



**UNIVERSIDAD DE TALCA FACULTAD
DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA
DE AGRONOMÍA**

EVALUACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE FÓSFORO EN LENTEJA Y TRIGO

MEMORIA DE TÍTULO

FLORENCIA XIMENA DONOSO MORALES

TALCA, CHILE

2019



**UNIVERSIDAD DE TALCA FACULTAD
DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA
DE AGRONOMÍA**

EVALUACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE FÓSFORO EN LENTEJA Y TRIGO

Por

FLORENCIA XIMENA DONOSO MORALES

MEMORIA DE TÍTULO

presentada a la Universidad de Talca como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERA AGRÓNOMA

TALCA 2019

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Talca, 2020

Ricardo Cabeza

Profesor Guía: Ing. Agr. Dr. Ricardo Cabeza Pérez.

Escuela de Agronomía
Facultad de Ciencias Agrarias

Ana María Méndez Espinoza

Profesora Guía: Ing. Agr. M. Sc., Dra. Ana María Méndez Espinoza.

Centro de Mejoramiento Genético y Fenómica Vegetal
Escuela de Agronomía
Facultad de Ciencias Agrarias

Fecha de presentación de Memoria de Título: 4 de octubre 2019

AGRADECIMIENTOS

Sin duda ha sido un trabajo que ha marcado mi vida universitaria, con muchas inquietudes y temores que gracias a mis profesores Ricardo Cabeza y Ana María Méndez he podido resolver y lograr convertirlas en certezas. Agradezco al laboratorio de fenómica por recibirme y ayudarme resolviendo dudas y dedicando tiempo a eso, al laboratorio de suelos por el tiempo dedicado a examinar muestras y también a resolver problemas que fueron surgiendo.

Sería ingrato no agradecer a aquellos que me acompañaron durante este proceso ya sea dando ánimos, revisando, leyendo, o escuchándome simplemente, especialmente a mi mamá, hermanos y sobrinos, a mi pololo y a mis compañeros de universidad que tras los años se transformaron en grandes amigos.

Dedicada a Jaime Donoso González, mi papá, que, sin estar, lo encuentro en todas partes.

RESUMEN

El fósforo (P) es un nutriente esencial, indispensable para que una planta complete su ciclo de vida. El P participa en reacciones de almacenamiento y transferencia de energía, y mantiene la integridad estructural de las membranas. Además, es un componente básico en macromoléculas como los fosfolípidos y los ácidos nucleicos. En las plantas, la absorción de este nutriente ocurre a nivel radicular, donde la morfología de la raíz influye en la cantidad y eficacia con que el nutriente es absorbido. Además de la morfología de la planta, otro factor que afecta su absorción es el influjo, que es la cantidad de nutriente absorbido por unidad de raíz y tiempo. Las propiedades del suelo también juegan un factor clave en la eficiencia de absorción de un nutriente, y en el caso del P, estas propiedades se reúnen en el concepto de capacidad tampón.

El trigo (*Triticum aestivum*) y la lenteja (*Lens culinaris*) son cultivos de gran importancia nutricional a nivel mundial y por consecuencia, nacional. En el estudio realizado se buscó analizar si la eficiencia de absorción de P en lenteja es mayor o menor a la de trigo. Para esto, se realizó un experimento con plantas de lenteja y trigo creciendo en dos niveles de P en el suelo. Posteriormente, se cosecharon en dos tiempos distintos y se midió la cantidad de materia seca producida, el largo de raíz y la absorción de P en ambas plantas.

Los resultados indican que la lenteja absorbe P más eficientemente que el trigo cuando la concentración del nutriente es mayor y en estados de desarrollo más tempranos, debido a la morfología de la planta, su influjo, y la alta relación raíz/parte aérea. Sin embargo, aunque las plantas de lentejas fueron más eficientes absorbiendo P, las plantas de trigo acumularon más P que las plantas de lentejas. Esto se debió a una mayor cantidad de materia seca desarrollada por las plantas de trigo.

Palabras claves: Absorción de P, concentraciones de P, lenteja, trigo.

ABSTRACT

Phosphorus (P) is essential for plant growth. P is the main component of molecules involved in energy transfer and those that carry the genetic code. Furthermore, it maintains the structural integrity of the membranes and is involved in photosynthesis and sugar transport. As In plants, P uptake occurs at root level, where the root morphology (central axis or fibrous) plays an important role in the nutrient uptake, in terms of quantity and efficiency. Besides root morphology, the amount of nutrient uptake is affected by the absorption rate, i.e. the amount of nutrient absorbed per unit of root in a specific period. Soil properties also play a key role in determining the efficiency of nutrient uptake. In the specific case of P, such soil properties that restrict the P availability are part of the soil buffer capacity concept.

Wheat (*Triticum aestivum*) and lentil (*Lens culinaris*) are crops of great nutritional importance worldwide. The aim of the current study was to determine if the P uptake efficiency in lentil was greater than in wheat. To reach this goal, an experiment with lentil and wheat in pots was carried out at two levels of soil P. Subsequently, plants were harvested in two different opportunities to measure dry matter production, root length and P uptake of both crops. Furthermore, root length was measured, and P influx calculated.

The results showed that lentil P uptake was more efficient than wheat when soil P concentration was higher, that was evident for earlier stages of development. However, even if lentil plants were more efficient taking up P, wheat plants absorbed more P than lentil plants. This was due to a higher amount of dry matter developed by wheat plants.

Keywords: P uptake, plant P concentration, lentil, wheat.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Hipótesis.....	2
1.2	Objetivo general.....	2
1.3	Objetivos específicos.....	2
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Trigo.....	3
2.1.1	Origen.....	3
2.1.2	Descripción de la planta.....	3
2.1.3	Producción nacional de trigo.....	4
2.2	Lenteja.....	4
2.2.1	Origen de la lenteja.....	4
2.2.2	Descripción del cultivo de la lenteja.....	5
2.2.2	Producción nacional de lenteja.....	5
2.3	Sistema radical de gramíneas y leguminosas.....	6
2.4	Importancia del fósforo (P) en los cultivos.....	7
2.5	Absorción de P en distintos cultivos.....	8
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
3.1	Ubicación del estudio.....	9
3.2	Material Vegetal.....	9
3.3	Establecimiento del ensayo/cultivo.....	9
3.1	Diseño experimental.....	10
3.2	Evaluaciones.....	10
3.3	Análisis estadístico.....	12

4	RESULTADOS.....	13
4.1	Primera cosecha.....	13
4.2	Segunda cosecha.....	14
4.3	Materia seca aérea producida por planta.....	15
4.4	Materia seca radical producida por planta.....	16
4.5	Concentración de P en la materia seca aérea.....	17
4.6	P absorbido por unidad de raíz.....	18
4.7	Uso eficiente del P absorbido.....	19
5	DISCUSIÓN.....	20
6	CONCLUSIÓN.....	23
7	BIBLIOGRAFIA.....	24
8	ANEXO.....	29

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Resultados de análisis de materia seca aérea, materia seca radical, largo de raíz, concentración de fósforo en la parte aérea y el fósforo absorbido por unidad de raíz obtenidos en la primera cosecha.....13

Cuadro 2: Resultados de análisis de materia seca aérea, materia seca radical, largo de raíz, concentración de fósforo en la parte aérea y el fósforo absorbido por unidad de raíz obtenidos la segunda cosecha.....14

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Producción total de materia seca aérea (MSa) por planta para lenteja y trigo en dos niveles de P para la primera y segunda cosecha.....	15
Figura 2: Producción total de materia seca radical (MS r) para lenteja y trigo creciendo en dos niveles de P para la primera y segunda cosecha.....	16
Figura 3: Concentración de P en la parte aérea para trigo y lenteja creciendo en dos niveles de P en el suelo para la primera y segunda cosecha.....	17
Figura 4: P absorbido por unidad de raíz para trigo (T) y lenteja (L), creciendo en distintos niveles de P en la primera y segunda cosecha.....	18
Figura 5: Eficiencia de la absorción de P por unidad de raíz para trigo y lenteja, con distintos niveles de P en la primera y segunda cosecha.....	19

1 INTRODUCCIÓN

Las plantas necesitan elementos esenciales para completar su ciclo de desarrollo. Se define como nutriente esencial a aquel elemento que en ausencia impide a la planta completar sus etapas vegetativas o reproductivas y cuya deficiencia solo puede ser corregida mediante el suministro de aquel elemento (Arnon y Stout, 1939). Además, un nutriente esencial cumple un rol fisiológico específico en la planta. Entre estos elementos se encuentra el nitrógeno (N), el potasio (K) y el fósforo (P). Este último es importante ya que es un constituyente fundamental en las moléculas de almacenamiento y transferencia de energía y en aquellas que contienen el código genético. Además, el P es parte estructural de las membranas biológicas y en las plantas es esencial para el ciclo de Calvin-Benson que resulta en la asimilación del CO₂ de la atmósfera (Taiz y Zeiger, 2006).

