



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

**Efecto del cultivo intercalado de trigo (*Triticum aestivum* L.) y lenteja (*Lens culinaris*)
sobre la absorción de nitrógeno**

MEMORIA DE TÍTULO

FRANCISCA IGNACIA ADRIAZOLA CERDA

TALCA, CHILE

2019



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

**Efecto del cultivo intercalado de trigo (*Triticum aestivum L.*) y lenteja (*Lens culinaris*)
sobre la absorción de nitrógeno**

POR

FRANCISCA IGNACIA ADRIAZOLA CERDA

MEMORIA DE TÍTULO

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

INGENIERO AGRÓNOMO

TALCA-2019

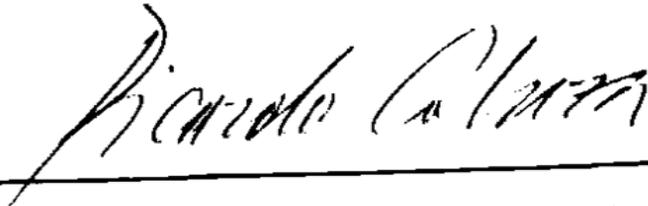
CONSTANCIA

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, 2019

Aprobación

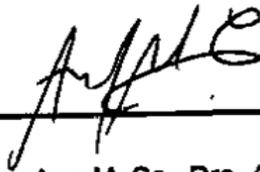


Profesor Guía. Ing. Agr. Dr. Ricardo Alfonso Cabeza Pérez

Profesor Guía

Escuela de Agronomía

Facultad de Ciencias Agrarias



Profesora Co-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: 25 de abril de 2019

AGRADECIMIENTOS

Sin duda el paso del tiempo, trae consigo una serie de nuevas experiencias, momentos inolvidables y aprendizajes significativos. Además, da a conocer las personas que siempre estarán en tu vida, en los buenos y en los malos momentos.

Indudablemente el primer agradecimiento va dirigido para mi familia, pilar fundamental en todo el proceso académico. Con gran certeza puedo decir que la familia es el fiel reflejo del verdadero amor y el apoyo incondicional. Gracias a ellos, puedo estar escribiendo estas palabras en la espera de finalizar una etapa más en mi vida.

A mis compañeras de universidad, que con el paso del tiempo formamos lazos importantes de amistad, que sé que perdurarán en el tiempo. Grandes mujeres todas, un gran equipo y mucho apoyo entre nosotras. Espero que a todas nos vaya muy bien, porque lo merecemos y porque está en el destino ser exitosas (G.R., B. F., F. D., C. F., B. R.).

A mi profesor guía Ricardo Cabeza y la profesora Ana María Méndez que siempre tuvieron la mejor disposición en ayudarme y en que hiciéramos un buen trabajo.

Por último, a mí misma, por no perder el enfoque, y por poder compatibilizar mis actividades personales con las responsabilidades de la universidad. Un gran desafío superado y una etapa muy linda que nunca olvidaré.

RESUMEN

La agricultura es la principal fuente de producción de alimentos que abastece las necesidades de la población que está en continuo crecimiento. El monocultivo es un sistema de producción masivo donde se obtienen elevados rendimientos. Da lugar a plantaciones de gran extensión con el cultivo de una sola especie año tras año, utilizando los mismos métodos de producción para toda la plantación, lo que lo hace eficiente a gran escala. Sin embargo, la producción constante produce pérdida de fertilidad en los suelos y biodiversidad provocando gran impacto ambiental. Por ese motivo, con objetivo de reducir los impactos ambientales y promover la biodiversidad de los suelos y diversidad de especies, el sistema de cultivos intercalados es una opción de producción con principios ecológicos que incentiva a utilizar cultivos asociados con leguminosas dado a su capacidad de fijación de nitrógeno, especialmente en suelos deficientes de nitrógeno con el fin reducir el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, obteniendo aumentos en la producción.

En este contexto se estudia el sistema de cultivos intercalados de trigo (*Triticum aestivum L.*) y lenteja (*Lens culinaris*) y el efecto que tiene sobre la absorción de N y la producción de materia seca en ambas especies cultivadas. Los resultados obtenidos indican que existe competencia entre las especies asociadas por la poca disponibilidad del nutriente en el suelo y que el cultivo de trigo depende principalmente del N disponible del suelo, absorbiendo mayor cantidad de N cuando se encuentra asociado con la lenteja, en tanto que la lenteja utiliza su capacidad de fijar nitrógeno de la atmósfera para satisfacer la demanda de N.

En el cultivo intercalado, se obtiene un aumento del rendimiento del cultivo de trigo en comparación al sistema de monocultivo, mientras que la lenteja disminuye su rendimiento, lo cual indica una compensación en los rendimientos de los cultivos. Estas diferencias están dadas por las características morfológicas de las especies y la habilidad competitiva de las especies cultivadas.

ABSTRACT

Agriculture is the main source of food for the increasing worldwide population. This food production is based mainly onto crop monoculture systems. This kind of system could reduce soil fertility and the above- and underground biodiversity. As an alternative, intercrop systems could reduce the use of chemical fertilizers and enhance biodiversity. The goal of the current work was to asses an intercropping system by using wheat mixed with lentils and to evaluate the possible effect of the nitrogen (N_2) fixation capacity onto the nitrogen (N) uptake in both crops. The main results showed that both crops compete for soil nutrients, mainly N, being wheat more efficient to take it up. On the other hand, wheat growing in combination with lentils produced more yield. Moreover, lentils decreased their yield, however, the total yield of the intercropped system was equal than the crop growing alone. Some of the differences observed in this experiment could be explained by morphological traits of both species while the more significant results suggested that wheat is more able to increase the yield and to take up soil nutrients.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Hipótesis.....	2
1.2	Objetivo general.....	2
1.3	Objetivos específicos	2
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Sistema de cultivos intercalados	3
2.2	Beneficios del sistema de cultivos intercalados	3
2.3	Cultivos intercalados y absorción de nutrientes	5
2.4	Descripción morfológica del cultivo del trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>).....	5
2.5	Cultivo del trigo en Chile	6
2.6	Producción Nacional	6
2.7	Importancia de la fertilización nitrogenada en trigo	7
2.8	Descripción morfológica del cultivo de lenteja (<i>Lens culinaris</i>)	7
2.9	Cultivo de lenteja en Chile.....	8
2.10	Producción Nacional	8
2.11	Fijación de nitrógeno atmosférico (N ₂) por leguminosas	9
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3.1	Lugar del estudio	11
3.2	Material Vegetal.....	11
3.3	Condiciones y manejo del ensayo	11
3.4	Tratamientos.....	12
3.5	Desarrollo vegetativo y absorción de N	12
3.6	Análisis estadístico	13
4	RESULTADOS	14
4.1	Materia seca aérea total producida por maceta	14
4.2	Materia seca aérea producida por planta.....	15
4.3	Materia seca radical total producida por maceta.....	16
4.4	Materia seca radical producida por planta	17
4.5	Relación raíz/parte aérea.....	18
4.6	Concentración de N	19
4.7	Nitrógeno total absorbido por maceta.....	19
4.8	Nitrógeno absorbido por planta	20
5	DISCUSIÓN	22
6	CONCLUSIONES.....	27
7	BIBLIOGRAFÍA	28

8 ANEXO 34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Tratamientos del ensayo con plantas de trigo y lenteja creciendo solos y asociados.....	12
Figura 4.1. Producción total de materia seca (MS) aérea para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical)	14
Figura 4.2. Producción normalizada de materia seca (MS) aérea para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical)	15
Figura 4.3. Producción total de materia seca (MS) de raíces para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical)	16
Figura 4.4. Producción normalizada de materia seca (MS) de raíces para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical)	17
Figura 4.5. Relación raíz/parte aérea (R/PA) para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical)	18
Figura 4.6. Concentración de N en la materia seca aérea de trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical)	19
Figura 4.7. Nitrógeno absorbido por maceta para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical)	20
Figura 4.8. Nitrógeno absorbido por planta de trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical)	21

1 INTRODUCCIÓN

La población mundial está creciendo de forma continua y acelerada, lo cual representa un gran desafío para la agricultura mundial (FAO, 2017). Actualmente el sistema de producción masivo y dominante es el monocultivo, que da lugar a plantaciones de gran extensión con el cultivo de una sola especie, utilizando productos o insumos químicos en gran cantidad, lo que lo hace eficiente a gran escala. Este sistema de producción provoca pérdidas en la fertilidad natural del suelo y biodiversidad (Kremen y Miles., 2012). Dado esto, con el objetivo de garantizar una seguridad alimentaria y mitigar los impactos ambientales, el sistema de producción de cultivos intercalados, es un sistema alternativo basado en principios ecológicos, a través de interacciones complementarias entre las especies cultivadas y bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico (N₂) principalmente del género *Rhizobium* con las especies de leguminosas.

El sistema de producción de cultivos intercalados se define como individuos de al menos dos especies de cultivos, en proximidad cercana y en crecimiento simultáneo, lo que conlleva una mayor interacción interespecifica y diversidad de cultivos (Li et al., 2014). Este sistema de cultivo desempeña un papel importante en el aumento de la calidad y el rendimiento de los cultivos, y la calidad ambiental, mediante la utilización eficiente del suelo, la luz, el agua y los nutrientes del suelo (Brooker et al., 2015). Sin embargo, puede presentar ciertas desventajas si la proximidad entre los cultivos no es la correcta.

Los autores Altieri y Nicholls (2007), mencionan que existe poca información respecto al cultivo intercalado, y que la mayoría de las investigaciones han sido a escala de huertos pequeños y artesanos, nada llevado a producción masiva o industrial. Chile, no queda ajeno a esta situación, ya que presenta poca investigación y literatura respecto al tema. INIA (Instituto de Investigación Agropecuaria) es la institución que lidera esta temática de investigación (Sotomayor, 2008), en sistemas de coberturas en vides (Ovalle et al., 2010).

En este contexto se estudió el comportamiento del efecto del cultivo intercalado de trigo (*Triticum aestivum* L.) y lenteja (*Lens culinaris*), y el efecto que posee esta práctica sobre la absorción de nitrógeno (N) en ambas especies. La lenteja al ser una leguminosa puede fijar su propio N₂ de la atmósfera, por lo que la asociación con una planta que no puede fijar su propio N puede representar una ventaja para esta última. Las leguminosas se destacan en los ecosistemas naturales, en la agricultura y en el sector agroforestal por su capacidad para fijar N₂ en simbiosis con rizobacterias, lo que hace de ellas excelentes colonizadoras en ambientes pobres de nitrógeno.

El trigo es un cultivo de gran importancia económica en el ámbito agrícola y también dada la cantidad de agricultores que desarrollan esta actividad. El trigo es un cultivo que depende de la disponibilidad de N en el suelo para su crecimiento óptimo y el uso de la lenteja como cultivo asociado al fijar nitrógeno atmosférico (N₂), lo hace muy valioso como abono verde.

