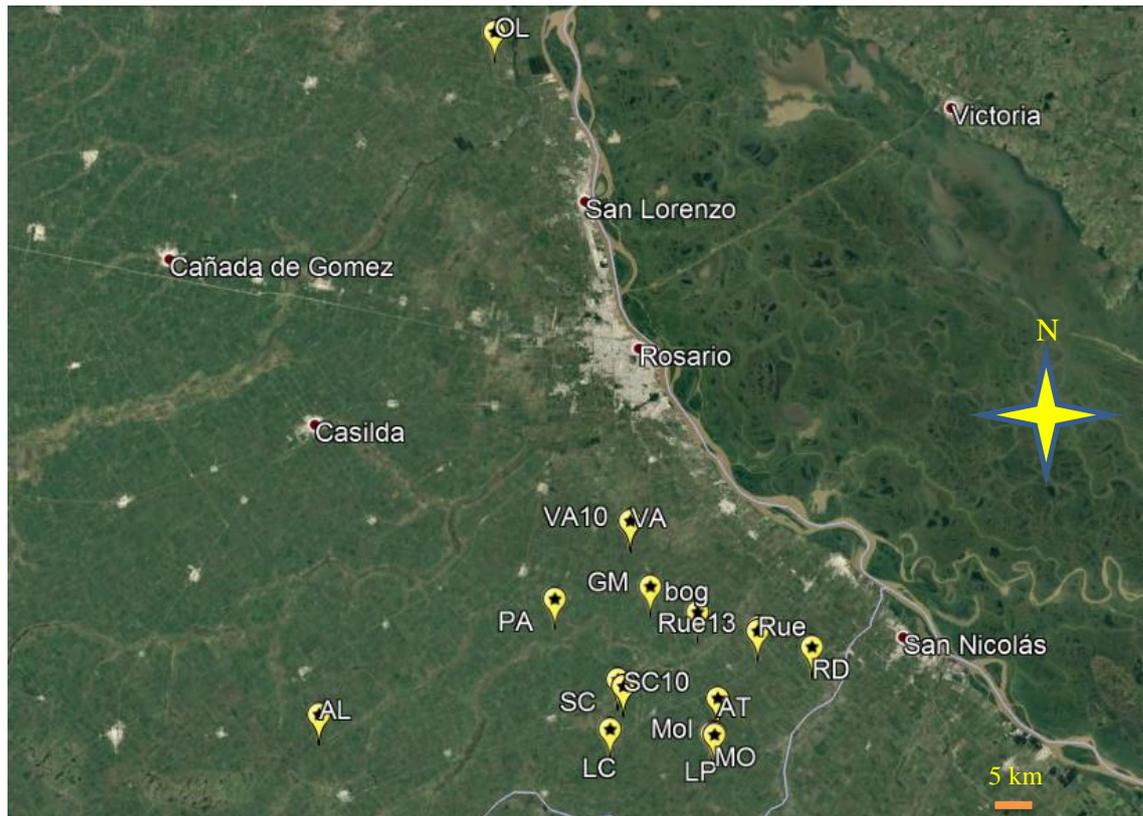
Las fuentes de nutrientes empleadas fueron sulfato de calcio y superfosfato triple de calcio para S y P, respectivamente. Las dosis fueron de 0 y 20 kg ha<sup>-1</sup> de nutriente para P y de 0 y 18 kg de S, ambos nutrientes aplicados en la línea de siembra. Las semillas fueron tratadas con fungicidas metalaxil-m más fluodoxinil, e inoculadas con cepas específicas de *Rhizobium leguminosarum*, dosificado todo según indicación de marbete.

### *2.1.4. Determinaciones de suelo y planta*

Se realizó análisis de suelos del estrato 0-0.2 m para caracterizar y determinar los ambientes en función del nivel de materia orgánica (Walkey & Black), pH (dilución acuosa 1:2.5), disponibilidad de P (Bray & Kurtz N°1), S-(SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup> (Turbidimetría) y N-(NO<sub>3</sub>)<sup>2-</sup> (reducción Cd) (Tabla 2.1). Se midió la resistencia a la penetración para conocer la condición física del suelo hasta una profundidad de 37,5 cm, en estratos de 2,5 cm, por el método de cono en condiciones de capacidad de campo (Bengough, 1990) (Figura 2.2).

En los siete ensayos de 2009 se determinó biomasa en el estado de floración (203) (Knott, 1987), mediante el muestreo de 0.4 m<sup>2</sup> por parcela. Las muestras se pesaron para obtener el peso húmedo, separando y pesando una alícuota para determinar el porcentaje de materia seca mediante secado en estufa a 60 °C hasta peso constante.

En 2010, en el sitio SC10 se midió la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en función de los tratamientos. Se realizaron muestreos durante el ciclo en los estados 108, 110, 203, 206 y 209 (nudo 8, nudo 10, floración, inicio de llenado de granos y madurez fisiológica respectivamente de acuerdo a Knott, 1987). En las muestras de los estados 203, 206 y 209 se hicieron determinaciones en tejido de concentración macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu y B).



**Figura 2.1.** Ubicación geográfica de los diferentes sitios de ensayo.

Previo a la cosecha, en todos los sitios (excepto GM) se tomó una muestra de 0.2 m<sup>2</sup> para la determinación de componentes de rendimiento, midiendo la densidad de plantas m<sup>-2</sup> (P), el número de frutos por planta (FP), y el número de semillas por fruto (SF), calculado como el cociente entre el número de semillas y número de vainas de la muestra. El número de semillas m<sup>-2</sup> (NS) se estimó contando las semillas totales de la muestra, y el peso de semillas (PS) pesando dicha muestra, todo expresado en base a 0 % de humedad.

Sobre estas muestras, luego de la determinación de los componentes de rendimiento, se separaron los granos del resto del material (vainas, tallos, zarcillos, hojas y/o estípulas), obteniendo así dos muestras por parcela, una de granos, y la otra conteniendo el conjunto del resto de las estructuras (RE). Cada muestra se molió para la determinación de la concentración de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca),

magnesio (Mg) y azufre (S) y los micronutrientes manganeso (Mn), hierro (Fe), cinc (Zn), cobre (Cu) y boro (B). Por otro lado, se cosechó la parcela entera (12 m<sup>2</sup>) para la determinación del rendimiento.

#### 2.1.5. Cálculo de las eficiencias de uso.

Se estimaron la eficiencia agronómica (EA), la eficiencia de recuperación (ER) y la eficiencia interna (EI) definidas respectivamente como la respuesta en rendimiento obtenido en función del nutriente agregado; el diferencial de absorción de nutrientes en función de la cantidad agregada; y el diferencial de rendimiento en función de la cantidad de nutriente absorbida:

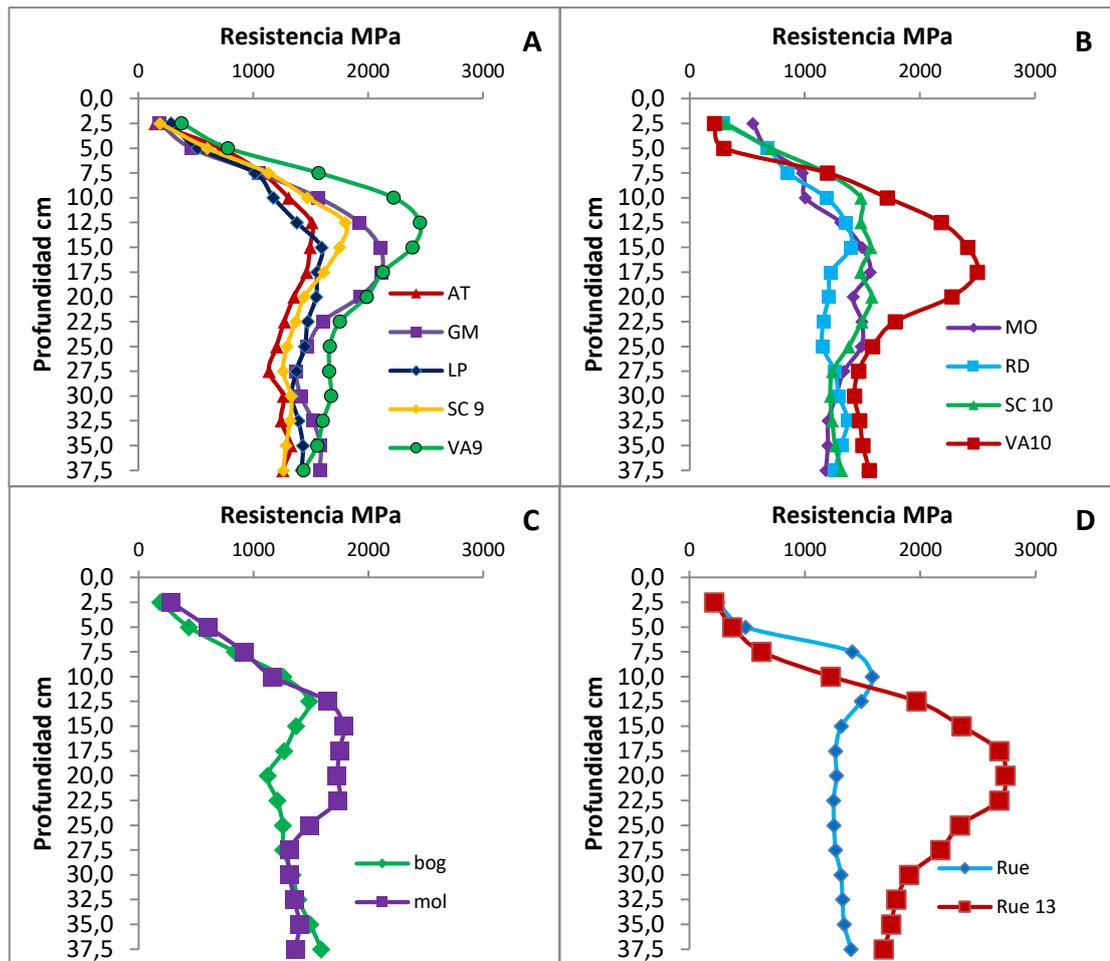
$$EA = \frac{\Delta \text{Rendimiento } kg}{\text{Nutriente aplicado } kg} \quad (1)$$

$$ER = \frac{\Delta \text{Nutriente Absorbido } kg}{\Delta \text{Nutriente aplicado } kg} \quad (2)$$

$$EI = \frac{\Delta \text{Rendimiento } kg}{\Delta \text{Nutriente absorbido } kg} \quad (3)$$

#### 2.1.6. Análisis de la información.

Tratándose de un trabajo, cuyo único diseño a lo largo de los años y sitios fue factorial con dos niveles de dos factores, se realizó un ANOVA para cada variable para detectar influencia del efecto del Sitio, de los factores y su interacción. Cuando el efecto fue significativo ( $\alpha < 0.05$ ) para la interacción se hicieron análisis por separado de cada sitio. En el caso de la determinación del umbral de respuesta en función del P extractable del suelo, se utilizó el método sugerido por Correndo y otros (2017). Para el análisis de las eficiencias se empleó ANOVA, para detectar efectos de factores principales y se graficaron empleando el software Bossom Statical Package (Cade y Richards, 2001), estableciendo valores de eficiencia interna en los percentiles 1, 50 y 99.



*Figura 2.2. Penetrometría por el método del cono a una profundidad de 37,5 cm en estratos de 2,5 cm. Los valores están expresados en MPa. A, B, C y D Las letras corresponden a los años en que se establecieron los sitios (A: 2009, B: 2010, C: 2011, dD: 2012 y 2013).*

### ***Capítulo 3.***

#### ***Producción de biomasa y generación del rendimiento en arveja por efecto de la fertilización fosforo-azufrada.***

##### *3.1 Introducción*

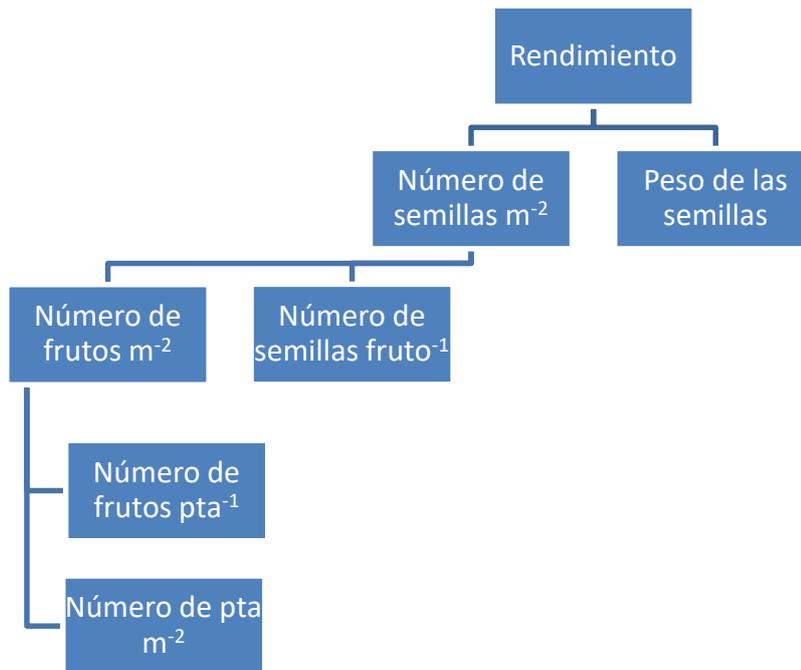
La producción de biomasa es originada por procesos de división y alargamiento celular, y por la producción de fotoasimilados, sustancias sintetizadas en las plantas superiores por acción de la luz como fuente de energía, el CO<sub>2</sub> como fuente de C, y los nutrientes y agua que aporta el sustrato (fotosíntesis). Como contrapartida el proceso de respiración implica la producción de energía con producción de CO<sub>2</sub>, y el balance de ambos procesos determina la tasa de crecimiento del cultivo (TCC). La energía generada en la respiración de fotoasimilados es almacenada y transferida en uniones de compuestos ricos en P (ADP-ATP) (Rabinowitch y Govindjee, 1969).

La disponibilidad de nutrientes altera la producción de fotoasimilados, y está estrechamente relacionada con la producción de mayor área foliar (Gutiérrez Boem y Thomas, 1999), la cual garantiza mayor intercepción de radiación, alterando así la producción de biomasa, y los diferentes componentes de rendimiento. Muchos autores demostraron que el aporte de nitrógeno afecta la intercepción de la radiación en girasol (Hall et al, 1995), trigo (Salvagiotti, 2004), y maíz (Massigam et al, 2009). El rendimiento en grano es función de la producción total de biomasa de un cultivo y cómo ésta es particionada a granos (índice de cosecha) (Rhoads and Stanley, 1981; Karlem and Camp, 1982; Welch y Flannery, 1985). Salvagiotti (2004) y Agosti (2011) demostraron en trigo y colza respectivamente, que mayores disponibilidades de N y S incrementaron la biomasa aérea, el número de órganos reproductivos, y por ende, el número de granos por unidad de superficie. En legumbres, específicamente poroto, Turuko y Mohamed

(2014) detectaron respuestas significativas del orden del 164 % en biomasa aérea total, del 94 % en el número de frutos por planta y del 86 % en el número de semillas por fruto por el agregado de 20 kg de P ha<sup>-1</sup>, mientras que en garbanzo el agregado de P produjo incrementos significativos en la cantidad de N fijado, del orden del 33 % en relación al testigo no fertilizado (Islam, et al 2012).

El número de semillas por unidad de superficie en arveja está fuertemente influenciado por la radiación y la temperatura (Meadley y Milbourn, 1971; Jeuffroy et al, 1990; Jeuffroy y Cabanet, 1994). Poggio et al (2005) determinaron que el cociente fotothermal durante el período crítico de arveja, comprendido entre floración y el estado final de aborto de semilla, tuvo una fuerte correlación con el número de frutos y el número de semillas por metro cuadrado. En arveja, se ha observado que una mayor disponibilidad de P incrementa la tasa de crecimiento, el índice de área foliar, la biomasa aérea total, el número de frutos por planta y el rendimiento (Sandaña et al, 2012; Erman et al, 2009).

El objetivo del presente capítulo fue cuantificar la respuesta a la fertilización con fósforo y azufre en arveja analizando (i) la dinámica de acumulación de biomasa y el índice de cosecha, (ii) el rendimiento y sus componentes numéricos y, (iii) determinar un umbral de respuesta a la fertilización con P en función de la disponibilidad edáfica.



**Figura 3.1.** Modelo representativo de las relaciones numéricas para la determinación del rendimiento en el cultivo de arveja

### 3.2 Materiales y métodos

#### 3.2.1 Determinaciones en el cultivo

En los siete experimentos instalados en 2009 se realizaron muestreos de biomasa aérea en una superficie de 0.4 m<sup>2</sup> por parcela, en floración (estado 203) (Knott, 1987). Se cortó la muestra a ras del suelo, se llevó a estufa una alícuota para ser secada a 60°C hasta peso constante. Se pesó y se determinó la biomasa acumulada por unidad de superficie.

En 2010, en el sitio SC10, (que presentaba una baja disponibilidad de P a la siembra) se determinó la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), tomando muestras en una superficie de 0,4 m<sup>2</sup>, en los estados fenológicos 108, 110, 203, 206 y 209, que se corresponden respectivamente con la aparición de 8 nudos, 10 nudos, floración, inicio de llenado, y madurez fisiológica (Knott, 1987). La TCC fue determinada como la diferencia de biomasa acumulada entre dos momentos de muestreo dividido los días transcurridos entre ambos.

Cuando el 80 % de los frutos de los nudos apicales viró de color verde a amarillento, se muestreó una superficie de  $0.4 \text{ m}^2$  para determinar biomasa aérea y componentes de rendimiento, en los 15 experimentos realizados en los 4 años (se exceptuó el sitio GM porque no se pudo realizar el muestreo). Se calculó el índice de cosecha y se determinaron los componentes numéricos del rendimiento de acuerdo al esquema de la Figura 3.1 (número de plantas, frutos planta<sup>-1</sup>, frutos m<sup>-2</sup>, semillas fruto<sup>-1</sup>, semillas m<sup>-2</sup> y peso de las semillas).

### *3.2.2 Determinaciones en suelo*

En los 16 ensayos se hicieron muestreos de suelo sobre el estrato de 0-0.2 m para la determinación de P (Bray1), N-(NO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, S-(SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup>, Materia Orgánica y pH.

### *3.2.3 Análisis de datos*

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza. En los ensayos de acumulación de biomasa en floración se comparó el efecto Sitio, P, S y las interacciones. En el ensayo de dinámica de acumulación de biomasa se comparó el efecto de P, S e interacciones PxS en cada una de las etapas consideradas. En el análisis del rendimiento y los componentes numéricos que lo determinan se testeó el efecto Sitio Año (Sitio), P, S y la interacción en forma individual en cada sitio para todos los componentes. Para la determinación del umbral de respuesta se empleó el método de la curva de calibración de logaritmo del arco seno modificado (ALCC), propuesto por Correndo et al (2017). En este análisis se relacionó el contenido de P extractable por el método Bray 1 en 17 sitios (16 de esta tesis y uno de un ensayo de fertilización en 2013 en la localidad de Rueda, Santa Fe) y el rendimiento relativo (RR) expresado como el cociente entre promedio de rendimiento de las parcelas sin aplicación de P, i.e. P0 S0 y P0 S1 (RT), y el promedio de rendimiento de las parcelas fertilizadas con fósforo, i.e. P1 S0 y P1 S1 (RP):

$$RR = \frac{RT}{RP} \quad (4)$$

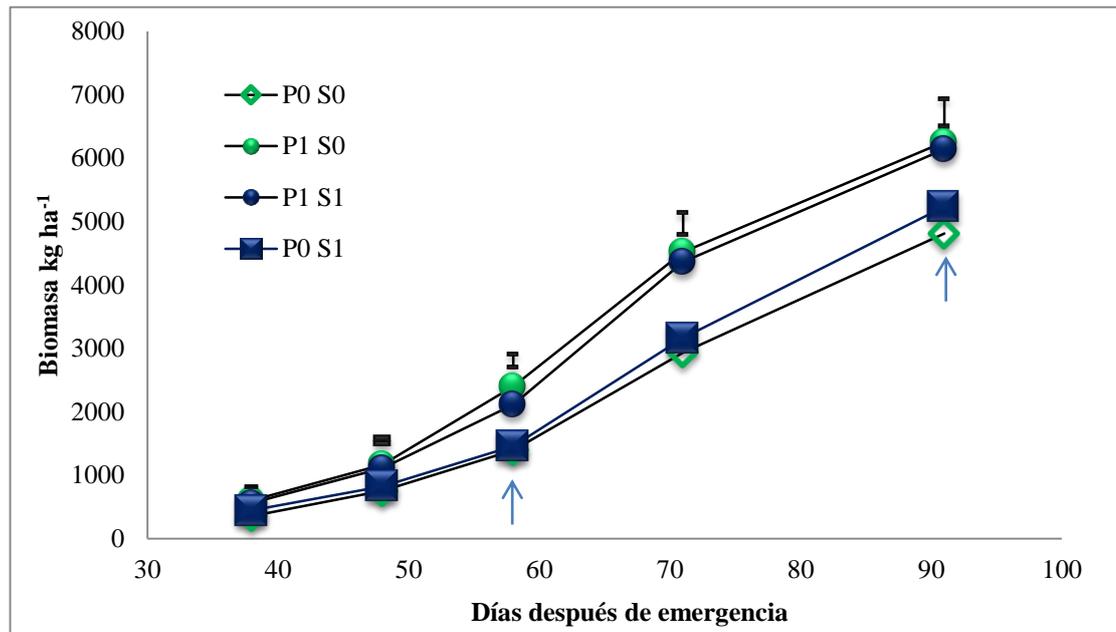
### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Producción de biomasa

La TCC mostró una marcada respuesta al agregado de P, tanto en estados vegetativos (108 y 110), como reproductivos (203 y 209), mientras que la mayor disponibilidad de S no tuvo efecto significativo en la TCC en ninguna de las etapas evaluadas (Figura 3.2) y tampoco hubo interacción PxS. En el nivel P1, la TCC tuvo incrementos del 45, 30, 76, y 35 % respecto del nivel P0 para las etapas E-108, 108-110, 110-203, y 203-206 respectivamente. No hubo diferencias entre tratamientos en la etapa 206-209 (llenado de granos), con una tasa media de 93.3 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (Tabla 3.1).

