

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RESPUESTA DE *Brassica carinata* A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y
AZUFRADA: DESARROLLO DE UN MODELO DE RESPUESTA**

por

**Francisco DELLA SANTA PERNAS
Juan Agustín UHLIG CUK
Ignacio VIVO VECINO**

**TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2018**

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. Esteban Hoffman

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Fecha: 27 de diciembre de 2018

Autores: -----

Ignacio Vivo Vecino

Juan Agustín Uhlig Cuk

Francisco Della Santa Pernas

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo brindado a lo largo de la carrera.

A los productores Pablo Montenegro y Markus Zoller que nos brindaron sus establecimientos para instalar los ensayos.

A los técnicos Darío Frost y Federico Domínguez por su ayuda para la parte práctica de nuestra tesis.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 <u>INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	2
2.2. <u>DEMANDA NUTRICIONAL DE CANOLA</u>	3
2.3. <u>NITRÓGENO</u>	4
2.3.1. <u>Importancia del N para cultivos de brassicas</u>	5
2.3.2. <u>Cambios morfofisiológicos ocasionados por la nutrición nitrogenada</u>	6
2.4. <u>AZUFRE</u>	6
2.4.1. <u>Importancia del azufre para la producción</u>	7
2.4.2. <u>Azufre en planta</u>	7
2.5. <u>SITUACIÓN DEL N Y S EN LOS SUELOS DEL URUGUAY</u>	9
2.6. <u>INTERACCIÓN N-S</u>	10
2.7. <u>FRACCIONAMIENTO Y MOMENTO DE APLICACIÓN</u>	11
2.8. <u>EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES</u>	12
2.9. <u>CURVA DE DILUCIÓN E ÍNDICES DE ESTADO NUTRICIONAL</u>	13
2.10. <u>RENDIMIENTO POTENCIAL Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO</u>	15
2.11. <u>HIPÓTESIS</u>	16
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	17
3.1. <u>DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO</u>	17
3.1.1. <u>Tratamientos aplicados</u>	18
3.2. <u>DETERMINACIONES REALIZADAS</u>	19
3.2.1. <u>Muestreo de suelo</u>	19
3.2.2. <u>Muestreo de biomasa y rendimiento</u>	19
3.3. <u>DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO</u>	20
3.3.1 <u>Eficiencia de uso del nitrógeno y azufre</u>	21
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	22
4.1. <u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZAFRA</u>	22
4.1.1. <u>Precipitaciones</u>	22
4.1.2. <u>Temperatura</u>	23

4.2. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS.....	24
4.2.1. <u>Evolución de la población y su efecto en el rendimiento</u>	25
4.2.2. <u>Análisis de componentes de rendimiento</u>	27
4.2.3. <u>Absorción de N y S</u>	33
4.2.4. <u>Estado nutricional del cultivo</u>	35
4.2.5. <u>Eficiencia de uso de nutrientes</u>	40
5. <u>CONCLUSIONES</u>	45
6. <u>RESUMEN</u>	46
7. <u>SUMMARY</u>	47
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	48

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Descripción de sitios.....	17
2. Dosis de N y S para los distintos tratamientos.....	18
3. Resultados análisis de suelo.....	20
4. Componentes de rendimiento.....	28
5. Estado nutricional del cultivo.....	35
Figura No.	
1. Ubicación de los ensayos.....	17
2. Precipitaciones mensuales acumuladas promedio para el año 2017 en relación a la serie histórica 2002-2016 para Paysandú.....	22
3. Temperatura media mensual promedio para el año 2017 en relación a la serie histórica 2002-2016 para la localidad de Paysandú.....	23
4. Rendimiento y desvío estándar por tratamiento y sitio.....	25
5. Población evaluada en diferentes estadios del cultivo.....	26
6. Relación entre población a cosecha y rendimiento en grano.....	27
7. Relación entre rendimiento kg ha^{-1} y granos m^{-2} ; y rendimiento kg ha^{-1} y peso de grano.....	29
8. Relación entre rendimiento kg ha^{-1} y componentes numéricos m^{-2}	30
9. Variación del rendimiento en grano para ambos sitios, en función de la biomasa total producida a cosecha.....	31
10. Relación entre rendimiento e índice de cosecha (IC).....	32
11. Materia grasa (%) en función del rendimiento en	

grano; y producción de materia grasa por unidad de superficie en función del rendimiento en grano.....	32
12. Absorción de N y S de los testigos a cosecha.	33
13. Nitrógeno y azufre absorbidos a cosecha por los diferentes tratamientos en relación al rendimiento para ambos sitios.....	34
14. Concentración crítica de nitrógeno y azufre; y concentración de N y S en C1.....	36
15. Relación entre índice de nutrición nitrogenada y azufrada.....	37
16. Rendimiento en relación al INN para los tratamientos con INS superior a 0,88 a distintos niveles de agregado de N; y rendimiento en relación al INN para los tratamientos bajo INS inferior a 0,88 para las diferentes dosis de N agregado.....	38
17. INS en relación a los kg ha ⁻¹ de S absorbidos a C1 para las diferentes dosis.....	39
18. INN en relación a los kg ha ⁻¹ de N absorbidos a C1 para las diferentes dosis.....	40
19. Eficiencia agronómica de uso de nitrógeno	41
20. Eficiencia de recuperación del fertilizante agregado para ambos sitios.....	41
21. Relación entre N absorbido y rendimiento, N agregado y rendimiento, N agregado y N absorbido, todos en kg ha ⁻¹	42
22. Relación entre S agregado y rendimiento, S absorbido y rendimiento, S agregado y S absorbido, todos en kg ha ⁻¹	43

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de colza en Uruguay tuvo baja relevancia hasta el año 2005, a partir de ese año el área de este cultivo ha ido creciendo hasta llegar a 53.000 hectáreas en la zafra 2017 (MGAP. DIEA, 2018). En lo que refiere a *Brassica carinata* el cultivo está comercialmente disponible desde la zafra 2015, llegando a un aproximado de 7.000 ha para la zafra 2017 (datos suministrados por UPM).