La fijación de N₂ atmosférico por parte de las leguminosas, abre nuevas opciones de agricultura amigable con el medio ambiente, creando sistemas de producción menos invasivos, disminuyendo la utilización y el exceso de insumos o productos químicos.

En síntesis, los cultivos intercalados de cereales y leguminosas podrían mejorar los rendimientos de los cultivos y, también, la sostenibilidad de los agroecosistemas, mediante procesos de complementariedad vegetal para la adquisición de recursos del suelo, y la 'facilitación' de procesos rizosféricos, gracias a las triples interacciones positivas planta-suelo-microorganismos (Duchene et al., 2017).

En base a los antecedentes presentados, a continuación, se plantean la hipótesis y objetivos del presente estudio:

1.1 Hipótesis

Las plantas de trigo creciendo en combinación con lentejas obtienen mayor cantidad de N desde el suelo, existiendo o no contacto entre raíces.

1.2 Objetivo general

Determinar el efecto del sistema de cultivo intercalado de lenteja-trigo sobre la absorción de N en ambas especies.

1.3 Objetivos específicos

1. Evaluar la absorción de N en ambas especies creciendo en combinación.
2. Evaluar la producción de materia seca aérea y radical en ambas especies creciendo en combinación.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema de cultivos intercalados

Antiguamente los campesinos hacían agricultura de subsistencia, en donde la producción era suficiente para satisfacer las necesidades de una familia. Las prácticas utilizadas eran básicas, no se contaba con tecnología para la producción y en diferentes partes del mundo se realizaban siembras en combinación, ignorando las características positivas que entrega este sistema de producción. Sin embargo, investigaciones sobre sistemas de cultivos asociados han mostrado que existen beneficios, como por ejemplo en el control de malezas (Liebman, 1998).

Liebman (1998), menciona que los cultivos intercalados pueden ser de diferentes combinaciones o asociaciones, como cultivos anuales con anuales, cultivos perennes con anuales o perennes con perennes. Los cereales se pueden producir con leguminosas y los cultivos de raíces asociados con frutales. Estos cultivos se pueden sembrar desde la forma más básica, como una combinación simple de dos cultivos en hileras intercaladas, hasta asociaciones más complejas de siembras entremezcladas. También pueden sembrarse en fechas iguales o diferentes (cultivos de relevo); la cosecha de los diferentes cultivos puede ser simultánea o a intervalos. La variedad de cultivos intercalados da a conocer la diversidad de prácticas utilizadas por productores en todo el mundo para satisfacer sus necesidades.

Sin embargo, debido a la intensificación de la agricultura y la amplia disponibilidad de fertilizantes sintéticos de bajo costo como la urea, la práctica de cultivos intercalados declinó drásticamente a principio de los años 1960 (Crews y Peoples, 2004). En las zonas de cultivo de secano de la región climática mediterránea de Chile central, el trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) se cultiva predominantemente en rotación con avena (*Avena sativa*) y el crecimiento óptimo del cultivo depende en gran medida de los fertilizantes nitrogenados aplicados. Estos representan alrededor de un 25% del costo de producción. Sin embargo, estos son fuente de contaminación, por lo que existe un renovado interés de los investigadores y los agricultores en reconsiderar el rol de las leguminosas intercaladas como fuente de ingreso de N a los sistemas agrícolas (Crews y Peoples, 2004; Jensen et al., 2011).

2.2 Beneficios del sistema de cultivos intercalados

El sistema de cultivos intercalados es un sistema alternativo para una producción más sostenible, que trae consigo una serie de interacciones positivas que benefician los componentes de producción.

La asociación de cultivos de cereales con leguminosas tiene efectos positivos como, por ejemplo: fijación de N_2 atmosférico, control de malezas, reducción de plagas, mejora la permeabilidad y agregación del suelo, promueve la actividad y diversidad de los microorganismos del suelo, y aumenta la biomasa producida (Duchene et al., 2017). Lo que significa que genera un menor impacto en el medio ambiente, cuidando la fertilidad de los suelos, reduciendo el uso de fertilizantes sintéticos y aumentando la diversidad de cultivos.

Duchene y colaboradores (2017), mencionan que la sostenibilidad en los agroecosistemas asociados, está explicada por un concepto denominado “complementariedad vegetal” que hace referencia a como las especies mejoran la capacidad de adquirir los recursos del suelo y, además, “facilitan” los procesos rizosféricos con interacciones positivas entre planta-suelo-microorganismos.

La complementariedad vegetal hace referencia a los recursos del suelo, donde una de las dos especies evoluciona o tiene características diferentes, que permite obtener recursos de una fuente diferente, reduciendo la competencia directa entre ellas y mejorando la partición de los recursos. Es decir, la complementariedad vegetal sugiere una competencia reducida debido al uso complementario de los recursos y la diferenciación de nichos entre especies intercaladas en el tiempo, en el espacio o en formas de un recurso dado (Tilman et al., 2001).

En cuanto a la facilitación interespecífica, según lo definido por Callaway (1995), es un efecto beneficioso de los individuos de una especie sobre el crecimiento o la supervivencia de los individuos de la otra especie. Esto puede ocurrir directamente a través de mecanismos positivos, por ejemplo, la mejora de las condiciones ambientales adversas, incluida la alteración favorable de la luz, la temperatura y humedad del suelo, y una mayor disponibilidad de nutrientes limitantes del suelo (Li et al., 2014). Por otro lado, de forma alternativa, la facilitación puede ocurrir de forma indirecta, por ejemplo, a través de la estimulación de microbios beneficiosos del suelo para liberar nutrientes durante la mineralización de la materia orgánica, la movilización de nutrientes inorgánicos poco solubles, o la transferencia de nutrientes a través de redes micorrícicas comunes, que vinculan las especies de plantas de cultivos en forma conjunta (Ehrmann y Ritz, 2013; Sun et al., 2013).

En ese sentido, por la reducción de la competencia directa y la triple interacción del sistema de producción se pueden utilizar los nutrientes del suelo y el agua de una forma más eficiente, mejorando el nivel de producción.

2.3 Cultivos intercalados y absorción de nutrientes

Como se mencionó anteriormente, el sistema de producción de cultivos intercalados trae consigo varias ventajas positivas para la producción. Sin embargo, se puede presentar competencia natural entre los individuos por luz, agua o nutrientes. Los autores Callaway y Walker (1997) hablan sobre la “co-ocurrencia” de interacciones positivas y negativas dentro de las comunidades vegetales y se ha demostrado que la competencia por los recursos, tiene efectos importantes y al coexistir dentro de la misma comunidad, incluso entre los mismos individuos, pueden producir efectos variables y complejos.

La nutrición de la planta es fundamental, y esta se realiza a través de su sistema de raíces, el cual absorbe agua y nutrientes. La proporción en la que una especie absorbe nutrientes depende de la concentración en el medio (Mengel y Kirkby, 1982). La absorción y transporte de los nutrientes y agua por las raíces son procesos complejos, que dependen no sólo de las propiedades de las membranas de las células, sino también, de la organización estructural de la raíz, los requerimientos de la planta, y los numerosos factores del suelo que continuamente influyen en el crecimiento (Drew, 1979). Por ende, la competencia se puede presentar entre individuos de la misma especie (intraespecífica) o entre individuos de diferentes especies (interespecífica) según la disponibilidad y la movilidad del nutriente (capacidad tampón) y de las características del sistema radical, como absorción de las raíces (Claassen y Steingrobe, 1999).

2.4 Descripción morfológica del cultivo del trigo (*Triticum aestivum* L.)

El trigo es una planta monocotiledónea, de ciclo anual, perteneciente a la familia de gramíneas, puede alcanzar hasta 1,2 m de altura. Los tallos son erectos y presentan estructura de caña, es decir están huecos en su interior, excepto los nudos. El crecimiento de los tallos no es apical, sino que se produce por el estiramiento de los tejidos situados por encima de los nudos (meristemo). Las hojas nacen de los nudos. Al igual que el resto de las gramíneas presentan dos partes: la vaina que rodea al peciolo y protege el meristemo o la zona de crecimiento y el limbo, que tiene la forma alargada y presenta nervios paralelos. Las flores se reúnen en espigas. Cada espiga consta de un eje principal o raquis sobre las que se distribuyen lateralmente las espiguillas. Estas constan de un eje principal del que nacen unos filamentos terminados por las glumas que encierran las flores hasta que estas empiezan a madurar (Faiguenbaum, 1990).

Su sistema radical está compuesto por dos tipos de raíces, las raíces seminales y las raíces adventicias. La primera se desarrolla junto con la radícula, este sistema de raíces puede alcanzar los dos metros de profundidad y mantiene a la planta hasta que aparezcan las raíces adventicias. Este segundo tipo de raíces aparece cuando emerge la cuarta hoja del macollaje y puede alcanzar

uno o dos metros, dependiendo de la condición del suelo, pero principalmente se concentra en los primeros treinta centímetros del suelo (FAO, 2002).

Existen distintas especies de trigo dependiendo del número de cromosomas en las células, estos se dividen en tres subgrupos; diploides ($2n=4$), tetraploides ($2n=24$) y hexaploides ($2n=42$), en donde el número de cromosomas básicos es $1n = 7$ (Gill et al., 2002).

2.5 Cultivo del trigo en Chile

El trigo es el cereal más sembrado en Chile, cultivado mayoritariamente por pequeños productores y se utiliza en la elaboración del pan, principal alimento de consumo masivo (ODEPA, 2012), por lo que tiene gran importancia socioeconómica. En la actualidad se cultiva principalmente el trigo hexaploide (*Triticum aestivum* L.) ocupando el 49,5% de la superficie sembrada con cultivos anuales, del que se obtiene como producto principal harina para pan y para la producción de una gran variedad de masas, proporcionando el 20% de las calorías y proteínas consumidas por los humanos (Reynolds et al., 2012). Por otra parte, Chile es un gran consumidor de pan, 98 kg persona/año (FECHIPAN, 2014), por lo que cualquier incremento en la calidad tecnológica y nutritiva del grano de trigo reviste gran importancia social.

Por ende, la tecnología desarrollada en la producción de trigo, ha logrado un crecimiento de las superficies cultivadas, debido al mejoramiento de las técnicas de manejo del cultivo y el fitomejoramiento, en donde este último se ha enfocado en la creación de variedades resistentes a enfermedades y a la tendadura, diversificación de los tipos de trigos cultivados y una mejora importante del potencial de rendimiento y la calidad panadera (ODEPA, 2012).