#### 3.3.2 Producción de biomasa en floración

El análisis de la producción de biomasa en floración (estado 203) en 7 sitios mostró un rango de acumulación de biomasa aérea que osciló entre 1635 y 3008 kg ha<sup>-1</sup>. El efecto Sitio fue altamente significativo, observándose en cada sitio diferencias visuales muy evidentes entre P0 y P1. No hubo interacción significativa (PxS, SitioxP ni SitioxPxS (Tabla 3.2). El agregado de P produjo un incremento en la biomasa aérea que varió del 32 al 84 %, con medias de 1887 y 2705 kg ha<sup>-1</sup> para P0 y P1 respectivamente (Tabla 3.2). La respuesta a S no tuvo un efecto significativo en la acumulación de biomasa aérea en el estado 203.



**Figura 3.2.** Acumulación de biomasa en diferentes estados del cultivo de arveja, afectados por la fertilización con P y S en el sitio SC10. Las flechas indican los momentos de floración y madurez fisiológica. Las barras indican el error estándar de la media de todos los tratamientos.

### 3.3.3 Rendimiento, producción de biomasa en madurez fisiológica, e índice de cosecha

El rendimiento en grano fue afectado por el efecto Sitio en forma significativa, siendo el rango de rendimiento medio de los sitios de 869 a 3828 kg ha<sup>-1</sup>. Se detectó una fuerte interacción SitioxP ( $p < 0.01$ ), dado que hubo sitios en los que la disponibilidad de P estuvo por encima de umbrales de respuesta calibrados en otros cultivos (14 a 35 ppm) y sitios con valores bajos de P en suelo ( $< 14$  ppm), con alta respuesta. La respuesta media al agregado de P en todos los sitios fue de 662 kg ha<sup>-1</sup> (+ 33.1 %) y un rango de incremento entre 6.2 y 77.7 % según los sitios (Tabla 3.3). Esa diferencia asciende a 765 kg ha<sup>-1</sup> y un 37 % de incremento promedio entre los sitios con respuesta a P. En el sitio con respuesta positiva a S (Sitio SC) el rendimiento fue 3669 y 4432 kg ha<sup>-1</sup> para S0 y S1 respectivamente, dando un incremento de 20.8 %.

**Tabla 3.1.** Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en función de los tratamientos ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) para las etapas de emergencia a 8 nudos (E-108), 8 a 10 nudos (108-110), 10 nudos a floración (110-203), floración al llenado de grano (203-206) y de llenado a madurez fisiológica (206-209) (Knott, 1987). Test LSD al 5 %. EE= error standard de la media.

Tratamientos	Etapas				
	E-108	108-110	110-203	203-206	206-209
	TCC ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )				
<b>P0</b>	10,6	38,9	63,7	124,9	98,6
<b>P1</b>	15,4	55,7	112,0	168,0	87,9
<b>EE</b>	0,52	4,87	11,65	10,81	13,16
<b>Valor Probabilidad</b>					
<b>P</b>	<0,01	0,05	0,03	0,03	0,59
<b>S</b>	0,46	0,57	0,33	0,48	0,62
<b>PxS</b>	0,06	0,46	0,35	0,94	0,26

La producción de biomasa aérea (MS) en madurez fisiológica (estado 209) se asoció con el rendimiento, explicando en promedio el 85 % de la variación de éste ( $p < 0.01$ ). La pendiente de la curva representa el índice de cosecha, que fue del 44 % en promedio para todos los sitios y tratamientos.

La biomasa aérea fue afectada significativamente por P en 11 de 16 sitios, con valores medios de biomasa aérea en estos 11 sitios de 4418 y 5511  $\text{kg MS ha}^{-1}$  para P0 y P1 respectivamente (+ 24.7 %). Hubo un solo sitio con respuesta a S, (Rue), donde la biomasa generada fue de 7062 y 9178  $\text{kg ha}^{-1}$  para S0 y S1 respectivamente (+ 30 %). En un solo sitio (MO), hubo interacción PxS donde la biomasa generada en P0 respondió a la fertilización con S (+13%) (Tabla 3.3).

**Tabla 3.2.** Datos de biomasa acumulada en floración (estado 203)  $\text{kg ha}^{-1}$ , en función de P y S en 7 sitios en 2009. Test LSD al 5%. EE= Error standard de la media.

Sitios	Biomasa aérea $\text{kg ha}^{-1}$				EE
	P0	P1	S0	S1	
<b>AL</b>	1855	2555	2187	2224	63,1
<b>AT</b>	2598	3418	3126	2891	80,4
<b>GM</b>	1252	2295	1638	1909	142,6
<b>LC</b>	1307	1963	1628	1642	67,8
<b>LP</b>	2118	3062	2727	2453	117,4
<b>SC</b>	2343	3170	2674	2839	115,3
<b>VA</b>	1739	2475	2159	2055	61,7
<b>Valor probabilidad</b>					
<b>Sitio</b>		<0,01			
<b>P</b>		<0,01			
<b>S</b>		0,23			
<b>PxS</b>		0,23			
<b>SitioxP</b>		0,31			
<b>SitioxS</b>		0,05			
<b>SitioxPxS</b>		0,41			

El efecto Sitio tuvo mayor impacto en la variación del IC que P o S, variando de 31 a 58 %. En 2 sitios el IC fue afectado por P, en ambos casos con una disminución del 5 y 8 % para los Sitios MO y Mol respectivamente.

### 3.3.4 Componentes numéricos del rendimiento

La densidad de plantas no fue afectada por ninguno de los tratamientos evaluados y no presentó interacciones de ningún tipo. Sólo tuvo significancia el efecto Sitio, con densidades promedio de  $57$  a  $172 \pm 2.9$  plantas  $\text{m}^{-2}$ .

**Tabla 3.3.** Rendimiento en grano en  $\text{kg ha}^{-1}$  (R), biomasa total  $\text{kg ha}^{-1}$  en madurez fisiológica (MS) e índice de cosecha (IC) en 15 Sitio-años (el sitio GM fue descartado).

Los símbolos al lado de los números indican diferencias significativas menores al 5 % (\*), y menores al 1% (\*\*), Test LSD. EE= Error standard de la media.

	<b>R (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>		<b>MS (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>				<b>IC (%)</b>	
<b>P0</b>	2155		4419				45	
<b>P1</b>	2817		5511				44	
<b>S0</b>	2432		4859				45	
<b>S1</b>	2540		5070				44	
<b>EE</b>	39,65		76,66				0,01	
<b>Sitio-año</b>	P0	P1	P0	P1	S0	S1	P0	P1
<b>AL</b>	2413	2784	4412	4926	4470	4869	52	53
<b>AT</b>	2601	3563**	6125	7377*	7017	6485	44	42
<b>bog</b>	1665	2959*	1982	2989	2207	2763	53	58
<b>LC</b>	2726	3641*	4624	6104*	5147	5582	49	45
<b>LP</b>	3053	4602*	5634	8865**	7014	7484	48	44
<b>MO</b>	2115	2886**	4800	5771**	5242	5329	49	45*
<b>Mol</b>	1183	1485**	2312	3018**	2776	2554	39	37*
<b>OL</b>	2171	2649*	4731	4985	4040	5677	44	48
<b>PA</b>	2389	2537	6242	7041*	6550	6733	37	36
<b>RD</b>	946	1549**	1852	3358*	2443	2768	44	44
<b>Rue</b>	1473	2197*	6852	9389**	7062	9178**	33	31
<b>SC</b>	3786	4316	7049	7382	7478	6953	45	45
<b>SC10</b>	2526	3018	3666	5085**	4408	4342	55	52
<b>VA</b>	2659	3281*	5471	6055	6049	5476	51	47
<b>VA10</b>	1997	2649**	4363	5548**	5054	4857	49	46
<b>EE</b>	158,6		316,1		317,1		0,02	
<b>Valor de Probabilidad</b>								
<b>Sitio</b>	<0,01		<0,01				<0,01	
<b>P</b>	<0,01		<0,01				0,1	
<b>S</b>	0,06		0,05				0,3	
<b>PxS</b>	0,31		0,28				0,51	
<b>SitioxP</b>	<0,01		0,01				0,58	
<b>SitioxS</b>	0,13		<0,01				0,21	
<b>SitioxPxS</b>	0,79		0,90				0,49	

El rendimiento se correlacionó positivamente con el número de semillas por metro cuadrado (NS) ( $r^2=0.89$ ). El NS fue afectado significativamente por el aporte de P en 12

de 16 sitios con 1584 y 2225 semillas  $m^{-2}$  en esos 12 sitios para P0 y P1 respectivamente, un incremento medio de 641 semillas  $m^{-2}$  (+ 40.5 %). Por otra parte la fertilización con S afectó el número de semillas  $m^{-2}$  en un solo sitio (Al), con 2612 y 3117 semillas  $m^{-2}$  para S0 y S1 respectivamente (+ 16.3 %). En dos sitios se halló interacción PxS significativa (RD y Mol), En RD, la fertilización azufrada produjo, en P0, un incremento de 11 % en NS, mientras que en P1 el NS disminuyó 8.5%. En Mol la respuesta a S en P0 fue del 16%, y en P1 disminuyó 9 % el NS. (Tabla 3.4).

El número de frutos por planta (FP) se asoció en forma positiva y significativa con el rendimiento ( $r=0.82$ ,  $p<0.01$ ). FP fue afectado significativamente en forma positiva por el agregado de P en 13 sitios, sobre un total de 16 ensayos. El valor promedio del incremento en estos 13 sitios fue del 39 %. El aporte de S no tuvo efecto sobre esta variable ( $p=0.08$ ). En un solo sitio (Mol) hubo interacción PxS ( $p<0.01$ ), en donde el aporte de S en P0 dio un incremento del 21 %, mientras que en P1, mayor disponibilidad de S redujo FP un 18% (Tabla 3.4).

El rendimiento fue explicado en un 74 % por el número de frutos  $m^{-2}$  (F). La fertilización con P incrementó significativamente el número de frutos  $m^{-2}$  en 14 de 16 sitios ( $p<0.01$ ), con un promedio en todos los sitios de 369 y 494 frutos  $m^{-2}$  para P0 y P1 respectivamente (+ 34 %). Mayor disponibilidad de S no tuvo efecto sobre esta variable, y no hubo interacción PxS (Tabla 3.4).

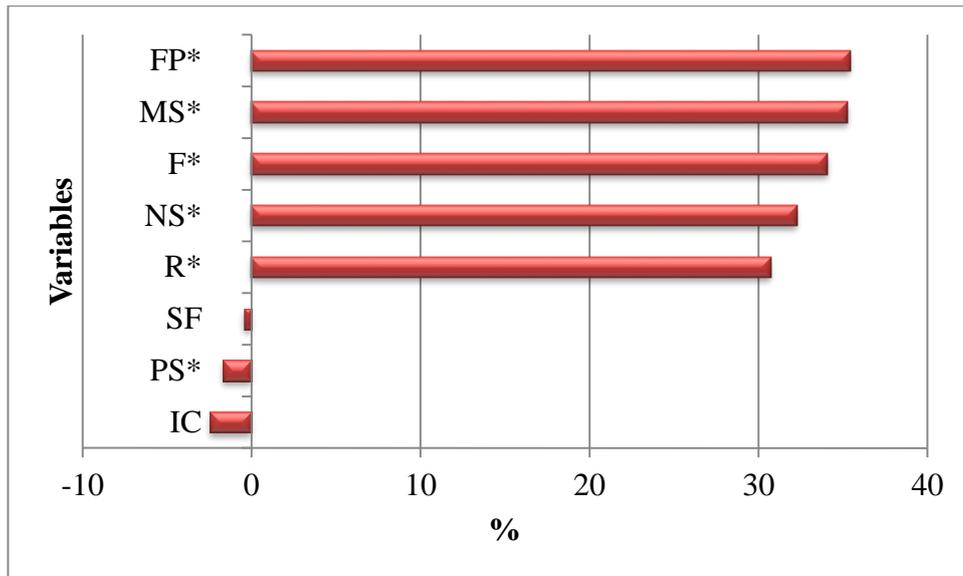
El número de semillas fruto<sup>-1</sup> (SF), tuvo una pobre asociación con el rendimiento tal como se muestra en la Tabla 3.4. SF fue modificado por efecto de P en 3 sitios, en dos de ellos con una disminución promedio de 4.6 a 4 SF (- 13%) cuando aumentó la disponibilidad de P, y un sitio con incremento de 3.7 a 4.5 SF (+ 21.6 %). La interacción PxS se dio en dos sitios (SC y OL). En SC mayor disponibilidad de S produjo 13 % más

semillas por fruto en P0, mientras que en P1 se redujo 2 %. En OL el efecto fue inverso, cayendo 2.5% SF por agregado de S en P0 e incrementándose 9% en P1 (Tabla 3.4).

El peso de las semillas (PS) no tuvo asociación con el rendimiento. Sin embargo, fue afectado por P en 2 de 16 sitios, con un promedio de 156 y 144 g 1000 semillas<sup>-1</sup> (-7.7 %) para P0 y P1 respectivamente. Hubo interacción SitioxP en 3 sitios (AT, Bog y Mol). En AT el PS se redujo 6% en P0 con mayor disponibilidad de S, mientras que en P1 incrementó 5% por el aporte de S. En Bog el PS creció 11 % por efecto del S en P0, aunque en P1 ese incremento sólo fue de 2,7 %. En Mol el PS fue 4.6 % menor por agregado de S en P0, mientras en P1 se incrementó 2 % (Tabla 3.4).

**Tabla 3.4.** Valores medios y análisis de la varianza para los componentes numéricos del rendimiento por sitio (el sitio GM fue descartado). Número de frutos por planta (FP), número de frutos  $m^{-2}$  (F), número de semillas fruto $^{-1}$  (SF), número de semillas  $m^{-2}$  (NS), y peso de semilla mg 1000 semillas $^{-1}$  (PS). Los símbolos al lado de los números indican diferencias significativas menores al 5 % (\*), y menores al 1% (\*\*) Test LSD al 5 %. EE=Error estándar de la media.

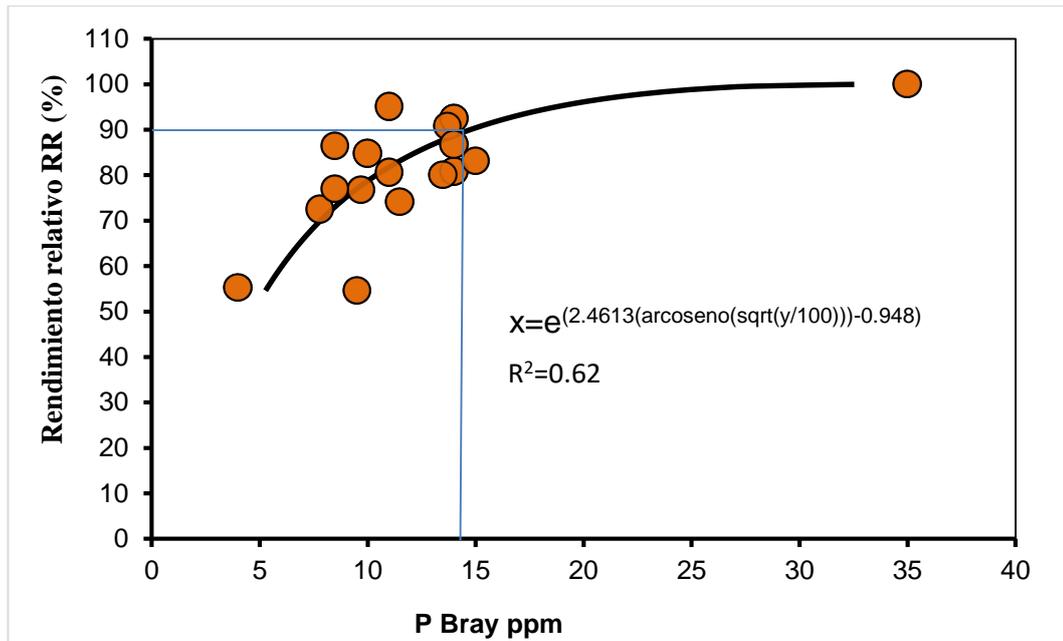
Tratamientos	FP		F		SF		NS		PS			
P0	3,35		369		4,48		1640		152			
P1	4,54		494		4,46		2670		150			
S0	3,91		426		4,43		1865		151			
S1	3,99		437		4,51		1945		152			
EE	0,07		7,18		0,04		44,12		0,91			
Sitios	P0	P1	P0	P1	S0	S1	P0	P1	S0	S1	P0	P1
Al	5,6	5,1	433	433	4,0	4,7	1794	1986	1724	2055*	164	161
AT	3,8	5,6**	445	667**	4,0	4,2	1956	2478*	2299	2135	154	167*
bog	1,8	3,13**	213	354**	4,0	4,2	774	1594**	1110	1258	205	186**
LC	4,5	6,3*	375	504*	5,2	5,2	1935	2626*	2149	2412	165	161
LP	3,6	6,6**	416	706*	5,6	5,4	2319	3777*	3089	3007	153	143*
MO	3,8	5**	326	465**	4,7	4,7	1822	2621**	2218	2226	135	128
Mol	2,5	3,3**	247	314*	3,8	3,8	921	1187**	1051	1056	150	145
OL	4,2	5,5*	373	469*	5,1	5,2	1921	2415*	2178	2158	131	128
PA	3,4	3,8	424	460	4,8	5,0	2056	2245	2090	2212	135	131
RD	1,8	2,6**	183	282**	4,4	4,5	793	1267**	1038	1021	139	143
Rue	3,2	4,4*	319	452*	3,4	3,8	1131	1651*	1229	1553	149	153
SC	5,6	7,7*	821	1025*	3,7	3,9*	2729	3000	2612	3117	162	168
SC10	3,3	4,4*	417	523*	4,7	4,4	1864	2421*	2155	2130	158	145*
VA	2,5	3,4**	423	577*	4,5	4,6	1975	2556*	2221	2310	157	149
VA10	2,7	4,1*	340	502**	4,5	4,4	1602	2119*	1920	1800	145	145
EE	0,27		29		0,14		124,79		3,65			
Valor de Probabilidad												
Sitio	<0,01		<0,01		<0,01		<0,01		<0,01		<0,01	
P	<0,01		<0,01		0,06		<0,01		<0,01		0,01	
S	0,08		0,08		0,02		0,03		0,03		0,14	
PxS	0,06		0,09		0,04		0,21		0,21		0,19	
SitioxP	<0,01		0,01		<0,01		0,01		0,01		<0,01	
SitioxS	0,29		0,25		0,04		0,23		0,23		0,13	
SitioxPxS	0,16		0,38		0,58		0,77		0,77		0,03	



**Figura 3.3.** Cambios relativos promedio de los 15 sitios (el sitio GM fue descartado para este análisis) por el aporte de P en el rendimiento (R), la biomasa aérea total acumulada (MS), índice de cosecha (IC), frutos planta<sup>-1</sup> (FP), número de frutos m<sup>-2</sup> (V), número de semillas fruto<sup>-1</sup> (SF), número de semillas m<sup>-2</sup> (NS) y peso de semillas (PS). Los (\*) indican diferencias significativas.

### 3.3.5 Relación entre la respuesta en rendimiento y el contenido de P en el suelo

Mediante el método de la curva de calibración del logaritmo del arco-seno modificado, propuesto por Correndo et al (2017), se determinó un umbral de respuesta a la fertilización fosforada de 14.7 ppm, para un nivel de rendimiento relativo del 90 % (Figura 3.4).



**Figura 3.4.** Rendimiento relativo en función del P Bray sobre 17 sitios. La línea azul presenta el umbral crítico de respuesta (14,7 ppm) para lograr un 90 % del rendimiento relativo empleando el método del logaritmo del arcoseno modificado (Correndo et al, 2017).

### 3.4 Discusión

La provisión de P mejoró la TCC desde estados tempranos en el ciclo de arveja. La menor disponibilidad de P en estados tempranos en el ciclo, da señales a la planta acerca de la estrategia que debe seguir, cambiando la estructura radical y reduciendo el metabolismo, lo que trae aparejado menor tasa de crecimiento y, según la gravedad de la deficiencia, reducciones en el rendimiento, por menor fijación de semillas, mas no por menor tamaño de las mismas (Grant et al, 2001).

La rápida producción de biomasa en respuesta a la aplicación de P, 10 días antes de la floración y hasta 40 días después del período crítico de acuerdo a Sandaña y Calderini, (2012), garantiza mayor intercepción de la radiación solar desde etapas más tempranas, y por ende ser más eficiente en la captura de este recurso en el momento de

definición de los componentes del rendimiento. Este comportamiento de arveja como consecuencia de la mayor disponibilidad de P, coincide con lo hallado por Sandaña et al (2012) en la acumulación de biomasa, aunque en promedio el incremento de la tasa observado en este trabajo (23.6 %), fue menor al medido por Sandaña a la dosis más alta de P que emplearon ellos. Este incremento relativo fue similar a la reportada para maíz, donde la deficiencia de P condujo a menor producción de biomasa, y en consecuencia menor captación de radiación y rendimiento (Plénet et al, 2000). En trigo, el comportamiento frente a deficiencias de P fue similar, aunque con una mayor tasa de acumulación a lo largo de todo el ciclo (Sandaña y Pinochet, 2014; Sandaña et al 2012). Por otro lado, la TCC no fue alterada por la mayor disponibilidad de S en el ciclo de arveja, coincidiendo con lo hallado por Agosti (2011) en colza. Sin embargo, Salvagiotti (2004) encontró en trigo, que mayor disponibilidad de S, modificó la TCC.

El IC no fue modificado por P. Podría afirmarse entonces que lo más común es que la fertilización con P en general no altera el IC, coincidiendo con lo hallado por Wen et al (2008) quien tampoco observó modificaciones en el IC en distintas variedades de arveja y garbanzo. Si bien hubo respuesta en la producción de biomasa por efecto del P, ésta fue proporcional a la biomasa acumulada en los granos.