Desde el punto de vista del sistema de producción, la inclusión de un cultivo *Brassica spp.* es una alternativa a los cultivos de invierno tradicionales como trigo y cebada. No obstante, estos cultivos no se han podido instalar definitivamente como consecuencias de problemas productivos y/o comerciales. En la actualidad existen planes comerciales, por lo que esta limitante parece estar superada, pero los bajos rendimientos y la falta de conocimiento por parte de productores y técnicos están actuando como limitante para el crecimiento del cultivo.

El potencial de rendimiento de *Brassica carinata* es de 5.000 kg ha⁻¹ (Castro, citado por Arrarte et al., 2018). El rendimiento promedio histórico de colza de las últimas siete zafras en Uruguay es de 1.400 kg ha⁻¹, siendo aproximadamente un 45% del rendimiento de trigo en cada una de dichas zafras, no existiendo reportes oficiales para el caso de *B. carinata*.

Una de las limitantes más importantes es la falta de un modelo de fertilización para nitrógeno (N) y azufre (S), especialmente para el cultivo de *B. carinata*. Si bien se han desarrollado modelos para el cultivo de colza, no se conoce si son aplicables a este nuevo cultivo.

El objetivo de este trabajo es evaluar la respuesta a N y S en el cultivo de *Brassica carinata* y conocer si las herramientas de decisión generadas para colza son aplicables a este cultivo. Para poder cumplir con estos objetivos se llevaron adelante una serie de ensayos experimentales en los que mediante la fertilización con N y S se generaron diferentes curvas de absorción de N y S.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La colza es una oleaginosa anual invernal que ha sido cultivada por miles de años en Asia, y luego en Europa. Especies de colza incluyen *Brassica napus* L., *Brassica rapa* L., *Brassica júncea* L. y *Brassica carinata* A. Braun. El mediterráneo es sugerido como su centro de origen más probable (Renard et al., citados por López y Verocai, 2016). Es un cultivo ampliamente difundido a nivel mundial, siendo el cuarto cultivo oleaginoso de importancia económica mundial (Alves, 2015).

Brassica carinata A. Braun, también conocida como mostaza etíope, es originaria de Etiopía y está bien adaptada a un clima mediterráneo. Originalmente era utilizada en Etiopía y Kenia como hoja vegetal y como condimento hasta que a mediados de los 90' cuando Getinet Alemaw, un estudiante graduado de Etiopía, inició el desarrollo del cultivo como otra alternativa para los cultivos de las brassicas mediante la AAFC (Agriculture and Agri-Food Canadá). Recientemente, países con climas semiáridos, han mostrado interés en este cultivo ya que es altamente resistente a la sequía y al calor. Otros rasgos agronómicos positivos de *B. carinata* incluyen excelente resistencia a enfermedades de pie causadas por *Leptosphaeria maculans* (Gugel et al., 1990), buena resistencia a *Alternaria sp*, gran tamaño de semilla y buena resistencia a la dehiscencia de las silicuas (Rakow y Getinet, 1998), todos factores que la hacen una especie muy promisoría para el desarrollo a nivel local.

Brassica carinata es un cultivo similar a la colza, del cual se puede extraer aceite no apto para consumo humano, pero con una importante función como biocombustible. Incluso, su remanente tiene elementos proteicos que sirve para la alimentación animal. Según estudios, los biocombustibles producidos a partir del aceite de la misma reducen las emisiones de gases de efecto invernadero en más del 70% en comparación con los combustibles fósiles (Kukkonen, 2017).

Un giro clave en la evolución de la *Brassica carinata* como cultivo vino con el surgimiento de varias iniciativas gubernamentales e industriales que exigían fuentes alternativas renovables y sostenibles de materia prima para combustible biojet y biodiesel de alta calidad. Un claro ejemplo de esto fue la CORISA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), que con el fin de disminuir las emisiones de dióxido de carbono para el año 2020 realizó varias pruebas con biocombustible de *B. carinata* con resultados positivos, permitiendo que en el año 2012 la aerolínea canadiense Porter

Airlines realizará el primer vuelo con este biocombustible. A este antecedente se le suma ahora la aerolínea australiana Qantas, que para principios del año 2018 se espera que realice el primer viaje entre Estados Unidos y Australia con biocombustible a base de *B. carinata*. En cuanto a nivel nacional, el área de Biocombustibles de UPM prueba, a través de las tierras de productores asociados a la empresa, el cultivo de invierno *Brassica carinata* para la producción de aceite apto para biocombustibles, en su búsqueda de producción sostenible de biocombustibles. UPM firmó un acuerdo a largo plazo con la empresa canadiense Agrisoma Biosciences Inc., la cual es mejoradora de la especie *Brassica carinata* sin necesidad de modificación genética.

El contenido promedio de aceite en *Brassica carinata* es de aproximadamente 40,2%, mientras que la canola promedia en 45,6%, sin embargo, la producción de aceite de *Brassica carinata* fue 16% mayor que la canola. Esto ocurre porque, si bien *Brassica carinata* posee menor índice de cosecha (IC *carinata* = 0,35; IC canola = 0,41) y menor contenido en aceite, produce un 52% más de biomasa total y es esto lo que le permite tener mayores rendimientos de aceite por unidad de superficie (Gesch et al., 2015).

Actualmente, alrededor del 95% de los aceites derivados de plantas en el mundo provienen de 8 cultivos distribuidos en 6 familias (FAO, 2015). Estos aceites contienen principalmente ácidos grasos con cadenas de 16 y 18 carbonos (C), tales como ácido palmítico (C16: 0), esteárico (C18: 0), oleico (C18: 1), linoleico (C18: 2) y linolénico (C18: 3). El ácido erúxico (C22: 1) es el principal ácido graso de cadena larga en el aceite producido a partir de *Brassica carinata* (30-45%). Las altas concentraciones de ácido erúxico dan como resultado una química del combustible similar a la de los combustibles derivados del petróleo en comparación con otros aceites vegetales renovables.