2.6 Producción Nacional

Según la información entregada por INE, la participación porcentual de la producción de trigo respecto a los otros cereales ha caído en los últimos 10 años, alcanzando un 39% del total de la producción de cereales en el periodo 2017/2018 dado por las condiciones climáticas no favorables. El cultivo de trigo se produce desde la región de Coquimbo hasta la región de los Lagos, concentrando su producción en las regiones del Bío Bío (29,7%) y La Araucanía (39,6%), que en conjunto representan un 69% del total de producción. La región del Maule sigue a las regiones mencionadas, en el tercer lugar respecto a la superficie de producción, representando el 12,5 % del total (ODEPA, 2018).

La producción nacional de trigo en la temporada 2017/2018 se estima que alcanzó alrededor de 1,479, 625 millones de toneladas. El 90% de la producción es de trigo harinero y el 10 % corresponde a trigo candeal (ODEPA, 2018).

2.7 Importancia de la fertilización nitrogenada en trigo

El N es el principal elemento requerido para la producción de los cereales, como es el caso del trigo (Echeverría et al., 2005). Deficiencias de este nutriente reducen la expansión foliar, provocan su prematura senescencia y afectan la tasa fotosintética, dando como resultado una menor producción de materia seca y grano. La deficiencia de N afecta el contenido proteico del grano, principal determinante de la calidad comercial del trigo (Ferraris et al., 2007).

Muchos estudios se han realizado con el objetivo de evaluar la mejor dosis de fertilización nitrogenada en trigo. En contraste, al obtener favorables rendimientos con dosis recomendadas se ha identificado un bajo uso eficiente de dicho nutriente en el cultivo de trigo, con valores de alrededor del 34% del total de la dosis aplicada (Raun, 1999). Esto puede mejorar, al menos en parte, con un manejo planificado de la fertilización nitrogenada, destinado a ajustar dosis de aplicación que aporten N en cantidad suficiente para cubrir los requerimientos de rendimiento y contenido de proteína. Otra estrategia apropiada puede ser la aplicación particionada del nutriente, en los momentos más oportunos para aumentar los rendimientos (aplicaciones tempranas) e incrementar su concentración en el grano (mediante aplicaciones más cercanas al período reproductivo (García, 2008). Es importante la aplicación N a la siembra, ya que en los primeros estadios de desarrollo del cultivo se determinan los componentes de rendimiento. Cuando se elimina la aplicación de N a la siembra y adicionalmente se atrasa la aplicación del N de inicio de macolla, se genera una baja importante en el rendimiento de grano (INIA, 2015).

El uso de fertilizantes químicos trae consigo un alto riesgo de contaminación (Aparicio et al., 1999). Por otra parte, la demanda actual por alimentos ha impulsado al sector agrícola a ser más eficiente en el uso de sus recursos y disminuir el uso de insumos químicos para lograr potenciar la producción de los principales cultivos alimenticios a nivel mundial.

2.8 Descripción morfológica del cultivo de lenteja (*Lens culinaris*)

La planta de lenteja corresponde a una especie dicotiledónea, herbácea anual, tiene un tallo delgado erecto, con un crecimiento indefinido aproximadamente de 30-50 cm de altura, algunas veces puede sobrepasar los 70 cm de altura dependiendo del ambiente de producción. Las hojas están formadas por un raquis de 50 mm de longitud en donde se insertan más de 15 folíolos. Las hojas son paripinnadas con presencia de zarcillo en las hojas superiores. Los folíolos son

ovalados y aplanados. Las flores son de color blanco con líneas de color azul, desarrollándose principalmente una vaina por pedúnculo, con un promedio de grano por vaina. El grano es parcialmente aplanado, de cutícula verde claro a gris y cotiledones amarillos claros. Pueden darse tres tipos de sistemas de raíces: un sistema radicular poco profundo, pero con muchas ramas y numerosos nódulos en la raíz principal; una raíz principal delgada y fina; o una forma intermedia, dependiendo del tipo de semillas (INIA, 2006).

2.9 Cultivo de lenteja en Chile

Le lenteja es una leguminosa de grano, destinada principalmente al consumo humano, gracias a su alto contenido proteico, aunque también se utiliza como planta forrajera para la alimentación de ganado. Es cultivada principalmente en los secanos costeros e interior de la zona central y centro sur de Chile. Sin embargo, la producción nacional ha disminuido significativamente en los últimos 30 años, producto del incremento de los costos de producción que desfavorecen las ganancias, desincentivando la siembra y debido al aumento de las importaciones dado al bajo precio de las legumbres en el extranjero principalmente desde Canadá, por lo que, además, son producidas a mayor escala que Chile (Baginsky y Ramos, 2017). Junto con el bajo nivel tecnológico y problemas sanitarios como la incidencia de roya (*Uromyces fabae*) son factores responsables de la disminución de la superficie sembrada.

En la década de los 70s' se introdujeron en Chile cultivares resistentes a roya, como Penzeskaja 14 y Laird para lidiar con este patógeno que limitaba la producción (Tay et al., 2001a). Tras esto, se obtuvieron granos que presentaban un tamaño inferior al de la lenteja chilena y no se adecuaba a la norma establecida de calidad exigida por los mercados internacionales. A pesar de que el posterior desarrollo de variedades como Araucana-INIA (Tay et al., 1981) y Super Araucana-INIA (Tay et al., 2001b) permitió aumentar el tamaño del grano, ambos cultivares no solucionaron el problema de la roya en las zonas de secanos costero e interior, debido a su alto grado de susceptibilidad y el costo de manejo de prácticas de control químico. Luego de esto en los años 1980-1990 el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) desarrolló el cv. Calpún-INIA que equilibraba la resistencia a la roya con el calibre del grano (INIA, 2006).

2.10 Producción Nacional

Según ODEPA (2017), actualmente la producción del cultivo de lenteja está centrada principalmente en áreas pequeñas, a cargo de la agricultura familiar campesina (AFC), donde 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 la disponibilidad de agua a futuro.

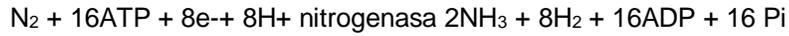
2.11 Fijación de nitrógeno atmosférico (N₂) por leguminosas

El nitrógeno (N) es un elemento esencial para las plantas, ya que forma parte de compuestos tan fundamentales como proteínas, ácidos nucleicos y clorofila, y el cual se necesita principalmente en los tejidos vegetales en crecimiento. La vía de ingreso de N a las plantas proviene del suelo, y para ser absorbido se debe encontrar mineralizado, como nitrato (NO₃⁻) y amonio (NH₄⁺). Sin embargo, debido a que se acumula principalmente en formas orgánicas en el suelo, se hace necesaria su transformación microbiana, conocida como mineralización, para dejarlo disponible para las plantas (Urzúa, 2000).

Las especies de leguminosas al igual que todos los vegetales absorben el N mineral del suelo, pero además pueden fijar el N₂ atmosférico; sin embargo, y a pesar de que su concentración en la atmosfera es elevada (78%), este no es aprovechable directamente por las plantas. El N₂ puede convertirse en producto asimilable a través de un proceso denominado fijación simbiótica de nitrógeno (FSN) mediante la simbiosis con bacterias fijadoras, principalmente del género *Rhizobium* (Urzúa, 2000; Olivares, 2004). Este proceso se ha identificado como simbiosis *Rhizobium*-leguminosa (Watanabe, 2000; Olivares, 2004). Según Azcon-Bieto y Talon (1999), la simbiosis más conocida e importante, desde una perspectiva económica, es la que se establece entre raíces de leguminosas y bacterias del género *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Sinorhizobium*, *Allorhizobium* y *Azorhizobium*. Todos ellos llamados colectivamente rizobios, caracterizándose por presentar morfología bacilar, ser aerobios gram-negativos, no ser formadores de esporas y, además, utilizar una gran variedad de azúcares como fuente de carbono.

Para que ocurra la fijación del N₂, los rizobios deben colonizar las raíces, formando protuberancias conocidas como nódulos. Las bacterias alojadas en los nódulos son las encargadas de transformar el N₂ a nitrógeno mineral (NH₃) por acción de una enzima llamada nitrogenasa, entregando a la planta el nutriente necesario para su síntesis proteica.

La siguiente ecuación expresa la reacción por la cual el N₂ se fija, quedando disponible para las plantas:



La transformación del N_2 corresponde a un proceso de reducción química y para crear este ambiente reductor, la planta genera una proteína denominada leghemoglobina, que protege a la nitrogenasa del O_2 . El O_2 es indispensable para la respiración celular, que debe estar ausente en este paso bioquímico. Cuando la leghemoglobina está activa, produce una coloración rojiza característica, que se puede apreciar al seccionar un nódulo ocupado por los bacteroides de *Rhizobium* en pleno proceso de fijación de N_2 . Cabe destacar que esta reacción es de alto consumo energético (16 ATP); sin embargo, la planta leguminosa logra un balance positivo por la enorme cantidad de N fertilizante equivalente que produce (Urzúa, 2000; Olivares, 2004).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar del estudio

El ensayo se realizó en los invernaderos del Centro de Mejoramiento Genético y Fenómica Vegetal, dependencias de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Talca.

3.2 Material Vegetal

Para el ensayo se utilizaron semillas de trigo (*Triticum aestivum L.*) variedad *Pandora*, que se caracterizan 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). También, se utilizaron semillas de lenteja (*Lens culinaris*) 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 Condiciones y manejo del ensayo

El ensayo se realizó en invernadero bajo condiciones de luminosidad de día corto y con una temperatura aproximada de 20 a 22 °C.

Para el establecimiento del ensayo se usaron macetas de 1,5 kg, y se utilizó un suelo Trumao, originado a partir de ceniza volcánica, perteneciente a la serie Bramaderos, con características generales de color gris oscuro, de textura franco-limosa y rico en materia orgánica (CORFO, 1964). Se sembraron seis semillas de trigo por maceta en el caso del monocultivo de trigo, y seis semillas de lentejas en el monocultivo de esta especie. Para el caso de los tratamientos con cultivo asociado se sembraron tres semillas de cada especie por maceta. Después de 13 días desde la siembra las plántulas emergieron. Una vez desarrolladas las primeras hojas, las plantas de lenteja fueron inoculadas con bacterias del género *Rhizobium* aplicando 2 mL de una suspensión de bacterias (Rizofix ® Biogram) por planta. Ambas especies se fertilizaron con 100 mL de solución nutritiva sin nitrógeno (50 mL K + 50 mL Mg + 50 mL Ca + 5 mL Fe + 5mL P + 25 mL micro). La falta de N en la solución nutritiva favorece el desarrollo y funcionamiento de los nódulos en lentejas. Se regó día por medio hasta alcanzar un 70% de la capacidad de campo del suelo.