De la misma manera, la mayor oferta de S sólo incrementó el IC en un solo sitio. La variación en el IC tampoco resultó ser significativa por efecto del agregado de S en maíz, incluso con y sin aporte de N (Pagani et al, 2012). Salvagiotti, y otros (2009) tampoco observaron cambios en el IC por agregado de N o S en trigo. En colza, mayores ofertas de S tampoco modificaron el IC (Agosti, 2011). Estos resultados sugieren que el IC es una variable conservativa en relación a la fertilización azufrada y fosfatada.

El rendimiento de arveja fue afectado por mayor disponibilidad de fósforo, como consecuencia de la mayor acumulación de biomasa, coincidiendo con lo hallado por Wen et al, (2008), Lafond y Pageau (2010) y Sandaña et al (2014).

En cambio, mayor disponibilidad de S no produjo cambios significativos de rendimiento (un sitio con respuesta sobre 16 experimentos). En línea con esto, en colza, Agosti (2011), sugiere que esta falta de respuesta es consecuencia de que la disponibilidad de S-(SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup> ha sido suficiente para que, con el aporte de la mineralización se cubran las necesidades del cultivo. Sin embargo se han reportado respuestas por efecto de S en soja, (Ferarris et al, 2004; Salvagiotti et al 2004), trigo (Salvagiotti, 2004) y maíz (Salvagiotti et al, 2005; Fontanetto, 2004).

El número de semillas por metro cuadrado se vio afectado positivamente por efecto del fósforo, como consecuencia del incremento del número de frutos por unidad de superficie (F), que a su vez fue determinado por el mayor número de frutos por planta (FP) cuando la disponibilidad de P fue mayor (Figura 3.3). Estos datos están en concordancia con lo hallado por Yemane et al, (2003) en Etiopía, quienes obtuvieron un 34% de incremento en frutos m<sup>-2</sup> por efecto de la fertilización fosforada. Akhtar et al (2003) en Pakistan hallaron que el agregado de P produjo mayor cantidad de frutos por planta y por unidad de superficie. Turuko et al (2014) observaron en poroto en Etiopía incrementos del orden del 94% y 86 % en el número de frutos planta<sup>-1</sup> y semillas fruto<sup>-1</sup> por el aporte de la misma dosis de P empleada en este experimento. En soja, Gonçaves et al (2010) encontraron respuestas del 7.1 % en el número de frutos pta<sup>-1</sup> por efecto del agregado de P.

Por otro lado, mayor disponibilidad de S, sólo en el sitio SC incrementó el número de semillas por fruto (SF), y en el sitio AL aumentó el número de semillas m<sup>-2</sup> (NS). Sin embargo, Zhao et al (1999) trabajando en macetas con suelos deficientes en S hallaron

respuestas significativas en la cantidad de nitrógeno fijado, el número de frutos  $m^{-2}$  y por ende en rendimiento en grano.

El número de semillas fruto<sup>-1</sup> es una variable muy estable, que fue afectado levemente en pocos sitios y en forma negativa por el aporte de P, probablemente por la competencia generada por el mayor número de destinos reproductivos. El aporte de S afectó levemente SF, incrementando el número, aunque lo hizo en un solo sitio.

En la Figura 3.3 se grafica la importancia relativa de los componentes afectados por el mayor aporte de P, donde claramente puede observarse las respuestas de los diferentes componentes de rendimiento.

La determinación de un umbral de contenido de P en el suelo por debajo del cual la probabilidad de respuesta es mayor es una herramienta agronómica que permite separar ambientes de mayor probabilidad de respuesta (suelos deficientes) de aquellos con menor probabilidad de respuesta (suelos bien provistos). Esta información es clave en los ambientes donde la provisión de P es relativamente baja, como es en la mayoría de los suelos agrícolas de Argentina, para no resignar rendimiento por una deficiencia de P, pero también lo es en ambientes ricos en P, para evitar que este nutriente se "escape" del sistema produciendo eutrofización de las fuentes de agua.

El único antecedente en Argentina de recomendación de fertilización fosforada en arveja data de 1987, para planteos con labranza, basado en un esquema de fertilización para casos de niveles menores a 10 ppm, y situaciones ubicadas entre 10 y 15 ppm (Ammann y González, 1987). En ese trabajo no se determinó una relación funcional entre rendimiento y disponibilidad de fósforo del suelo.

Relacionando la respuesta con el nivel de P observado en la presente tesis, el valor umbral hallado (Figura 3.4) coincide con el reportado por McKenzie et al (2001), quienes encontraron que por encima de las 15 ppm, las probabilidades de respuesta fueron

mínimas. Si bien trabajaron con un extractante diferente a Bray 1 (Kelowna modificado), éste presenta una buena correlación con Bray 1 (Howard, 2006), y tienen similares capacidades de extracción (Van Lierop, 1988).

En forma comparativa, arveja tiene umbrales de respuesta superiores a los de la soja, hallados por Echeverría et al (2002) y Gutiérrez Boem et al, (2010), e inferiores a los de trigo (Echeverría y García, 1998; García et al, 2006; Bolland, et al, 1999), colza (Bolland et al, 2006; Bolland et al, 1999), maíz (García, 1999; Berardo et al, 2001), y girasol (Díaz Zorita, 2004).

### *3.5 Conclusiones*

La fertilización con P modificó la tasa y cantidad de biomasa acumulada en arveja, especialmente en los suelos donde los contenidos de P extractable fueron más bajos. No hubo mayores cambios en el IC por lo que la biomasa generada y particionada a grano fue bastante estable a pesar de la variación en la oferta de P. Esa mayor acumulación de biomasa se tradujo en la fijación de mayor cantidad de frutos por planta, y por ende de frutos por unidad de superficie, lo que incrementó el número de semillas  $m^{-2}$ . El rendimiento, como consecuencia de esto fue modificado en forma positiva. Se halló un valor de P extraído por el método Bray 1, que permite discriminar situaciones con mayor o menor probabilidad de respuesta al rendimiento de arveja.

## ***Capítulo 4.***

### ***Absorción y eficiencias de uso de P, S y de otros macro y micronutrientes***

#### ***4.1 Introducción***

Normalmente el área destinada a la producción de arveja a nivel nacional se estima en alrededor de las 100.000 a 120.000 ha, aunque es poco consistente de acuerdo a la fuente que se consulte (Vita y Prieto, 2018; INASE 2019), mientras que en otros cultivos como maíz, trigo o soja, rondan en promedio las 6, 5.5 y 18.5 millones de hectáreas respectivamente (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2019). Consecuencia de esto es que la arveja haya sido estudiada en menor medida que las demás especies. Pocos son los trabajos en relación a las eficiencias de uso de nutrientes en arveja, y no hay análisis globales de eficiencias, tales como los realizados en cereales por Doberman (2007) y Bruulsema (2008). Las legumbres en general, y arveja en particular, son ricas en proteína e hidratos de carbono, además de contener minerales esenciales para el ser humano. Hoy se considera que al menos la mitad de la población mundial padece alguna deficiencia de algún mineral esencial (White y Broadley, 2005), siendo las más frecuentes las deficiencias de Zn y Fe. En el caso específico de arveja, cuyo principal destino es el consumo humano directo, cobra importancia la concentración de micronutrientes esenciales en semilla, que por diversos factores como el ambiente productivo, o la fertilización pueden disminuir (diluirse) y afectar los requerimientos mínimos diarios de las personas.

La cuantificación de los requerimientos de nutrientes de cualquier cultivo es un conocimiento clave para diagnosticar la fertilización en forma adecuada, y conocer con cuanta eficiencia estamos usando a los nutrientes que aplicamos (Dobermann, 2007). Por otra parte, la eficiencia de uso de un nutriente depende, entre otros factores, de la disponibilidad adecuada de otros nutrientes. Salvagiotti et al (2009), por ejemplo,

demonstraron en trigo, que la eficiencia de uso de nitrógeno mejoró sustancialmente en la medida en que se fertilizaba con azufre.

A nivel mundial existe una gran dispersión en la información sobre la eficiencia de uso de los nutrientes, concentrada mayormente en los principales cereales (maíz, trigo y arroz) (Dobermann, 2007).

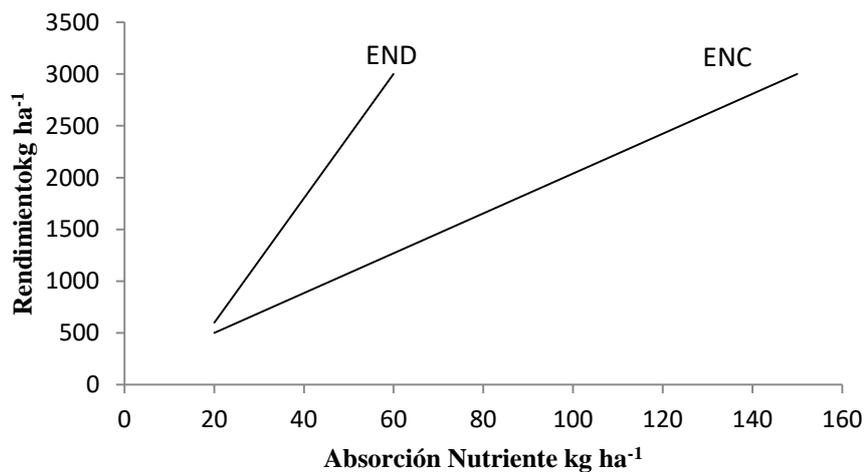
La medida de eficiencia más común es la eficiencia agronómica (EA), definida por el incremento en la cantidad de granos producida en función del agregado de un determinado nutriente (Ecuación 1). Depende a su vez de la eficiencia con que esa cantidad de nutriente es absorbido (Eficiencia de Recuperación, ER) (Ecuación 2) y cómo se transforma ese nutriente absorbido en biomasa (Eficiencia Interna, EI) (Ecuación 3).

La eficiencia agronómica, es en promedio para los cereales, entre 10 y 30 kg grano  $\text{kg N}^{-1}$ , 30 a 50 kg  $\text{kg P}^{-1}$ , y de 10 a 20 kg  $\text{kg K}^{-1}$  (Doberman, 2007; Snyder y Bruulsema, 2007). La ER es muy variable en cereales en función de qué región y manejo tecnológico se haga, con valores para N en el rango de 0.33 a 0.58 kg de N absorbido por kg de N aplicado; para P de 0.22 a 0.27 kg de P absorbido por kg de P aplicado, y para K de 0.38 a 0.51 kg de K absorbido por kg de K aplicado (Witt & Dobermann, 2004; Pathak et al, 2003; Liu et al, 2006). La EI para cereales son de 57, 252 y 86 kg grano  $\text{kg}^{-1}$  absorbido de N, P y K respectivamente (Witt et al, 1999; Ciampitti et al 2013; Pagani et al, 2012, Liu et al, 2006; Chuan et al, 2013; Fan et al, 2005).

Para la misma cantidad absorbida de un determinado nutriente, vamos a tener un rango de rendimientos desde un mínimo, en donde el nutriente en cuestión va a estar concentrado, hasta un máximo, en donde ese mismo nutriente va a estar diluido.

Entre estas dos situaciones, vamos a tener un rango de eficiencias que es necesario estimar, las cuales tienen una distribución del tipo “envelope”, limitada por cuantiles de diferente probabilidad (Cade and Noon, 2003). Así, se estima no solo la regresión del

percentil 50 de la distribución (i.e. eficiencia interna más probable), sino también las líneas de regresión sobre los percentiles 1 y 99, que determinan los límites biológicos de la relación entre consumo de nutrientes y producción (Janssen, 1990). Estas líneas son conocidas como la línea de dilución (máxima EI) y línea de acumulación de nutrientes (mínima EI) (Smaling and Janssen, 1993). Gráficamente estas relaciones se pueden observar en la Figura 4.1, en donde se muestra el rendimiento en función de la absorción de un determinado nutriente. El límite superior (cuantil 99) es la máxima eficiencia, donde el nutriente está más diluido (END), y, en consecuencia, ése nutriente es el que limita el rendimiento. Por otro lado, el límite inferior es donde el nutriente está más concentrado y la eficiencia es baja (cuantil 1) (ENC).



**Figura 4.1.** Esquema representativo de la relación entre la absorción de un nutriente y el rendimiento delimitados por la recta END= cuya pendiente representa la eficiencia para nutriente diluido, y la recta ENC= cuya pendiente representa la eficiencia para nutriente concentrado.

Estas relaciones y las eficiencias derivadas de las funciones fueron determinadas en distintos cultivos, por ejemplo para nitrógeno (N) en soja (Salvagiotti et al, 2008), para

N, P y K en maíz (Setiyono et al, 2010) y arroz (Witt et al, 1999) y para P en trigo (Sandaña y Pinochet, 2014). En arveja, dado que es un grano con un contenido de proteínas intermedio entre soja y los cereales, y posee un alto contenido de hidratos de carbono, es de esperarse que las eficiencias sean intermedias entre soja y los cereales. Sin embargo, en arveja no se han estimado estos parámetros.

En el estudio de los requerimientos nutricionales de los cultivos, no solo es importante conocer la cantidad absorbida al final del ciclo sino también la dinámica de absorción por unidad de tiempo. Estos conocimientos permiten determinar la oportunidad de corregir en forma eficiente, deficiencias de ciertos nutrientes que se puedan presentar en el cultivo, o que se detecten luego de la implantación de los mismos, como así también contribuir a conocer la eficiencia productiva a través de prácticas agronómicas y del mejoramiento genético (Ramos et al, 1985; Tanno et al, 1985; Slafer et al, 1999). En general, en los cultivos la máxima absorción de nutrientes es anterior a la máxima acumulación de materia seca, aunque hay diferentes patrones en la tasa de absorción en función del nutriente estudiado. Así, Ciampitti et al (2013) observaron en maíz que en anthesis se había acumulado antes el K que N, siguiéndole S, y finalmente, el último en acumularse fue P. Lo mismo en soja, donde K se acumula antes que P en el estado de floración (R2) (Gaspar et al, 2017). En soja la tasa de acumulación de nutrientes coincide con la de materia seca, y los valores más altos se dan entre la formación del fruto y el llenado de las semillas (Hanway and Weber, 1971). En arveja, Malhi et al (2007) estudiaron estas relaciones en un ambiente de Canadá, encontrando que la absorción máxima de N, P, K y S se alcanzó en promedio a los 73, 78, 68 y 73 días respectivamente después de emergencia.

Los objetivos del presente capítulo fueron determinar en arveja el efecto de la fertilización con P y S sobre: (i) la concentración, absorción e índice de cosecha de P, S

y otros macro y micronutrientes en madurez fisiológica; (ii) la eficiencia agronómica en el uso de P y S y sus componentes: la eficiencia de recuperación e interna de P y S, y la eficiencia interna de otros de macro y micronutrientes y, (iii) caracterizar la dinámica de absorción e IC de P, S y otros macro y micronutrientes.

## *4.2 Materiales y métodos*

### *4.2.1 Absorción total y eficiencia en el uso de nutrientes.*

En 13 de los 16 ensayos llevados a cabo entre 2009 y 2012, se recolectaron muestras de 0.4 m<sup>2</sup> para determinar biomasa aérea y componentes de rendimiento en madurez fisiológica. Se separaron los granos del resto de estructuras (suma de las paredes de los frutos, tallos, estípulas, zarcillos y hojas). Las muestras fueron secadas en estufa a 60°C hasta peso constante y luego molidas para posterior determinación de la concentración de N por calcinación de la muestra y determinación de N en gases (Dumas, 1831). Las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn, B y Fe se determinaron por espectrofotometría de masa acoplado con plasma (ICP-MS) previa digestión ácida.

El rendimiento se determinó mediante la cosecha de parcelas de 12 m<sup>2</sup> (humedad 0%), calculándose la biomasa aérea total acumulada empleando el IC calculado a partir de la muestra de 0.4 m<sup>2</sup>. La absorción total de nutrientes se determinó afectando la biomasa seca acumulada de granos y resto de estructuras, por la concentración de los mismos.

Se ajustaron modelos lineales entre la absorción de macro y micronutrientes y el rendimiento obtenido de la cosecha de las parcelas.

Se calculó el índice de cosecha de cada nutriente (ICn), como el porcentaje de nutriente en grano en relación a la suma de ése nutriente en grano más el resto de estructuras (RE):

$$ICn = \frac{Ng}{Ng + Nv} * 100 \quad (7)$$

Donde Ng es la cantidad de nutrientes en grano y Nv es la cantidad del mismo nutriente en el resto de las estructuras.

Se cuantificó la eficiencia agronómica y de recuperación de nutrientes en los sitios donde hubo respuesta en el rendimiento al agregado de P y/o S, usando las ecuaciones [1] y [2].

Se estimó la eficiencia interna de los macro y micronutrientes mediante el cociente entre la absorción total de cada nutriente y el rendimiento de la parcela, corregido a 0 % de humedad usando la ecuación [3].

#### *4.2.2 Evolución de la absorción de nutrientes*

El sitio SC10, por ser uno de los de menor nivel de P Bray, y por poseer buen potencial de rendimiento en base al manejo previo del lote, fue elegido para evaluar la dinámica de acumulación de biomasa y nutrientes. En las muestras obtenidas para medir acumulación de MS de emergencia a floración (E-FL, 58 dde), de floración a inicio de llenado (FL-LL, 71 dde), inicio de llenado a madurez fisiológica (LL-MF, 91 dde), correspondientes a los estados 203, 206 y 209 (Knott 1987), se determinó la concentración de macro y micronutrientes en biomasa aérea y en granos con el objeto de determinar la dinámica de absorción de los diferentes nutrientes en respuesta al aporte de P y S. La tasa de absorción de cada nutriente se calculó como la diferencia entre la cantidad de nutrientes absorbida entre dos muestreos sucesivos dividido por el número de días transcurridos entre esos momentos.

### 4.2.3 Análisis estadístico

Para el análisis de concentración, absorción total de macro y micronutrientes e índices de cosecha se realizó un ANOVA para verificar efecto de los factores principales Sitio, P, S, e interacciones PxS, SitioP, SitioS y SitioPxS. Los análisis fueron realizados con INFOSTAT, versión 2016.

Se realizó regresión por cuantiles para cuantificar las funciones de dilución y acumulación, siendo la función que pasó por el percentil 99 aquella en la que el nutriente estaba diluido, y la que pasó por el percentil 1, aquella en la que el nutriente estuvo concentrado. (END=0.99 y ENC= 0.01 de la figura 4.1) y los coeficientes en la mediana de la relación entre nutriente absorbido y rendimiento en base seca, utilizando el software Blossom Statical Package (Fort Collins, Colorado) (Cade y Richards, 2005). La comparación de EIs y de dinámica de acumulación de macro y micronutrientes, se analizó mediante test de comparación (F) con INFOSTAT.

## 4.3 Resultados

### 4.3.1 Absorción e índice de cosecha de P, S y demás macronutrientes en grano y resto de estructuras en madurez fisiológica

No se halló interacción PxS en la absorción total (i.e. granos más estructuras vegetativas) de macronutrientes. Mayor disponibilidad de P incrementó la absorción total de N, P, K, Ca, Mg y S en 31, 47, 48, 24, 17 y 27 % respectivamente. En sólo dos sitios (SC9 y OL) el aporte de P no alteró la absorción total de N, P, K y Mg (interacción SitioP) (Tabla 4.1).

El efecto Sitio impactó en forma significativa en los IC de todos los macronutrientes.

La fertilización con P modificó los IC de N, P, K y S, disminuyendo 4.5, 3, 13 y 5 % respectivamente, mientras que los datos sugieren una mayor partición a granos de Mg, cuyo IC incrementó 4%. En algunos sitios el IC de N, K y S fue alterado por efecto de P (interacción SitioxP) (Tabla 4.2),

La concentración de N, P y K en granos fue incrementada por efecto de P en 1.4, 12.2 y 2.7 % respectivamente, mientras que en el resto de las estructuras (RE) el incremento fue mayor (8, 20 y 19 % respectivamente), reduciendo las de Ca y Mg en 3,2 y 8 % respectivamente (Tabla 4.3).

**Tabla 4.1.** Análisis de variancia y valores medios de Absorción total (grano+resto de estructuras) de macronutrientes en 14 experimentos de fertilización con P y S.

Tratamientos	Absorción Total kg ha <sup>-1</sup>					
	N	P	K	Ca	Mg	S
<b>P0</b>	126	9,4	91	77,6	14,4	5,1
<b>P1</b>	166	13,6	134,4	96,3	16,8	6,5
<b>S0</b>	142	11,4	110,4	84,1	15,1	5,1
<b>S1</b>	150	11,6	115	89,9	15,9	6,5
<b>EE</b>	2,21	0,23	2,2	1,62	0,25	0,11
<b>Valor de Probabilidad</b>						
<b>Sitio</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>P</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>S</b>	0,01	0,66	0,15	0,01	0,04	<0,01
<b>P*S</b>	0,11	0,14	0,95	0,62	0,93	0,47
<b>SitioxP</b>	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,15
<b>SitioxS</b>	<0,01	0,29	0,04	0,02	0,03	<0,01
<b>SitioxPxS</b>	0,50	0,45	0,65	0,63	0,64	0,77

Mayor disponibilidad de S incrementó la absorción total de N, K, Mg y S en 6, 7, 5 y 27 % respectivamente (Tabla 4.1), efecto que se dio en algunos sitios (interacción SitioxS). No alteró los IC de ningún nutriente (Tabla 4.2), y sólo aumentó la concentración de N y S en granos en 1 y 16 % respectivamente, mientras que en RE redujo la concentración de P e incrementó la de S (Tabla 4.3).

**Tabla 4.2.** Análisis de variancia y valores medios de Índice de cosecha (IC) de macronutrientes en 14 experimentos de fertilización con P y S.