Por otra parte, la absorción de los nutrientes por las plantas depende en primer lugar del tipo de planta y de las propiedades intrínsecas del suelo. El tipo de planta determina el tamaño del sistema radical y el influjo del nutriente, es decir, la cantidad de nutriente absorbido por unidad de raíz en un tiempo determinado. Es por esto que las plantas difieren en la cantidad de nutrientes que pueden absorber, incluso a igual nivel de disponibilidad de un nutriente en el suelo (de Willigen y van Noordwijk, 1987). Las propiedades del suelo que están relacionadas con la absorción de P se pueden resumir en el concepto de capacidad tampón (CT). La CT es la resistencia que ejerce el suelo ante el cambio de la concentración del P en la solución del suelo, ya sea ante una adición de P o ante la absorción de este por las plantas (Jungk, 2001).

Un sistema radical extenso, y una gran afinidad para absorber el nutriente permite a la planta obtener el P desde el suelo de una manera más eficiente. Las leguminosas, en general, poseen un sistema radical menor que el de las gramíneas, sin embargo, la concentración de P en la parte aérea es mayor (0,2%), comparada con el trigo (0,12%) (Reuter y Robinson, 1986). Dicho esto, si el sistema radical de las leguminosas es menor que el de las gramíneas, pero la concentración de P en la parte aérea es mayor, sugiere que las leguminosas tienen una alta eficiencia para absorber P, es decir un alto influjo (Föhse, 1991).

El sistema radical de las leguminosas es pivotante, presenta una raíz principal con numerosos pelos radicales y se ha demostrado que estos contribuyen al 90 % de la absorción de P, debido, por un lado, a que abarcan mayor área y por otro, a su pequeño radio junto al crecimiento perpendicular con el eje de la raíz. Las gramíneas, en cambio, poseen un sistema radical fibroso formado por raíces adventicias (Föhse, 1991).

Para evaluar cuál de los dos grupos de plantas (leguminosas y gramíneas) posee la mejor eficiencia de absorción de P, se realizó un experimento con dos niveles de P en el suelo y se determinó el crecimiento y absorción de P para lenteja y trigo panadero. A continuación, se plantea la hipótesis y objetivos del presente estudio:

1.1 **Hipótesis**

La eficiencia en la absorción de fósforo (P) en leguminosas como la lenteja es mayor que en gramíneas como el trigo, así como el uso interno del P.

1.2 **Objetivo general**

Evaluar la absorción de P en lenteja (*Lens culinaris* Medik.) y trigo (*Triticum aestivum* L.).

1.3 **Objetivos específicos**

1. Determinar el crecimiento específico de lenteja y trigo.
2. Evaluar la absorción de P para lenteja y trigo.
3. Determinar el influjo de P en lenteja y trigo.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Trigo

2.1.1 Origen

El origen del trigo se encuentra en Asia, en la región de Mesopotamia, entre los ríos Tigris y Éufrates (Mellado 1984). Su nombre, *triticum*, proveniente del latín, quiere decir quebrado, triturado o trillado, y es referente al trabajo que se realiza para separar el grano de la cascarilla que lo recubre (Faiguenbaum, 1988). Su fruto es una cariósida, de carácter indehiscente, contiene una sola semilla y en el cual las paredes del ovario (pericarpio) y la testa están unidas de tal manera que son inseparables (Schilling y Sierra, 1973).

El trigo es una planta de carácter anual, perteneciente a la familia de las gramíneas, y está representado por dos especies monocotiledóneas; la más importante, *Triticum aestivum* L., corresponde al trigo harinero, utilizado en la producción de harina para pan, galletas y repostería. La segunda especie, *Triticum turgidum* L. corresponde al trigo duro o candeal y es destinado a la obtención de semolina para la fabricación de fideos y pastas (Mellado, 1984).

2.1.2 Descripción de la planta

El trigo es un cultivo herbáceo anual, que puede alcanzar hasta 1,2 m de altura. El tallo es hueco, excepto en los nudos y el crecimiento se produce por el estiramiento de los tejidos por encima del nudo (meristema). Al igual que el resto de las gramíneas, las hojas del trigo son de forma alargada y presenta dos partes: una vaina que rodea el peciolo y protege el meristema, y; el limbo, con nervios paralelos que dan la forma característica de la hoja, las cuales nacen desde los nudos. La flor se reúne en espigas con un eje principal (raquis) en el que se distribuyen las espiguillas (Faiguenbaum, 1990).

Para que el trigo desarrolle correctamente su sistema radicular, es necesario tener suelos profundos, la temperatura debe oscilar idealmente entre 10 y 24°C (Bayer, 2012). Sin embargo, es más importante la acumulación de grados día, o integral térmica, que va definiendo las etapas

fenológicas. Los grados día necesarios para el cambio en las diferentes etapas de desarrollo, pueden variar dependiendo de la variedad.

2.1.3 Producción nacional de trigo

El trigo es el cereal con mayor superficie en Chile. Durante la temporada 2017-2018, la superficie nacional de trigo fue de 236 mil hectáreas, aumentando un 5,1% con respecto a la temporada anterior. Además del aumento de superficie, hubo un incremento en el rendimiento, alcanzando un total de 1,47 millones de toneladas en la temporada. El maíz sigue al trigo en cuanto a superficie, alcanzando un total de 81,6 mil hectáreas (ODEPA, 2019).

Por otra parte, el trigo tiene una gran importancia socioeconómica, ya que es cultivado en su mayoría por pequeños productores y es utilizado en la elaboración del pan, que es el principal alimento masivo en nuestro país. La producción de trigo en los últimos 20 años ha disminuido a nivel nacional de aproximadamente 370 mil ha a aproximadamente las 236 mil ha que hay actualmente, sin embargo, su consumo no ha presentado mayores variaciones, incluso ha crecido un 1%. La menor producción interna ha hecho que aumenten las importaciones a una tasa que es relativamente alta, para compensar la demanda (COTRISA, 2018).

2.2 Lenteja

2.2.1 Origen de la lenteja

El origen de este cultivo está ubicado en Asia Central, comprende el noroeste de la India (Punjab, provincias de la frontera noroeste y Kashmir), Afganistán, Tadjikistán, Uzbekistán y Tian-Shan occidental (Hernández, 1986). Según restos arqueológicos, la lenteja, junto a otros cultivos como el trigo y la cebada, fueron las primeras especies que se comenzaron a cultivar (Lev-Yadun *et al.*, 2000).

La lenteja se ha convertido en un cultivo de gran interés porque es un alimento rico en proteínas y alto contenido en hierro (Fe) (Rebello *et al.*, 2014). Hoy es cultivada en la mayoría de las regiones subtropicales y templadas del mundo, que incluyen a Chile y Argentina. Al ser un alimento tan consumido a nivel mundial, la lenteja ha sido modificada a nivel de germoplasma para adaptarse a distintas condiciones de estrés. Por ejemplo, en Aleppo, Siria, el cultivo está

adaptado a inviernos muy fríos, con temperaturas bajo los 0°C y veranos cálidos. En Valencia, España, el cultivo está adaptado a veranos largos y calurosos e inviernos templados (Gorim *et al.*, 2017). Actualmente la lenteja se cultiva en nuestro país principalmente en la VII y VIII región por pequeños agricultores, en suelos en condiciones de secano y en rotación con cereal, que puede ser avena o trigo (Baginsky y Ramos 2018; Tay *et al.*, 2000).

El mayor productor de lenteja en el mundo es Canadá, y su producción está principalmente enfocada al mercado externo. En este país, el cultivo de la lenteja está mecanizado y contempla el uso de insumos agrícolas y poca mano de obra. Además, existe gran apoyo gubernamental a la producción de lenteja, con la implementación de políticas que favorecen la investigación, el desarrollo de mercados y el desarrollo de nuevas variedades (De La Tejera *et al.*, 2001).

2.2.2 Descripción del cultivo de la lenteja

Las plantas de lentejas presentan un crecimiento indeterminado, alcanzando una altura de 30 a 50 cm, flores de color blanco, generalmente se desarrolla una vaina por pedúnculo, y en promedio un grano por vaina; la vaina es de color verde claro a gris. El peso de las 100 semillas es de 8 g (INIA, 2006).

Las condiciones de suelo son importantes para el desarrollo de la lenteja. Así, el pH es un factor limitante para su cultivo, siendo el óptimo entre 5,8 y 7,0. Si el pH del suelo es bajo se debe corregir con enmiendas calcáreas. Debido a la capacidad de la lenteja de fijar biológicamente nitrógeno (N₂) atmosférico, en general, sólo se recomienda la aplicación de fertilizantes fosfatados (INIA, 2015), si el análisis de suelo así lo determina.

La lenteja se puede sembrar en invierno (abril-mayo) en zonas de loma, siempre que las condiciones climáticas lo permitan, lo ideal es sembrarla lo más temprano posible y con semillas desinfectadas para evitar el ataque de hongos y prevenir enfermedades en los primeros estados de desarrollo de la planta. En primavera (septiembre en adelante) se puede sembrar en zonas de vega, igualmente, dependiendo de las condiciones climáticas (INIA, 2015).