3.4 Tratamientos

El ensayo estuvo compuesto de 4 tratamientos (4 repeticiones cada uno) (Figura 1). Cada repetición contiene 6 plantas en total, y los tratamientos de cultivos asociados tienen 3 plantas de cada especie: 3 de trigo y 3 de lenteja. En el caso de los tratamientos con cultivos asociados, se mantuvo igual volumen de suelo para el crecimiento de las raíces.

Se utilizaron como controles macetas sembradas solo con trigo o lenteja. Por otra parte, los cultivos asociados se realizaron de la siguiente forma: en el tratamiento 'asociado 1' se dejó que las raíces de ambas especies exploraran todo el volumen de suelo contenido en la maceta, mientras que en el tratamiento 'asociado 2' se separó el volumen de suelo en partes iguales, impidiendo la mezcla de las raíces mediante una malla (Figura 1).

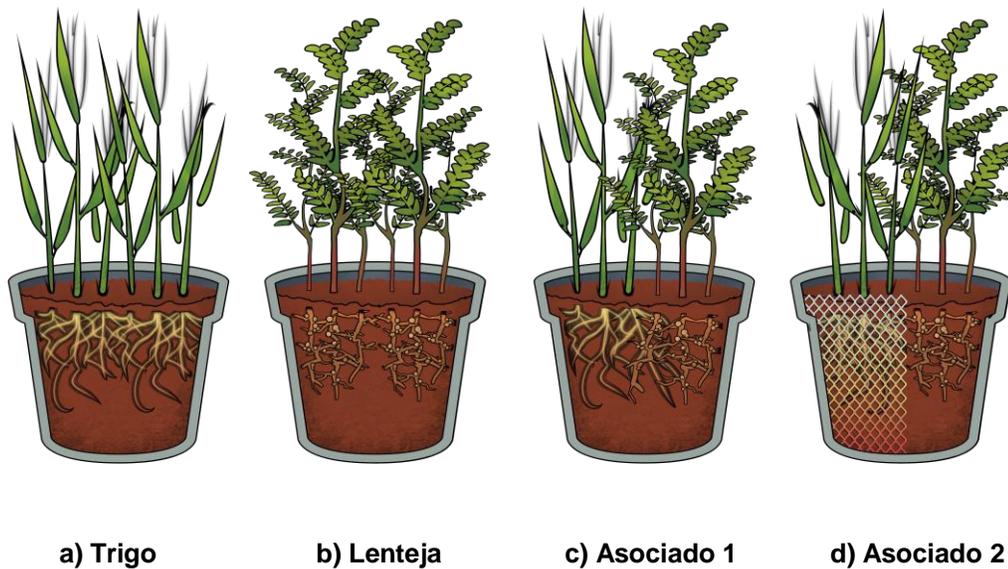


Figura 3.1. Tratamientos del ensayo. a) y b) Tratamientos controles o de referencia. c) y d) Tratamientos con plantas asociadas de trigo y lenteja.

3.5 Desarrollo vegetativo y absorción de N

Las plantas crecieron por 91 días en condiciones de invernadero. Una vez transcurrido este tiempo, las plantas fueron cosechadas y separadas en parte aérea y radical. Las plantas fueron almacenadas en bolsas de papel y secadas en estufa de aire forzado a 70°C, hasta alcanzar peso constante (~72 h). Una vez seco el material, estas fueron pesadas para determinar la producción de materia seca aérea y radical producida en cada tratamiento. Para la determinación de la

concentración de N en la planta, la parte aérea fue molida y se pesaron 0,15 mg de material de cada una de las repeticiones para la determinación de N, mediante el método de Dumas. 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.

3.6 Análisis estadístico

Para el análisis del ensayo se utilizó un diseño completamente al azar. 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 una vía (ANDEVA, $p < 0,05$), mientras que la separación de las medias fue realizada entre los 4 tratamientos con la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS

4.1 Materia seca aérea total producida por maceta

La cantidad de MS aérea producida por maceta en el tratamiento control de trigo fue de 4,4 g maceta⁻¹, mientras que para lenteja control fue de 3 g maceta⁻¹ (Figura 2). Lo anterior indica una diferencia de 32% más en la producción de MS aérea de trigo respecto la lenteja, existiendo una diferencia estadísticamente significativa.

En cuanto a los tratamientos de cultivos asociados, si se considera la producción total por maceta (trigo + lenteja) estos obtienen una producción similar al tratamiento control de trigo (Figura 2). Entre ambos tratamientos con asociación de cultivos, no hay diferencias estadísticas, es decir, producen igual MS aérea, independiente de que sus raíces estuvieran en contacto o no.

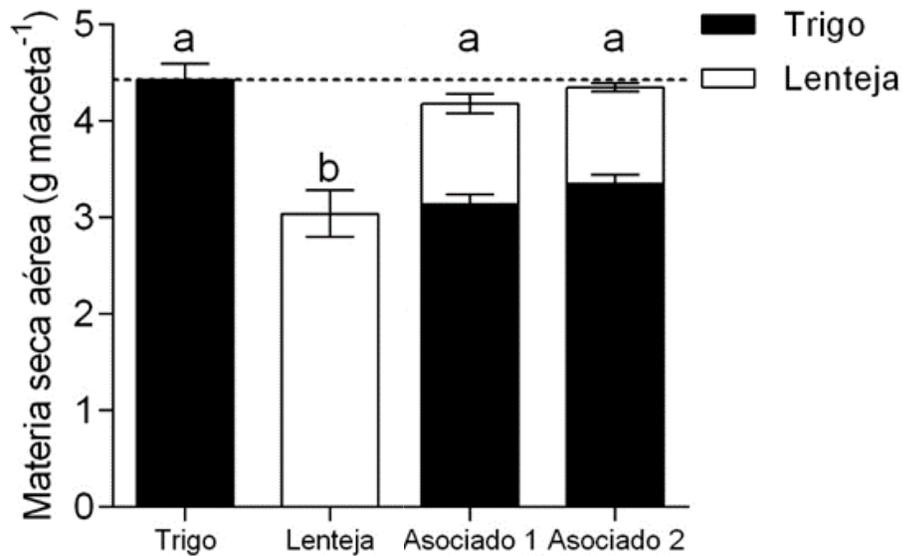


Figura 4.1. Producción total de materia seca (MS) aérea por maceta, para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical). Letras minúsculas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

4.2 Materia seca aérea producida por planta

En los tratamientos control, el promedio de producción de MS aérea de una planta de trigo tiende a ser mayor que una planta de lenteja, aunque esta diferencia no es estadísticamente significativa (Figura 3). Por otra parte, el promedio de producción de MS aérea de una planta de trigo en los tratamientos asociados, aumenta, mientras que para lenteja disminuye en relación a los controles/monocultivos. El aumento de la producción de MS aérea de trigo es de un 37% más respecto de la producción de trigo control, produciéndose la misma cantidad en ambos tratamientos asociados. Mientras que para las plantas de lenteja la situación es distinta, existe una disminución aproximadamente del 50% respecto al control, y en ambas asociaciones el promedio de producción de MS aérea de una planta de lenteja es igual.

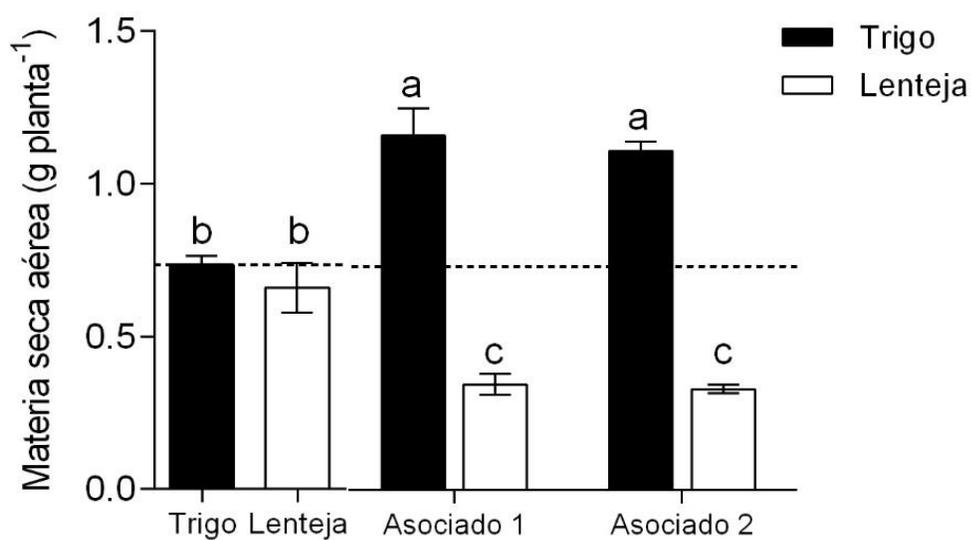


Figura 4.2. Producción normalizada de materia seca (MS) aérea por planta para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical). Los valores fueron normalizados por la cantidad de plantas por maceta. Letras minúsculas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

4.3 Materia seca radical total producida por maceta

El promedio de producción de MS radical total por maceta se comportó de la misma forma que la MS aérea producida por trigo y lenteja en control. La biomasa radical de trigo fue mayor a la de lenteja (Figura 4). La producción total por maceta en trigo control fue de $3,13 \text{ g maceta}^{-1}$ y en lenteja fue de $1,65 \text{ g maceta}^{-1}$, lo cual representa un 48% más de MS radical de trigo en maceta.

Sin embargo, en el caso de los cultivos asociados, la MS radical disminuyó en ambos tipos de asociaciones, con raíces juntas y separadas, siendo menor la producción de raíces en el tratamiento que confinó las raíces a una parte del volumen de suelo y que se encontraban separadas físicamente por una malla (Asociado 2).

La producción total de raíces del cultivo 'asociado 1' es similar a la producción total de raíces del trigo en monocultivo. Mientras que la producción total de raíces en el cultivo 'asociado 2' es similar a la producción total de raíces a la lenteja en monocultivo.