2.2. DEMANDA NUTRICIONAL DE CANOLA

La canola es una oleaginosa muy demandante de nutrientes siendo el nitrógeno (N) y potasio (K) los más requeridos por unidad de grano producido, seguidos por fósforo (P) y azufre (S). La extracción total de un cultivo ya sea brassica o cualquier otro, va a depender principalmente del rendimiento. El cultivo de canola es más exigente en requerimientos de nutrientes por kg de grano si se lo compara con los requerimientos de los cereales más utilizados en el país, pero cuando se analizan los requerimientos según rendimiento, estos son muy similares.

La extracción se define como los nutrientes que son depositados en tejidos y órganos cosechables, y que por lo tanto no son reciclados debido a que no vuelven a ingresar al sistema suelo (Ciampitti y García, 2009). Un cultivo

de canola de 2000 kg ha⁻¹ extrae aproximadamente 76 kg ha⁻¹ de N, cantidad un poco inferior a la de un cultivo de trigo de 4000 kg ha⁻¹, el cual extrae 84 kg ha⁻¹ de N (Ciampitti y García, 2009). Para producir 2000 kg ha⁻¹ el cultivo de canola extrae 22 kg ha⁻¹ de P, 56 kg ha⁻¹ de K, 14 kg ha⁻¹ de S, cantidades superiores a las de un cultivo de trigo de 4000 kg ha⁻¹ el cual extrae 16 kg ha⁻¹ de P, 16 kg ha⁻¹ de K y 8 kg ha⁻¹ de S. Al relativizar los datos respecto a un cultivo de trigo, se observa que la canola demanda cantidades similares de nutrientes, pero inferiores de N, superiores para P y S, y muy superiores en el caso del K ya que un cultivo de canola de 2.000 kg ha⁻¹ de grano extrae 40 kg ha⁻¹ más de K que el cultivo de trigo de 4.000 kg ha⁻¹.

La absorción de P es superior que la de trigo o cebada debido al mayor contenido de proteína en el grano, la extracción de P ocurre rápidamente en etapas tempranas del crecimiento (Martino y Ponce de León, citados por López y Verocai, 2016). La canola tiene la particularidad de ser un cultivo muy eficiente en la utilización del P del suelo y del P aplicado por lo que no sería necesario agregar este nutriente en grandes cantidades (Grant y Bailey, citados por López y Verocai, 2016). La ausencia de deficiencias de P es fundamental porque permite una adecuada implantación y permite obtener una roseta de mayor tamaño en menor tiempo (Iriarte, citado por López y Verocai, 2016), también permite un mayor desarrollo radical con más ramificaciones y raíces secundarias, favoreciendo la exploración del suelo y por tanto una mayor capacidad de soportar adversidades climáticas (Martino y Ponce de León, 1999). En estudios realizados en el sudeste de la provincia de Buenos Aires por González Montaner y Di Napoli (2009) observaron que la fertilización fosforada en canola se puede manejar de igual manera que para trigo, pero con un nivel umbral de P extractable Bray-1 de 15 ppm. Debajo de estos niveles, se incrementa la probabilidad de respuesta a la fertilización fosforada en términos de rendimiento y retorno económico.

El potasio (K) es muy importante para el desarrollo de la planta y es utilizado en grandes cantidades por la canola durante su crecimiento (Martino y Ponce de León, 1999), sin embargo, es el nutriente que menos frecuentemente limita el rendimiento (Grant y Bailey, 1993). La adecuada disponibilidad de este confiere a la planta resistencia a enfermedades, insectos, sequías y heladas (Thomas, 1995).

2.3. NITRÓGENO

El nitrógeno cumple funciones vitales en los seres vivos. Es requerido en grandes cantidades en los tejidos de las plantas encontrándose tanto en formas orgánicas como inorgánicas, forma parte de proteínas, aminoácidos, nucleótidos y clorofila (Martino y Ponce de León 1999, Perdomo et al. 2008).

Las ganancias de nitrógeno al sistema suelo-planta son la fertilización, la fijación biológica, el N que entra con lluvias, es decir N que estaba fuera del sistema. La mineralización, si bien no es una ganancia para el sistema, constituye la principal fuente de N para las plantas en ecosistemas no disturbados (García, 1996). Los responsables de este proceso son los microorganismos presentes en el suelo, quienes a partir del nitrógeno orgánico presente en la materia orgánica producen amonio (NH_4) y nitrato (NO_3), formas que pueden ser absorbidas por las plantas (Canola Council, 2013).

2.3.1. Importancia del N para cultivos de brassicas

La disponibilidad de nitrógeno (N) es uno de los principales factores que controlan el crecimiento, la asimilación de CO_2 y la productividad de las brassicas, sin embargo, se sabe poco sobre las respuestas fisiológicas y morfológicas de *B. carinata* al N (Seepaul, 2016). Las brassicas son altamente sensibles a la aplicación de N (Hocking et al., 1997) y requieren tasas de agregado relativamente altas para la obtención de rendimientos óptimos (Malagoli et al. 2005, Rathke et al. 2006). El N representa el mayor aporte de energía y costo en la producción de semillas oleaginosas (Gan et al., 2008), por lo tanto, la optimización de la eficiencia agronómica y económica del N es crítica para el éxito comercial. La gestión de la aplicación de N para la eficiencia de captación y utilización requiere una comprensión del crecimiento y la asignación de recursos en respuesta a la limitación de N. Las brassicas tienen un consumo de N durante el estado vegetativo relativamente alto hasta iniciarse el estado reproductivo, donde disminuye su consumo y comienza la translocación de N de las hojas y tallos a las semillas en desarrollo (Wiesler et al., 2001).

La cantidad de biomasa producida a elongación, caída de flores y madurez está correlacionada positivamente con el rendimiento en grano (Sarandón et al., 1996), el cual aumenta frente a incrementos en la disponibilidad de N (Grant y Bailey, 1993). Lo mismo concluyó Agosti (2011), quien logró mediante aplicaciones sostenidas de N durante el ciclo del cultivo un mayor rendimiento en grano a través de aumentos en la biomasa total producida sin cambios en el índice de cosecha. En el 72% de los casos la variación en biomasa producida está dada por N (Miller et al., 2003). Según Iriarte (2002), es recomendable realizar la fertilización nitrogenada en estadios vegetativos tempranos (roseta 4-6 hojas) para que el N esté disponible en el momento de mayor requerimiento (50% de floración), momento en el cual el IAF es máximo (Almond et al., 1986).