2.2.2 Producción nacional de lenteja

En Chile, entre los años 1985 y 2000, hubo una fuerte caída en la siembra de lentejas. Posterior a esto, la superficie se ha mantenido en cerca de mil a mil doscientas hectáreas. La

producción de lenteja generó un rendimiento máximo de 1.063 toneladas a nivel país el año 2013, con un rendimiento promedio de 8,8 quintales por hectárea, considerando una superficie sembrada de cerca de 1.200 ha (INDAP, 2017).

Según ODEPA (2017), actualmente la producción del cultivo de lenteja está centrada principalmente en áreas pequeñas a cargo de la agricultura familiar campesina (AFC). La zona de producción se ubica principalmente entre la VII y VIII región, destinando el producto al consumo interno. La lenteja representa un 3,37% de la producción total de legumbres, encontrándose en la cuarta posición. En primer lugar, está el lupino, seguido del poroto y la arveja.

La comuna de Chanco, ubicada en la costa de la VII región, es uno de los sectores identificados para la producción de lenteja, bajo la tecnología difundida por INIA. Los turistas que llegan al sector consumen gran cantidad de la oferta, alrededor del 70% del volumen de producción (ODEPA, 2003). Sin embargo, las posibilidades de expansión de este cultivo en dicha localidad, está limitada por el volumen de demanda local que se produce en determinadas épocas del año y a futuro, por la disponibilidad de agua.

La producción nacional se complementa con la importación, la cual entre 2008 y 2014, fue principalmente desde Canadá (96%), Argentina (2%) y EEUU (1%). Chile importa un total de 15,769 toneladas cada año con un valor de US\$824/ton (Faúndez, 2017).

2.3 Sistema radical de gramíneas y leguminosas

Las raíces cumplen tres funciones fundamentales para el desarrollo de las plantas; 1) anclaje; 2) absorción y translocación de agua y nutrientes y; 3) síntesis de fitohormonas y otros compuestos orgánicos (Miranda, 2004). La capacidad que tienen las raíces para explorar el suelo está dada por las características morfológicas de cada especie, lo cual es controlado genéticamente y también depende del ambiente en que las raíces se desarrollan (Miranda, 2004).

Según Keppler y Rickman (1990) las raíces se pueden clasificar según su longevidad: raíces viejas o nuevas; y según su tipo: raíces seminales o definitivas. Sin embargo, es necesario tener más detalle de la forma que presentan, por lo que un sistema descriptivo según la morfología es útil, como por ejemplo la siguiente descripción:

1.- Un sistema dominado por una raíz y ejes laterales, presentando dominancia en el crecimiento descendente de la raíz principal.

2.- Sistema de raíces de primer orden laterales, que pueden ser horizontales o verticales dependiendo de su tratamiento.

3.- Un sistema de raíces de segundo orden y otros órdenes laterales.

El sistema radical del trigo (*Triticum aestivum*), comienza su desarrollo durante la germinación, momento en el cual se desarrolla la radícula y las raíces seminales que dejan de crecer cuando la planta alcanza el estado de tres a cuatro hojas, perdiendo importancia y dando paso a las raíces principales, éstas se desarrollan a partir de la corona ubicada en el sub-nudo que corresponde a la unión del mesocótilo con el coleóptilo, estas raíces son las que le dan el crecimiento a la planta (Miranda, 2004). Las raíces principales se concentran en los primeros 20 a 30 cm, si no se presentan condiciones limitantes, la raíz puede llegar a alcanzar 1 metro de profundidad (Miranda 2004).

En leguminosas, a pocos días de la emergencia de la radícula, se puede observar la aparición de raíces secundarias, que se desarrollan generalmente en la parte superior o cuello de la raíz principal, se encuentran en disposición de corona y tienen un diámetro ligeramente menor al de la raíz principal. Más tarde, y más abajo, aparecen más raíces secundarias, y sobre ellas se desarrollan las raíces terciarias y pelos absorbentes, que se encuentran en todos los puntos de crecimiento de la raíz. En general, las raíces son superficiales, y se encuentran en los primeros 20 cm de profundidad (Debouck e Hidalgo, 1985).

2.4 Importancia del fósforo (P) en los cultivos

Las principales funciones del P para el desarrollo de la planta son: aporte de energía durante la fotosíntesis y el transporte de carbohidratos; es un elemento fundamental en la división celular; facilita el crecimiento y la formación de raíces; estimula el desarrollo de las semillas y es un regulador para todos los ciclos vitales de la planta. Su carencia se manifiesta por retraso en la maduración y baja producción de frutos y semillas. Su exceso en el suelo puede llegar a provocar una disminución de la disponibilidad de cinc (Zn), inhibiendo su absorción (Fernández, 2007).

Para fertilizar con P, se debe considerar el aporte del elemento desde el suelo (suministro de P). Además, se debe tener en cuenta la capacidad de adsorción de P del suelo, la cual afecta la eficiencia de fertilización. También se considera la capacidad de absorción de P del cultivo, el historial de manejo de la fertilización y las características edafoclimáticas del lugar en el que se está desarrollando el cultivo. Teniendo estos antecedentes, se puede tomar la decisión de realizar fertilizaciones de corrección y de mantención (INIA, 2018).

2.5 Absorción de P en distintos cultivos

La tasa de absorción de un nutriente depende de cada especie y variedad, de las condiciones ambientales y del órgano de la planta que se analice. Las raíces toman el P desde la solución del suelo en donde el elemento se encuentra como H_2PO_4 y HPO_4^{2-} , la predominancia de una u otra forma depende del pH del suelo (Moron, 1992). Generalmente, la disponibilidad de P para los cultivos es menor a la que estos requieren, es decir, la concentración de P disponible en el suelo se torna un factor limitante en el proceso de absorción, por lo tanto, es necesaria la reposición mediante fertilización (Moron, 1992).

En el suelo, los compuestos fosfatados generalmente tienen baja solubilidad, comparado con aniones como SO_4^{2-} o NO_3^- . Sin embargo, es un elemento relativamente estable en el suelo, y las pérdidas por lixiviación son mínimas, mientras que no hay pérdidas por volatilización. Al ser un elemento estable en el suelo y de baja solubilidad, este es deficiente para las plantas (Ferrando, 2013).

La absorción de P en un cultivo depende de la producción de materia seca y de la concentración del elemento en ella. A partir de ese parámetro, se puede obtener la cantidad de P extraído por el cultivo. Egle *et al.*, (1999) midieron la absorción de P en tres estados de desarrollo del trigo (macollaje a antesis, en antesis y a madurez), dando como resultado que todas las variedades estudiadas presentan un aumento considerable en la absorción de P en el tiempo (Gómez, 2006).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del estudio

Este estudio se desarrolló en los invernaderos del Centro de Mejoramiento Genético y Fenómica Vegetal, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Talca. Las primeras mediciones se realizaron en el laboratorio de Fenómica. Los análisis foliares y de suelo se realizaron en el Centro Tecnológico de Suelos y Cultivos (CTSyC). Todas las instalaciones se encuentran ubicadas en la Universidad de Talca, campus Talca.

3.2 Material Vegetal

Se utilizaron semillas de trigo (*Triticum aestivum*) variedad Pandora caracterizadas por ser resistentes a la tendadura y desgrane y con una moderada susceptibilidad a la roya estriada (*Puccinia triticina*) y a la de la caña (*Puccinia graminis*), además, de una moderada resistencia al oídio (*Blumeria graminis*) (INIA, 2003). Las semillas de lenteja (*Lens culinaris*) usadas corresponden a la variedad Calpún, que actualmente es la primera variedad de lenteja de grano grande con resistencia a roya (*Uromyces fabae*) (Tay et al., 2007).

3.3 Establecimiento del ensayo/cultivo

Las semillas fueron sembradas en macetas, durante el mes de octubre de 2018, en suelo de origen volcánico (Trumao), perteneciente a la serie Bramadero, que se extiende por el área pre-Andina de las provincias de Talca y Linares, con características generales de color gris oscuro, textura franco-limosa y rico en materia orgánica (IREN-CORFO, 1964). El suelo fue recolectado en la zona de Bramadero, en la comuna de San Clemente, VII Región del Maule. Se utilizaron 32 macetas de un volumen de 458 cm³, las cuales fueron llenadas con 700 g de suelo y 30 g de arena. Se adicionó 1 g de N en forma de urea (2,17 g de urea).

3.1 Diseño experimental

Fueron diseñados dos experimentos, uno para evaluar el efecto de la fertilización con P en etapas tempranas del crecimiento y el otro para una etapa más avanzada. Estos se realizaron con un diseño completamente al azar con arreglo multifactorial, donde los factores correspondieron a la concentración de P en el suelo y a la especie. Para el establecimiento de los ensayos se dispusieron 4 tratamientos con 8 repeticiones cada uno y 4 plantas en cada maceta:

Tratamiento 1. Trigo con baja concentración de P.

Tratamiento 2. Lenteja con baja concentración de P.