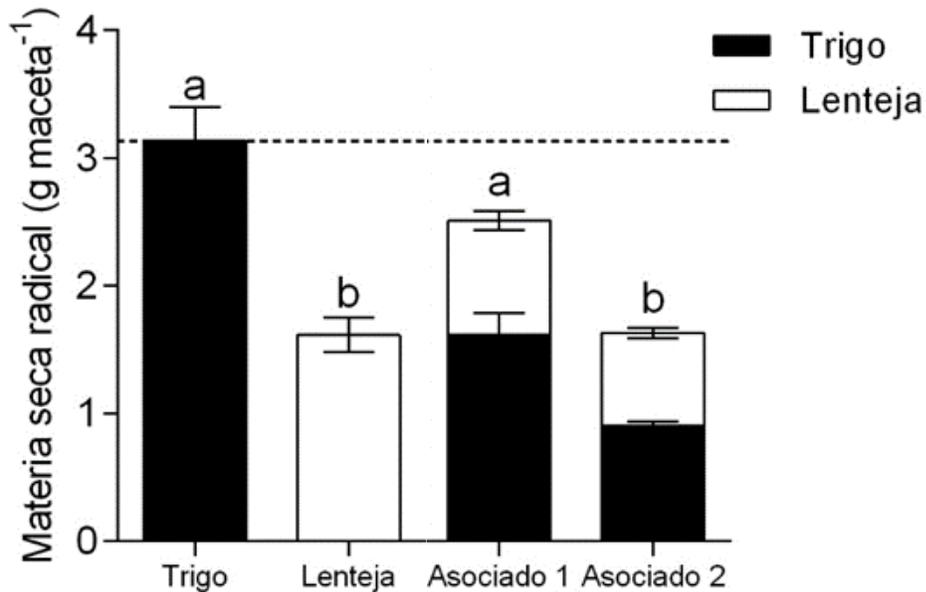


Figura 4.3. Producción total de materia seca (MS) de raíces por maceta para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical). Letras minúsculas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

4.4 Materia seca radical producida por planta

El promedio de producción de MS radical por planta fue diferente en ambas especies de cultivo en los tratamientos control (Figura 5). La producción por planta de trigo fue 0,53 g maceta⁻¹ y de lenteja fue 0,35 g maceta⁻¹, es decir un 34 % más en el cultivo de trigo.

Sin embargo, en la asociación de cultivos, el cultivo 'asociado 1' presenta diferencias significativas en la producción de raíces entre ambas especies de plantas, siendo el cultivo de trigo quien presenta la mayor producción de raíces respecto al cultivo de lenteja. En contraste, en el cultivo 'asociado 2' ocurre una situación diferente. La producción de materia seca radical producida por planta no presenta diferencias entre las especies. La producción unitaria de raíces de trigo y lenteja es la misma, recordando que este tratamiento presentaba una malla que separa las raíces físicamente. La producción de MS radical de la planta de trigo en el 'asociado 2' disminuye en un 50% respecto a la planta de trigo en el 'asociado 1'.

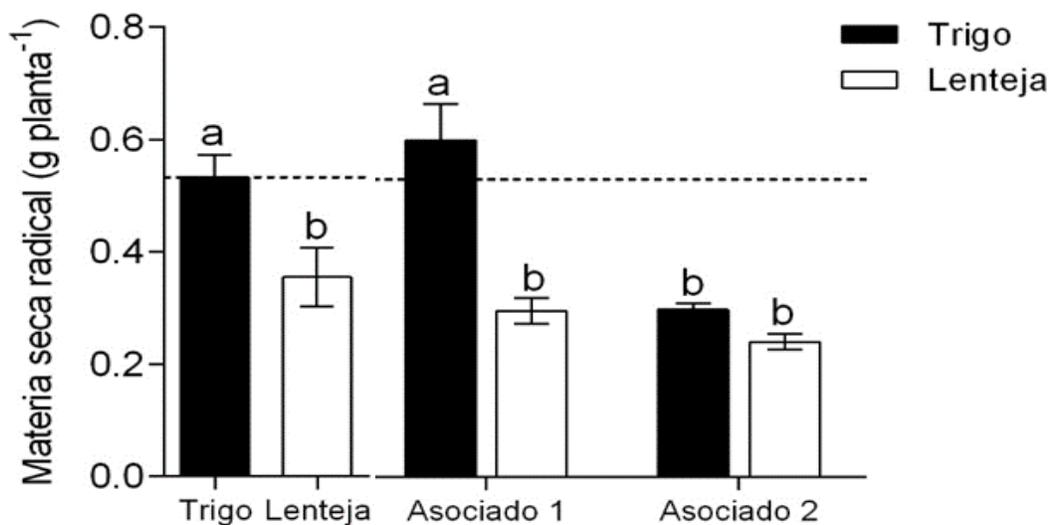


Figura 4.4. Producción normalizada de materia seca (MS) de raíces para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical). Los valores fueron normalizados por la cantidad de plantas por maceta. Letras minúsculas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$). Nota: El tratamiento 'asociado 1', presentó dificultades al determinar la materia seca de raíces producida por cada especie de planta, dado que las raíces crecieron en contacto y se entrelazaron. Sin embargo, dado que en el tratamiento 'asociado 2' el crecimiento de las raíces fue delimitado, se obtuvo la proporción de las raíces producidas por cada especie y con esta información se determinó la producción de raíces para el tratamiento de cultivo 'asociado 1'.

4.5 Relación raíz/parte aérea

La relación R/PA explica la cantidad de raíces necesarias para sustentar la parte aérea de una planta (Figura 6). Si el valor es mayor a 1 significa que existe mayor proporción de raíces que de parte aérea y viceversa. Para el caso de las plantas de trigo, se puede observar que la relación R/PA cuando crece en monocultivo, es mayor que cuando crece asociado, es decir, la relación R/PA disminuye cuando las plantas de trigo se encuentran asociadas con lenteja. Lo contrario ocurre para las plantas de lentejas, las cuales aumentan la relación R/PA cuando se encuentran asociadas con trigo. Lo anterior implica un aumento de las raíces para sostener la parte aérea.

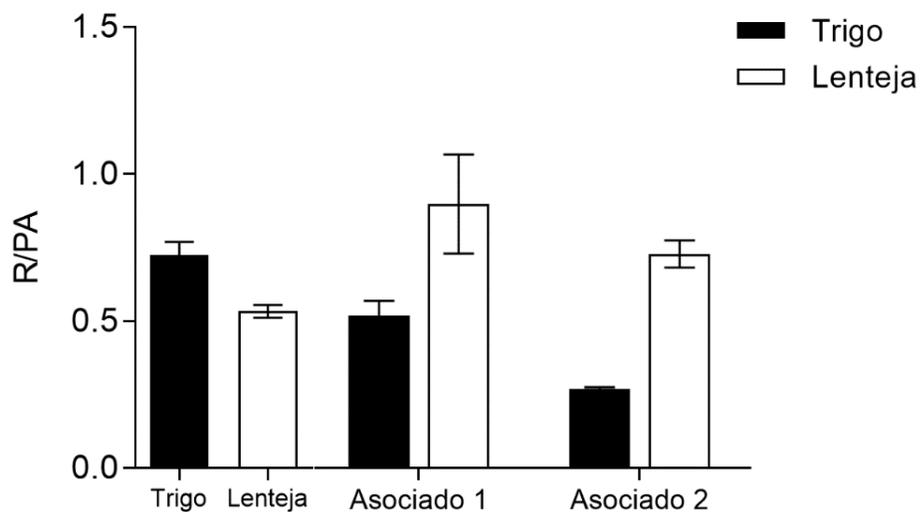


Figura 4.5. Relación raíz/parte aérea (R/PA) para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical) Valores de R/PA iguales a 1 indican igual proporción R/PA, valores <1 una mayor proporción de PA y valores >1 una proporción mayor de raíces.

4.6 Concentración de N

Se determinó la concentración de N en la parte aérea de trigo y lentejas, tanto en monocultivo o en asociación (Figura 7). En el caso de la concentración de N en lentejas, este fue de alrededor de $4,3 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Mientras que la concentración de N en trigo fue de $\sim 1,3 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Las plantas de lentejas presentan alta concentración de nitrógeno, ya sea en monocultivo o en asociación con trigo. Proporcionalmente, las plantas de trigo presentan una concentración de N un 70% menos que las plantas de lenteja.

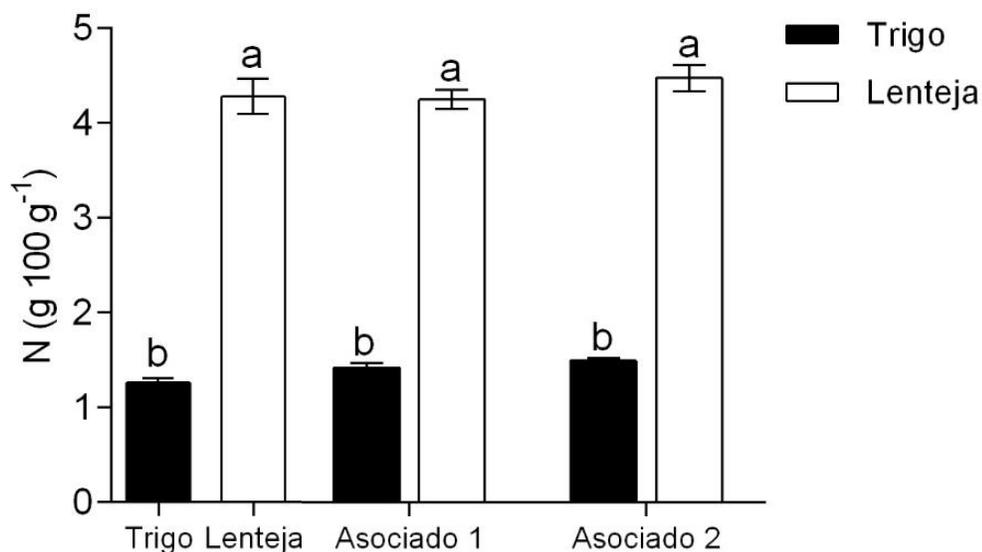


Figura 4.6. Concentración de N en la materia seca aérea de trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical). Letras minúsculas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

4.7 Nitrógeno total absorbido por maceta

El nitrógeno absorbido se calculó multiplicando la materia seca aérea total producida por la concentración de N del tejido vegetal. Como se observa en la figura 8, la lenteja en monocultivo acumuló la mayor cantidad de N por maceta. Mientras que el trigo en monocultivo acumuló la menor cantidad de N total por maceta. Existiendo una diferencia significativa de un 58% más de N acumulado en lenteja respecto al trigo en los tratamientos control.

En el caso del N acumulado por ambos cultivos al estar asociados, la cantidad es de alrededor de 90 mg N maceta⁻¹, valor menor que lo absorbido por la lenteja en monocultivo, pero superior que la cantidad de N absorbido por trigo solo.