	IC (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
<b>P0</b>	59,8	72,8	23,1	3,2	19,2	44,4
<b>P1</b>	57,1	70,6	20	3,1	20	42,3
<b>S0</b>	58,3	71,3	21,4	3,1	19,7	42,7
<b>S1</b>	58,5	72,1	21,6	3,1	19,5	44
<b>EE</b>	0,34	0,4	0,27	0,06	0,25	0,5
<b>Valor de Probabilidad</b>						
<b>Sitio</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>P</b>	<0,01	<0,01	<0,01	0,18	0,03	<0,01
<b>S</b>	0,69	0,19	0,67	0,67	0,53	0,08
<b>PxS</b>	0,68	0,46	0,60	0,98	0,30	0,92
<b>SitioxP</b>	<0,01	0,06	<0,01	0,14	0,22	<0,01
<b>SitioxS</b>	0,02	0,01	0,08	<0,01	0,26	0,45
<b>SitioxPxS</b>	0,63	0,38	0,10	0,94	0,72	0,92

**Tabla 4.3.** Análisis de la varianza y valores medios de concentración de macronutrientes en grano y resto de estructuras (RE), en 14 experimentos de fertilización con P y S.

	Concentración de macronutrientes (g kg <sup>-1</sup> )											
	N		P		K		Ca		Mg		S	
	Grano	RE	Grano	RE	Grano	RE	Grano	RE	Grano	RE	Grano	RE
<b>P0</b>	36,6	12,8	3,27	0,64	9,38	16,5	1,15	18,7	1,27	2,74	1,09	0,71
<b>P1</b>	37,1	13,8	3,67	0,77	9,63	19,7	1,11	18,1	1,28	2,53	1,08	0,73
<b>S0</b>	36,7	13,4	3,51	0,73	9,50	18,3	1,11	18,5	1,27	2,7	1,00	0,65
<b>S1</b>	37,1	13,2	3,43	0,68	9,50	17,9	1,16	18,4	1,27	2,6	1,16	0,80
<b>EE</b>	0,16	0,17	0,04	0,02	0,06	0,24	0,02	0,16	0,01	0,02	0,01	0,02
<b>Valor de Probabilidad</b>												
<b>Sitio</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>P</b>	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20	<0,01	0,44	<0,01	0,45	0,30
<b>S</b>	0,04	0,45	0,23	0,02	0,49	0,35	0,14	0,71	0,96	0,35	<0,01	<0,01
<b>PxS</b>	0,54	0,12	0,92	0,10	0,16	0,50	0,18	0,03	0,24	0,05	0,708	>0,99
<b>SitioxP</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	0,08	<0,01	0,08	<0,01	<0,01	0,01
<b>SitioxS</b>	0,11	0,58	0,48	0,18	0,92	0,41	<0,01	0,07	0,11	0,29	0,42	0,28
<b>SitioxPxS</b>	0,07	0,64	0,70	0,39	0,45	0,11	0,88	0,05	0,40	0,50	0,47	0,54

#### 4.3.2 Eficiencia agronómica, de recuperación e interna

Entre los sitios con respuesta a rendimiento por mayor oferta de P (10 sitios), la EAP fue en promedio de 28 kg grano  $\text{kg}^{-1}$  de P aplicado, con un rango entre los 10 y 60 kg grano  $\text{kg}^{-1}$  de P aplicado. El factor de mayor peso fue el Sitio, no influyendo la fertilización con S. Por otro lado, la eficiencia de recuperación de P (ERP) tuvo valores de 10.4 a 45.2 %, dependiendo del Sitio (Tabla 4.4). En dos sitios donde se halló respuesta en rendimiento por agregado de S, la EA de S (EAS) fue en promedio de 19 kg de grano por  $\text{kg}^{-1}$  de S aplicado, con un rango entre 10 y 28, siendo afectado principalmente por el efecto Sitio sin interacción con P (Tabla 4.5).

**Tabla 4.4.** Análisis de la varianza y valores medios de eficiencia agronómica (EAP) y de recuperación de P (ERP) en sitios con respuesta a la fertilización con P.

<b>Sitios</b>	<b>EAP</b>	<b>ERP</b>
<b>AL</b>	19,2	-
<b>bog</b>	35,1	10,2
<b>LC</b>	22,6	12,1
<b>LP</b>	59,9	34,8
<b>MO</b>	11,8	20,6
<b>Mol</b>	10,6	8,4
<b>RD</b>	33,8	16,9
<b>Rue</b>	34,3	45,4
<b>SC10</b>	34,2	21,7
<b>VA10</b>	19,1	17,0
<b>EE</b>	4,8	4,5
<b>Valor de Probabilidad</b>		
<b>Sitio</b>	<0,01	<0,01
<b>S</b>	0,46	0,65
<b>SitioxS</b>	0,52	0,41

**Tabla 4.5.** Análisis de la varianza y valores medios de eficiencia agronómica (EAS) y de recuperación de S (ERS) en sitios con respuesta a la fertilización con S.

<b>Sitios</b>	<b>EAS</b>	<b>ERS</b>
<b>AL</b>	10	-
<b>Rue</b>	28	16
<b>EE</b>	4,2	4
<b>Valor de Probabilidad</b>		
<b>Sitio</b>	0,04	-
<b>P</b>	0,98	0,6
<b>SitioxP</b>	0,17	-

De los dos sitios donde hubo respuesta en rendimiento a la aplicación de S, sólo en uno de ellos se pudo determinar la absorción. La eficiencia de recuperación de S (ERS) en ese sitio fue del 16 %. En este caso el aporte de P no tuvo efecto sobre la ERS (Tabla 4.5).

La fertilización con P afectó la eficiencia interna en forma significativa de N, P y K, con disminuciones en los valores hallados de 7, 13 10 % respectivamente. En tanto no tuvo efecto sobre Ca, Mg y S.

En cambio, la fertilización con S no alteró en forma significativa la EI de los macronutrientes, excepto la de S, con una disminución de 17 % (Tabla 4.6). Como hubo un efecto significativo del Sitio sobre todos los nutrientes se halló interacción SitioxP para todos los macronutrientes a excepción de Ca, y SitioxS para Ca, Mg y S. No hubo interacción PxS ni SitioPxS.

Debido a que hubo más sitios con respuesta a P, se pudo establecer que la EAP, se relacionó más estrechamente con la ERP que con la EIP (Figura 4.3).

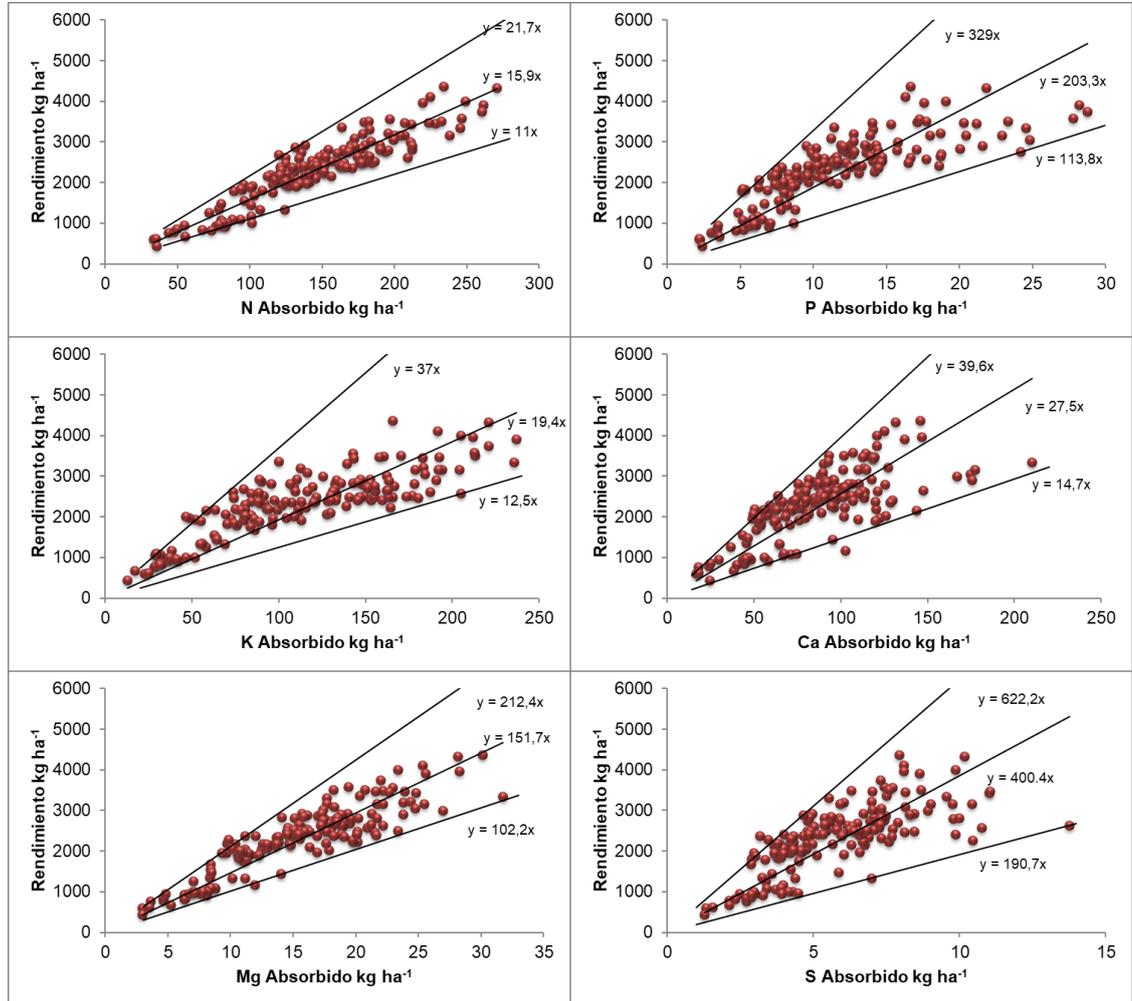
**Tabla 4.6.** Eficiencia Interna (EI) de macronutrientes en arveja en kg grano kg<sup>-1</sup> nutriente absorbido en 14 experimentos. Test F al 5%.

	Eficiencia Interna kg kg <sup>-1</sup>					
	N	P	K	Ca	Mg	S
<b>P0</b>	16,5	230	24,6	27,9	152	422
<b>P1</b>	15,4	199	21	27,6	156	411
<b>S0</b>	16	212	22,8	28,1	155	455
<b>S1</b>	15,9	218	22,8	27,4	153	378
<b>EE</b>	0,12	2,72	0,32	0,37	1,7	6,18
<b>Valor de Probabilidad</b>						
<b>Sitio</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>P</b>	<0,01	<0,01	<0,01	0,60	0,06	0,20
<b>S</b>	0,46	0,10	0,99	0,20	0,52	<0,01
<b>PxS</b>	0,70	0,67	0,20	0,15	0,07	>0,99
<b>SitioxP</b>	<0,01	<0,01	<0,01	0,13	<0,01	0,02
<b>SitioxS</b>	0,08	0,14	0,14	0,01	0,04	<0,01
<b>SitioxPxS</b>	0,63	0,64	0,65	0,95	0,93	0,94

La eficiencia interna estimada en el percentil 50 (mediana de la eficiencia) el percentil 1 (máxima acumulación) y el percentil 99 (máxima dilución) de la relación entre el rendimiento y los nutrientes absorbidos, fueron respectivamente de 16, 11 y 22 kg de grano kg<sup>-1</sup> N absorbido; 203, 114, y 329 kg de grano kg<sup>-1</sup> P absorbido; 19, 13 y 37 kg de grano kg<sup>-1</sup> K absorbido; 400, 191 y 622 kg de grano kg<sup>-1</sup> S absorbido; 152, 102 y 212 kg de grano kg<sup>-1</sup> Mg absorbido; y de 28, 15 y 40 kg de grano kg<sup>-1</sup> Ca absorbido (Figura 4.2). La recíproca de la función en el percentil 50 es el requerimiento medio de nutriente por unidad de producción (kg nutriente kg<sup>-1</sup> grano), dando una relación N:P:K:Ca:Mg:S de 25:2:21:14.6:2.6:1.

Como consecuencia de la distribución de los datos en la relación entre rendimiento y absorción de un nutriente, para un mismo nivel de rendimiento vamos a tener dos situaciones extremas según se trate de que el nutriente esté más diluido o más concentrado. El rango de variación de la EI entre los dos límites fue de 2, 2.9, 3, 2.7, 2.1

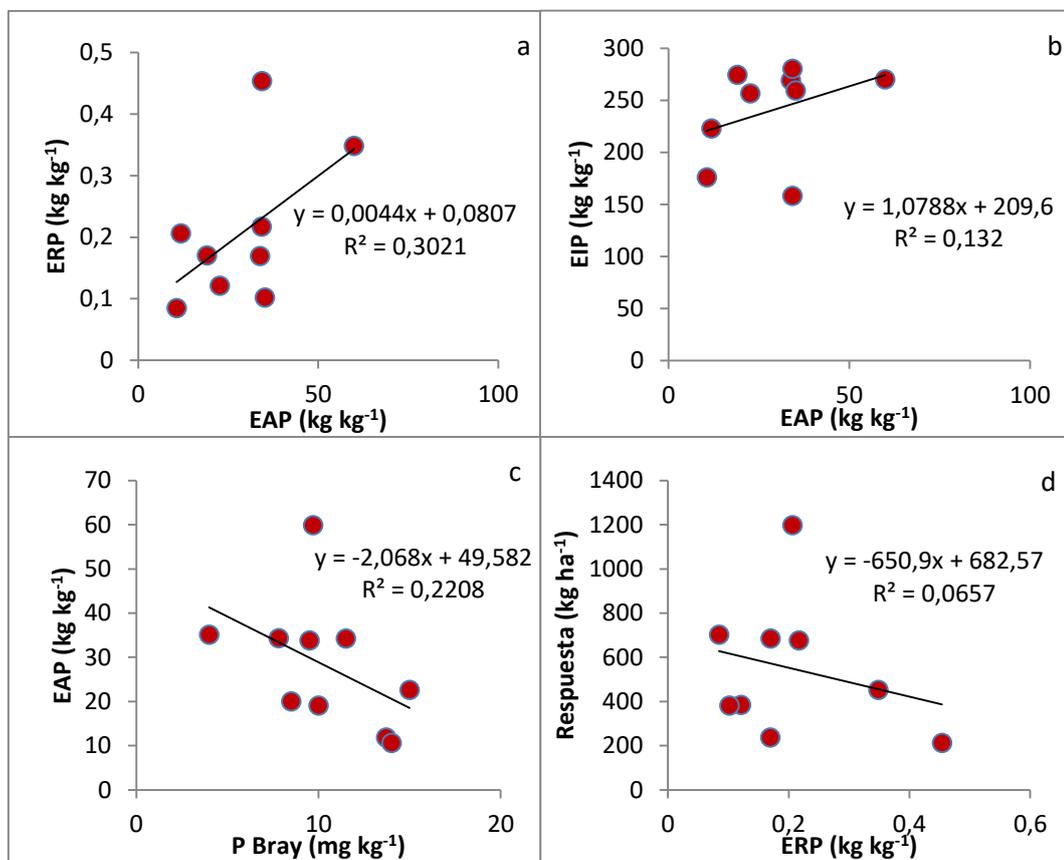
y 3.3 veces mayor producción de grano por unidad de nutriente absorbido, para N, P, K, Ca, Mg y S respectivamente (Tabla 4.7).



**Figura 4.2.** Relación entre la cantidad de macronutrientes absorbidos y el rendimiento en arveja. Los números indican la Eficiencia Interna (EI) de los macronutrientes para el percentil 50 (mediana), 1 (máxima acumulación) y 99 (máxima dilución). Los modelos fueron forzados a pasar por el origen de las coordenadas.

**Tabla 4.7.** Relación entre la EI de macronutrientes entre las situaciones más diluidas o más concentradas.

EI kg kg <sup>-1</sup> para los percentiles 1, 50 y 99						
Percentil	N	P	K	Ca	Mg	S
<b>1 (C)</b>	11	113,8	12,5	14,7	102,2	190,7
<b>50</b>	15,9	203,3	19,4	27,5	151,7	400,4
<b>99 (D)</b>	21,7	329	37	39,6	212,4	622,2
<b>Rel D/C</b>	2,0	2,9	3,0	2,7	2,1	3,3



**Figura 4.3.** Relación entre EAP y ERP (a), entre EAP y EIP (b), entre P Bray y EAP (c) y entre ERP y respuesta en rendimiento (d), en aquellos sitios donde hubo respuesta al agregado de P.

4.3.2 *Absorción, concentración en grano y en resto de estructuras en madurez fisiológica, e índice de cosecha de micronutrientes.*

El promedio de absorción total fue de 462, 184, 63, 1444 y 174 g ha<sup>-1</sup> para Mn, B, Cu, Fe y Zn. El efecto Sitio impactó significativamente la absorción total de micronutrientes por el cultivo.

Mayor disponibilidad de P incrementó la absorción total de Mn, B, Cu, y Fe, en 17, 28, 18 y 41 % respectivamente. Hubo sitios donde la absorción de Cu y Fe no fueron modificadas por aporte de P (interacción SitioxP) (Tabla 4.9). A pesar de ello, sólo alteró los IC de Cu y Zn, incrementándolos 5 y 6 % respectivamente. La concentración de Mn fue modificada tanto en grano como en resto de estructuras, disminuyéndolas 5 y 10 % respectivamente, mientras que en Zn la disminución fue de 13 y 28 % para granos y resto de estructuras respectivamente.

**Tabla 4.8.** *Concentración media de micronutrientes en grano de arveja (0% humedad) y en resto de estructuras (RE) en mg kg<sup>-1</sup>. Test F al 5%.*

	Concentración de micronutrientes en mg kg <sup>-1</sup>									
	Mn		B		Cu		Fe		Zn	
	Grano	RE	Grano	RE	Grano	RE	Grano	RE	Grano	RE
<b>P0</b>	18,5	100,6	9,4	34,7	10	10,2	72,5	281	48,8	18,2
<b>P1</b>	17,5	90,3	9,1	34,1	10,1	8,9	74,5	312	42,5	13,1
<b>S0</b>	17,8	95,3	9,4	35,1	10,1	9,9	71,5	299	44,9	15,9
<b>S1</b>	18,3	95,6	9,1	33,8	10,1	9,2	75,6	294	46,5	15,3
<b>EE</b>	0,19	1,38	0,15	0,42	0,09	0,27	1,62	8,63	0,47	0,4
<b>Valor de Probabilidad</b>										
<b>Sitio</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>P</b>	<0,01	<0,01	0,30	0,32	0,54	<0,01	0,34	0,01	<0,01	<0,01
<b>S</b>	0,06	0,91	0,11	0,02	0,72	0,06	0,08	0,69	0,02	0,29
<b>PxS</b>	0,17	0,10	0,01	0,73	0,49	<0,01	0,21	0,68	0,75	0,53
<b>SitioxP</b>	0,06	0,07	0,02	<0,01	0,14	0,02	<0,01	0,18	<0,01	<0,01
<b>SitioxS</b>	0,05	0,21	0,55	0,25	0,11	0,99	<0,01	0,60	0,01	0,25
<b>SitioxPxS</b>	0,04	<0,01	0,41	0,67	0,75	<0,01	0,67	0,83	0,25	0,88

Por otro lado, el agregado de S incrementó la absorción total de Mn y Zn en 9 y 7 % respectivamente (tabla 4.9). La concentración de B en resto de estructuras fue disminuida por agregado de S en un 4 %, mientras que incrementó la concentración de Zn en granos un 4 % (Tabla 4.8). A pesar de estas modificaciones, no alteró el IC de ninguno de los micronutrientes analizados.

**Tabla 4.9.** Absorción total de micronutrientes (granos + resto de estructuras) afectados por la fertilización con P y S en g ha<sup>-1</sup>. Test F al 5%. EE= Error estándar de la media.

	Absorción Total g ha <sup>-1</sup>				
	Mn	B	Cu	Fe	Zn
<b>P0</b>	426	161	57,7	1198	171
<b>P1</b>	497	206	67,9	1690	177
<b>S0</b>	442	182	62	1402	168
<b>S1</b>	481	185	63,6	1486	180
<b>EE</b>	10,6	3,68	1,45	43,95	3,15
<b>Valor de Probabilidad</b>					
<b>Sitio</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>P</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,17
<b>S</b>	<0,01	0,58	0,46	0,18	<0,01
<b>PxS</b>	0,77	0,69	0,21	0,91	0,06
<b>SitioxP</b>	0,20	0,07	<0,01	0,03	0,39
<b>SitioxS</b>	0,09	0,02	0,16	0,31	<0,01
<b>SitioxPxS</b>	0,23	0,86	0,33	0,38	0,58

El promedio de IC fue de 10, 12, 39, 13 y 61 % para Mn, B, Cu, Fe y Zn respectivamente. Hubo un fuerte efecto Sitio para los IC de todos los micronutrientes. Sólo en algunos sitios se modificó por efecto de S el IC de Mn, B y Fe (interacción SitioxS). Los factores P y S interactuaron en el IC de Cu (Tabla 4.10).

**Tabla 4.10.** Índice de cosecha (IC) de micronutrientes afectados por la fertilización con P y S. Test F al 5 %. EE= Error estándar de la media.