Tratamiento 3. Trigo con alta concentración de P.

Tratamiento 4. Lenteja con alta concentración de P.

A 16 macetas se aplicó P en forma de superfosfato triple (SFT), correspondiente a 175 mg de SFT por maceta y en las otras 16 macetas fue aplicada una cantidad de P en forma de SFT de 700 mg. Con cada maceta establecida, se procedió a la siembra, las 16 macetas con la menor concentración de P, se dividieron en 2 grupos, y en 8 de ellas se sembraron 10 semillas de trigo, y a las otras 8 macetas se sembró 10 semillas de lenteja, con las macetas que tenían mayor concentración de P, se realizó el mismo procedimiento. La siembra se realizó la segunda semana de octubre de 2018.

Las macetas se regaron día por medio hasta llegar a un peso de 1000 g, correspondiente a la capacidad de campo, con una solución nutritiva sin N ni P, con la siguiente composición: K_2SO_4 0,7 mM; $MgSO_4$ 0,5 mM; $CaCl_2$ 0,8 mM; y micronutrientes: H_3BO_3 4,0 μM ; Na_2MoO_4 0,1 μM ; $ZnSO_4$ 1,0 μM ; $MnCl_2$ 2,0 μM ; $CoCl_2$ 0,2 μM ; $CuCl_2$ 1.0 μM ; y FeNaEDTA 30 μM .

3.2 Evaluaciones

A los 15 días después de la siembra, se realizó un raleo para dejar las plantas más vigorosas en cada maceta, con una población de 4 plantas en cada una de ellas. El riego continuó con la misma frecuencia y metodología. Se realizaron dos cosechas durante el desarrollo del experimento. La primera cosecha se realizó a los 41 días después de siembra (DDS) cuando el

estado fenológico del trigo estaba en fase vegetativa, con 3 nudos. En el caso de la lenteja, esta también se encontraba en fase vegetativa, en etapa de despliegue de hojas. La segunda cosecha fue hecha a los 56 DDS. Al momento de esta cosecha, el trigo se encontraba en el inicio de la fase reproductiva, en estado de bota, mientras que la lenteja también en fase reproductiva, con las primeras yemas florales.

Tanto para la primera como segunda cosecha, se tomaron cuatro macetas de cada uno de los tratamientos y especies: 4 macetas de lenteja y 4 macetas de trigo con alta y baja concentración de P en el suelo, 16 macetas en total. En cada una de ellas se tomó una muestra de suelo, y se cosechó la parte aérea y radical por separado. La parte aérea se juntó por macetas en bolsas de papel, las que posteriormente se pesaron y se obtuvo el peso fresco de cada una de ellas. Las raíces en cambio se cosecharon de manera individual, en bolsas separadas, y también fueron pesadas, para determinar el peso fresco. Posteriormente, el material vegetal fue secado por 48 horas en una estufa (Elos Heat) a 60 °C. Transcurrido ese período, se obtuvo el peso seco de la materia seca aérea (MSa) y radical (MSr).

Se midió el largo de las raíces con el método de Tennant (1975). Para ello, se utilizó una bandeja graduada con una retícula en su base con cuadros de 1 cm², en la cual se distribuyó una cantidad conocida de raíces y se procedió a contar la cantidad de raíces intersecadas en forma longitudinal y vertical con las líneas de la cuadrícula. Mediante una calibración con hilo de largo conocido, se determinó el largo de las raíces, el cual fue expresado en centímetros.

La muestra de suelo de cada maceta fue dejada a temperatura ambiente para su secado y posterior análisis químico.

La determinación de la concentración de P y N en el material vegetal, así como la disponibilidad de P en el suelo, se realizó en el Centro Tecnológico de Suelos y Cultivos (CTSyC). La determinación de la concentración de P se realizó en las cenizas del material vegetal mediante la reacción de nitro-vanado-molibdato y medición por colorimetría (Sadzawka *et al.*, 2001). Por otra parte, la concentración de N en la planta fue determinada mediante el método de Dumas. Para esto, se pesaron 0,15 mg de material vegetal (parte aérea) de cada una de las repeticiones. La muestra fue combustionada a una temperatura de 950° en presencia de oxígeno. A través de procesos de óxido-reducción se determinó la concentración total de N en el tejido. La disponibilidad de P en el suelo se evaluó mediante una extracción con bicarbonato de Na (NaHCO₃ 0,5 M pH 8,5) y determinación de la concentración por colorimetría (Olsen, 1954).

3.3 Análisis estadístico

Para el análisis se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo multifactorial, siendo los factores el nivel de P y el cultivo. Los datos recopilados fueron analizados y graficados con el software GraphPad Prism 6®. La prueba estadística usada para determinar diferencias entre tratamientos fue un análisis de varianza de dos vías (ANDEVA, $p < 0,05$).

4 RESULTADOS

4.1 Primera cosecha

La primera cosecha se realizó luego de 41 días después de la siembra (DDS) y se analizó la producción de materia seca aérea (MSa), materia seca radical (MSr), largo de las raíces (LR), concentración de P en la parte aérea y el P absorbido por unidad de raíz. Al comparar los dos niveles de P (P1 y P2, respectivamente), se observó que la MSa no presentó diferencias significativas para ambos cultivos. En el caso de lenteja no hubo variaciones en la cantidad de MSa y en el trigo hubo un 48% más de MSa con la mayor cantidad de P (P2) (Cuadro 1). La MSr tampoco presentó diferencias significativas. En la lenteja no hubo variaciones, mientras que, en el trigo, aumentó un 36%. Para el LR, si hubo diferencias significativas. El crecimiento de la lenteja fue de un 38% mayor en P2 que en P1, el trigo siguió la misma tendencia con un 31% de mayor crecimiento en P2 que en P1.

El P absorbido por unidad de raíz, igualmente mostró diferencias significativas (Cuadro 1). A diferencia del resto de las variables, para el P absorbido en lenteja hubo una disminución de un 40% cuando las plantas crecieron con mayor disponibilidad de P (P2). Por otra parte, en el trigo la absorción de P por unidad de raíz fue un 41% mayor en P2 que en P1.

Cuadro 1. Efecto del nivel de P (P-Olsen) en el suelo sobre la materia seca aérea (MSa) total producida en cada maceta, materia seca radical (MSr), largo de las raíces (LR) y P absorbido por unidad de raíz al momento de la primera cosecha (41 DDS) y en distintos niveles de P: nivel bajo (P1) y alto (P2). Letras minúsculas distintas indican diferencias para los niveles de P (ANDEVA de dos vías con un valor $p < 0,05$). $n=4$.

Cultivo	Tratamiento	P disponible (mg P kg ⁻¹)	MSa (g)	MSr (g)	LR (cm)	P total	P
						absorbido (mg)	absorbido por cm raíz (µg cm ⁻¹)
Lenteja	P1	28,1	0,71	0,06	904,5a	0,72	0,83a
	P2	40,1	0,70	0,06	1458,7a	0,74	0,50ab
Trigo	P1	31,3	0,56	0,09	2986,9ab	0,87	0,29b
	P2	33,8	1,07	0,14	4318,7b	2,75	0,49ab
	valor-p	--	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	<0,05

4.2 Segunda cosecha

Al igual que durante la primera cosecha, transcurridos 56 DDS, se evaluó la producción de MSa, MSr, LR, la concentración de P en la parte aérea y la cantidad de P absorbido por unidad de raíz. Al comparar los dos niveles de P, se observó que la MSa presentó diferencias significativas en ambos cultivos. Para la lenteja, el aumento de la MSa fue de un 18% y en el caso del trigo este aumento fue de un 25% cuando se evalúa el nivel de P más alto (Cuadro 2). En el caso de la MSr, también hubo diferencias entre los tratamientos. Para lenteja se registró un aumento de 33%, mientras que, para trigo, este parámetro fue menor en un 29%. Por otra parte, en el caso del LR, también se registró diferencias significativas. El crecimiento de la lenteja fue de un 39% en P2, el trigo siguió la misma tendencia con un 40% de mayor crecimiento en P2.

El P absorbido por unidad de raíz presentó diferencias significativas (Cuadro 2). Para lenteja, el P absorbido por unidad de raíz fue menor de $\sim 0,7 \mu\text{g} [\text{cm de raíz}]^{-1}$ en ambos niveles de P. En el caso del trigo, la absorción de P fue de $\sim 0,4 \mu\text{g} [\text{cm de raíz}]^{-1}$ en ambos niveles de P.

Cuadro 2. Efecto del nivel de P (P-Olsen) en el suelo sobre; materia seca aérea (MSa), materia seca radical (MSr), largo de las raíces (LR) y P absorbido por unidad de raíz al momento de la segunda cosecha (56 DDS). P1: baja disponibilidad de P; P2: alta disponibilidad de P en el suelo. Letras minúsculas distintas indican diferencias para los niveles de P (ANDEVA de dos vías con un valor $p < 0,05$). $n=4$.