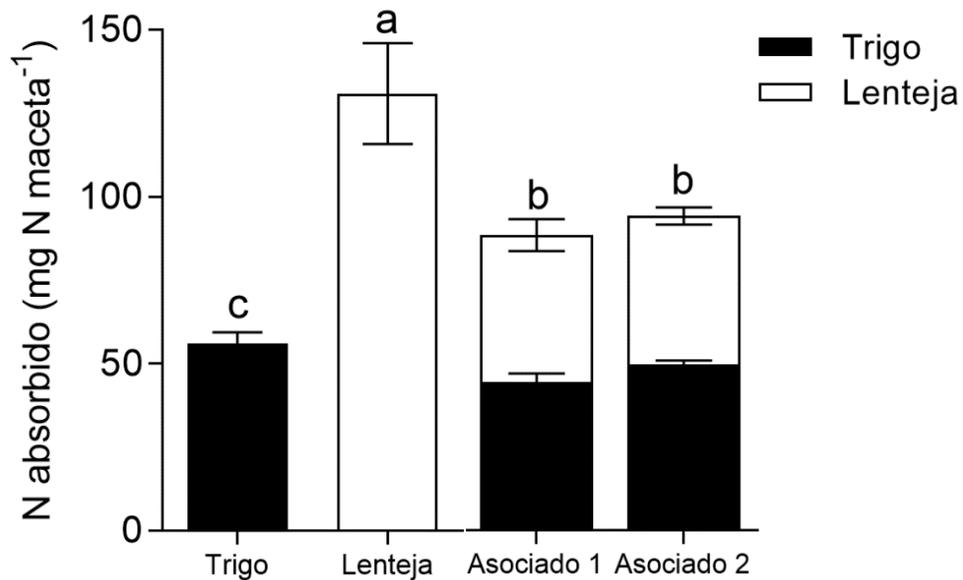


Figura 4.7. Nitrógeno absorbido por maceta para trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical). Letras minúsculas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

4.8 Nitrógeno absorbido por planta

La cantidad de N acumulado por una planta de lenteja es mayor que la cantidad de N acumulado por una planta de trigo en las plantas control (Figura 9). Mientras que en la asociación de cultivos 1 y 2, el N acumulado no tiene diferencias entre las especies asociadas, pero es mayor al del trigo y menor al de lenteja en monocultivo. Es decir, se encuentra en un valor intermedio, alcanzando aproximadamente 16 mg N planta⁻¹. La cantidad de N acumulado por una planta de trigo en los tratamientos asociados aumento en un 48%, mientras que el N acumulado por una planta de lenteja en los tratamientos asociados disminuyo en un 43%.

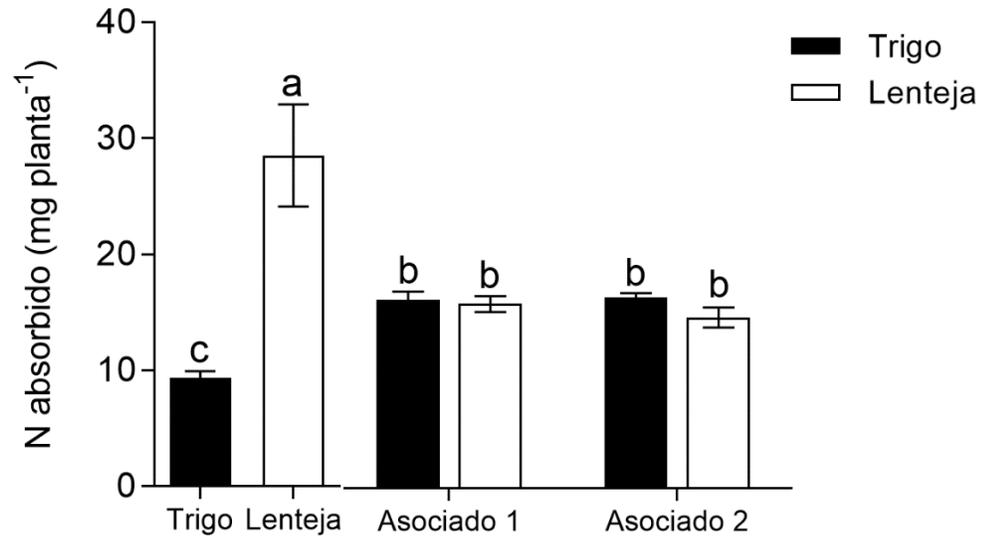


Figura 4.8. Nitrógeno absorbido por planta de trigo y lenteja, asociado 1 (trigo-lenteja con contacto radical) y asociado 2 (trigo-lenteja sin contacto radical). Letras minúsculas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

5 DISCUSIÓN

Tras los resultados obtenidos, se determina el efecto del cultivo intercalado de trigo y lenteja sobre la absorción de N y la producción de materia seca en ambas especies.

En primer lugar, las diferencias obtenidas en la producción de materia seca (MS) aérea y MS radical total y unitaria de las especies sembradas en monocultivo para la referencia del ensayo, se explican a través de las diferencias morfológicas de cada especie y la disponibilidad limitada del nutriente N. La producción de MS aérea es mayor en trigo que en lenteja, debido a que sus hojas son grandes, alargadas y rectas y sus tallos son erectos, presentan estructura de caña y alcanzan mayor longitud. Mientras que la lenteja presenta hojas pequeñas y ovaladas y su tallo es delgado, endebles y de menor longitud. El trigo tuvo un crecimiento de 21 cm y la lenteja alcanzó una altura de 17 cm aproximadamente (datos no presentados).

Por otra parte, el sistema radical de las especies cultivadas es distinto. El trigo presenta mayor producción de MS radical dado que su raíz es densa y fasciculada, tiene raíces seminales y coronarias. Las primeras son las raíces de la radícula, que dejan de funcionar (1 a 2 meses) para quedar en forma definitiva las de los nudos de la corona (Mellado, 2017), por lo que explora más el suelo y a su vez tiene mayor eficiencia para absorber N. En cambio, la lenteja presenta una raíz menos densa, pivotante, es decir, la radícula emerge de la raíz principal, que posteriormente permite que las raíces laterales se desarrollen (Gregory, 1988), por lo que explora menos el suelo, dado que la fuente de N proviene del suelo y de la atmósfera. La tasa de fijación de N_2 de las leguminosas se correlaciona negativamente con el contenido de N inorgánico en el suelo (Mahieu, 2009). Por lo tanto, existe una predominancia por parte de la especie de trigo de una mayor producción de materia seca (Figura 4.1 y 4.4), mientras que la especie de lenteja predomina en la absorción de nitrógeno en un medio deficiente (Figura 8).

En cuanto a los cultivos asociados si se analiza el rendimiento en su totalidad, en ambos casos la producción total de MS aérea es similar al tratamiento de trigo control (Figura 2). Situación que, desde el punto de vista agroecológico, se conoce como 'relación equivalente de tierra' (Land Equivalent Ratio [LER]) (Willey y Osuri, 1972). La LER compara la eficiencia de los cultivos individuales y cultivos asociados en su rendimiento, peso seco o cualquier variable cuantitativa de la producción, por lo tanto, indica el potencial productivo de la especie en una superficie determinada. En este caso, la producción total de seis plantas de trigo en monocultivo, fue alcanzada por la producción total de la asociación de tres plantas de lenteja más tres plantas de trigo.

No obstante, a pesar de que el rendimiento de MS aérea del cultivo asociado 1 y 2 fue alto, si se analiza de forma individual por especie y por producción unitaria, se observa como el trigo supera los rendimientos de MS aérea y la lenteja disminuye su producción de forma significativa en comparación a las especies control (Figura 3). Esto puede ser explicado mediante la complementariedad vegetal de las especies y la facilitación de procesos rizosféricos, la cual puede presentar interacciones tanto complementarias como competitivas (Bedoussac y Justes, 2010a). Es decir, las especies asociadas se complementan en cuanto a la obtención del nutriente. En este caso, la lenteja fija N_2 , que puede ser suficiente para su requerimiento, dejando una mayor cantidad de N disponible en el suelo para la absorción del trigo, disminuyendo la competencia directa por el nitrógeno mineral. Sin embargo, pudo existir competencia entre las especies por otro nutriente, ya que independientemente de que la solución nutritiva aportara los nutrientes en cantidad necesaria para las plantas, no quiere decir que ambas especies que se encontraban asociadas lo absorbieran en la misma cantidad.

En relación al comportamiento de las especies asociadas respecto a los cultivos de referencia, las plantas de trigo, en el tratamiento ´asociado 1` produjeron mayor cantidad de raíces que las plantas de trigo en el ´asociado 2` y ambas produjeron la misma cantidad de MS aérea, siendo superior en un 37 % al del cultivo de referencia (Figura 3). Esto indica dos cosas:

1) El mayor desarrollo de raíces en el ´asociado 1` es debido a que las plantas tuvieron todo el volumen de suelo para explorar, mientras que en el ´asociado 2` el volumen de suelo estaba reducido a la mitad, por lo que limitó la exploración del suelo por parte de las raíces. Sin embargo, el menor desarrollo de raíces no fue un impedimento para obtener los nutrientes necesarios, ya que las plantas movilizan los nutrientes a la superficie de absorción radicular por difusión y flujo de masa (Jungk y Claassen, 1995). La proporción de nutrientes tomados por una planta depende de la demanda impuesta por las raíces del suelo, de la superficie radicular, del tamaño del sistema radicular, y de la movilidad del nutriente en el suelo (Nye, 1979). En este caso el nitrato (NO_3^-) es un elemento muy móvil, por lo que no necesariamente las plantas deben desarrollar mucho sistema radicular para poder absorberlo, dado a que se mueve disuelto en el agua hacia las raíces. Esto explica como las plantas de trigo en el ´asociado 2` obtuvieron la misma cantidad de N y produjeron la misma cantidad de MS aérea con un sistema de radical más pequeño.

2) En cuanto al aumento de la producción de MS aérea de trigo en ambas asociaciones, esto está explicado por la cantidad N disponible en el suelo. Las plantas que se encontraban en el tratamiento control agotaron el N disponible del suelo, puesto que se encontraba con baja disponibilidad y existió competencia intraespecífica por el nutriente, absorbiendo una menor cantidad de N por planta (Figura 4.8), y presentando leves síntomas con hojas cloróticas (Anexo

1). En el caso de las plantas de trigo que se encontraban asociadas, según lo observado, disponían de más cantidad de N en el suelo, debido a que el número de plantas de trigo se redujo a la mitad, y que las lentejas fijan su propio nitrógeno, disminuyendo la competencia y absorbiendo casi el doble de cantidad de N por planta (Figura 9). Independiente de que, si el volumen de suelo estaba dividido o las raíces se encontraban separadas, como fue explicado más arriba, el N se mueve disuelto en el agua y las plantas de trigo fueron más hábiles que las plantas de lentejas para obtener el N del suelo, teniendo una mayor capacidad de absorción, debido a un sistema radicular más eficiente.

Así, se puede decir que las plantas de trigo en asociación fueron más eficientes que las plantas de trigo control, ya sea por su desarrollo de parte aérea, radical y la competencia y absorción de N. Según las mediciones indirectas de N que se tomaron en las plantas de trigo, se pudo demostrar que existió mayor competencia por el N del suelo entre las plantas del tratamiento control que las plantas de trigo asociadas. El índice de clorofila fue más bajo para las plantas control, demostrando una caída más rápida en la tasa fotosintética de la planta (Anexo 3, Figura 1). El índice de flavonoides aumenta en condiciones de deficiencia de N y las plantas del tratamiento control presentaron el valor más alto en contraste con las plantas de trigo asociadas (Anexo 3, Figura 2). El índice de balance de nitrógeno (NBI), que es la relación clorofila/flavonoides, indica que el balance de N en la planta es el más bajo para las plantas de trigo del tratamiento control (Anexo 3, Figura 3). Lo anterior indica que la presencia de hojas cloróticas en las plantas de trigo control fue dado por deficiencia de N (Anexo 1).