2.3.2. Cambios morfofisiológicos ocasionados por la nutrición nitrogenada

Seepaul et al. (2016), estudiaron la respuesta comparativa de *B. carinata* y *B. napus* al crecimiento vegetativo, desarrollo y fotosíntesis en función de la nutrición nitrogenada. Estos autores observaron que la deficiencia de N induce una serie de cambios morfológicos en la arquitectura aérea que inhiben el desarrollo de las hojas y tallos. Durante la fase de crecimiento vegetativo, la limitación de N restringió la altura de la planta y el número de nudos y patrones de ramificación, redujo la expansión de la hoja y la capacidad fotosintética. La falta de N cambió los patrones de asignación de biomasa.

En dicho estudio se observó que el número de ramas primarias se redujo un 66% entre el control (N 100%) y el tratamiento con 0 nitrógeno, el área foliar disminuyó en 87% cuando se redujo del N 100% al 0N, la altura de la planta estuvo estrechamente relacionada con el número de nudos del tallo principal ($y = 17.045 + 0.1602x$; $r^2 = 0.88$) y el tamaño de los entrenudos del tronco principal mostraron una relación cuadrática con el nivel de N ($y = 1.5817 + 0.0404x - 0.0002x^2$; $R^2 = 0.99$).

En cuanto a los cambios de los componentes del rendimiento causados por la variación en la nutrición nitrogenada, Agosti (2011), menciona que en los trabajos que observaron incrementos del rendimiento por agregado de N, el componente que mejor explicó las diferencias en rendimiento fue el número de granos por unidad de superficie (NG), explicado por aumentos en el número de silicuas planta⁻¹ (Allen y Morgan 1972, Scott et al. 1973, Asare y Scarisbrick 1995, Hocking et al. 1997, Cheema et al. 2001). Algunos trabajos también muestran incrementos en el número de granos por silicua (Allen y Morgan 1972, Scott et al. 1973, Cheema et al. 2001), mientras que otros observaron estabilidad en este parámetro (Asare y Scarisbrick 1995, Hocking et al. 1997) en respuesta a la aplicación de nitrógeno. En cuanto a los cambios en el peso de los granos (PG), en general los trabajos no muestran cambios significativos por agregado de N (Ogunlela et al., Hocking y Mason, citados por Agosti, 2011).

2.4. AZUFRE

La canola tiene una alta respuesta al agregado de azufre, ya que es un componente fundamental de dos de sus aminoácidos esenciales, la cisteína y metionina, necesarios para síntesis de proteínas y clorofila (Pozzolo et al., 2008). Un cultivo de canola 2000 kg ha⁻¹, extrae aproximadamente 14 kg ha⁻¹ de S. Para lograr una producción sostenible se requiere un eficiente suministro de este nutriente, lo que está relacionado no sólo con la dosis de fertilizante aplicado, sino con el momento en que está disponible para el cultivo. El

momento de mayor demanda de éste nutriente es en torno a floración, momento donde se evidencian las deficiencias del mismo (Sarandón et al., 1993).

2.4.1. Importancia del azufre para la producción

El cultivo de canola ha mostrado ser extremadamente sensible a la deficiencia de este nutriente, llegando a no producir grano en condiciones de deficiencia severa (Mazzilli y Hoffman, 2010). Este macro-nutriente limita la producción de grano tanto como la de aceite (Pinkerton, 1998). Su deficiencia frecuentemente restringe el rendimiento (Grant y Bailey, 1993), condicionando, además, la respuesta a la disponibilidad de N (Zamora y Massigoge, 2008). Para obtener una producción más elevada y estable del cultivo de canola es necesario que la nutrición nitrogenada sea acompañada con un contenido de S adecuado, el cual también mejoraría el índice de eficiencia del N (Høivnva et al., Zamora y Massigoge, citados por Ferreira y Ernst, 2014).

En un experimento realizado por Mazzilli y Hoffman (2010) en Uruguay, en el departamento de Paysandú, compara dos tratamientos, uno al que se le aplica 20 kg de S por hectárea a la siembra y al otro no se le agrega este nutriente. En el que se le agregó 20 kg de S el rendimiento concretado fue cuatro veces superior al testigo (2138 kg ha vs. 556 kg ha). La baja disponibilidad de S limita el número de granos por silicua, inclusive cuando la disponibilidad de N es adecuada (Hocking et al., 1997). Deficiencias medias suelen reducir el rendimiento sin mostrar síntomas aparentes, por lo que se hace imprescindible un esquema de fertilización basado en análisis de suelo y planta (Hocking et al., 1997). La respuesta al azufre se manifiesta en parcelas con historia agrícola prolongada, bajo contenido de materia orgánica, erosión y escasa historia de fertilización azufrada (Ferraris et al., 2004).

En relación al contenido de aceite en grano Asare y Scarisbrick (1995), Ahmad y Abdin (2000) sostienen que el incremento de la disponibilidad de S se asocia con un mayor contenido de aceite en grano, aunque de menor calidad debido al incremento en el contenido de glucosinolatos en el aceite (Fismes et al. 2000, Burzaco et al. 2009). Otros autores también afirman que la concentración de aceite en el grano aumentó a medida que se aplicó más S, sobre todo cuando se aplicaron las mayores dosis de N (Malhi et al. 2007, Brennan y Bolland 2008).

2.4.2. Azufre en planta

Hay diferentes factores que hacen difícil que el análisis de suelo realmente cuantifique cuanto del azufre está disponible (Maynard et al., 1983).