Cultivo	Tratamiento	P disponible (mg P kg ⁻¹)	MSa (g)	MSr (g)	LR (cm)	P total	P
						absorbido (mg)	absorbido por cm raíz ($\mu\text{g cm}^{-1}$)
Lenteja	P1	32,2	0,75a	0,06a	840,5a	0,60a	0,72a
	P2	48,4	0,92a	0,09a	1374,6a	0,91a	0,69a
Trigo	P1	32,2	2,13b	0,17ab	6899,5b	2,60b	0,38b
	P2	33,8	2,83b	0,12b	11425,9c	4,65c	0,41b
	valor-p	--	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01

4.3 Materia seca aérea producida por planta

Durante la primera cosecha (Fig. 4.1a), para el caso de la lenteja, la cantidad de MSa producida por planta, en ambos niveles de P fue de 0,18 g. En el caso del trigo, la MSa producida en el nivel más bajo de P fue de 0,14 g y en el nivel más alto fue de 0,27 g, aunque en ambos casos no hubo diferencia estadística significativa. La diferencia de crecimiento entre ambos cultivos fue de un 22% en el caso del nivel más bajo de P, siendo mayor la MS aérea del cultivo de lenteja, y en el caso del nivel de P más alto, la diferencia entre cultivos fue de un 33%, siendo mayor la producción de MS aérea en el caso del trigo.

Para la segunda cosecha, (Fig. 4.1b) la MSa producida para lenteja fue de 0,19 y 0,23 g para el nivel bajo y alto de P, respectivamente. En este caso, existió una diferencia de producción de MSa de un 17,4%. En el caso del trigo, a una baja concentración de P se produjo 0,53 g de MS aérea, y con una mayor concentración del nutriente se obtuvo 0,71 g, lo cual entrega una diferencia de 25%. La diferencia de crecimiento entre ambos cultivos fue de un 64% en el caso del nivel más bajo de P, siendo mayor la MS aérea del cultivo de trigo y en el caso del nivel de P más alto, la diferencia entre cultivos fue de un 68%, siendo mayor la producción de MS aérea en el caso del trigo. Hubo diferencias estadísticamente significativas entre los cultivos al considerar ambos niveles de P.

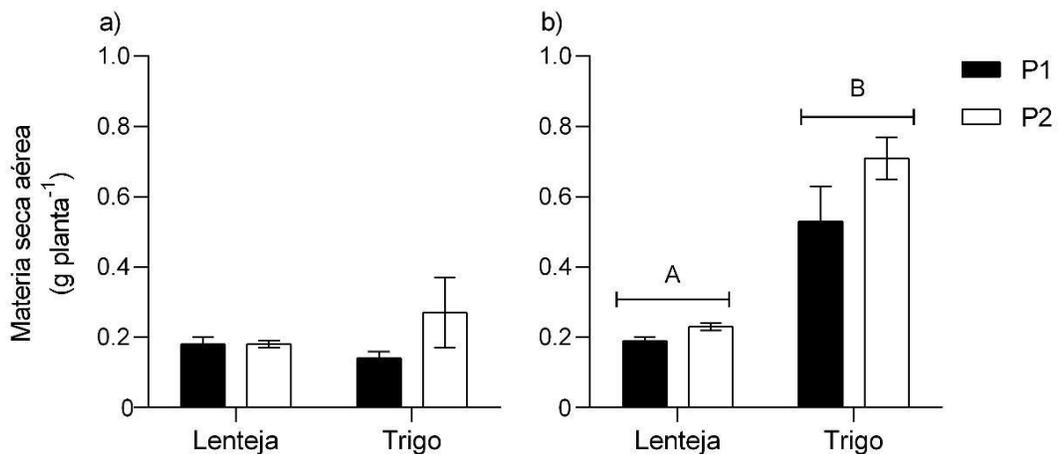


Figura 4.1. Producción de materia seca aérea por planta en lenteja y trigo creciendo en distintos niveles de P: nivel bajo (P1) y alto (P2). a) cosecha 1 (41 DDS) y b) cosecha 2 (56 DDS). Letras mayúsculas distintas indican diferencias entre cultivos (ANDEVA de dos vías con un valor- $p < 0,05$). Las barras indican error estándar del promedio con $n=4$.

4.4 Materia seca radical producida por planta

En la primera cosecha, la cantidad de MS radical (MSr) producida por planta para lenteja y en ambos niveles de P fue de 0,015 g (Fig 4.2a). En el caso del trigo la cantidad de MSr producida por planta para el tratamiento con bajo nivel de P fue de 0,022 g. Por otra parte, con el nivel de P más alto, la MSr fue de 0,034 g presentando una diferencia de un 35% entre los niveles de P. No existen diferencias estadísticamente significativas al comparar la MSr producida en ambos niveles de P dentro de cada cultivo, pero si hubo diferencias al comparar los cultivos en ambos niveles de P.

En la segunda cosecha (Fig. 4.2b), la MSr producida por lenteja en el tratamiento con baja disponibilidad de P fue de 0,015 g y con una mayor concentración de P en el suelo esta fue de 0,023 g, lo cual entrega una diferencia de crecimiento de un 35%. En el caso del trigo, cuando la disponibilidad de P fue menor, la producción de MSr fue mayor que con una mayor concentración de P en el suelo. Así, la MS radical en el primer caso fue de 0,044 g y en el nivel más alto de P, esta fue de 0,029 g. Para este parámetro hubo diferencias estadísticas significativas entre los cultivos en ambas cosechas (Fig. 4.2).

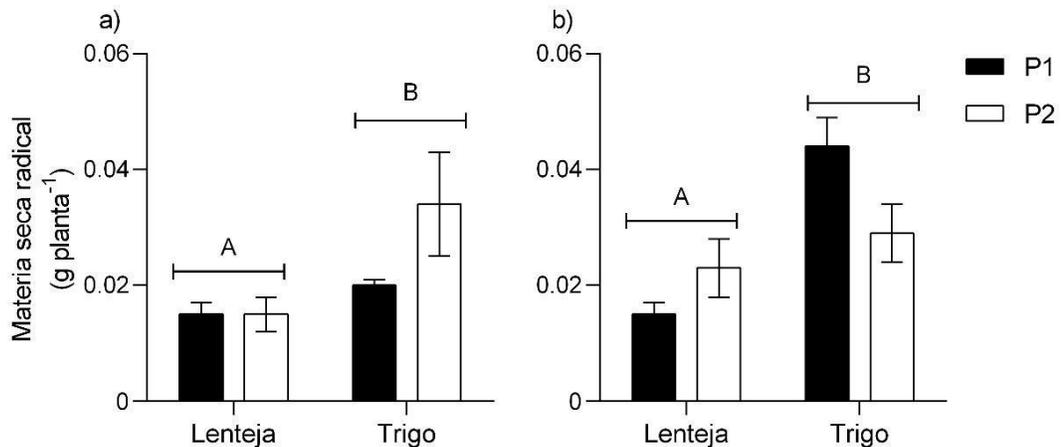


Figura 4.2. Producción de materia seca radical por planta en lenteja y trigo creciendo en distintos niveles de P: nivel bajo (P1) y alto (P2). a) cosecha 1 (41 DDS) y b) cosecha 2 (56 DDS). Letras mayúsculas distintas indican diferencias entre cultivos (ANDEVA de dos vías con un valor-p <0,05). Las barras indican error estándar del promedio con n=4.

4.5 Concentración de P en la materia seca aérea

Al momento de la cosecha después de 41 DDS, la concentración de P en la parte aérea para lenteja fue de 0,1% en ambos niveles de P en el suelo. En el caso del trigo, la concentración de P fue de 0,15% para P1 y de 0,26% en P2. Las diferencias fueron significativas entre los niveles de P para trigo y para la comparación entre cultivos en los dos niveles de P (Fig. 4.3a).

Transcurridos 56 DDS, la concentración de P en MSA disminuyó. En el caso de la lenteja, la concentración de P fue de 0,08% en las plantas creciendo con menor adición de P y de ~0,1% para las plantas con mayor disponibilidad de P en el suelo. En el caso del trigo, la concentración de P en la parte aérea con bajo nivel de P fue de 0,13% y con el nivel de P más alto, fue de 0,16%, existiendo diferencias significativas entre los tratamientos (Fig. 4.3b). Es importante mencionar que también se registraron diferencias en la concentración de P en ambos cultivos durante los dos momentos de cosecha, lo cual da cuenta de una variación genotípica.