	IC %				
	Mn	B	Cu	Fe	Zn
<b>P0</b>	9,4	12,3	37,7	13,4	58,8
<b>P1</b>	9,6	11,8	39,5	12,6	62,3
<b>S0</b>	9,6	12,1	38,3	12,8	59,8
<b>S1</b>	9,4	12,1	38,9	13,2	61,3
<b>EE</b>	0,15	0,2	0,61	0,35	0,59
<b>Valor de Probabilidad</b>					
<b>Sitio</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>P</b>	0,20	0,07	0,04	0,09	<0,01
<b>S</b>	0,54	0,96	0,50	0,45	0,07
<b>PxS</b>	0,56	0,17	0,01	0,62	0,56
<b>SitioxP</b>	0,86	0,06	0,25	0,15	0,05
<b>SitioxS</b>	0,02	0,05	0,82	0,02	0,21
<b>SitioxPxS</b>	0,79	0,33	0,48	0,16	0,70

#### 4.3.4 Eficiencia interna de micronutrientes

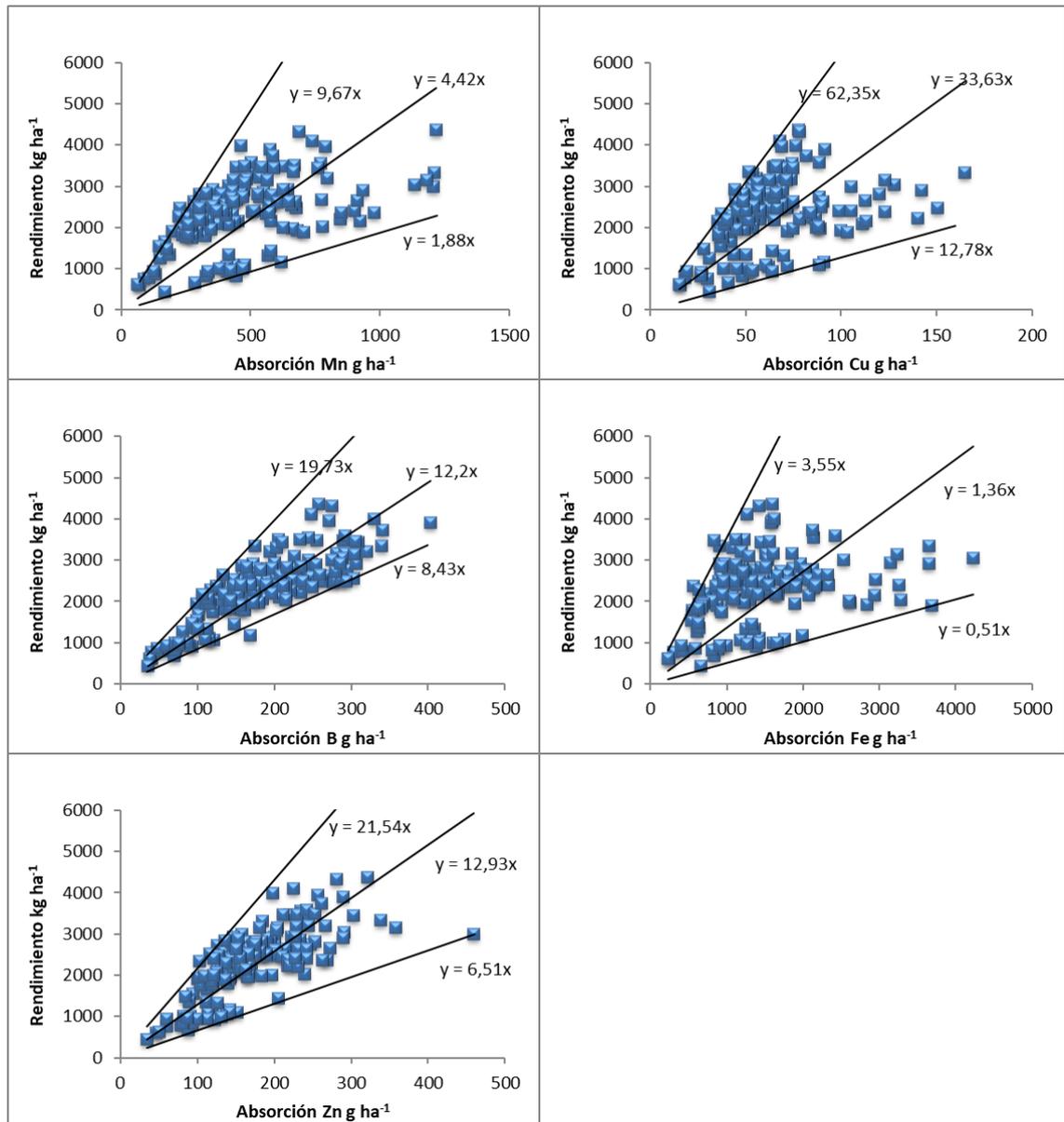
La eficiencia interna (EI) en el uso de los micronutrientes en el percentil 50 (eficiencia más probable), en el percentil 1 (máxima acumulación), y en el percentil 99 (máxima dilución), fueron respectivamente de 4.4, 1.9 y 9.7 kg grano g<sup>-1</sup> Mn absorbido; 33.6, 12.8 y 62.4 kg de grano g<sup>-1</sup> Cu absorbido; 12.2, 8.4 y 19.7 kg grano g<sup>-1</sup> B absorbido; 1.46, 0.51 y 3.6 kg grano g<sup>-1</sup> Fe absorbido; y 12.9, 6.5 y 21.5 kg grano g<sup>-1</sup> Zn (Figura 4.4).

El efecto Sitio tuvo un fuerte impacto en las EIs de todos los micronutrientes, e interactuó con el P en la EI de B y Zn, y con S en la EI de B. No hubo interacción PxS. La mayor disponibilidad de P afectó las EIs de Mn, y Zn incrementándolas en 9 y 21 % respectivamente, y reduciendo la EI de Fe en 6 %. (Tabla 4.11).

**Tabla 4.11.** Eficiencia Interna de micronutrientes en kg g<sup>-1</sup> afectados por fertilización fosforada. Test F al 5 %. EE= Error estándar de la media.

	Eficiencia Interna kg g <sup>-1</sup>				
	Mn	B	Cu	Fe	Zn
<b>P0</b>	5,5	13,3	39,1	1,9	12,4
<b>P1</b>	6	13,1	40,4	1,79	15
<b>S0</b>	5,9	13	39,4	1,9	13,7
<b>S1</b>	5,6	13,4	40,2	1,85	13,7
<b>EE</b>	0,1	0,17	0,64	0,05	0,2
<b>Valor de Probabilidad</b>					
<b>Sitio</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>P</b>	<0,01	0,26	0,15	<0,01	<0,01
<b>S</b>	0,12	0,17	0,38	0,42	0,78
<b>PxS</b>	0,32	0,33	0,10	0,36	0,87
<b>SitioxP</b>	0,34	<0,01	0,09	0,11	<0,01
<b>SitioxS</b>	0,06	<0,01	0,76	0,06	0,10
<b>SitioxPxS</b>	0,45	0,86	0,58	0,24	0,96

En el caso de los micronutrientes la relación entre el percentil 99 sobre el percentil 1 fue de 5.1, 4.9, 2.3, 7 y 3.3 para Mn, Cu, B, Fe y Zn, respectivamente (Tabla 4.12). Es decir que, para el set de datos de este trabajo, la producción de granos por unidad de nutriente (kg grano g<sup>-1</sup> micronutriente) se multiplicó por 5 en Mn y Cu, por 2 en B, por 7 en Fe y por algo más de 3 en Zn cuando se pasó de una situación más concentrada a una más diluida, siendo estas magnitudes, en promedio, superiores a las relaciones observadas para macronutrientes.



**Figura 4.4.** Relación entre la cantidad de micronutrientes absorbidos y el rendimiento en arveja (0 % MS). Los números indican la Eficiencia Interna (EI) de los micronutrientes en kg grano producido g<sup>-1</sup> micronutriente absorbido, para el percentil 50 (mediana), 1 (máxima acumulación), y 99 (máxima dilución). Los modelos fueron forzados a pasar por el origen de las coordenadas.

**Tabla 4.12.** Relación entre la EI de micronutrientes entre las situaciones más diluidas o más concentradas.

Percentil	EI kg g <sup>-1</sup> para los percentiles 1, 50 y 99				
	Mn	Cu	B	Fe	Zn
<b>1 (C)</b>	1,88	12,8	8,43	0,51	6,51
<b>50</b>	4,42	33,6	12,2	1,36	12,9
<b>99 (D)</b>	9,67	62,4	19,7	3,55	21,5
<b>Rel D/C</b>	5,1	4,9	2,3	7,0	3,3

#### 4.3.5 Dinámica de la absorción de macro y micronutrientes

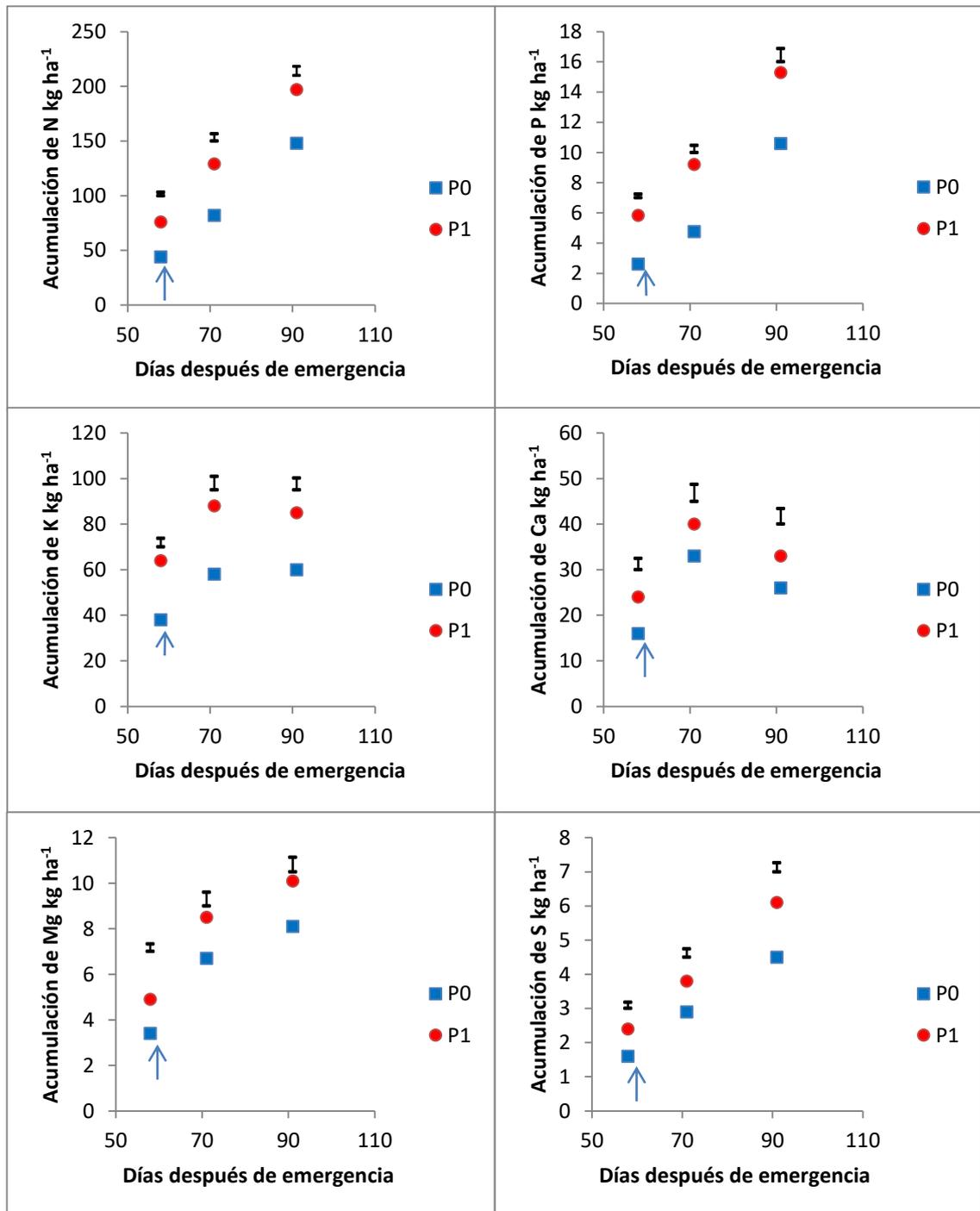
La máxima acumulación N, P, Mg y S se registró en los muestreos realizados a los 91 días después de emergencia, mientras que para K y Ca, se alcanzó 20 días antes.

En línea con lo observado en la dinámica de acumulación de biomasa (Capítulo 3), se observó un incremento por efecto del P agregado en la etapa E-FL, de 73, 123, 68, 44 y 50 % de N, P, K, Mg y S respectivamente. En FL-LL los cambios en la acumulación de nutrientes por efecto de P fueron de 57, 93, 52 y 31 %, y en LL-MF fueron de 33, 44, 42 y 36 % para N, P, K y S respectivamente (Figura 4.5).

No se observó efectos de P en la absorción de Ca en ninguna de las etapas consideradas, y tampoco para Mg en FL-LL y LL-MF. En cambio, la mayor disponibilidad de S no tuvo impacto en la acumulación de esos nutrientes en ninguna de las etapas consideradas (Tabla 4.13, Figura 4.5). No se halló interacción PxS en ninguna de las etapas. No hubo interacción PxS ni efecto de S en la tasa diaria de acumulación. La tasa de absorción de macronutrientes por el agregado de P sólo tuvo efecto diferencial según la etapa considerada. Así, de E-FL, el P tuvo efecto significativo en la cantidad absorbida por día de N, P, K, Mg y S, incrementándola en 73.7, 100, 69, 50 y 33 % respectivamente, mientras que desde FL-LL, el P tuvo efecto sólo en la tasa de absorción de N y P, incrementándola en 37 y 53 % respectivamente (Tabla 4.13; Figura 4.5).

**Tabla 4.13.** Tasa de absorción ( $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) de macronutrientes modificados por aporte de P. E-FL= Emergencia a Floración; FL-LL= Floración a Inicio de Llenado; LL-MF= Inicio de Llenado a Madurez Fisiológica. Test F al 5%. EE= Error estándar de la media.

<b>Etapa</b>	<b>Efecto</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>S</b>
<b>E-FL</b>	P0	0,76	0,05	0,65	0,28	0,06	0,03
	P1	1,32	0,10	1,10	0,41	0,09	0,04
<b>FL-LL</b>	P0	2,95	0,17	1,59	1,29	0,26	0,1
	P1	4,05	0,26	1,88	1,27	0,28	0,11
<b>LL-MF</b>	P0	3,3	0,29	0,11	-0,37	0,07	0,08
	P1	3,39	0,3	-0,17	-0,35	0,08	0,11
<b>EE</b>	E-FL	3,11	0,24	3,75	2,48	0,33	0,18
	FL-LL	6,54	0,47	5,93	3,73	0,6	0,24
	LL-MF	8,28	0,89	5,18	3,39	0,63	0,26
<b>Valor de Probabilidad</b>							
<b>Etapa</b>	<b>Efecto</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>S</b>
<b>E-FL</b>	P	<0,01	<0,01	<0,01	0,07	0,02	0,02
	S	0,61	0,46	0,71	0,95	0,92	0,40
	PxS	0,69	0,49	0,55	0,58	0,47	0,66
<b>FL-LL</b>	P	0,05	0,05	0,50	0,96	0,59	0,47
	S	0,43	0,23	0,92	0,66	0,65	0,99
	PxS	0,47	0,79	0,32	0,39	0,31	0,34
<b>LL-MF</b>	P	0,87	0,87	0,58	0,95	0,91	0,09
	S	0,57	0,27	0,67	0,76	0,73	0,60
	PxS	0,24	0,80	0,15	0,11	0,13	0,26



**Figura 4.5.** Dinámica de la acumulación de macronutrientes en función del aporte de P. Las barras indican el error estándar. Las flechas indican el estado 203 (plena floración).

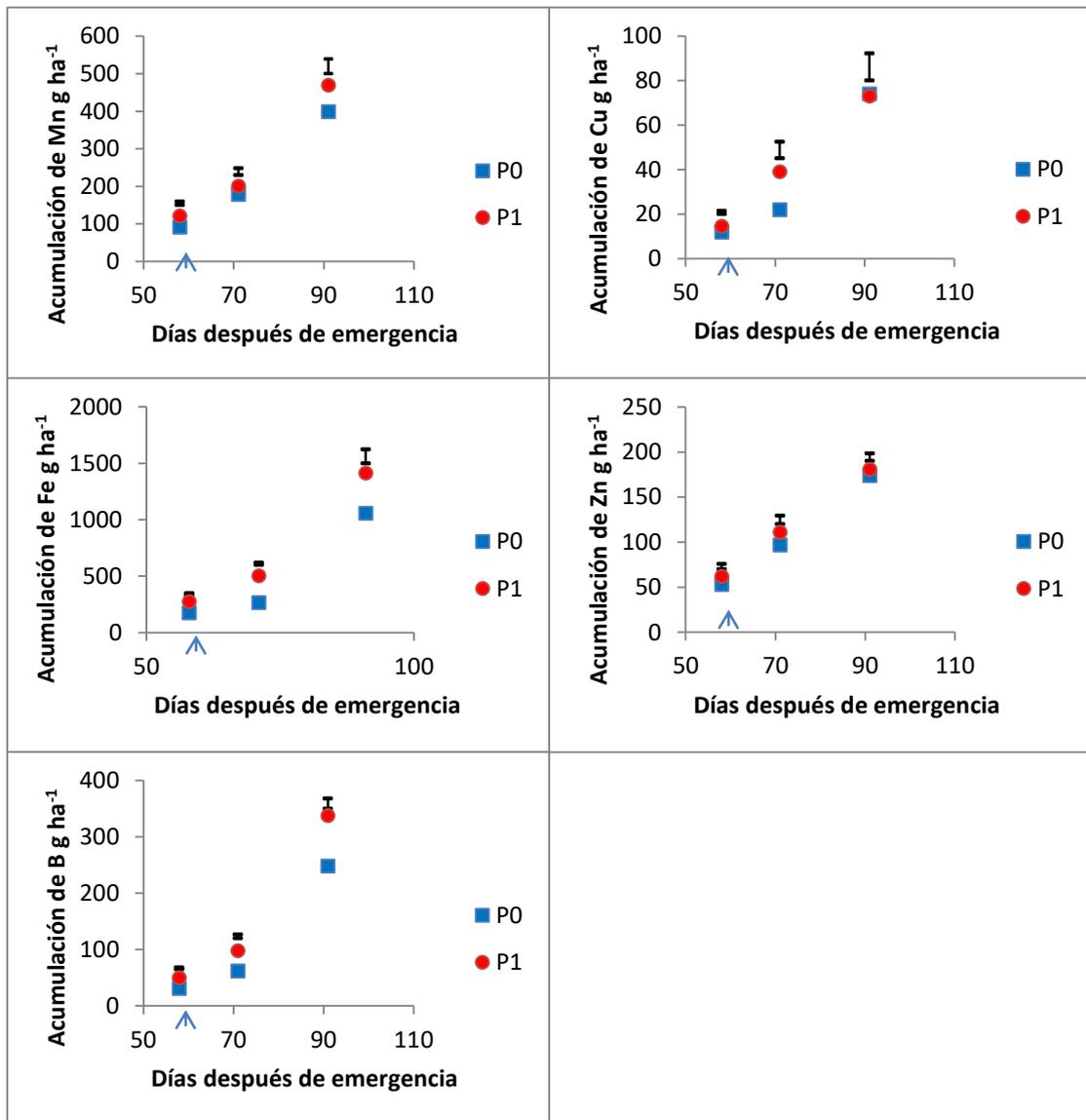
En el caso de micronutrientes, la tendencia de acumulación fue lineal en Mn, Cu, Fe, Zn y B, alcanzándose el máximo de acumulación en el muestreo realizado a los 91 días después de emergencia.

Mayor disponibilidad de S no afectó la absorción de ningún micronutriente en ninguna de las etapas consideradas.

En E-FL el aporte de P aumentó significativamente la acumulación de Mn, Fe y B, en 32, 57 y 61 % respectivamente. Esta tendencia en la absorción se mantuvo significativa para Fe y B en FL-LL con incrementos de 88 y 58 %, para finalmente, en LL-MF, incrementar sólo la absorción de B en 36 % (Figura 4.6). En FL-LL se mantuvo la mayor tasa de absorción en respuesta a la fertilización con P en Fe y B, con incrementos de 153 y 54 % respectivamente. En LL-MF el P sólo afectó la tasa de absorción de B, incrementándola en 29%. La fertilización azufrada no tuvo efecto en la dinámica de absorción de ningún micronutriente en ninguna de las etapas estudiadas (Tabla 4.14).

**Tabla 4.14.** Tasa de absorción de micronutrientes ( $\text{g ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) en las etapas E-FL (58 dde), FL-LL (71 dde), y LL-E (91 dde) afectados por la fertilización fosforada. E-FL= Emergencia a Floración; FL-LL= Floración a Inicio de Llenado; LL-MF= Inicio de Llenado a Madurez Fisiológica. Test F al 5%. EE= Error estándar de la media.

<b>Etapa</b>	<b>Efecto</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>B</b>
<b>E-FL</b>	P0	91	11,9	176	53	31
	P1	121	14,5	276	62	50
<b>FL-LL</b>	P0	178	22	268	97	62
	P1	201	39	503	111	98
<b>LL-MF</b>	P0	399	74	1059	174	248
	P1	469	73	1415	181	338
	E-FL	8,8	1,33	18,6	5,7	2,9
<b>EE</b>	FL-LL	18,3	7,5	20	9,2	6,8
	LL-MF	38,6	12,2	124	8,34	18,4
<b>Valor de Probabilidad</b>						
<b>Etapa</b>	<b>Efecto</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>B</b>
<b>E-FL</b>	P	0,05	0,21	0,01	0,30	<0,01
	S	0,70	0,62	0,68	0,88	0,90
	PxS	0,64	0,30	0,84	0,41	0,83
<b>FL-LL</b>	P	0,40	0,15	<0,01	0,31	0,01
	S	0,62	0,49	0,09	0,92	0,93
	PxS	0,55	0,53	0,24	0,35	0,26
<b>LL-MF</b>	P	0,24	0,98	0,08	0,59	0,01
	S	0,95	0,51	0,81	0,75	0,94
	PxS	0,64	0,44	0,60	0,47	0,95



**Figura 4.6.** Acumulación de micronutrientes a los 58, 71 y 91 días después de emergencia (dde) en  $g\ ha^{-1}$  afectados por la fertilización con P. Las barras indican el error estándar. Las flechas indican el estado 203 (plena floración).