Por lo anterior, es el análisis de planta el que brinda un resultado más preciso, en comparación al de suelo (Maynard et al., citados por Planchón y Figares, 2004). Surge la necesidad de lograr una mayor confiabilidad en la determinación del S como una posible vía para mejorar el diagnóstico de fertilización requerido y el ajuste del rendimiento al agregado de este nutriente. Promover fertilizaciones azufradas excesivas que no generen una respuesta positiva en el rendimiento podría afectar negativamente el beneficio económico del cultivo y el medioambiente a través del uso ineficiente de recursos (Agosti, 2011). Al ser un nutriente poco móvil en la planta, son las hojas más jóvenes quienes manifiestan los síntomas de deficiencia (Thomas, citado por Martino y Ponce de León, 1999). Los síntomas de deficiencia son más fáciles de apreciar en floración ya que en esta etapa los requerimientos son mayores. El síntoma más común es un amarillamiento generalizado en la hoja (Grant y Bailey, 1993).

El período crítico para este nutriente es entorno a las 5-6 hojas hasta el comienzo de elongación del tallo para asegurar el máximo rendimiento (Pinkerton, 1998). Del total de azufre absorbido por el cultivo, el 50% se acumula en la semilla, estando el restante localizado en tallos, hojas y silicuas (Pinilla, citado por Adrover y Ferreira, 2012). Existen algunos trabajos en colza que han determinado bajos niveles de recuperación de S en grano (Zhao et al., 1993). Su partición al órgano que se exporta (granos) es de menor magnitud que para nitrógeno y fósforo. En cambio, su partición al rastrojo en pie es mayor. Esta característica atenuaría los efectos de la alta demanda de azufre sobre la exportación del cultivo y hasta permitiría una reutilización de un fertilizante azufrado, por parte del cultivo siguiente (Rubio et al., 2007). La insuficiencia de S puede provocar también atrasos en la floración y maduración de la canola. La planta produce vainas pequeñas que se ubican principalmente en el estrato superior de la planta (Grant y Bailey, 1993).

Hocking et al. (1996) obtuvieron valores óptimos de referencia para la relación de concentración de Nt:St, en plantas deficientes en S fue mayor que 10 y 7,5 para plantas con adecuado suministro de azufre. No se encontró un valor crítico para lograr la máxima concentración de aceite en grano para ninguno de los índices por sí solos. Sin embargo, la relación entre estos dos nutrientes (S:N) en C1 se relaciona con la concentración de aceite en grano. El nivel crítico de S:N en C1 necesario para obtener el 95 % de la máxima concentración de aceite en grano fue de 0,13, lo que equivale a una relación Nt:St crítica de 7,7. Si bien este es un indicador de fácil estimación, solamente da una idea relativa del estado nutricional entre ambas variables, pero una misma relación puede estar dada por valores diferentes de cada nutriente.

2.5. SITUACIÓN DEL N Y S EN LOS SUELOS DEL URUGUAY

En el sistema agrícola actual, no se laborea, y se acumulan años de agricultura continua sin pasturas desde hace más de 10 años (Ernst y Siri, 2011) y se realiza un mayor número de cultivos por hectárea y por año que los registrados en la década de los noventa, con elevada frecuencia de soja. Para un nivel de intensidad promedio de 1,52 cultivos por hectárea y por año, para todo el período desde el 2001 al 2012, calculado en base a la información de MGAP. DIEA (2010), dos tercios del área en agricultura tiene cinco años o más en agricultura continua (Souto et al., 2012).

Suelos bajo sistemas de agricultura continua sin pasturas y con alta frecuencia de soja en el sistema reducen su capacidad de aporte de N. Este cultivo afecta el balance de N del suelo, ya que la extracción como grano con la cosecha produce balances negativos de N en un cultivo que no recibe fertilización nitrogenada (Siri y Ernst 2009, Quincke y Sawchick 2011, Sainz Rozas et al. 2011). Los datos utilizados para generar el modelo propuesto por Hoffman et al. (2010) para fertilización en trigo y cebada mostraron que entre el 40 y 50 % de las chacras habían presentado concentraciones de N-NO_3^- mayores a los 16 mg kg^{-1} (Mazzilli et al., 2015). En promedio sólo un 3 % para el periodo 2010-2012 y 14 % para el año 2009 de las situaciones superaron el valor crítico propuesto de 16 mg kg^{-1} de NNO_3^- (Mazzilli et al., 2015). Esta diferencia seguramente esté explicada por la reducción de la superficie agrícola en rotación de cultivos con pasturas plurianuales con inclusión de leguminosas (García Préchac et al., citados por Mazzilli et al., 2015), y el aumento de la participación del cultivo de soja en el sistema.

Los cambios estructurales que se produjeron en los últimos 20 años en la agropecuaria uruguaya se han caracterizado por el aumento en la intensidad de uso del suelo, incidiendo en procesos como la erosión y la evolución de la fertilidad de los suelos (Mancassola y Casanova, 2010). La mayor intensidad agrícola y cultivos más demandantes hacen que las deficiencias de ciertos nutrientes se pongan de manifiesto. En cuanto al azufre, no todas las especies tienen igual tendencia a presentar deficiencias de este nutriente (Zamalvide, 1995), la familia de las brassicas tiene un contenido en planta mayor al 1% (Cerveñansky, 2011). Muchos de los fertilizantes que se han utilizado en los últimos años no contenían azufre (Zamalvide, 1995), por lo tanto, no se generaba una incorporación de este nutriente por medio de los fertilizantes. Otros factores que llevaron a que aumentara la deficiencia de azufre en el Uruguay fueron: la utilización de especies más sensibles y/o exigentes de azufre, suelos pobres en su fertilidad natural, altos niveles de rendimiento en cultivos, etapa de la rotación con acumulación de materia orgánica y extracciones de azufre fuera del sistema suelo (Cerveñansky, 2011).

2.6. INTERACCIÓN N-S

Debido a la estrecha relación existente entre N y S asociados al rol central en la producción de proteínas (Orlovius, 2003) es necesaria una correcta complementación del N con un adecuado suministro de S (Zamora y Massigoge, citados por López y Verocai, 2016). El S permitiría un uso más eficiente del nitrógeno ya que juega un papel importante en la activación de la enzima nitrato reductasa, necesaria para la conversión de NO_3^- a aminoácidos en las plantas. Una baja actividad de esta enzima, reduce los niveles de proteínas a la vez que incrementa los niveles de NO_3^- en planta (Cabalceta, 2010). Se han obtenido niveles mayores de nitrato en planta en situaciones de deficiencia de azufre, lo que pone en evidencia que niveles bajos de éste nutriente en el suelo no afecta la absorción de nitrógeno por parte de la planta, sino que, interfiere en el metabolismo de la misma (Martino y Ponce de León, citados por López y Verocai, 2016).