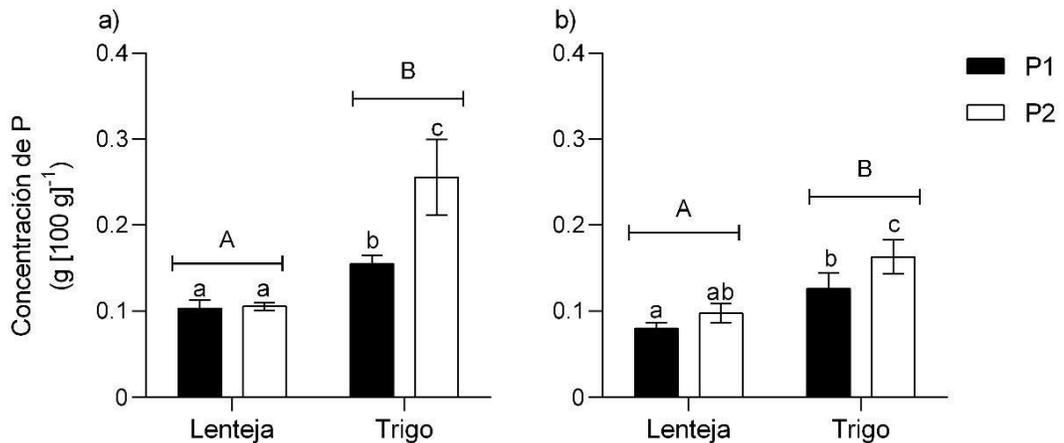


Figura 4.3. Concentración de P en la parte aérea de lenteja y trigo creciendo en distintos niveles de P: nivel bajo (P1) y alto (P2). a) cosecha 1 (41 DDS) y b) cosecha 2 (56 DDS). Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas entre los niveles de P y letras mayúsculas distintas indican diferencias entre cultivos (ANDEVA de dos vías con un valor- $p < 0,05$). Las barras indican error estándar del promedio con $n=4$.

4.6 P absorbido por unidad de raíz

Los resultados muestran que, en lenteja, cuando el nivel de P fue más bajo, la absorción por unidad de raíz fue de $0,83 \mu\text{g cm}^{-1}$, siendo mayor que en el caso de mayor nivel de P, con una absorción de $0,51 \mu\text{g cm}^{-1}$. En el caso del trigo, la absorción en el nivel de P más bajo fue de $0,29 \mu\text{g cm}^{-1}$ por unidad de raíz y en el caso del mayor nivel de P fue de $0,65 \mu\text{g cm}^{-1}$. Entre cultivos, en el nivel más bajo de P, la lenteja absorbió un 65% más P que el trigo por unidad de raíz, y en el caso del nivel mayor de P, el trigo absorbió un 20% más de P por unidad de raíz que la lenteja. Existen diferencias estadísticamente significativas entre los cultivos al considerar ambos niveles de P (Fig. 4.4a).

En el caso del ensayo 2, el P absorbido en la lenteja con un bajo nivel de P en el suelo fue de $0,72 \mu\text{g cm}^{-1}$, y con un mayor nivel de P fue de $0,69 \mu\text{g cm}^{-1}$, sin diferencias entre los dos niveles. Con un bajo nivel de P, la absorción del nutriente en el caso del trigo fue de $0,38 \mu\text{g cm}^{-1}$ y para el caso de mayor nivel de P fue de $0,41 \mu\text{g cm}^{-1}$. Entre cultivos, a un nivel más bajo de P, la lenteja absorbió un 47% más que el trigo, y en el caso del nivel más alto de P, el trigo absorbió un 40% menos de P por unidad de raíz que la lenteja. Existen diferencias estadísticamente significativas entre los cultivos al comparar ambos niveles de P (Fig. 4.4b).

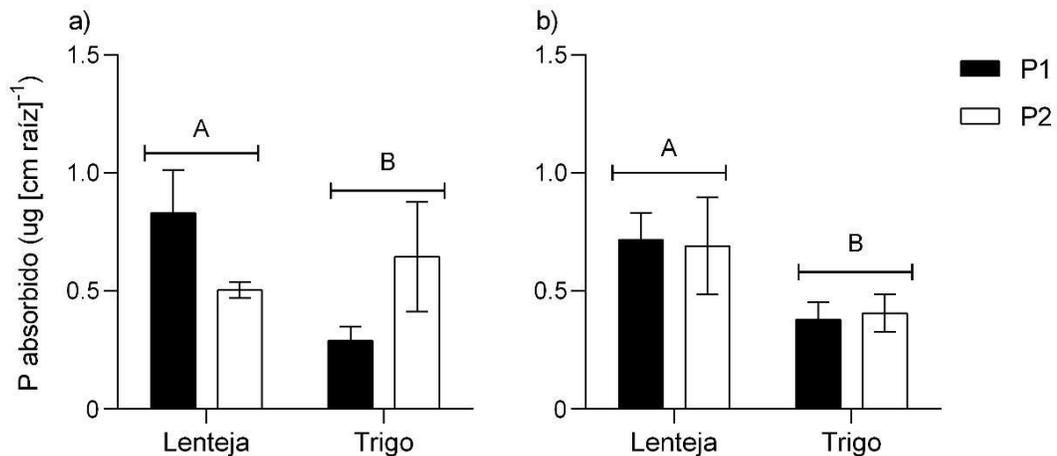


Figura 4.4. P absorbido por unidad de raíz para trigo y lenteja, creciendo en distintos niveles de P: nivel bajo (P1) y alto (P2). a) cosecha 1 (41 DDS) y b) cosecha 2 (56 DDS). Letras mayúsculas distintas indican diferencias entre cultivos (ANDEVA de dos vías con un valor- $p < 0,05$). Las barras indican error estándar del promedio con $n=4$.

4.7 Uso eficiente del P absorbido

La cantidad de P para producir una unidad de materia seca (1 g de MS) fue distinta para ambos cultivos y dependiente del nivel de P en el suelo (Fig. 4.5). En términos generales, la lenteja produjo mayor cantidad de MS por unidad de P en comparación con el trigo, principalmente cuando las plantas estaban más jóvenes (Fig. 4.5a). El nivel de P también fue determinante en la cantidad de MS producida por unidad de P absorbido. En general, a mayor cantidad de P en el suelo, la eficiencia en el uso del P disminuye. Por otra parte, durante la segunda cosecha, la eficiencia en el uso del P aumento, dado principalmente por un aumento de la MS producida y una disminución de la concentración de P en los tejidos de las plantas.

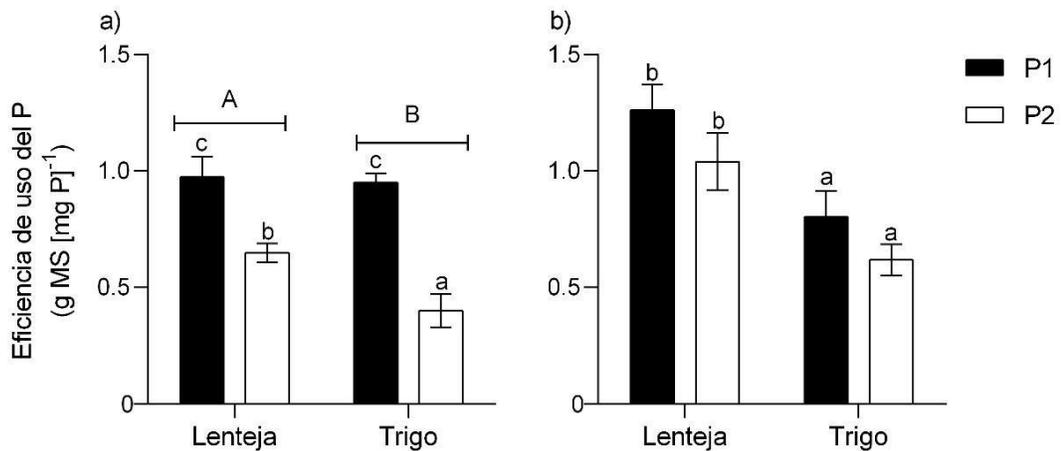


Figura 4.5. Eficiencia del uso del P absorbido para lenteja y trigo creciendo en distintos niveles de P: nivel bajo (P1) y alto (P2). a) cosecha 1 (41 DDS) y b) cosecha 2 (56 DDS). Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas entre los niveles de P y letras mayúsculas distintas indican diferencias entre cultivos (ANDEVA de dos vías con un valor- $p < 0,05$). Las barras indican error estándar del promedio con $n=4$.

5 DISCUSIÓN

El P es el segundo elemento más importante para el crecimiento de las plantas después del N (Lozano et al., 2012). En el suelo existen varias formas químicas de P, incluyendo el inorgánico (Pi) y el orgánico (Po). Estos componentes tienen múltiples fuentes, ya sea de origen natural o antropogénico, los cuales difieren ampliamente en su comportamiento y destino, tanto en suelos naturales como cultivados. Se estima que del P aplicado como fertilizante para los cultivos, sólo entre el 10 a un 20% es aprovechado durante el primer año debido a que la mayor parte es rápidamente absorbido en el suelo o precipitado en formas de baja solubilidad (Vance, 2001, Vu *et al.*, 2008). La deficiencia de P en el suelo es un factor limitante para el crecimiento y desarrollo de las plantas y se ha observado una estrecha relación entre los niveles de aplicación de P al suelo y el rendimiento de materia seca (Mesa *et al.*, 1987). En el caso de las leguminosas, estas responden a la fertilización fosfatada cuando los suelos son pobres en este nutriente (INIA, 2018).