#### 4.4 Discusión

##### 4.4.1 Absorción total, concentración de macronutrientes, e índice de cosecha

La fertilización con P incrementó la absorción de todos los macronutrientes. El IC de N, P y K disminuyó, debido a que el incremento de la concentración de estos nutrientes en granos, fue menor que el incremento de la concentración en el resto de estructuras. Coincide con lo hallado por Srivastava y Ahlawat (1995), y Erman et al (2009), quienes

reportaron que el aporte de P además de promover incremento de biomasa, mejoró el tenor proteico (N), atribuido a una mayor fijación biológica de N.

La mayor oferta de S incrementó la absorción total de N, K, Mg y S, pero no modificó los IC de los mismos, mejorando la concentración de N y S en granos, y en RE la de S, mientras que la de P fue reducida. Dado que el mayor aporte de S no alteró la acumulación de biomasa aérea, es evidente que tuvo que haber una mayor concentración de esos nutrientes, hecho que se pudo verificar en N en grano y S en resto de estructuras (Tabla 4.3). Togay et al, (2008), hallaron incrementos en la absorción de N, P, K, Ca y Mg en garbanzo ante mayor disponibilidad de P y de S en suelos calcáreos de India, con incrementos porcentuales similares a los de este trabajo.

Las concentraciones de macronutrientes en arveja resultaron ser diferentes a las halladas por otros autores. Así, la concentración en grano de P, K y Mg fueron inferiores a las reportadas por Neugschwandtner et al (2016), en resto de estructuras lo fueron para P, Mg y Ca, mientras que la concentración de K fue superior a lo hallado por esos autores.

La relación entre nutrientes en grano es variable en función del ambiente en donde se desarrolla el cultivo, de la especie considerada y de la variedad dentro de una misma especie entre otros factores, y conocerla es de interés para saber cuan balanceado puede estar un cultivo desde el punto de vista nutricional, dando indicios para la corrección de posibles desvíos respecto de un valor de referencia. Sadras (2006) compila relaciones N:P sobre la base de la absorción total de esos nutrientes, promedio entre cereales, legumbres y oleaginosas, con valores de 5.9, 8.9 y 5.4 respectivamente. Dentro del grupo de legumbres, la relación en el caso de arveja fue de 10.7, mientras que el de lenteja fue de 9.4, la de garbanzo 6.4, y la de soja fue de 11.2 (Sadras, comunicación personal). Todos los cuales son inferiores a la hallada en este trabajo (12,7), también considerando absorción total (granos + RE).

Si bien no abundan trabajos donde se muestren relaciones de los mismos nutrientes en granos de arveja, en forma parcial se han reportado relaciones entre algunos de ellos. Malhi et al (2007) hallaron relaciones N:P en arveja de 9.4, N:K de 3.2 y N:S de 9.5, las que comparadas a las del presente trabajo fueron menores para N:P (10.6), N:K (3.9), y N:S (34.1).

Ray et al (2014) hallaron en promedio de diferentes variedades de arveja, relaciones K:Mg de 8.8, levemente por encima de los de este trabajo (7.5). En poroto (*Phaseolus vulgaris*), y lenteja (*Lens culinaris*) los mismos autores reportaron que la relación K:Mg fue de 9.1 y 9.5 respectivamente, mientras que la hallada en garbanzo (*Cicer arietinum*) fue de 3.6.

En otra leguminosa como soja, la absorción de N, P, K y Ca fue, en relación a la de S, menor en un 50 %, mientras que la absorción de Mg fue similar a los obtenidos en arveja en este trabajo (Bender et al, 2015). Tamagno et al (2017), hallaron en soja relaciones N:P menores, y coincidiendo con los datos de Bender et al (2015), relaciones N:K mayores a los de arveja observados en este estudio.

El índice de cosecha de nutrientes permite inferir la exportación de nutrientes con los granos, como así también estimar el remanente que queda en el suelo para los cultivos sucesores en la rotación, aunque presenta una marcada variabilidad en función del ambiente, la especie y la variedad dentro de una misma especie (Newton and Hill, 1982; Bushby and Lawn, 1992; Gan et al, 2010). En promedio para los cereales, los IC de N, P, K, Ca y Mg, son menores al promedio de las legumbres, y mayores que éstas para el ICS (Tabla 4.15). Respecto de las oleaginosas, éstas tienen menor IC de N, P, Ca y Mg que las legumbres, y mayor IC de K y S (Tabla 4.14).

Promediando los IC, pero esta vez sólo a partir de los datos de los autores que trabajaron con arveja, resultaron similares para N y P, mayores para K y menores para Ca y Mg a los de este trabajo (Tabla 4.15).

La fertilización con P condujo a una reducción en el ICN, como consecuencia de haber incrementado proporcionalmente más la concentración de N en resto de estructuras (8 %) que en granos (1.3 %) (Tabla 4.3). Este hecho permite inferir que una mayor proporción de N tenga como destino final a los cultivos sucesores de arveja en las rotaciones, que normalmente son maíz o soja.

Se espera que ante incrementos de biomasa por fertilización, haya mayor absorción de nutrientes, sin embargo, depende de cómo sea la partición a granos, esa oferta se traducirá en mayor concentración de nutrientes en las semillas. El ICP disminuyó ante una mayor oferta de P, debido a que en los tratamientos fertilizados, el incremento de la concentración de P en resto de estructuras fue proporcionalmente mayor al incremento de la concentración de P en granos (Tabla 4.3). En forma similar, Salvagiotti et al (2009), halló en soja ICN menores en los tratamientos fertilizados con N sugiriendo mecanismos de mayor concentración en resto de estructuras.

La eficiencia agronómica del P aplicado (EAP) no fue alterada por agregado de S, como tampoco en los dos casos donde hubo respuesta a rendimiento por agregado de S, la EAS fue modificada por efecto del P.

Por otro lado, la eficiencia de recuperación de P (ERP) tampoco fue afectada por mayor disponibilidad de S, y en el único sitio donde se midió la ERS, no hubo efecto del P.

**Tabla 4.15.** Rangos de índices de cosecha de nutrientes de diferentes cultivos reportados en la bibliografía.

<b>Cultivos*</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>S</b>
<b>Cereales</b>	0,59-0,64	0,69-0,84	0,09-0,33	0,05-0,16	0,3-0,5	0,57-0,64
<b>Legumbres</b>	0,55-0,86	0,72-0,89	0,35-0,58	0,05-0,33	0,28-0,5	0,07-0,08
<b>Arveja</b>	0,56-0,79	0,72-0,84	0,35-0,46	0,05	0,28	0,076
<b>Oleaginosos (excepto soja)</b>	0,54-0,68	-	-	-	-	-
<b>Soja</b>	0,73-0,75	0,73-0,81	0,46-0,56	0,09	0,18	0,61

(\*)Cereales (Arroz, avena, maíz, trigo): Sahrawat, 2000; Neugschwndtner et al,2016; Bender et al, 2012; Ciampitti et al, 2013; Pagani et al, 2012; Setiyono et al, 2010, Salvagiotti et al, 2009; Dordas, 2009; Shukla et al, 2000. Legumbres y arveja: Neugschwndtner et al, 2016; Mahli et al, 2007; Gan et al, 2010; Ayaz et al, 2004; Singh et al, 2005; Araujo et al, 2012. Oleaginosos (Colza y mostaza): Gan et al, 2010. Soja: Tamagno et al, 2017; Bender et al, 2015.

En cambio, la fertilización con P al elevar la absorción de N, P y K en mayor proporción en que lo hizo el rendimiento, redujo en forma significativa la eficiencia interna de estos nutrientes. Lo mismo ocurrió por efecto del agregado de S en relación a su eficiencia interna.

La ERP en arveja resultó estar dentro del rango establecido para otras especies (15-30 %) (García F, 2009). Aunque comparado con la eficiencia observada en maíz por Chicowo et al, (2010), arveja en el presente trabajo recuperó un 25 % más. Los datos de ERP aportados por Fosu-Mensah (2016) en maíz, dan cuenta de un rango que va de 10 a 20 % en suelos deficientes en P de Ghana. Fageria et al (2014) reportaron valores de ERP para cultivos de cobertura leguminosas promedio de apenas 2 % en oxisoles de Brasil, muy pobres en P, y con un alto grado de fijación de P.

Es de esperarse que al fertilizar con un determinado nutriente disminuya su EI, dado que pasamos de una situación diluida a una de concentración de ese nutriente. Comparativamente arveja presenta valores de EI que difieren de la de otras especies, especialmente de los cereales (Tabla 4.16).

Los tratamientos fertilizados con P en los sitios con respuesta, produjeron incrementos de la biomasa aérea de alrededor del 40 %, lo cual implicó también, mayor exploración radicular (Katterer et al, 1993) y mayor fijación biológica de nitrógeno, por lo que además de reducir la EI de P, también lo hicieron las de N y K (Tabla 4.6).

Estos dos términos (EI y ER) definen la EAP, la cual presentó una gran variabilidad en función del nivel de P en el suelo y del ambiente. Wen et al (2008), trabajando con 3 variedades de arveja en suelos de 14 ppm de P Olsen, observaron una EAP de 32.8 kg de grano  $\text{kg}^{-1}$  de P. La ERP en los sitios con respuesta estuvo algo por debajo de lo hallado en arveja por Ferraris et al (2012) en un suelo con 7,8 ppm de P (Bray 1), quienes obtuvieron en un solo sitio/año, eficiencias de 48 kg de grano  $\text{kg}^{-1}$  de P aplicado.

En lenteja, Wen et al (2008) hallaron EAP de 19, y en garbanzo ésta fue de sólo 5 kg de grano  $\text{kg}^{-1}$  de P agregado. García y Salvagiotti (2009) reportan EAP en soja entre 21 y 25 kg grano  $\text{kg}^{-1}$  de P aplicado, tomando una base de 47 ensayos en Argentina y Bolivia, mientras que en trigo, Gerster et al (2005) reportan eficiencias de 18 a 38 en función del tenor de P en el suelo.

En los sitios con respuesta en rendimiento por agregado de P, se pudo demostrar que la EAP estuvo más relacionada a la ERP que a la EIP, y que a mayor disponibilidad de P Bray, la EAP es menor, y que la ERP es independiente del nivel de respuesta al rendimiento (Figura 4.3).

La EA depende entonces de cuanto nutriente absorbe la planta en función de lo que se aplica (ER), y cuánto de lo absorbido se transforma en rendimiento (EI). En este trabajo la fertilización con P produjo incrementos de la absorción de ese nutriente, promoviendo la generación de biomasa, que a su vez produjo mayor absorción de otros nutrientes. En 10 sitios la fertilización con P produjo incrementos de rendimiento que fueron proporcionalmente menores al aumento de la cantidad de P absorbido, explicando así la reducción de la EI, tanto de P, como de N y K, que pasaron de situaciones diluidas a más concentradas.

**Tabla 4.16.** *Recopilación de bibliografía de EI (kg grano kg<sup>-1</sup> de nutriente absorbido) de diferentes especies.*

<b>Cultivos *</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>S</b>
<b>Cereales</b>	57	252	86	-	-	564
<b>Legumbres</b>	16	452	98	60	580	417
<b>Soja</b>	13	154	28	-	-	244
<b>Arveja (este trabajo)</b>	16	203	19	28	152	400

(\*)Cereales: Witt et al, 1999; Fageria unpublished; Ciampitti et al, 2013; Pagani et al, 2012; Liu et al, 2006; Chuan et al, 2013; Fan et al, 2005. Legumbres: Baligar et al, 2001; Rudresh et al, 2005; Gerloff et al, 1983; Prieto y Salvagiotti, 2014. Soja: Salvagiotti et al, 2008; Salvagiotti et al, 2013.

#### *4.4.2 Absorción total, concentración e índice de cosecha de micronutrientes.*

El incremento de la absorción de Mn, B, Cu y Fe por mayor aporte de P se debería a la mayor exploración radicular de los tratamientos fertilizados, y al incremento en la generación de biomasa, ya que la concentración de los mismos micronutrientes tanto en

granos como en RE, fueron deprimidos (diluidos) por la mayor disponibilidad de P, excepto en Fe (Tabla 4.8).

Mayor disponibilidad de S incrementó la absorción total de Mn y Zn, y en el caso de Zn lo hizo mediante el aumento de la concentración de Zn en granos.

La concentración de micronutrientes en grano de arveja ha sido objeto de un menor interés que en el caso de macronutrientes. El factor Sitio tuvo un marcado efecto en la concentración media de micronutrientes en los granos coincidiendo con lo hallado por Ray et al (2014) que trabajando en suelos de Canadá, demostraron que el efecto Sitio es más fuerte que el efecto variedad en la concentración de micronutrientes en grano. Si bien los ensayos de esta tesis fueron conducidos en un mismo tipo de suelo (argiúdoles típicos), las condiciones particulares fueron variables, como grado de erosión, años de agricultura continua, historia de fertilización e historia de rotaciones.

La concentración de micronutrientes en semillas de arveja hallada en este trabajo resultó ser mayor a la reportada por Neugschwandtner et al (2016), siendo 21, 56, 96 y 38 % superior para Cu, Fe, Mn y Zn. Los datos de Amarakoon et al (2012), muestran concentraciones en grano de Fe 41 % inferior, pero similares de Zn, y Ray et al (2014), muestran datos sensiblemente menores a los de este trabajo, siendo 37, 50, 42 y 74 % inferior para Fe, Zn, Mn y Cu respectivamente. Estas diferencias claramente son debidas al tipo de suelos en donde se desarrollaron los ensayos (Amarakoon et al, 2012).

La fertilización con P afectó la concentración en grano de Mn y Zn, reduciéndolas, algo que podría estar relacionado con el efecto antagónico entre P y Zn (Adriano et al, 1971; Khorgamy et al, 2009), dado que mayor disponibilidad de P incrementó la EI de Zn (Tabla 4.11).

Los IC medidos en este trabajo fueron menores a los reportados por Neugschwandtner et al (2016), quienes trabajaron en arveja con 3 niveles de fertilización

nitrogenada. El promedio de los IC de hallado por estos autores fue 121, 43, 50 y 22 % de Mn, Cu, Fe y Zn respectivamente, por encima de los de este trabajo. Sin embargo es muy variable el IC de micronutrientes en otros cultivos según la fuente consultada. Así en soja los IC reportados por Bender et al (2015) fueron superiores, (194, 183, 60 y 130 % para Mn, B, Cu y Fe respectivamente, y -25 % para Zn). Ciampitti et al (2013) reportaron IC en maíz fertilizado con 112 kg N ha<sup>-1</sup> (promediando 3 densidades de plantas), que resultaron ser +47, -12, +54 y -11 % de Mn, Cu, Fe y Zn respectivamente. Por otro lado, Sahrawat (2000), reportó para arroz IC similares a los de arveja para Mn, 67 % superior en Fe y -60 % de Zn, en ensayos conducidos en África.

Claramente las diferencias en concentración e IC de micronutrientes entre los diferentes trabajos, son de una magnitud muy superior que para macronutrientes.

La fertilización con P incrementó la EI de Mn y Zn, reduciendo la de Fe. De todos modos hubo interacción con el efecto sitio. Existen pocos estudios que lo aborden en cultivos extensivos como soja, trigo o maíz, y en menor medida en arveja. La relación entre la EI en la situación diluida y la concentrada de micronutrientes, en promedio, fueron mayores a las halladas para macronutrientes en este trabajo.

En maíz, Bender et al (2013) hallaron valores de EI de 22, 145, 85, 9 y 24 kg g<sup>-1</sup> de Mn, B, Cu, Fe y Zn respectivamente, coincidiendo con los resultados de Ciampitti et al (2013), que en ensayos conducidos en maíz informan valores similares para Mn, Cu, Fe y Zn en promedio de los tratamientos de densidad y fertilización nitrogenada con los que trabajaron. Estos valores son sensiblemente superiores a las EI de este trabajo (Figura 4.2). Sahrawat (2000) obtuvo en arroz valores de EI para Fe y Mn que fueron 12 y 71 % respectivamente menores a los de arveja, y en Zn 193 % superior.

Además de la necesidad de los micronutrientes para alcanzar la mayor producción del cultivo de arveja, también es importante la cantidad de micronutrientes en granos que

hacen a las propiedades alimenticias de su semilla. La bio-fortificación de los alimentos es un proceso de incremento de la calidad de los granos mediante el uso de diversas técnicas de mejoramiento genético o manejo de la fertilización (Bouis, 2000). Se estima que más de 2000 millones de personas sufren “hambre oculta” por deficiencias en micronutrientes y vitaminas (Frossard et al, 2000; Welch et al, 2004). El hierro es un elemento esencial en la constitución de la hemoglobina, y como tal tiene un requerimiento mínimo necesario en la dieta humana (Roeser, 1986). El cinc tiene como rol la estabilización de membranas y estructuras celulares, formando parte de una gran cantidad de enzimas involucradas en el metabolismo de carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos (Sandström, 1997).

Una de las formas de mejorar la calidad del grano, es mediante la fertilización, práctica que altera la concentración de micronutrientes en grano. La fertilización con P no modificó la concentración en grano de Fe y redujo la de Zn, mientras que la fertilización con S incrementó la concentración en grano de Zn. Sin embargo, y a pesar de ello, las concentraciones de micronutrientes esenciales para la alimentación humana hallados en este trabajo sugieren que satisfarían las necesidades en seres humanos con menores cantidades de ingesta diaria, que las arvejas producidas en otras regiones del mundo.

Tomando como base los niveles de Ingesta Diaria Recomendada (IDR) de nutrientes minerales para hombres y mujeres (FAO/WHO, 2000), las arvejas producidas en este trabajo tuvieron en promedio 44, 35 y 55 % más de Mn, Fe y Zn, que las del trabajo de Ray et al (2014) en suelos oscuros y negros de Saskatchewan, Canadá (Tabla 4.17). Esto bien puede ser debido a la mayor oferta de esos nutrientes en los suelos en los que se condujeron los experimentos en Argentina.

**Tabla 4.17.** Valores de Ingesta Diaria Recomendada (IDR) discriminada por sexo en humanos de los principales nutrientes (FAO, 2000), y el porcentaje de IDR cubierto con una ración diaria de 100 g de arveja comparando lo hallado en este trabajo y por el de Ray et al (2014). (SD=sin dato).

Nutriente	Ingesta Diaria Recomendada (IDR) mg		% IDR Este Trabajo		% IDR (Ray et al 2014)	
	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
K	4700	4700	79	79	22	22
Mg	420	320	31	41	28	36
Ca	1000	1000	11	11	SD	SD
Zn	11	8	42	56	27	38
Fe	8	18	91	41	67	30
Mn	2,3	1,8	78	100	54	69
Cu	0,9	0,9	90	90	90	90

#### 4.4.3 Dinámica de absorción de macro y micronutrientes

No abundan estudios que relacionen la fertilización con P y S en la dinámica de absorción de macro y micronutrientes en el cultivo de arveja. En forma comparativa lo hallado coincide con los datos de Bender et al (2015), quienes observaron que la mayor tasa de acumulación en soja se dio entre los últimos estadios vegetativos y el inicio del llenado de granos (V7 a R5) para N, P, Ca, Mg y S, mientras que la mayor tasa para K fue antes, entre fin de estados vegetativos e inicio de formación de vainas (V7 a R3), llegando a acumular al final de esa etapa el 75% del K total absorbido.

Las tasas máximas de absorción reportadas por los mismos autores para Zn, Mn, Cu y B entre fin de estados vegetativos y llenado de granos (V7 a R5), coinciden a lo hallado en arveja, aunque ellos observaron que en el caso de Fe la tasa máxima se alcanzó antes, entre fin de estadios vegetativos e inicio de formación de semillas (V7 a R3).

En el cultivo de maíz, Ciampitti et al (2013), hallaron que el porcentaje de micronutrientes absorbidos al momento de emisión de estigmas, fue sensiblemente

superior al adquirido por arveja en un estado fenológico equivalente (floración, estado 203, Knott (1987)). De esta manera más del 50 % de Zn y Fe fueron acumulados luego de floración, razón por la cual esta información es importante para decidir la corrección de una posible deficiencia de estos dos nutrientes. Los datos de este trabajo muestran que al estado 206 (inicio de llenado de semillas), se había alcanzado el 44, 41, 31, 58 y 27 % del Mn, Cu, Fe, Zn y B respectivamente.

#### *4.5 Conclusiones*

La fertilización con P en arveja incrementó la absorción total de todos los macronutrientes. Aumentó la concentración de P, pero también la de N y K, tanto en grano como en resto de estructuras. Modificó la tasa de absorción de N, P, K, S y Mg entre emergencia y floración; y entre floración y llenado de granos sólo incrementó la tasa de absorción de N y P.

En los sitios donde hubo respuesta al P, la EA, estuvo más relacionados a cambios en la relación entre lo absorbido y lo aplicado (ER), que a la relación entre el rendimiento logrado y la cantidad absorbida (EI). En el único sitio donde hubo respuesta a S y se midió la absorción, también fue debido a una mayor absorción (ERS) que a la transformación en rendimiento (EIS).

En micronutrientes produjo cambios en la concentración y absorción total de los mismos, modificando el IC e incrementó la EI de Mn y Zn, mientras que disminuyó la de Fe. También varió la tasa de absorción de Fe y B, tanto en estadios vegetativos como en inicio de reproductivo.

El agregado de S alteró la absorción total de algunos macronutrientes y la concentración de P en resto de estructuras y de S en granos y resto de estructuras. La falta de respuesta a la fertilización azufrada en la generación de biomasa y rendimiento en

grano, contribuyó a que no fueran alterados el IC y la EI de todos los macronutrientes, excepto la EIS, en los tratamientos con aporte de S. Tampoco alteró la tasa de absorción de macronutrientes.

Mayor aporte de S disminuyó la concentración de B en resto de estructuras, e incrementó la concentración de Zn en granos. También incrementó la absorción total de Mn y Zn, pero no modificó el IC de micronutrientes. No modificó la EI ni la tasa de absorción de micronutrientes.