Cuando el nitrógeno se combina con aplicaciones de azufre, las respuestas son lineales y positivas hasta niveles de 200 Kg N ha^{-1} , pero si la deficiencia de azufre no es reconocida o es mal interpretada como deficiencia de nitrógeno, y se incrementa la fertilización con nitrógeno, la respuesta es negativa (González Montaner y Di Napoli, 2009). Se debe tener en cuenta que la interacción entre estos nutrientes es sinérgica a dosis óptimas y antagónicas a niveles excesivos de uno de ellos (Fismes et al. 2000, Šiaudinis y Butkute 2013). Cuando se fertiliza canola con altas dosis de N, es necesario incrementar adecuadamente los niveles de S para un óptimo rendimiento de granos, permitiendo un suministro constante de S fácilmente disponible desde la emergencia hasta la elongación de la vara floral (Malhi, 1999).

González Montaner y Di Napoli (2009) afirman que el azufre es un factor limitante, por lo cual, en ausencia del mismo, el incremento del N disponible mediante fertilización nitrogenada, afecta negativamente el rendimiento del cultivo. La severidad de las deficiencias de S estuvo directamente influenciada por la cantidad de nitrógeno aplicado, las plantas que no recibieron N no mostraron deficiencias aparentes de azufre, mientras que aquellas a las que se les fue suministrado, particularmente en altos niveles, presentaron síntomas que sugieren serios desórdenes fisiológicos (Janzen y Bettany, 1984).

Los elevados requerimientos de N y S llevaron a la existencia de recomendaciones de manejo de nutrientes basadas en relaciones N/S en suelo de 7:1 (Grant y Bailey, 1993). Por otra parte, Agosti (2011) no encontró interacción N x S, esto posiblemente sea debido a que el testigo no haya sufrido limitantes de azufre gracias al aporte del suelo. Para las condiciones

agroclimáticas del Uruguay, Ferreira y Ernst (2014) concluyeron que la tasa de dilución del contenido de azufre crítico (S_c), resultante de la ecuación de regresión potencial, resultó menor a la del nitrógeno crítico (N_c) durante el ciclo del cultivo estudiado ($b = -0.18$ y -0.36 para S y N respectivamente), lo que coincide con lo reportado por Réussi et al. (2012) para el cultivo de trigo. Estas diluciones diferenciales de ambos nutrientes generaron una relación N_c/S_c variable entre 3,3 y 6,9, sin un patrón de comportamiento en relación a la acumulación de biomasa del cultivo, este aspecto condiciona el uso de esta relación como indicador del diagnóstico al igual que sucedió en trigo según Réussi et al. (2012). Por lo cual la utilización de dicha relación no resultó útil para predecir el estado nutricional del cultivo para el crecimiento y producción de grano, pero si lo hizo para la concentración de aceite (Ferreira y Ernst, 2014).

2.7. FRACCIONAMIENTO Y MOMENTO DE APLICACIÓN

El cultivo de canola requiere un suministro eficiente de nitrógeno para mantener una producción sostenible, lo que está relacionado con el momento en que esté disponible para el cultivo (Tamagno et al., 1999). La etapa crítica en la determinación del rendimiento, comienza entre dos y tres semanas antes de la floración (Tayo y Morgan, citados por Adrover y Ferreira, 2012) entre los estados de fin de roseta e inicios de floración. La dosis fraccionada de fertilizante nitrogenado, parte en la siembra y parte en el primer o ambos estadios mencionados, podría ser una alternativa para mejorar el rendimiento y la eficiencia en el uso del nitrógeno en el cultivo de colza (Tamagno et al., citados por Adrover y Ferreira, 2012).

Una alta disponibilidad de nitrógeno previo al comienzo de la senescencia de las hojas podría determinar mayor área foliar y duración de la misma garantizando una mayor provisión de asimilados, lo que se traduciría en el logro de un mayor número de silicuas y semillas por silicua. Sin embargo, las respuestas a la fertilización podrían ser dependientes del genotipo y de las condiciones ambientales. En este sentido, se considera que el efecto de la aplicación de N puede ser afectado por la ocurrencia de déficit hídrico durante el período crítico del cultivo (Murphy y Pascale, 1989).

Los datos obtenidos en ensayos realizados en Argentina muestran que la fertilización nitrogenada solo provocó aumentos en rendimiento y biomasa cuando se realizó de forma fraccionada (Iriarte, citado por López y Verocai, 2016), en parte debido a que el cultivo tiene una baja capacidad de aprovechar altas disponibilidades de N en estadios tempranos del desarrollo (Tamagno et al., 1999). Además, para lograr un uso más eficiente del agua del suelo se deberían evitar aplicaciones desbalanceadas hacia la siembra ya que aumentan

el consumo de agua en roseta, provocando un crecimiento exagerado que genera problemas de abastecimiento hídrico para etapas finales (Burzaco et al., 2009).

Otros ensayos realizados por Valenzuela y Gallardo, citados por Adrover y Ferreira (2012) de diferentes momentos de fertilización (siembra, estado de roseta y floración) encontraron que los mayores rendimientos se observaron cuando se aplicó en roseta. La fertilización a floración en cambio, tuvo baja eficiencia ya que los componentes del rendimiento están en su mayoría definidos. Según Newbould, citado por Adrover y Ferreira (2012) la práctica más utilizada para la aplicación de N es mediante la fertilización en la siembra. Sin embargo, debido a las pérdidas de N-NO_3^- por lixiviación, es posible que las dosis aplicadas no sean totalmente aprovechadas por el cultivo en los estados de mayor requerimiento de este nutriente.