Las plantas absorben P desde el suelo mediante su sistema radical y la eficiencia de absorción de este elemento depende de dos factores: del tamaño del sistema radical y de la velocidad de absorción del nutriente por unidad de raíz, también conocido como influjo (Föhse et al. 1988). En el caso de lenteja y trigo, estos cultivos presentan diferencias en el largo del sistema radical. La lenteja presenta una raíz pivotante, es decir, la radícula emerge de la raíz principal, la cual posteriormente permite que las raíces laterales se desarrollen (Gregory, 1988), por lo que explora el suelo en menor medida que el trigo. En cambio, este último presenta mayor producción de materia seca radical, dado que su raíz es densa y fasciculada, con raíces seminales y coronarias. Las primeras son las raíces de la radícula, las cuales dejan de funcionar uno a dos meses después de germinar, para dar paso a las raíces que crecen desde los nudos de la corona (Mellado, 2007). En este sentido, los resultados de este estudio muestran una predominancia por parte del trigo a producir una mayor cantidad de raíces en comparación a lenteja (Cuadros 1 y 2).

El crecimiento de las raíces depende de la disponibilidad de P, y a su vez, el crecimiento de la parte aérea depende del transporte de nutrientes desde las raíces (Macklon et al., 1994). Sin embargo, en especies distintas, la respuesta a la deficiencia de un nutriente puede ser variable. En el caso del presente trabajo, la mayor disponibilidad de P en el suelo afectó de forma positiva el largo de las raíces tanto para lenteja como para trigo (Cuadros 1 y 2). Sin embargo, en el caso de la lenteja, no hubo un incremento del peso de las raíces, lo cual sugiere que la extensión del sistema radical fue producto de la presencia de raíces más finas. Por ejemplo, los cultivos de trigo y centeno, adquieren P no por un mayor influjo, sino más bien por un mayor desarrollo del sistema radical, compensando de esta forma la menor entrada de P por unidad de raíz (Föhse et al., 1988). Los experimentos realizados por Föhse et al. (1988), concuerdan con las observaciones

realizadas en este estudio. Así, en el caso del trigo, existió una menor cantidad de P absorbido por unidad de raíz en comparación a lenteja, especialmente al momento de la segunda cosecha, cuando la producción de materia seca fue mayor (Cuadros 1 y 2). Por lo tanto, la mayor demanda de P observada en el caso de trigo fue compensada con el mayor tamaño de su sistema radical y no por un aumento en el influjo. En otros estudios, un aumento en la disponibilidad de P en el suelo resultó en un aumento del largo del sistema radical en lenteja cultivada en condiciones de secano (Singh et al., 2005). Sin embargo, en el mismo estudio, lentejas cultivadas bajo un sistema de riego, disminuyeron el largo de raíces en respuesta al incremento de disponibilidad de P. En el caso del trigo, un aumento de la disponibilidad de P resultó también en un aumento de la cantidad de P absorbido por unidad de raíz en nueve cultivares analizados por Römer y colaboradores (1988).

En el caso de la parte aérea, a la primera cosecha el estado fenológico de ambos cultivos se encontraba en etapa vegetativa. En el caso del trigo, este se encontraba con 3 nudos, y en el caso de la lenteja, en etapa de despliegue de hojas. A la segunda cosecha, el trigo se encontraba en estado de bota y en lenteja comenzaban a aparecer las primeras yemas florales. Además, debido a que las hojas del trigo son alargadas, grandes y rectas, con un tallo erecto y una estructura de caña, este alcanza una mayor longitud. Por otra parte, la lenteja tiene hojas pequeñas y ovaladas, con un tallo más endeble, delgado y de menor longitud, lo cual tiene un impacto negativo sobre la producción de MS aérea. De esta forma, el trigo tuvo una producción de materia seca aérea mayor que lenteja (Cuadro 2 y Fig. 4.1). De forma similar, la fertilización fosfatada en una rotación con trigo-lenteja, resultó en el aumento de la producción de biomasa aérea en trigo y la extracción de P, y el efecto residual de la aplicación del fertilizante afectó positivamente el rendimiento de lenteja (Harmsen et al., 2001).

Según Loneragan y Asher (1967) existen dos definiciones al momento de hablar de eficiencia del P, una se refiere a la habilidad de una planta para producir un cierto porcentaje de su máximo rendimiento a un cierto nivel de P, es decir, la cantidad de P necesitada por la planta para producir una unidad de materia seca, también conocido como requerimiento interno. La otra definición es la eficiencia del consumo de la planta, que es la habilidad del sistema radical para absorber el P presente en el suelo y acumularlo en la parte aérea. En el presente estudio el cultivo de trigo tuvo una mayor concentración de P en ambas cosechas (Fig. 4.3) y en términos generales, la eficiencia del uso del P fue mayor en el caso de lenteja (Fig. 4.5). Sin embargo, en el caso del trigo en la primera cosecha, la eficiencia fue comparable a la de lenteja con bajo nivel de P. Al momento de la segunda cosecha, la eficiencia del uso del P por parte de la lenteja fue mayor que en trigo. Aparentemente, el aumento de disponibilidad de P en el suelo hace disminuir la eficiencia en el uso del P. Lo anterior es concordante con los resultados obtenidos en otros estudios para lenteja (Singh et al., 2005).

Por otra parte, la eficiencia está relacionada con el influjo de P (afinidad del elemento que es absorbido). Aquellas especies con baja eficiencia de P, como el tomate, la cebolla y el poroto, tienen una baja relación raíz/parte aérea y un bajo influjo. Mientras que aquellas especies que presentan una alta eficiencia de P, como el trigo y el centeno, presentan un extenso sistema radical o una alta relación raíz/parte aérea (Föhse et al., 1988).

Otra forma de definir la eficiencia es cantidad de biomasa producida por unidad de P aplicado. Pérez (2007) estudió la absorción de P en diferentes leguminosas y sus resultados muestran que existe un aumento en la producción de biomasa a medida que aumenta la dosis de P. Sin embargo, el uso interno del P disminuye a medida que hay más P disponible en el suelo.

Según Bates y Lynch, (1996) citado por Miranda (2004) el P influye en el sistema radical con un conjunto de respuestas morfológicas cuando existe una deficiencia. Estas respuestas se presentan como una mejora en la exploración de las raíces en crecimiento, aumentando la tasa de elongación y provocando cambios en la densidad radical. Estas respuestas van acompañadas de cambios en procesos metabólicos y bioquímicos, y son más bien una respuesta adaptativa. Según Marschner (1995) la absorción del P depende principalmente de la densidad radical y el largo de los pelos radicales, cuando existe una aglomeración de pelos radicales se genera una competencia inter-específica, por lo que la alta densidad radical no será un sinónimo de alta absorción de nutrientes. En el caso particular del presente trabajo, la mayor producción de raíces en el cultivo del trigo, compensa la menor absorción de P por unidad de raíz y de esta forma logra satisfacer la mayor demanda de P. Por otra parte, la mayor concentración de P en los tejidos de la lenteja, indican que este cultivo ejerce una mayor absorción por unidad de raíz, mostrando una estrategia de absorción diferente, ya que no desarrolla un sistema radical extenso como el trigo.

6 CONCLUSIÓN

La lenteja absorbe con mayor eficiencia el P en los primeros estados fenológicos y a menor disponibilidad de P en el suelo. A medida que el cultivo crece, la eficiencia disminuye a un nivel más bajo de P.

En el caso del trigo, la eficiencia de absorción de P aumenta a medida que aumenta el P disponible cuando la planta es más joven y disminuye cuando la planta está más madura. Lo anterior producto de un mayor sistema radical.

La absorción de P por unidad de raíz y la eficiencia de su uso del P fue mayor en lenteja que en trigo. Lo anterior no significó que lenteja absorbiera más P que trigo, debido a que este último desarrolló mayor cantidad de materia seca que lenteja.

7 BIBLIOGRAFIA

- Arnon, D.I.; Stout, P.R. 1939. The Essentiality of Certain Elements in Minute Quantity for Plants with Special Reference to Copper. *Plant Physiology*, 14: 371-375.
- Baginsky, C; Ramos, L. 2018. Situación de las legumbres en Chile: Una mirada agronómica. *Revista Chilena de Nutrición*, 45: 21-31.
- Bates, T; Lynch, J. 1996. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability. *Plant Cell and Environment*, 19: 529-538.
- IREN-CORFO. 1964. Suelos: Descripciones Proyecto Aerofotogramétrico. Antecedentes obtenidos durante el proyecto aerofotogramétrico Chile/O. E. A./B. I. D. con la cooperación del Ministerio de Agricultura, Departamento de Conservación de Suelos y Aguas.
- COTRISA. 2018. Análisis del sector triguero al 2018. Recuperado de https://www.cotrisa.cl/actualidad/doc/sector_triguero_2018.pdf.
- CropScience Chile. 2012. Trigo (*Triticum aestivum*). Bayer Chile. Recuperado de www.cropscience.bayer.cl.
- De La Tejera, B; Santos, A. 2001. Impactos de la política agrícola en los mercados y en el desarrollo: el caso de la lenteja en México y Canadá. *Economía y Sociedad*, 9: 95-114.
- Debouck, D; Hidalgo, R. 1985. Morfología de la planta de frijol común. In: López Genes, Marceliano; Fernández O., Fernando O.; Schoonhoven, Aart van (eds.). Frijol: Investigación y producción. Programa de las Naciones Unidas (PNUD); Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, CO. p. 7-41.
- Egle, K; Manske, G; Römer, W; Vlek, P. 1999. Improved phosphorus efficiency of three new wheat genotypes from CYMMIT in comparison with an older Mexican variety. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 162: 353-358.
- Faiguenbaum, H. 1988. Producción de cultivos en Chile. Cereales, leguminosas e industriales. Publicitaria Torreloones, Santiago, Chile. Trigo. p. 187-212.
- Faiguenbaum, H. 1990. Morfología, crecimiento y desarrollo de trigo (*Triticum aestivum* L.). Proyecto docente. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 48 p.
- Faúndez M; Cerda R; Pedreros A. 2017. Oportunidades para el desarrollo competitivo de las leguminosas de grano en Chile. FIA, Santiago. Chile. 115 p. Recuperado de <http://www.fia.cl/wp-content/uploads/2018/02/Leguminosas.pdf>.