La relación R/PA disminuyó en los cultivos asociados, siendo en el control la relación más alta. Las plantas de trigo en ambas asociaciones fueron eficientes, desarrollaron menor proporción de raíces para sostener una mayor proporción de parte aérea, pero en particular las plantas de trigo del 'asociado 2' fueron más eficientes en la absorción de N y en el desarrollo de su parte aérea con un sistema radical más pequeño: relación R/PA 'asociado 1' > 'asociado 2'.

Situación distinta se observó en las plantas de lentejas. En ambas asociaciones las plantas de lenteja tuvieron el mismo comportamiento, desarrollaron la misma cantidad de raíces y la misma cantidad de materia seca aérea, existiendo contacto o no entre las raíces con el cultivo asociado. La producción de MS aérea se vio fuertemente disminuida en ambas asociaciones en comparación al control (Figura 3), lo cual implica un aumento de la relación R/PA (Figura 6). Esto significa que una mayor cantidad de raíces sostuvieron una menor producción de parte aérea, en otras palabras, las plantas de lenteja asociadas destinaron mayor cantidad de asimilados a las raíces, en comparación a las plantas de lenteja control, para obtener nutrientes, esto podría indicar competencia por nutrientes con el cultivo asociado.

Si bien la planta de lenteja absorbe preferentemente el N en forma inorgánica y fija, además, N₂ atmosférico, cuando el N del suelo es limitado o existe competencia con el cultivo asociado (Hauggaard et al., 2008) se puede decir que las plantas de lentejas del tratamiento control crecieron con ambas fuentes de N, por eso su mayor absorción y mayor producción de MS aérea en comparación con las plantas asociadas (Figura 3 y 9). Mientras que las plantas de lenteja en asociación, independiente si existía una separación de raíces, compartían los mismos nutrientes del suelo aportados por la solución nutritiva, existiendo una competencia interespecifica por los nutrientes especialmente el nitrógeno, reduciendo las fuentes de N para las lentejas asociadas sólo al del nitrógeno proveniente de la atmósfera. Lo anterior indica que las plantas de lentejas creciendo en asociación disponían de muy poco N en el suelo o quizás nada, para su crecimiento, debido que tuvo que competir con el trigo, una especie más competitiva con un sistema radicular más eficiente para obtener nutrientes y utilizó la capacidad de fijar N₂ de la atmósfera para satisfacer la demanda, pero aparentemente no fue suficiente para la mantención de la planta completa, ya que desarrolló una menor parte aérea y su sistema radicular fue mayor dado que tuvo que explorar más el suelo en busca de nutrientes. Situación que reafirma esta competencia, es que los nódulos en las primeras etapas de vida de una leguminosa no están bien desarrollados, por lo que el cultivo asociado compite con la leguminosa directamente por el nitrógeno mineral, hasta que la leguminosa adquiere la capacidad suficiente para fijar el nitrógeno atmosférico (Voisin et al., 2002) en este caso dejando en desventaja a la especie de lenteja, dado la mayor competitividad por parte de la especie de trigo. Estudios realizados indican que las leguminosas intercaladas aumentan la tasa de fijación de N₂ en situación de competencia en comparación con un sistema de monocultivo (73% y 61% de N₂ para intercalados y cultivos solos, respectivamente), pero disminuye la cantidad total de N₂ fijado, debido a la producción más baja de biomasa en comparación con el cultivo solo (Bedoussac et al, 2015).

Pero, un detalle importante observado, es que las plantas de lentejas asociadas a pesar de que absorbieron menor cantidad de N, muestran igual concentración de N que las plantas de lenteja control (Figura 7), pero un menor tamaño, lo cual indica que también pudo existir competencia por otro nutriente. Lo anterior se refleja en la presencia de hojas con carencias nutricionales en lenteja (Anexo 2). En este caso no se pudo realizar mediciones indirectas de N para determinar exactamente si la deficiencia proviene del N, debido a que el área foliar de la lenteja es muy pequeña.

Otros estudios de investigación también han determinado que, en la mayoría de las situaciones, el cereal intercalado es más productivo que la leguminosa intercalada independiente de la estrategia de cultivo (Bedoussac et al, 2015). Pruebas realizadas con cereales: cebada (*Hordeum vulgare L.*), trigo blando (*Triticum aestivum L.*) y de trigo duro (*Triticum turgidum L.*)

intercalados con leguminosas como: guisante (*Pisum sativum L.*) o haba (*Vicia faba L.*), indican que cuanto más aumenta el rendimiento de grano del cereal intercalado, menos produce la leguminosa, lo que sugiere que existe una compensación entre los cultivos (Bedoussac et al, 2015). Esto indica que el beneficio del cultivo intercalado para el cereal puede ser una ventaja del crecimiento con leguminosas, lo que confirma que el cereal es la especie más competitiva (Vandermeer et al. 1998) permitiendo mayor biomasa y rendimiento en comparación con los monocultivos.

No obstante, la eficiencia del cultivo intercalado es mayor cuando la disponibilidad del N en el suelo es baja. Ensayos realizados con asociación de cultivos de cereal-leguminosa, más la utilización de fertilizantes nitrogenados, determinaron que la eficiencia de la leguminosa para fijar N₂ atmosférico no es significativa, dado que tiene como prioridad absorber el N del suelo cuando se encuentra disponible, comprobando que el rasgo adaptativo de las plantas (fijación de N₂ o plasticidad de las raíces) es eficiente sólo en situaciones estresantes como la baja disponibilidad del recurso o competencia significativa con otra especie (Bargaz et al, 2015a; Jensen, 1996).

6 CONCLUSIONES

Las plantas de trigo obtienen mayor cantidad de N del suelo para su crecimiento al estar asociadas con plantas de lentejas, dado a que las plantas de lenteja fueron menos competitivas.

El contacto de raíces entre las especies cultivadas no produjo diferencias en los rendimientos ni en la absorción de N, pero se observó que una separación espacial de ellas hace más eficiente la absorción de N por el sistema radical. Así, la producción de los cultivos intercalados dependerá tanto de las características morfológicas de la especie, la disponibilidad de los nutrientes y su respuesta a la competencia interespecífica.

El sistema de trigo-lenteja es una alternativa de producción diferente a la convencional, la cual promueve la diversidad de especies y la utilización de leguminosas en suelos deficientes de N, reduce el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos y disminuye los impactos negativos sobre el medio ambiente.

7 BIBLIOGRAFÍA

Altieri, M., Nicholls, C. 2007. Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción; teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas*, 16 (1), 3-12p.

Aparicio, P., Arrese, C., Becana, M. 1999. Fijación de nitrógeno: 193-212. In: Azcon-Bieto, J. y M. Talón. *Fisiología y Bioquímica Vegetal*. Ediciones Interamericana McGrawHill. 517p.

Azcon, J., Talón, M. 1999. *Fisiología y Bioquímica Vegetal*. Ediciones Interamericana McGraw-Hill. Cap. 16.

Bargaz, A., Isaac, M., Jensen, E., Carlsson, G. 2015a. Intercropping of faba bean with wheat under low water availability promotes faba bean nodulation and root growth in deeper soil layers, *procedia. Environmental Science and Technology*. 29: 111-112.

Baginsky, C., Ramos L. 2017. Situación de las legumbres en Chile: Una mirada agronómica. Facultad de ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. *Revista Chilena de Nutrición*. Volumen. 45.

Bedoussac, L., Justes, E. 2010a. The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to promote yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and soil* 330: 19-35.

Bedoussac, L., Journet, E., Hauggaard, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E., Prieur, L., Justes, E. 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy Sustainable Development*. 35: 911-935.

Brooker, R., Bennett, A., Cong, W. 2015. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist* 206: 107–117.

Callaway, R. 1995. Interacciones positivas entre plantas. *Revisión Botánica* 61: 306-349.

Callaway, R., Walker, L. 1997. Competition and facilitation: A synthetic approach to interactions in plant communities. *Ecology*; Brooklyn. Volumen 78, N° 7.

Claassen, N., Steingrobe, B., 1999. Mechanistic simulation models for a better understanding of nutrient uptake from soil, in: Rengel, Z. (Ed.), Mineral Nutrition of Crops. Fundamental Mechanisms and Implications. The Harworth Press, Inc., Binghamton, NY, pp. 327–367.

CORFO. (1964). Suelos, descripciones. Proyecto aerofotogrametrico. Chile/O.E.A/B-ID.

Crews, T., Peoples, M. 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 102: 279-297.

Drew, M. 1979. Properties of roots which influence rates of absorption. Chapter 3, In: Harley, J.; R. Russell (eds.) *The soil-root interface*. London, Academic Press. pp. 21-38.

Duchene, O., Vian, J., Celette, F. 2017. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementary and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 240: 148–161.

Echeverría, H., Barbieri, P., Sainz Rosas, H., Covacevich, F. 2005. Fertilización nitrogenada y métodos de diagnóstico de requerimientos de nitrógeno en trigo. *Informaciones Agronómicas*. 26: 8-15.

Ehrmann, J., Ritz K. 2013. Plant:soil interactions in temperate multi-cropping production systems. *Plant and Soil* 376: 1–29.

FAO, 2002. Botany of the wheat plant, In: *Bread wheat, Improvement and production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (FAO). Roma, Italia.

FAO, 2017. El futuro de la alimentación y la agricultura, tendencias y desafíos *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*.

Faiguenbaum, H. 1990. Morfología, crecimiento y desarrollo de trigo (*Triticum aestivum L.*). Proyecto docente. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 48p.

FECHIPAN, 2014. Cifras panadería latinoamericana. 4p. Federación Chilena de Industriales Panaderos. Recuperado de <http://www.fechipan.cl>.

Ferraris, G., L. Couretot, L., Ponsa, J. 2007. Evaluación del efecto de un fertilizante foliar nitrogenado sobre el rendimiento, sus componentes, la eficiencia de uso del nitrógeno y la calidad

en cebada cervecera y trigo. Información técnica de Trigo y otros cultivos de invierno, campaña 2007. Publicación Miscelánea N°107. INTA EEA Rafaela 45:56

García, F. 2008. Manejo nutricional del cultivo de trigo. En: Actas Jornadas A Todo Trigo. Mar del Plata.

Gill, B., Friebe, B. 2002. Cytogenetics, Phylogeny and evolution of cultivated in: Bread wheat, Improvement and production. Organización de las naciones Unidas para la agricultura y alimentación (FAO). Roma, Italia. 71-88 pp.

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, pp. 857–867.