Cuando se menciona el fraccionamiento del S este no parece ser necesario, como lo demostraron Mazzilli y Hoffman (2010) los cuales concluyeron que el agregado de S a elongación cuando ya se agregó a la siembra, no solo no mostró respuesta, sino también una leve tendencia a la disminución del rendimiento. A su vez Grant y Bailey, citados por Planchón y Figares (2004) mencionan que la mayor respuesta en suelos pobres se obtiene agregando el azufre a la siembra. Sin embargo, estos autores agregan que es posible encontrar respuestas a la aplicación más tardía en suelos con buena disponibilidad de azufre inicial. Iriarte (2002) encontró respuesta a la fertilización azufrada en suelos con bajos contenidos de materia orgánica cuando los niveles de S-SO_4 a siembra fueron menores a 6 ppm.

La dinámica del nitrógeno en el suelo es muy similar a la de azufre, lo cual implica que las dificultades para predecir las dosis necesarias de N son igualmente válidas para el S (Martino y Ponce de León, 1999). Debido a esta dinámica, existe un fuerte componente ambiental en la respuesta a la fertilización fraccionada en canola, principalmente dependiente de las condiciones hídricas del año (Tamango et al., 1999).

2.8. EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES

La eficiencia de uso de nutrientes o fertilizantes generalmente describen que tan bien son utilizados los nutrientes por las plantas o el sistema. Una expresión común para la eficiencia es la eficiencia de recuperación (ER) y se define como el porcentaje del nutriente recuperado en la biomasa aérea durante el ciclo de crecimiento (Cassman et al., 2002). La forma de calcular la eficiencia aparente de recuperación de un nutriente es $ER = (U - U_0)/F$, donde U es la

absorción del nutriente de la biomasa aérea a madurez fisiológica, U_0 es la absorción de la planta sin aplicación de fertilizantes y F es la dosis del nutriente. Se ha estimado que la ER del N en condiciones favorables es de un 50 a 70%, para P de 10 a 25% y para K de 50 a 60% (Isherwood, citado por Hoffman et al., 2015). El inconveniente del indicador ER es que no se sabe cuánto del nutriente en la biomasa corresponde al aportado por fertilizante y cuanto del mismo es aportado por el suelo, al mismo tiempo que no considera la naturaleza y conducta de un nutriente en el suelo. Los nutrientes con potencial de acumulación en el suelo, como P y K, deben ser medidos en el largo plazo ya que tienen efecto residual o acumulativo, mientras que el N por su comportamiento en el suelo de naturaleza más transitoria se puede evaluar en el corto plazo. Otra forma de estimar la eficiencia de utilización del N es calculando la eficiencia fisiológica (EF) la cual estima los kg de incremento de rendimiento por kg de nutriente absorbido, se calcula $EF = (R - R_0) / (U - U_0)$; donde R es el rendimiento del cultivo con aplicación de nutrientes, R_0 es el rendimiento del cultivo sin aplicación de nutrientes, U es la absorción del nutriente de la biomasa sobre el suelo a madurez fisiológica y U_0 es la absorción de la planta sin aplicación de fertilizantes. A partir de la ER y la EF se puede calcular la eficiencia agronómica (EA) la cual estima los kg de incremento de rendimiento por kg de nutriente aplicado $EA = ER \times EF$ o también se puede calcular como $EA = (R - R_0) / F$ (Hoffman et al., 2015).

Muchos datos de investigación han demostrado que existe una gran variación entre los valores de eficiencia del N aplicado como fertilizante en diferentes cultivos. Esto se debe a la variabilidad de manejo, dosis y condiciones ambientales al momento de la aplicación (Boaretto et al., 2008). Excesos hídricos, baja evapotranspiración y escasa absorción de N por parte del cultivo son condiciones que generan bajas eficiencias de uso de nitrógeno (EUN) y por lo tanto un ambiente propicio para las pérdidas de N del sistema, probablemente vía lixiviación (Barbieri et al., 2008).

2.9. CURVA DE DILUCIÓN E ÍNDICES DE ESTADO NUTRICIONAL

La tasa de producción de materia seca está determinada por la cantidad de radiación interceptada, la cantidad de agua disponible y por la disponibilidad de nutrientes (Connor y Sadras 1992, Andrade 1995). Entre los nutrientes, el nitrógeno es el que en mayor medida limita la producción, de ahí la importancia de conocer los requerimientos nutricionales y realizar diagnósticos de deficiencias (Díaz Zorita, citado por De Caram, 2007). Las curvas de dilución son definidas por los niveles de concentración crítica del nutriente en la biomasa aérea durante todo o parte del ciclo del cultivo (Colnenne et al., 1998). En nitrógeno, esta concentración crítica ha sido definida como la mínima concentración de N requerida para lograr la máxima tasa de crecimiento del

cultivo (Greenwood, citado por Ferreira y Ernst, 2014), y varía con la biomasa aérea producida, ya que se produce un efecto de dilución del nitrógeno en la planta. La diferencia entre la concentración de N actual (N_a) y el correspondiente nivel crítico (N_c) para una cantidad dada de biomasa aérea, indica la intensidad de la deficiencia de N (o exceso) experimentada por el cultivo (Colnenne et al., 1998).

Colnenne et al. (1998) determinaron una curva de dilución de N en colza invernal válida para valores de acumulación de materia seca entre 1,43 y 6,47 Mg ha^{-1} , representada por la siguiente ecuación: $\%N_c = 4,48W^{-0,25}$. Donde W es la cantidad de materia seca aérea total acumulada en un momento expresada en Mg ha^{-1} . Varios autores han reportado diferentes niveles de concentración crítica de N en canola para iguales momentos fenológicos específicos del ciclo (Hocking et al., Plank y Tucker, Orlovius, citados por Ferreira y Ernst, 2014), estos valores difieren entre ellos y son específicos de cada trabajo, dejando en evidencia la variación del nivel crítico cuando no se tiene en cuenta la producción de materia seca acumulada al mismo momento que se determinó la concentración de N.