Fernández, M. 2007. Fósforo: amigo o enemigo. ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar, XLI (2). p 51-57.

Ferrando, M. 2013. Fósforo, curso de fertilidad de suelos. Facultad de agronomía, Universidad de la República. Uruguay. 103 p.

Föhse, D; Claassen, N; Jungk, A. 1988. Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. *Plant and Soil*, 110: 101–109.

Föhse D; Claassen N; Jungk A. 1991. Phosphorus efficiency of plants. II. Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species. *Plant and Soil* 132: 261–272.

Gómez, L. 2006. Respuesta del uso interno de fósforo en trigo (*Triticum aestivum*) a cambios en la disponibilidad fosforada del suelo en un Andisol de la décima región de Chile. Licenciado en Agronomía. Universidad Austral de Chile.

Gorim, L; Vandenberg, A. 2017. Evaluation of wild lentil species as genetic resources to improve drought tolerance in cultivated lentil. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1129.

Gregory, J. 1988. Root growth of chickpea, faba bean lentil, and pea and effects of water and salt stress. In: Summerfield R.L (ed.), *World Crops: Cool-season Food Legumes*. Kluwer Academic Publishers, London, UK, p 857–867.

Harmsen, K; Matar, A; Saxena, M; Silim, S. 2001. Yield response to phosphorus fertilizer in a wheat-lentil rotation in a Mediterranean environment. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 49: 385-404.

Hernández, E. 1986. *Biología Agrícola: los conocimientos biológicos y su aplicación a la agricultura* (2da edición). México: Compañía editorial Continental.

INDAP. 2017. Lentejas. Recuperado de www.indap.gob.cl/docs/default-source/biobio/bulnes/lentejas.xls.

INIA. 2003. Trigo harinero primaveral variedad Pandora. Programa de Fitomejoramiento de Trigo, INIA Quilamapu. Chillán, Chile.

INIA. 2006. Calpún-INIA, cultivar lenteja (*Lens culinaris* Medik) de grano grande y resistente a la roya. Centro regional de investigación Quilamapu.

Jungk, A. 2001. Movimiento de nutrientes a la interfase suelo-raíz. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1: 1-18.

Keppler, B; Rickman, R. 1990. Modeling crop root growth and function. *Advances in Agronomy*, 44: 113-131.

Lev-Yadun, S; Gopher, A; Abbo, S. 2000. The cradle of agriculture. *Science*, 288: 1602-1603.

Loneragan, J; Asher, C. 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. If. Rate of phosphate absorption and its relation to growth. *Soil Science*, 103: 311-317.

Lozano, P; Hernández, R; Bravo, C; Rivero, C; Delgado, H. 2012. Disponibilidad de fósforo en un suelo de las sabanas bien drenadas venezolanas, bajo diferentes coberturas y tipos de fertilización. *Interciencia*, 37: 820-827.

Macklon, A; Mackie-Dawson, L; Sim, A; Shand, C; Lilly, A. 1994. Soil-P resources, plant-growth and rooting characteristics in nutrient poor upland grasslands. *Plant and Soil*, 163: 257 – 266.

Marschner, M. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Institute of plant nutrition. Second Edition. Academic Press. 889 p.

Miranda, G. 2004. Producción de raíces de trigo, papas y arvejas creciendo bajo distintos niveles de fósforo. Licenciado en Agronomía. Universidad Austral de Chile. 69 p.

Mesa, A; Martínez, J; Mendoza, F. 1987. Niveles críticos de P en leguminosas promisorias. *Pastos y Forrajes*, 10(2): 147-152.

Mellado, M. 1984. Boletín de Trigo 1984: Aspectos generales sobre cultivo del trigo. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 19.

Mellado, M., 2007. El trigo en Chile cultura, ciencia y tecnología. Colección libros INIA N° 21. Ograma. Chillán, Chile.

Moron, A. 1992. El fósforo en el sistema suelo planta. *Revista INIA Inv Agr*. Dic 1992. p 45-46.

ODEPA, 2003. Artículo de Leguminosas, Perspectiva para el cultivo de lenteja y evolución del mercado mundial, importaciones y precios internos, siembras y producción. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos>.

ODEPA, 2017. Annual regional information of planted surface, production and yields. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos>.

ODEPA. 2019. Boletín de cereales. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-cereales-julio-de-2019>.

Olsen, R; Cole, V; Watanabe, F; Dean, A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington, DC. US Department of Agriculture. Circular 939. p 19.

Pérez, M. 2007. Eficiencia de algunas leguminosas en la utilización de fósforo proveniente de rocas fosfóricas. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 24(1): 113-132.

Rebello, CJ; Greenway, FL; Finley, JW. (2014). Whole grains and pulses: A comparison of the nutritional and health benefits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(29): 7029-7049.

Reuter D; Robinson J. 1986. Plant analysis: an interpretation manual. Inkata Press.

Römer, W; Augustin, J; Schilling, G. 1988. The relationship between phosphate absorption and root length in nine wheat cultivars. *Plant and Soil*, 111: 199-201.

Sandaña, P; Vistoso, E. 2018. Boletín informativo 2018. Estrategias de la fertilización fosfatada en praderas. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 40729.

Sadzawka, A; Grez, R; Mota, M; Saavedra, R; Carrasco, M; Rojas, C. 2001. Métodos de análisis de tejidos vegetales. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Comisión de Normalización y Acreditación. 1-24.

Singh, K; Srinivasarao, C; 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.

Schilling, M; Sierra, E. 1973. Síntesis morfológica de las gramíneas y ensayo de clave para determinación de los géneros más frecuentes en Santiago. Cátedra de botánica. Segunda edición. Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, Laboratorio de Taxonomía, Santiago, Chile.

Tapia, F; Almarza, P. 2015. Sembrando lentejas. Boletín informativo INIA N 10517.

Taiz, L; Zeiger, E. 2006. Nutrientes esenciales, carencias y desórdenes vegetales. En *Fisiología vegetal* 118 - 119. España: Universitat Jaume I.

Tay, J; France, A; Gerdin, M; Kramm, V; Velasco, R. 2000. Manual de Producción de leguminosas de grano y hortalizas para el secano costero de la Región del Maule. Boletín informativo INIA 40. p 7.

Tay, J; Peñaloza, E; France, A. 2007. Calpún-INIA, Cultivar de lenteja (*Lens culinaris* Medik) de grano grande y resistente a roya. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional de Investigaciones Carillanca, Temuco, Chile.

Tennant, D. 1975. A Test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology*, 63(3): 995-1001.

de Willigen, P; van Noordwijk, M. 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. PhD Dissertation, Wageningen University. 282 p.

Vance, C. 2001. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant Physiology*, 127: 390-397.

Vu, D; Tang, C; Armstrong, R. 2008. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to a calcareous soil in a Mediterranean climate. *Plant and Soil*, 304: 21-33.

8 ANEXO

Anexo 8.1 Resultados análisis de nitrógeno foliar (N foliar) para ensayo 1, de acuerdo a dos niveles de P-Olsen en el suelo; bajo (P1) y alto (P2).

Cultivo	Tratamiento	P-Olsen	N foliar
		(mg P kg ⁻¹)	%
Lenteja	P1	28,1	5,08a
	P2	40,1	6,56a
Trigo	P1	31,3	3,59a
	P2	33,8	4,67b
Valor P			0,0015

Anexo 8.2 Resultados análisis de nitrógeno foliar (N foliar) para ensayo 2, de acuerdo a dos niveles de P-Olsen en el suelo; bajo (P1) y alto (P2).

Cultivo	Tratamiento	P-Olsen	N foliar
		(mg P kg ⁻¹)	(g)
Lenteja	P1	32,19	5,93a
	P2	48,44	6,15a
Trigo	P1	32,23	2,07b
	P2	33,77	2,75b
Valor P			0,0006