Hauggaard, H., Jørnsgaard, B., Kinane, J., Jensen, E. 2008. Grain legume –cereal intercropping: the practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renew. Agriculture, Food and Systems*. 23: 3-12.

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

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

INIA, 2015. Gestión del N en la productividad y calidad del cultivo de trigo. INIA Carrillanca. Ficha técnica 02.

Jensen, E. 1996. Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil* 182, 25-38.

Jensen, E., Peoples, M., Boddey, R., Gresshoff, P., Hauggaard, H., Alves, B., Morrison, M. 2011. Legumes of mitigation of climate change and provision of feedstock of biofuel and biorefineries. A review. *Agronomy Sustainable and Development*.

Jungk, A., Claassen, N., 1997. Ion diffusion in the soil-root system. *Advances in Agronomy*. Volumen 61: 53–110.

Kremen, C., Miles, A. 2012. Ecosystem Services in Biologically Diversified versus conventional Farming system: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *Ecology and Society*, 17 (4): 40.

Li, H., Zhang F., Rengel, Z., Shen, J. 2014. Rhizosphere properties in monocropping and intercropping systems between faba bean (*Vicia faba L.*) and maize (*Zea mays L.*) grown in a calcareous soil. *Crop and Pasture Science* 64: 976–984.

Liebman, M. 1988. Ecological suppression of weeds in intercropping systems: a review. In: *Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches*. Altieri, M. A., and M. Liebman, eds. Florida: CRC Press.

Mahieu, S. 2009. Assessment of the below ground contribution of field grown pea (*Pisum sativum L.*) to the soil N pool. University d'Angers.

Mellado, M., 2007. El trigo en Chile cultura, ciencia y tecnología. Colección libros INIA N° 21. Ograma. Chillán, Chile. p. 65-96.

Mengel, K., Kirkby, E. 1982. Principles of plant nutrition, 3rd ed. International Potash Institute, Bern.

Nye, F. 1979. Choice, Exchange, and the Family. In: Wesley R. Burr, Reuben Hill, F. Ivan Nye, and Ira L. Reiss, editors. *Contemporary Theories about the Family. General Theories/ Theoretical Considerations*. New York: The Free Press: 1-41.

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, 2012. Mercado del trigo en Chile. Producción y comercialización en la temporada 2011/2012. 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, 2018. Trigo: situación y perspectivas. Informe cosecha de trigo en la temporada 2017/2018. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos>.

Olivares, J. 2004. Fijación Biológica de Nitrógeno. Estación Experimental del Zaidín, Granada, España. 10 pp.

Ovalle, C., Del Pozo, A., Peoples, M., Lavín, A. 2010. Estimating the contribution of nitrogen from legume cover crops to the nitrogen nutrition of grapevines using the ¹⁵N isotopic dilution technique. *Plant and Soil* 33(4): 247-259.

Raun, W. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*, 91(3): 357-363.

Reynolds, M., Foulkes, J., Furbank, R., Griffiths, S., King, J., Murchie, E., Parry, M., Slafer, G. 2012. Achieving yield gains in wheat. *Plant, Cell and Environment* 35:1799–1823.

Sotomayor, A. 2008. Modelos agroforestales sistemas productivos para una agricultura sustentable. Programa: Desarrollo, validación y asistencia técnica agroforestal. INDAP.1-24p.

Sun, Y., Zhang, N., Wang, E., Yuan, H., Yang, J., Chen, W . 2013. Influence of intercropping and intercropping plus rhizobial inoculation on microbial activity and community composition in rhizosphere of alfalfa (*Medicago sativa* L.) and Siberian wildrye (*Elymus sibiricus* L.). *FEMS Microbiology Ecology* 70: 218–226.

Tay, J., Paredes, M., Kramm, V. 1981. Araucana-INIA, variedad de lenteja de grano grande. *Agricultura Técnica* 41:170.

Tay, J., Peñaloza, E., France, A. 2001a. Breeding for resistance to lentil rust in Chile. p. 243. In *Proceedings of the 4th European Conference on Grain Legumes. Towards the sustainable production of healthy food, feed and novel products*, European Association for Grain Legume Research (ed.), Cracovia, Poland.

Tay, J., France, A., Paredes, M. 2001b. Super Araucana-INIA: una nueva variedad de lenteja (*Lens culinaris Medik.*) chilena de grano grande. *Agricultura Técnica* 61:385-389.

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.

Tilman, D., Reich P., Knops, J., Wedin D., Mielke, T., Lehman C. 2001. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science* 294: 843-845.

Urzúa, H. 2000. Fijación simbiótica de nitrógeno en Chile: Importante herramienta para una Agricultura Sustentable. Proc. XX Reunión Latinoamericana de Rhizobiología, Arequipa, Perú. p. 211-227.

Vandermeer, J., Noordwijk, M., Anderson, J., Ong, C., Perfecto, I. 1998. Global change and multi-species agroecosystems: concepts and issues. *Agriculture Ecosystems Environment* 67:1–22.

Voisin, A., Salon, C., Munier, N., Ney, B. 2002. Effect of mineral nitrogen on nitrogen nutrition and biomass partitioning between the shoot and roots of pea (*Pisum sativum L.*). *Plant and soil*. 242: 251-262.

Watanabe, I. 2000. Biological nitrogen fixation and its use in Agriculture. Recuperado de www.osahinet.or/~it6i-wtnb/BNF.html. J.ICA/Cantho Univ. Expert. Mar – Apr. Vietnam.

Willey, R., Osiru, D. 1972. Studies of mixture of maize and beans (*Phaseolus vulgaris*) with particular reference to plant population. *Journal Agricultural.Science* 79: 517-529.

8 ANEXO

Anexo 8.1. Fotografía del tratamiento de trigo en monocultivo. Se observa la presencia de hojas cloróticas en las plantas.



Anexo 8.2. Fotografías de las diferencias de las hojas de las plantas de lenteja; cultivadas solas y asociadas a trigo.



Control

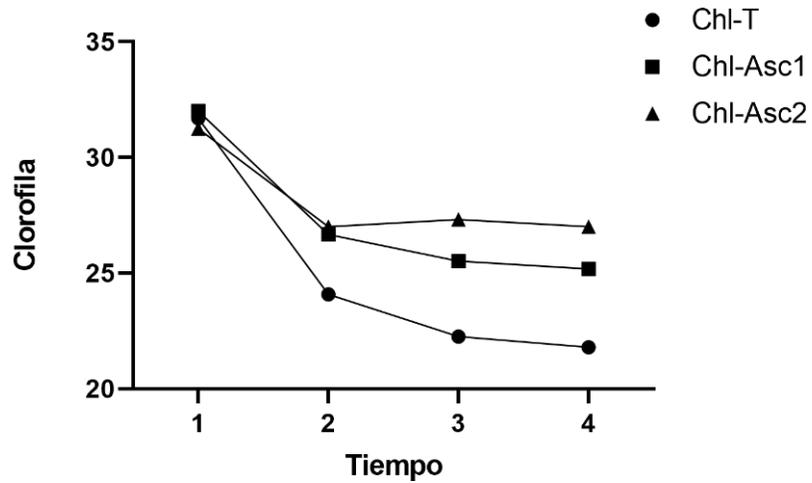


Asociado 1

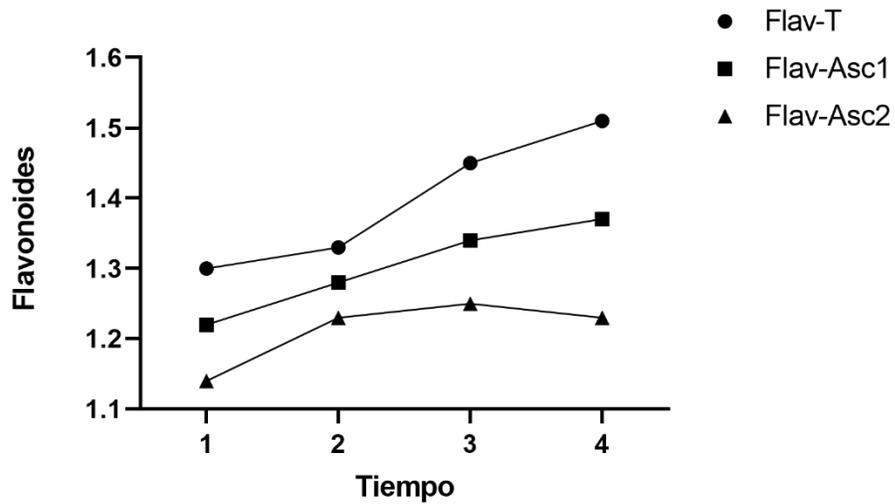


Asociado 2

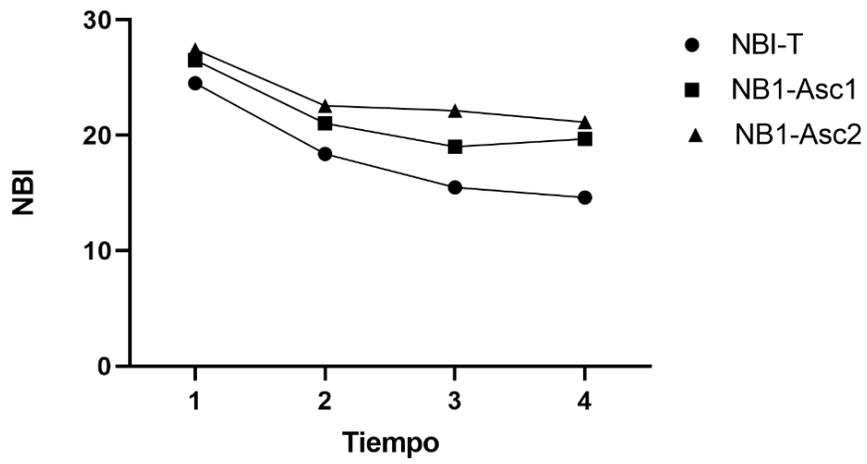
Anexo 8.3 Mediciones no destructivas realizadas durante el crecimiento del trigo con Dualex (FORCE-A, Scientific TM) que entrega datos inmediatos del índice de clorofila (Chl), índice de flavonoides (Flav), índice de balance de nitrógeno (NBI).



Anexo 8.3. 1. Índice de clorofila en hojas de trigo de tratamiento control (Chl-T), 'asociado 1' (Chl-Asc1) y 'asociado 2' (Chl-Asc2).



Anexo 8.3.2. Índice de flavonoles en hojas de trigo de tratamiento control (Flav-T), 'asociado 1' (Flav-Asc1) y 'asociado 2' (Flav-Asc2).



Anexo 8.3. 3. Índice de balance de nitrógeno (NBI) en hojas de trigo de tratamiento control (NBI-T), ´asociado 1` (NB1-Asc1) y ´asociado 2` (NB1-Asc2).