## ***Capítulo 5.***

### ***Conclusiones generales, aportes al conocimiento y líneas de investigación futuras.***

El área en la que se implantaron los ensayos, caracterizada por una fuerte historia agrícola continua y labranza de suelo, presentó una marcada disminución de la oferta de macronutrientes, especialmente P, N y K, como así también una caída significativa en los tenores de materia orgánica, y consecuentemente un franco deterioro físico, cuyo resultado final fue la compactación subsuperficial (Figura 2.2). Bajo estas condiciones, y a nivel local, los antecedentes de los efectos de la fertilización con P y S en el cultivo de arveja (Ammann y González, 1987; Ferraris et al, 2012), se limitaron a medir sólo respuestas en rendimiento, sin explicar en términos cuantitativos qué componentes de la generación de rendimiento fueron afectadas, como tampoco describieron la dinámica de absorción, y cómo fue la partición de esos nutrientes a granos.

Arveja respondió cuantitativamente y con más frecuencia al aporte de P que al de S en la generación de biomasa aérea desde estados vegetativos tempranos (Tabla 3.1), efecto que fue manifestado en plena floración (Tabla 3.2), y que se mantuvo hasta madurez fisiológica (Figura 3.2; Tabla 3.3). Sandaña y Calderini (2012) demostraron los efectos positivos que la generación de biomasa tiene sobre el rendimiento de arveja y sus componentes. La determinación de un umbral de respuesta a rendimiento en función del nivel de P extraíble por el método Bray (Figura 3.4) es una herramienta fundamental para poder discriminar probabilidad de respuesta en los sistemas de producción que incluyen arveja en la secuencia de cultivos. El valor de 14.7 ppm coincide con el reportado por otros autores (McKenzie, 2001), aunque se debe ajustar con más datos que se vayan generando.

El hecho de que arveja requiera menos S por unidad producida, explica en cierta medida esta falta de efecto sobre la producción de biomasa ante el agregado de S, por lo que uno puede inferir que los sitios no fueron deficientes en S, al menos para arveja, coincidiendo con lo reportado por Agosti (2011) en colza.

En la figura 3.1 se propuso un modelo para explicar los componentes que hacen a la definición del rendimiento en arveja. El número de frutos por planta fue uno de los componentes que mayor efecto tuvieron sobre el rendimiento, constituyendo así un indicador rápido a campo para hacer predicciones de rendimiento. Aquí es donde el aporte de P produjo los mayores cambios, mientras que la mayor oferta de S no modificó este componente (Tabla 3.4). Asociado a la densidad de cada sitio, el número de frutos por planta, define el número de frutos por unidad de superficie, el cual es un indicador más fuerte para explicar las variaciones en el rendimiento. Así llegamos al número de semillas por unidad de superficie, que explica más estrechamente las variaciones en el rendimiento (Poggio et al, 2005; Sandaña y Calderini, 2012), demostrándose que el efecto de P fue más consistente, mientras que S sólo lo alteró en un solo sitio (Tabla 3.4). De esta manera se acepta la primera hipótesis del trabajo que fue *“La fertilización fosforada tiene efectos relativos mayores que los de azufre, incrementando la producción de biomasa y el rendimiento por un aumento en el número de semillas por metro cuadrado”*.

El incremento en la acumulación de biomasa se debió a mayor disponibilidad de P, mas no de S. El aporte de P incrementó la absorción tanto de P y S, como la del resto de los nutrientes estudiados, mientras que el agregado de S modificó la absorción de S, N, Ca y Mg (Tabla 4.1). Coincide en parte con lo hallado por Ryan et al, (2003), quienes observaron en arveja que la fertilización con P promovía mayor generación de biomasa, y en la misma medida, mayor absorción de P. En el mismo sentido, Erman et al (2009)

hallaron que la fertilización con P incrementaba la absorción de P y N, coincidiendo con lo hallado por Bolland et al (1999) en garbanzo.

El crecimiento inicial promovido por mayor oferta de P incrementó, excepto para Ca, la tasa diaria de acumulación en el resto de los macronutrientes, sólo en la etapa que va desde la emergencia hasta inicio de floración (Tabla 4.13). Sin duda el aporte de P al mejorar el contenido de N, lo está haciendo con las proteínas, objeto de interés comercial e industrial (Erman et al, 2009).

El caso de los micronutrientes es de gran importancia dado que hace a la calidad como alimento (Frossard et al, 2000; Welch et al, 2004). Se demostró que la mayor disponibilidad de P incrementó la absorción total los micronutrientes estudiados, con la sola excepción del Zn, coincidiendo con Ryan et al (2009). En cambio, ante una mayor oferta de S, sólo se incrementó la absorción de Mn y Zn, no alterándose la del resto (Tabla 4.9). Esto a pesar de que en el único sitio donde se estudió la dinámica de absorción, el aporte de P modificó significativamente desde emergencia a inicio de llenado, la absorción de Fe; y la de B desde emergencia a madurez fisiológica (Tabla 4.14). Así, la segunda hipótesis que plantea *“La mayor disponibilidad de P y de S incrementará el crecimiento del cultivo de arveja y, de esta forma, aumentará la absorción de ambos nutrientes, como así también la de otros macro y micronutrientes”* se acepta parcialmente dado que no se pudo demostrar para el caso de la fertilización azufrada, y la mayor absorción de nutrientes por efecto de P no fue sino para alguno de ellos (Tablas 4.1 y 4.9).

En los sitios donde se dieron respuestas significativas en rendimiento por mayor oferta de P, la EAP de estuvo más estrechamente relacionada a la ERP que a la EIP (Figura 4.6). Es decir que la mayor producción de granos ante mayor oferta de P está más relacionada con la capacidad de absorber o captar P, que con el proceso fisiológico de transformarlo en más cantidad de granos, aunque muchos factores están involucrados en

estos procesos como la variedad, el ambiente (fertilidad de suelo, acción de micorrizas, clima, etc) y manejo (Baligar y Fageria, 2001). Esta asociación no se pudo realizar con los sitios donde hubo respuesta de rendimiento por agregado de S, debido a que sólo en un sitio se pudo calcular la ERS. Por todo esto, la tercer hipótesis que establecía que *”La mayor EA de P y S en los sitios con respuesta, está ligado más a la ER que a la EI”* fue aceptada.

### *5.1 Principales aportes al conocimiento de este trabajo*

Entre los hallazgos originales de este trabajo, la curva de rendimiento relativo en función del nivel de P en el suelo (Figura 3.6), aporta una herramienta que orienta para la toma de decisiones en el sector productivo, si bien es cierto que deberá reforzarse con más datos de respuesta a la aplicación de P.

Otra contribución fue conocer el mecanismo de incremento de rendimiento ante mayor oferta de P, el cual fue la fijación de mayor número de frutos por planta (FP). Esta variable resultó también ser un estimador sencillo para predecir en forma rápida el rendimiento a campo.

También fue valioso aportar los límites biológicos de la absorción de macro y micronutrientes en arveja, tanto en las situaciones concentradas como en las diluidas, y por cierto la mediana, la cual es la recíproca del requerimiento nutricional del cultivo, datos importantes, que junto al IC permite determinar balances de nutrientes cuando se incorpora arveja en los sistemas de producción.

Finalmente, como consecuencia del estudio de las concentraciones de micronutrientes, se demostró que las arvejas producidas en el sudeste de Santa Fe tienen mayor concentración de micronutrientes esenciales para la alimentación humana, que las

producidas en Canadá (principal productor mundial), lo que nos posiciona mejor en el mercado mundial.

## *5.2 Líneas de investigación*

A partir de este trabajo, otras líneas de trabajo deberían llevarse a cabo, orientando las investigaciones hacia la búsqueda de respuestas a los interrogantes que se plantean a continuación.

### *5.2.1 Alteraciones que la nutrición pudiera tener sobre el contenido proteico de arveja y sus propiedades.*

La creciente demanda mundial de proteínas vegetales, constituye una oportunidad para arveja. Si bien hay antecedentes del impacto de la nutrición nitrogenada en el contenido proteico de arveja, (Holl and Vose, 1980), menos claro es el efecto de P, S y sus posibles interacciones en la acumulación de proteínas y sus propiedades (Adebiye and Aluko, 2011). Dado que se demostró con este trabajo un efecto de acumulación de macronutrientes por efecto de P (Tabla 4.6), estudiar si ese N incrementa el nivel de proteína en semillas.

### *5.2.2 Efectos que la nutrición del cultivo de arveja puede tener en una rotación.*

En Argentina, a diferencia de los principales productores mundiales de arveja, se la cultiva en secuencia inmediata con maíz o soja de 2° en la misma estación de crecimiento. Bien documentado es el impacto de arveja en el rendimiento de maíz o soja en secuencia (Andrade et al, 2015; Salvagiotti et al, 2014), pero sería de interés medir el impacto en los cultivos en secuencia con arveja, a partir de que hay acumulación de macronutrientes a partir del aporte de P y S.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Adebiyi, A; R.E. Aluko. 2011. Functional properties of protein fractions obtained from commercial yellow field pea (*Pisum sativum* L.) seed protein isolate. Food Chemistry, 128, pp. 902-908.
- Adriano, D. C., Paulsen, G. M.; Murphy, L. S. 1971. Phosphorus-iron and phosphorus-zinc relationships in corn (*Zea mays*). Agron. J. 63: 36-39.
- Agosti, M.B., 2011. Fertilización nitrógeno-azufrada y variabilidad genotípica en el rendimiento y la calidad de grano en colza-canola (*Brassica napus* L.). Magister thesis. Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Amarakoon, D. Thavarajah, K. McPhee, P. Thavarajah. 2012 Iron-, zinc-, and magnesium-rich field peas (*Pisum sativum* L.) with naturally low phytic acid: A potential food-based solution to global micronutrient malnutrition.
- Amma, A; González, J; Riva, E; Bianchini, P; Bimboni, H; Mitidieri, A; Mitidieri, I. 1987. Recomendaciones prácticas para el cultivo de arveja. INTA EEA San Pedro, Ruta 9 km 170. San Pedro, Buenos Aires, Argentina.
- Andrade, J; S.L. Poggio, M. Ermácora, E.H. Satorre. 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa Argent. Eur. J., 67 (2015), pp. 37-51, 10.1016/j.eja.2015.03.001.
- Akhtar, N., Amjad, M. and Anjum, M.A. 2003. Growth and Yield Response of Pea (*Pisum sativum* L.) Crop to Phosphorus and Potassium Application. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 40, 217-222.
- Araujo, A; Teixeira, M. 2012. Variabilidade dos índices de colheita de nutrientes em genótipos de feijoeiro e sua relação com a produção de grãos. R. Bras. Ci. Solo, 36:137-146.
- Ayaz, S., B.A. McKenzie, G.D. Hill, D.L. McNeil. 2004. Nitrogen distribution in four grain legumes. J. Agric. Sci., 142 (2004), pp. 309-317.
- Bacigaluppo, S; Dardanelli, J; Gerster, G; Quijano, A; Balzarini, M; Bodrero, M; Andriani, J; Enrico, J; Martignone R. 2004. Variaciones del rendimiento de soja en el sur de Santa Fe. Factores limitantes de clima y suelo. Serie Para Mejorar la producción N° 33 EEA INTA Oliveros.
- Baligar VC, Fageria NK, He ZL. (2001) Nutrient use efficiency in plants. Commun Soil Sci Plant Anal 32: 921-950.
- Bender, R. B., J.W. Haegerle, M.L. Ruffo, F.E. Below. 2013. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. Agron. J. 105. 161-170.

- Bender, R., Haegele, J. W. and Below, F. E. 2015. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern Soybean Varieties. *Agronomy Journal* Vol 107, 2.
- Bengough, A; C. Mullins. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, 41 (1990), pp. 341-358.
- Berardo A., S. Ehrt, F. Grattone y F. García. 2001. Corn yield response to phosphorus fertilization in the southern Pampas. *Better Crops International* 15(1): 3-5.
- Bolland, M.D.K.H.M. Siddique, S.P. Loss, M.J. Baker. 1999. Comparing responses of grain legumes, wheat and canola to applications of superphosphate *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 53 (1999), pp. 157-175.
- Bolland MDA, Brennan RF, White PF (2006) Comparing responses to phosphorus of field pea (*Pisum sativum*), canola (*Brassica napus*) and spring wheat (*Triticum aestivum*). *Australian Journal of Experimental Agriculture* 46, 645–657.
- Bouis, H.E. 2000. Enrichment of food staples through plant breeding: a new strategy for fighting micronutrient malnutrition. *Nutrition* 16, 701-704.
- Brescia, V. Rabaglio, M. 2015. Atlas de consumo de Alimentos. En <https://inta.gov.ar/paginas/atlas-de-consumo-de-alimentos>.
- Bruulsema, T.W., C. Witt., F. Garcia, S. Li, T.N. Rao, F. Chen, and S. Ivanova. 2008. *Better Crops*, 92(2):13-15 (2008).
- Bushby, H. V. A. and Lawn, R. J. 1992. Accumulation and partitioning of nitrogen and dry matter by contrasting genotypes of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek). *Aust. J. Agric. Res.*, 43: 1609–1628.
- Cade, B. S. and Richards, J. D. 2005. User manual for Blossom statistical software. U.S. Geological Survey, Fort Collins Science Center, Fort Collins, CO.
- Cade, B.S. and Noon, B. R. 2003 A gentle introduction to quantile regression for ecologists. pp. 412-420.
- Calviño, PA; M. Redolatti. 2004. Resultado de dividir la dosis de nitrógeno en trigos de alto rendimiento en el Sudeste bonaerense. *Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos*, p 171.
- Chicowo R, Corbeels M, Mapfumo P, Tittone P, Vanlauwe B and Giller KE (2009). Nitrogen and phosphorus capture and recovery efficiencies, and crop responses to a range of soil fertility management strategies in sub-Saharan Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 88, 59-77.
- Chuan, L.; P. He, J. Jin, S. Li, C. Grant, X. Xu, S. Qiu, S. Zhao, W. Zhou. 2013. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China. *Field Crops Res.*, 146 (2013), pp. 96-104.

Ciampitti, I.A., Camberato, J.J., Murrell, S.T., Vyn, T.J..2013. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I. macronutrients. *Agron J* 105:783–795.

Ciampitti, I; M. Boxler; F. Gracia. 2010. Nutrición de Maíz: Requerimientos y absorción de nutrientes. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* N° 48. International Institute of Plant Nutrition Diciembre 2010.

Correndo, A. Salvagiotti, F. García, F. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analysis soil test value-relative yield relationships. *Crop and Pasture Science*. Published on line march 2017. *Crop Sci.* (2017), 10.2135/cropsci2016.05.0322.

Cruzate GA & R Casas. 2009. Extracción de nutrientes en la Agricultura Argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. N° 44.:21-2 6.

Cruzate, G y R. Casas. 2003. Balance de nutrientes. *Fertilizar* N°8 Ed. Especial Sostenibilidad. P 7-13.

Darwich, N. 1984. Tecnología disponible para el cultivo de maíz en la zona sudeste de la Provincia de Buenos Aires. EEA INTA Balcarce.

Díaz Zorita M. 2004. Importancia del fósforo en la nutrición mineral del girasol. En: [www.fertilizar.org](http://www.fertilizar.org).

De Wit, C. T. 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agric. Syst.*, 40 (1992), pp. 125-151.

Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management. Papers presented at the IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices 7-9 March 2007, Brussels, Belgium.

Dordas, C. 2009. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source–sink relations. *Eur. J. Agron.*, 30, pp. 129-139.

Dumas, J. 1831. *Procedes de l'analyse organique*. *Annales de Chimie et de Physique*, 2 (1831), pp. 198-213.

Echeverría H, Ferraris G, Gerster G, Gutiérrez Boem F, Salvagiotti F. 2002. Fertilización de soja y la secuencia trigo-soja en la región pampeana. Campañas 2000/01 y 2001/02. INTA – FERTILIZAR. EEA INTA Pergamino Buenos Aires.

Echeverría H. y F. Garcia. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico* No. 149. EEA INTA Balcarce.

Echeverría, H. E.;H. R. Sainz Rosas. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado al estadio de seis hojas del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo* 19 2001 p 57-66.

Echeverría, H. Ferraris, G. Gerster, G. Gutiérrez Boem, F. Salvagiotti, F.2002. Fertilización en soja y trigo-soja: Respuesta a la fertilización en la Región Pampeana.

Resultados de la red de ensayos del proyecto Fertilizar-INTA 4. Campaña 2000-2001 y 2001-2002. EEA INTA Pergamino.

Egli, D. B. 2006. The role of seed in the determination of yield of grain crops. *Australian Journal of Agricultural Research* 57 (12), 1237.

Elsheikh, A., Elzidany, A. 1997. Effects of Rhizobium inoculation, organic and chemical fertilizers on yield and physical properties of faba bean seeds. *Plant Foods for Human Nutrition*. September 1997, Volume 51, Issue 2, pp 137–144.

Erman M, Yildirim B, Togay N, Cig F (2009) Effect of phosphorus application and rhizobium inoculation on the yield, nodulation and nutrient uptake in field pea (*Pisum sativum* sp *arvense* L.). *J Anim Vet Adv* 8:301–304.

Fageria NK, Baligar VC. 2014. Macronutrient-use efficiency and changes in chemical properties of an oxisol as influenced by phosphorus fertilization and tropical cover crops. *Comm Soil Sci Plant Analysis*. 2014b;45:1227-1246.

Fan MS, Liu XJ, Jiang RF, Zhang FS, Lu SH, Zeng XZ, Christie P. 2005. Crop yields, internal nutrient efficiency, and changes in soil properties in rice-wheat rotations under non-flooded mulching cultivation, *Plant and Soil*, 2005, vol. 277 (pg. 265-276).

FAO. 2018. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>.

FAO/WHO. 2000. Preliminary report on recommended nutrient intakes. Joint FAO/WHO Expert Consultation on Human Vitamin and Mineral Requirements, FAO, Bangkok, Thailand, September 21±30, 1998, revised July 13, 2000. Food and Agricultural Organization of the United Nations Rome, Italy and World Health Organization, Geneva, Switzerland.

Ferrari, M; Melchiori, R; H. Fontanetto. 2005. Fósforo en soja: El aporte de la fracción orgánica lábil del suelo. *Actas XIII Congreso de AAPRESID*. Rosario 10 de agosto de 2005.

Ferraris G., F. Salvagiotti, P. Prystupa y F.H. Gutiérrez Boem. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. *XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*: 144.

Ferraris, G., Couretot, L., Magnone, G. 2012. Nutrición del cultivo de arveja. Experiencias de la campaña 2011/2012. Informe Proyecto Regional Agrícola CRBAN. EEA INTA Pergamino.

Fontanetto H. 2004. Nutrición de cultivos y manejo de la fertilidad en la región centro de Santa Fe. *Simposio Fertilidad 2004*. INPOFOS - PPI – PPIC.

Frossard E, Bucher M, MaÈchler F, Mozafar A, Hurrell R. 2000. Review. Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80, 861±879.

Fosu-Mensah BY, Mensah M. The effect of phosphorus and nitrogen fertilizers on grain yield, nutrient uptake and use efficiency of two maize (*Zea mays*. L) varieties under rain fed condition on Haplic Lixisol in forest savannah transition zone of Ghana: *Environ. Syst. Res.* 2016; 5: 22.

Gan, Y., C.A. Campbell, H.H. Janzen, R.L. Lemke, P. Basnyat, C.L. McDonald. 2010. Nitrogen accumulation in plant tissues and roots and N mineralization under oilseeds, pulses, and spring wheat. *Plant and Soil*, 332 (2010), pp. 451-461.

García F.O. 2003. El manejo de fósforo en la producción de trigo y maíz. Simposio El fósforo en la agricultura argentina. INPOFOS, pág.55-61.

García F.O., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, G. Deza Marin y A. Berardo. 2006. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe – Resultados y Conclusiones de los primeros seis años 2000-2005. Editorial AACREA. Buenos Aires, Argentina.

García, F. 2009. Eficiencia de uso de nutrientes y mejores prácticas de manejo para la nutrición de cultivos de grano. Simposio Fertilidad 2009, Rosario, IPNI Cono Sur.

García, F. O. (1999). Fósforo y Azufre en el cultivo de maíz. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. INPOFOS/PPI/PPIC, Cono Sur. 3: 6-9.

García, F. O. y González Sanjuan, M. F. 2013. La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos? En: *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, IAH 9-marzo de 2013. International Plant Nutrition Institute (IPNI). pp 2-7. Disponible en: <http://www.ipni.net/publication/ia>.

García, F. y F. Salvagiotti. 2009. Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del Cono Sur de Latinoamérica. In J Espinosa y F. García (ed). *Memorias del Simposio “Uso eficiente de nutrientes”*. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica pág. 37-48.

Gaspar, A; C. Laboski, S. Nave, S. Conley. 2017. Dry matter and nitrogen uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels. *Crop Sci.* (2017), 10.2135/cropsci2016.05.0322.

Gerloff GC, Gabelman WH (1983) Genetic basis of inorganic plant nutrition. Lauchli A, Bielecki RL, eds, *Encyclopedia of Plant Physiology* (Springer-Verlag, New York), 15B. New Series:453–476.

Gerster, G.; Bacigaluppo, S. 2004. Consecuencia de la densificación por tránsito en Argiudoles del sur de Santa Fe. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 303.

Gerster, G., Novello, O., Salvagiotti, F. 2005. Respuesta del trigo a la fertilización con fósforo con diferentes antecesores. *Serie Para Mejorar la Producción N° 28*. EEA INTA Oliveros.

Gonçalves Junior AC, Nacke H, Marengoni NG, Carvalho EA, Coelho GF (2010) Produtividade e componentes de produção da soja adubada com diferentes doses de fósforo, potássio e zinco. *Cienc. Agrotec.* 34:660-666.

Grant, C.A; Flaten, D.N., Tomasiewicz, D.J., Sheppard, S.C.2001. The importance of early season phosphorus nutrition, *Canadian Journal of Plant Science* vol. 81 211-224.

Guilioni L, Lecoœur J (2010) Carbon acquisition at the crop level in pea. In 'Physiology of the pea crop'. (Eds N Munier-Jolain, V Biarnès, I Chaillet, J Lecoœur, MH Jeuffroy) pp. 44–60. (CRC Press: Boca Raton, FL, USA)

Gutierrez-Boem, F. H. and Thomas, G. W. 1999. Phosphorus nutrition and water deficits in field-grown soybeans. *Plant Soil*, 207, 87–96.

Gutiérrez Boem, F.H., F.O. García, y M. Boxler. 2010. ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para Soja, Maíz y Trigo? XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mayo 31 a 4 Junio de 2010. Rosario. Argentina.

Gutierrez Boem, F.H, P. Prystupa, G. Ferraris. 2007. Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean Crops. *J. Plant Nutr.* 30 (2007), pp. 93-104.

Hall, A.J., C.A. Chimenti, F. Vilella, G. Feier, 1995. Timing of water stress effects on yield components in sunflower. In: *Proceedings 11 th International Sunflower Conference*, Vol. 1. International Sunflower Association, Mar del Plata, Argentina, pp. 131-136.

Hanway, J.J. and Weber, C.R. 1971 Accumulation of N, P, and K by soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) plants. *Agronomy Journal*, 63, 406-408.

Hoefgen, R., H. Hesse 2008. Sulfur and Cysteine Metabolism. In: J. Jez, editor, *Sulfur: A Missing Link between Soils, Crops, and Nutrition*, Agron. Monogr. 50. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. p. 83-104.

Holl, F.B., and J.R. Vose. 1980. Carbohydrate and protein accumulation in the developing field pea seed. *Can. J. Plant Sci.* 60: 1109–1114.

Howard, A.E. 2006. Agronomic thresholds for soil phosphorus in Alberta: A review. 42 pp. In *Alberta Soil Phosphorus Limits Project. Volume 5: Background information and reviews*. Alberta Agriculture, Food and Rural Development, Lethbridge, Alberta, Canada.

Inase. 2018. Catálogo Nacional de Cultivares. En <https://gestion.inase.gob.ar/consultaGestion/gestiones>.

Inase. 2019. SISA arveja 2019 2020. En [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe\\_arvejas2.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_arvejas2.pdf).

Islam, M., Mohsan, S., Ali, S., 2012. Effect of different phosphorus and sulfur levels on nitrogen fixation and uptake by chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Agrociencia*, 46: 1-13.

Janssen, B.H., 1998. Efficient use of nutrients: an art of balancing. *Field Crops Research* 56, 197-201.

Janssen, B.H., F.C.T. Guiking, D. Van der Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf and H. van Reuler. 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma* 46, 299-318.

Jeuffroy, M. H.; C. Cabanet. 1994. A model to predict seed number per pod from early pod growth rate in pea (*Pisum sativum* L.). *J. Exp. Bot.*, 45 (1994), pp. 709-715.

Jeuffroy, M. H.; C. Duthion, J.-M. Meynard, A. Pigeaire. 1990. Effect of a short period of high day temperatures during flowering on the seed number per pod of pea (*Pisum sativum* L.). *Agronomie*, 2 (1990), pp. 139-145.

Karlen, D. L. and Camp, C. R. 1982. N, P and K accumulation by high-yielding irrigated maize grown on a Typic Paleudult in the Southeastern U.S. *Proc. 9th Intl. Plant Nutri. Colloq.* Edited by: Scaife, A. Vol. 1, pp.262–267.

Karlen, D.L., R.L. Flannery, and E.J. Sadler. 1988. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. *Agron. J.* 80:232–242.

Katterer, T; Hansson, A; Andren, O. 1993. Wheat root biomass and nitrogen dynamic effects on daily irrigation and fertilization. *Plant and Soil* 151: 21-30.

Khorgamy, A., A. Farnia, 2009. Effect of phosphorus and zinc fertilisation on yield and yield components of chick pea cultivars. *African Crop Science Conference Proceedings*, 9: 205-208.

Knott, C. M: 1987. A Key for Stages of Development of the Pea (*Pisum sativum*). *Annals of Applied Biology* 111:233-245.

Kour, S., Arora, S., Jalali V.K., Bali, A.S. and Gupta, M. 2014. Direct and residual effect of sulphur fertilization on yield, uptake and use efficiency in Indian mustard and succeeding rice crop. *Journal of Plant Nutrition*, 37, 2291± 2301.

Lafond, J., D Pageau. 2010. Fertilisation phosphatée et potassique dans la culture du pois sec. *Canadian Journal of Plant Science*, 90(5): 629-636.

Lambert, R. G., A.J. Linck. 1958. Effects of high temperature on yield of peas. *Plant Physiol*, 33 (1958), pp. 347-350.

Liu, M.Q., Z.R. Yu, Y.H. Liu and N.T. Konijn. 2006. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 74, 245-258.

Maiti, D., D.K. Das, H. Pathak. 2006. Simulation of fertilizer requirement for irrigated wheat in eastern India using the QUEFTS model *Arch. Agron. Soil Sci.*, 52 (2006), pp. 403-418.

Malhi, S.S., Johnston, A.M., Schoenau, J.J., Wang, Z.H., Vera, C.L. 2007. Seasonal biomass accumulation and nutrient uptake of pea and lentil on a black chernozem soil in Saskatchewan. *J Plant Nutr* 30: 721–737.

Malmantile, A.; Gerster, G; Salvagiotti, F. y Bacigaluppo, S. 2018. Velocidad de infiltración del agua y compactación del suelo, en respuesta a la intensificación de la rotación con gramíneas. *Revista Para Mejorar La Producción* N° 57. EEA INTA Oliveros en: <https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta.velocidad-infiltracion-agua-compactacion-suelorespuesta-intensificacion-rotacion-gramineas.pdf>.

Massignam, A.M., S.C. Chapman, G.L. Hammer, and S. Fukai. 2009. Physiological determinants of maize and sunflower grain yield as affected by nitrogen supply. *Field Crops Res.* 113:256–267.

McLaren R.G., Swift R.S. 1977. Changes in soil organic sulfur fractions due to long-term cultivation of soils. *Journal of Soil Science*, 28 (3) (1977), pp. 445-453.

McKenzie R.H. Middleton A.B. Solberg E.D. DeMulder J. Flore N. Clayton G.W. Bremer E. 2001b. Response of pea to rate and placement of phosphate fertilizer in Alberta. *Can. J. Plant Sci.* 81: 645–649.

Meadley, J. T. & Milbourn, G. M. 1971. The growth of vining peas. III. The effect of shading on abscission of flowers and pods. *J. agric. Sci., Camb.* 77, 103–8.

Michelena, R.; C. Iurria, F. Vavruska; R. Mon; A. Pittaluga. 1989. Degradación de suelos en el norte de la Región Pampeana. *Publicación Técnica N°6*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centros Regionales Buenos Aires Norte, Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe. Proyecto de Agricultura Conservacionista.

Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca. 2019. Estimaciones Agrícolas. En <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>.

Mollier A, Pellerin S. 1999. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *Journal of Experimental Botany* 50: 487–497.

Neugschwandtner, R. & Kaul, H. (2016). Concentrations and uptake of micronutrients by oat and pea in intercrops in response to N fertilization and sowing ratio. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 67(1), pp. 1-15.

Newton and Hill, 1982. nutrient management. p. 359-395. In A. Dobermann et al. (ed.) *Increasing productivity of intensive rice systems through site-specific nutrient management*. Science Publishers, Inc., International Rice Research Institute, Enfield, NH (USA) and Los Baños (Philippines).

Ney, B; Turc, O. 1993. Heat unit base description of the reproductive development of pea. *Crop Science* 33: 510-514.

Niklas, K.J., 2006. Plant Allometry, Leaf Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry, and Interspecific Trends in Annual Growth Rates. *Ann Bot* 97, 155-163.

Pagani A., Echeverría H. E., Andrade F. H., Sainz Rozas H. R. 2012. Effects of nitrogen and sulfur application on grain yield, nutrient accumulation, and harvest indexes in maize, *J. Plant Nutr.*, 2012, 35, 1080-1097.

Pagani, A; H.E. Echeverría. 2012. Influence of sulfur deficiency on chlorophyll-meter readings of corn leaves *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 175 (2012), pp. 604-613.

Pathak H., Aggarwal P.K., Roetter R., Kalra N., Bandyopadhaya S.K., Prasad S., Van Keulen H. 2003. Modeling the quantitative evaluation of soil nutrient supply, nutrient use efficiency, and fertilizer requirements of wheat in India. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 65 , pp. 105-113.

Plénet, D., Mollier, M., Pellerin, S., 2000. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and Yield components.

Poggio, S.L., Satorre, E., Dethiou, S., Gonzalo, G.M. 2005. Pod and seed numbers as a function of photothermal quotient during the seed set period of field pea (*Pisum sativum*) crops. *European Journal of Agronomy* 22,55–69.

Prieto, G. Alamo, F. Appella, C. Avila, F. Balbo, R. Brassesco, R. Buschittari, D. Casciani, A. Espósito, A. Fariña, L. Fekete, A. Figueroa, E. Frolla, F. Maggio, J. Maggio, M. Martínez, M. Martins, L. Pérez, G. Prece, N. Vallejo, M. Zgrablich, A. 2018. Rendimiento de cultivares de Arveja (*Pisum sativum*, L) en diferentes ambientes de la República Argentina. Campaña 2017-2018. En: [https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta\\_rendimiento\\_de\\_la\\_red\\_de\\_cultivares\\_de\\_arveja\\_2017\\_2018.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta_rendimiento_de_la_red_de_cultivares_de_arveja_2017_2018.pdf).

Prieto, G. Vita, E. 2017. Relevamiento de cultivos de invierno campaña 2017-2018 en Sudeste de Santa Fe y nordeste de Buenos Aires. En [https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta\\_relevamiento-cultivos-invierno.campana-2017.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta_relevamiento-cultivos-invierno.campana-2017.pdf).

Prieto, G; Salvagiotti, F. 2014. Curvas de dilución y acumulación de macronutrientes en arveja (*Pisum sativum*). XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas”. Producción sustentable en ambientes frágiles. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.

Rabinowitch, E. I., Govindjee. 1969. Photosynthesis. 273 p. New York: Wiley and Sons.

Ramos, J.M., L.F. García del Moral, L. Recalde. 1985. Vegetative growth of winter barley in relation to environmental conditions and grain yield. *J. Agric. Sci.*, 104 (1985), pp. 413-419.

Ray, H., Bett, K., Tar'an, B., Vandenberg, A., Thavarajah, D., Warkentin, T. 2014. Mineral micronutrient content of cultivars of field pea, chickpea, common bean, and lentil grown in Saskatchewan, Canada. *Crop Science* 54:1698–1708.

Rhizobium inoculation on yield, nodulation and nutrient uptake in field pea (*Pisum*

Rhoads, F.M. and Stanley, R.L. 1981. Fertiliser scheduling, yield and nutrient uptake of irrigated corn. *Agron J* 73, 971–974.

Roeser, H.P. 1986. Iron. *J. Food Nutr.* 42, 82–92.

Rudresh, D. L.; M.K. Shivaprakash, R.D. Prasad. 2005. Effect of combined application of Rhizobium, phosphate solubilizing bacterium and Trichoderma spp. on growth, nutrient uptake and yield of chickpea (*Cicer aritenium* L.). *Appl. Soil Ecol.*, 28 (2005), pp. 139-146.

Sadras, V. O. 2006. The N:P stoichiometry of cereal, grain legume and oilseedcrops. *Field Crops Res.* 95, 13–29.

Sahrawat, K. L. 2000. Macro and micronutrients removed by upland and lowland rice cultivars in West Africa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31 (2000), pp. 717-723.

Ryan MH, Angus JF (2003) Arbuscular mycorrhizas in wheat and field pea crops on a low P soil: increased Zn-uptake but no increase in P-uptake or yield. *Plant Soil* 250:225–239.

Salvagiotti F, Cassman K G, Specht J E, Walters D T, Weiss A and Dobermann A 2008 Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research* 108, 1-13.

Salvagiotti F, Cassman KG, Specht JE, Walters DT, Weiss A, Dobermann A .2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review. *Field Crop Res.* 108 1-13.

Salvagiotti F, Specht JE, Cassman KG, Walters DT, Weiss A, Dobermann A (2009) Growth and nitrogen fixation in high-yielding soybean: impact of nitrogen fertilization. *Agron J* 101:958–970.

Salvagiotti F. 2013. ¿Cómo podemos aumentar los rendimientos de soja? La visión desde la nutrición. En: Garcia F, Correndo A (Eds.) *Simposio Fertilidad 2013 IPNI*. pp. 44-50.

Salvagiotti, F. & Miralles, D.J. 2007. Wheat development as affected by nitrogen and sulfur metabolism of sulfate. *Ann. Rev. Plant Physiol* 24, 381-414.

Salvagiotti, F. 2004. Interacciones nitrógeno x azufre en el crecimiento y determinación del rendimiento en trigo (*Triticum aestivum* L) Relación con el diagnóstico de la fertilización nitrogenada. Tesis. UBA.FA, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados, Magister Scientiae área Producción Vegetal, Maestría en Producción Vegetal; Producción Vegetal, 2004.

Salvagiotti, F., Castellarin, J.M., Miralles, D.J., Pedrol, H.M., 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research* 113, 170- 177.

Salvagiotti, F., Gerster, G., Bacigaluppo, S., Castellarin, J., Galarza, C., Gonzalez, N., Gudelj, V., Novello, O., Pedrol, H., Vallone, P., 2004. Residual and fresh effects of phosphorus and sulphur on soybean following wheat. *Ciencia. Suelo* 22, 92–101.

Salvagiotti, F; Gutierrez Boem F; Ferraris, G; Prystupa, P; Couretot, L; Dignani, D. 2005. Respuesta del maíz a dosis crecientes de azufre y su relación con variables del suelo. Para Mejorar la Producción N° 29. EEA INTA Oliveros.

Salvagiotti, F., Castellarin, J.M, Miralles, D. J., Pedrol, H. M. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Res.*, 113 (2009), pp. 170-177.

Salvagiotti F, Ferraguti F, Enrico J, Prieto G. (2014) Respuesta a nitrógeno en maíz de fecha tardía según cultivo antecesor. Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión de Materia Orgánica y Sustancias Húmicas. Bahía Blanca, Argentina.

Salvagiotti, F; P. Prystupa; G. Ferraris, L. Couretot, L. Magnano, D. Dignani, F.H. Gutiérrez-Boem. 2017. N:P:S stoichiometry in grains and physiological attributes associated with grain yield in maize as affected by phosphorus and sulfur nutrition *Field Crop Res* 203 (2017), pp. 128-133.

Sandaña, P., Calderini, D.F. 2012. Comparative assessment of the critical period for grain yield determination of narrow-leafed lupin and pea. *European Journal of Agronomy* 40, 94–101.

Sandaña, P., Pinochet D. 2014. Grain yield and phosphorus use efficiency of wheat and pea in a high yielding environment. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 14 (4) 973-986.

Sandaña, P., Ramírez, M., Pinochet, D. 2012. Radiation interception and radiation use efficiency of wheat and pea under different P availabilities. *Field Crops Res.* 127, 44–50.

Sandström B. 1997. Bioavailability of zinc. *Eur J Clin Nutr* 51 :S17– S19.  
sativum sp. Arvense L.). *J. Anim. Vet. Adv.* 2009;8(2):301-304.

Sattari S Z, van Ittersum M K, Bouwman A F, Smit A L and Janssen B H 2014 Crop yield response to soil fertility and N, P, K inputs in different environments: testing and improving the QUEFTS model *Field Crop. Res.* 157 35–46.

Senasa. 2018. En <https://www.argentina.gob.ar/senasa/exportaciones-importaciones-estadisticas-y-relaciones-internacionales>.

Senigagliesi C., R. García y M.L. de Galetto. 1984. evaluación de la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada y fosfatada en el área centro-norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. III Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino.

Setiyono, T., D., Walters, D.T., Cassman, K.G., Witt, C., Dobermann, A. 2010. Estimating the nutrient uptake requirements of maize. *Field Crops Res.* 118 (158-168).

Shukla SK, Warsi AS. 2000. Effect of sulphur and micronutrients on growth, nutrient content and yield of wheat (*Triticum aestivum* L). *Ind J Agric Res* 34: 203– 5.

Sims JT, Pierzynski GM: Chemistry of phosphorus in soil. In *Chemical processes in soil*, SSSA book series 8. Edited by: Tabatabai AM, Sparks DL. Madison: SSSA; 2005:151-192.

Singh, K. K., Srinivasarao, C. and Ali, M. 2005. Root growth, nodulation, grain yield, and phosphorus use efficiency of lentil as influenced by phosphorus, irrigation, and inoculation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36: 1919–1929.

Slafer G, Araus JL, Richards RA. 1999. Physiological traits that increase the yield potential of wheat. In: Satorre EH, Slafer GA, eds. *Wheat. Ecology and physiology of yield determination*. New York: Food Products Press, 379±415.

Slafer GA, Andrade FH (1993) Physiological attributes related to the generation of grain yield in bread wheat cultivars released at different eras. *Field Crops Research* 31,351-367.

Smaling, E.; Janssen, B; 1993. Calibration of QUEFTS : a model predicting nutrient uptake and yields from chemical soil fertility indices. *Geoderma* 59. 21-44.

Snyder, C.S. and Bruulsema, T.W. (2007) *Nutrient Use Efficiency and Effectiveness in North America. Indices of Agronomic and Environmental Benefits*. IPNI publication Ref. # 07076, International Plant Nutrient Institute.

Srivastava, T. K., Ahlawat, R. P. 1995. Response of pea (*Pisum sativum*) to phosphorus, molybdenum and biofertilizers. *Ind. J. Agron.*, 40 (1995), pp. 630-635.

Statistics Canada. 2016. Canada National Statistical Agency. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/en/type/data?MM=1>.

Steet, J.A. Tong, C.H. 1996. Degradation kinetics of green color and chlorophyll in peas by colorimeter and HPLC. *J Food Sci* 61:924-7.

Tamagno, S., G.R. Balboa, Y. Assefa, P. Kovács, S.N. Casteel, F. Salvagiotti, F.O. García, W.M. Stewart, I.A. Ciampitti, 2017. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: a synthesis-analysis. *Field Crops Res.*, 200 (2017), pp. 18-27.

Tanno H, Komaki Y, Gotoh K. 1985. The effectiveness of selection based on harvest index in spring wheat. *Memoirs of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Japan* 14: 352±356.

Togay N., Togay Y., Cimrin K. M., Turan M. 2008. Effect of Rhizobium inoculation, sulfur and phosphorus application on yield, yield components and nutrient uptake in chick pea (*Cicer arietinum* L.). *African Journal of Biotechnology*. Vol. 7(6): 776- 782.

Torres Duggan, M.; M.B. Rodríguez; R.S. Lavado Y R. Melgar. 2010. Eficiencia agronómica del azufre elemental relativa a una fuente azufrada soluble en trigo en la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo*, 28: 67-77.

Turc, O; Lecoœur, J. 1997. Leaf primordium initiation and expanded leaf production are co-ordinated through similar response to air temperature in pea (*Pisum sativum* L.) *Annals of Botany* 80: 265-273.

Turuko, M. and Mohammed, A. 2014 Effect of Different Phosphorus Fertilizer Rates on Growth, Dry Matter Yield and Yield Components of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *World Journal of Agricultural Research*, 2, 88-92.

Van Duivenbooden, N., Wit, C.T., Van Keulen, H., 1996. Nitrogen, phosphorus and potassium relations in five major cereals reviewed in respect to fertilizer recommendations using simulation modelling. *Fertilizer Research* 44, 37-49.

Van Lierop, W. 1988. Determination of available phosphorus in acid and calcareous soils with the Kelowna multiple-element extractant. *Soil Sci.* 146(4): 284-291.

Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL (2003) Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist* 157, 423–447.

Vita Larrieu, E; Prieto, G 2018. Relevamiento de cultivos de invierno campana 2018 2019 en el sudeste de Santa Fe y nordeste de Buenos Aires. En [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_-\\_relevamiento\\_de\\_cultivos\\_de\\_invierno\\_campana\\_2018.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_-_relevamiento_de_cultivos_de_invierno_campana_2018.pdf).

Vivas, H. N. Vera Candiotti; R. Albrecht; J. Hotian. 2009. Fósforo y azufre sobre soja de primera en rotación con gramíneas. Región Central de santa Fe. Serie Para Mejorar la Producción N° 42. Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros. Centro Regional santa Fe.

Vivas, H.; R. Albrecht; N. Vera Candiotti J. Hotian. 2008. Fertilización combianda de fósforo y azufre en una secuencia de cultivos. Región Central de santa Fe. Serie Para Mejorar la Producción N° 39. Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros. Centro Regional santa Fe.

Welch, L. F. and Flannery, R. L. 1985. "Potassium nutrition of corn". In *Potassium in Agriculture*, Edited by: Munson, R. D. Madison, WI: Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. of Am., and Soil Sci. Soc. Am.

Welch, R.M., Graham, R.D. 2004. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *J Exp Bot* 55:353–364.

Wen, G., C. Chen, K. Neill, D. Wichman, and G. Jackson. 2008. Yield response of pea, lentil and chickpea to phosphorus addition in a clay loam soil of central Montana. *Arch. Agron. Soil Sci.* 54(1):69–82. doi:10.1080/03650340701614239.

White, P.J., Broadley, M. R., 2005. Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends in Plant Science* 10, 586-593.

Witt C, Dobermann, A. 2004. Toward a decision support system for site-specific nutrient management In: Dobermann A, Witt C, Dawe D (eds) Increasing productivity of intensive rice systems through site-specific nutrient management. Science Publishers Inc., Enfield, NH, USA and International Rice Research Institute (IRRI), Metro Manila, Philippines, pp 359–395.

Witt, C.; A. Dobermann, S. Abdulrachman, H. Gines, Wang Guanghuo, R. Nagarajane, S. Satawatananont, TranThuc Son Pham Sy Tan, Levan Tiem, G.C.Simbahan, D.C.Olka. 1999. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. *Field Crops Research*, 63, 113-138.

Yemane, A. and Skjelvag, A.O. (2003). Effect of fertilizer phosphorus on yield traits of Dekoko (*Pisum sativum* var. Abyssinicum) under field conditions. *J. Agron. Crop Sci.*, 189: 14-20.

Zhao, F.J., Wood, A.P., McGrath, S.P. 1999. Effects of sulphur nutrition on growth and nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil* 212: 209–219.