Para las condiciones agroecológicas de Uruguay Ferreira y Ernst (2014) obtuvieron ecuaciones de dilución para la concentración crítica de nitrógeno y azufre ($N_c=5,21 \text{ MS}^{-0,36}$ y $S_c=1,22e^{-0,18\text{MS}}$ respectivamente). Para una situación dada y en cualquier momento del período de crecimiento del cultivo, es posible determinar un Índice de Nutrición Nitrogenada (INN) como la relación entre la concentración actual de N y la concentración crítica de N, correspondiente a la masa real del cultivo:

$$\text{INN} = N_{\text{act}} / N_c$$

Para determinar el índice de nutrición azufrada (INS) se aplica la misma metodología:

$$\text{INS} = S_{\text{act}} / S_{\text{crítico}}$$

Los índices nutricionales son utilizados como una herramienta de diagnóstico con el objetivo de predecir el nivel crítico de un determinado nutriente para producir la máxima cantidad de biomasa seca en un momento determinado. Ferreira y Ernst (2014) encontraron a partir de sus ecuaciones que el índice crítico de nutrición azufrada fue de 0,88 y 0,74 para la máxima producción de biomasa en elongación y grano respectivamente. Para nitrógeno solamente se encontró un valor crítico de 1,04 para la producción de biomasa, mientras que para la producción de grano se observó que bajo condición de

azufre suficiente no existió limitante de nitrógeno en todo el rango de estado nutricional estudiado. En cambio, bajo la condición de azufre limitante la respuesta del rendimiento al estado nutricional nitrogenado fue lineal.

2.10. RENDIMIENTO POTENCIAL Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

Un modelo simple de generación del rendimiento en grano, asume que este es el producto de la biomasa total generada por el cultivo y el índice de cosecha (IC), siendo este el atributo que más limita el rendimiento en canola (Diepenbrock, citado por Agosti, 2011). Por lo tanto, futuros incrementos en rendimiento deberían, posiblemente, estar ligados a incrementos en el IC (Agosti, 2011). Según Diepenbrock y Grosse, citados por Agosti (2011) la generación del rendimiento se puede analizar a través de los componentes numéricos del mismo, desglosándolo en: número de plantas m^{-2} , silicuas por planta, granos por silicua y peso de grano. Los tres primeros componentes, en su conjunto determinan el número de granos m^{-2} .

Dentro de estos el número de granos es el más importante y el peso de grano el más estable frente a modificaciones del ambiente (Peltonen-Saino y Jauhiainen, 2008). En los trabajos que observaron incrementos del rendimiento por agregado de N, el componente que mejor explicó las diferencias en rendimiento fue el número de granos por unidad de superficie (NG), explicado por aumentos en el número de silicuas planta⁻¹ (Allen y Morgan 1972, Scott et al. 1973, Asare y Scarisbrick 1995, Hocking et al. 1997, Cheema et al. 2001).

Para el caso de *Brassica napus*, la experiencia a nivel comercial la ha realizado la Central Cooperativa de Granos (CCG) en los cuales se pudo constatar el potencial del cultivo (rendimientos de 3000 kg ha⁻¹) y rendimientos de aceite superiores al 40 % (Alves, 1999). El promedio a nivel mundial el cual se ubica en los 1720 kg ha⁻¹ para la serie de años 2000-2009 (Rondanini et al., 2012). En Uruguay el promedio para las últimas zafas fue de 1400 kg ha⁻¹.

Para *Brassica carinata* en ensayos experimentales en Argentina por parte del INTA, en el año 2012 reportan un rendimiento promedio de los ensayos de 2433 kg ha⁻¹. En otro trabajo realizado por Seepaul et al. (2016) en el sur de EUA mostraron rendimientos entre 2335 y 4000 kg ha⁻¹. Los rendimientos en ensayos experimentales realizados por INIA en Uruguay tuvieron un rendimiento medio de 4000 kg ha⁻¹ para cuatro años de evaluación, con un máximo de 5100 y un mínimo de 2800 kg ha⁻¹ para el año 2015 y 2014 respectivamente (Castro, 2018).

2.11. HIPÓTESIS

La hipótesis agronómica es que los índices de nutrición nitrogenada y azufrada generados para colza, predicen la respuesta a la fertilización en este cultivo a inicio de elongación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Se instalaron dos ensayos durante el invierno de 2017, el primero en un predio comercial llamado “Las Cumbres” ubicada en el departamento de Paysandú y el segundo ensayo fue colocado en el establecimiento “La Carolina” ubicado en el límite entre el departamento de Paysandú y Río Negro (Figura No. 1).



Figura No. 1. Ubicación de los ensayos

Cuadro No. 1. Descripción de sitios

Sitio	Fecha de siembra	Formación	Unidad	Tipo de suelo	Grupo CONEAT	Índice CONEAT
La Carolina	06-jun.	Fray Bentos	San Manuel	Brunosol éútrico lúvico	11.3	149
Las Cumbres	12-jun.	Fray Bentos	Young	Brunosol éútrico típico	11.4	214

Ambos ensayos fueron instalados en suelos con potencial de producción superior a la media nacional, siendo en ambos casos suelos Brunosoles, con alto contenido de materia orgánica, perfil de tipo: A/Bt/Cca, alta saturación en bases, texturas medias a pesadas y drenaje moderado a bueno. Todas características que benefician el desarrollo del cultivo.

3.1.1. Tratamientos aplicados

Se realizaron ocho tratamientos de combinaciones de N y S a los cuales se le aplicaron 46 kg de P₂O₅ y 60 kg de K₂O por hectárea para evitar que estos nutrientes sean limitantes para el crecimiento y desarrollo del cultivo, con el objetivo de que las variaciones en rendimiento se deban exclusivamente a las diferencias entre nitrógeno y azufre. Los ocho tratamientos fueron combinaciones de dosis de N y S como se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro No. 2. Dosis de N y S para los distintos tratamientos

Tratamientos	Instalación		C1		TOTAL	
	N	S	N	S	N	S
1) N0-N0-S0-S0	0	0	0	0	0	0
2) N20-N20-S0-S0	20	0	20	0	40	0
3) N20-N20-S20-S0	20	20	20	0	40	20
4) N20-N60-S20-S0	20	20	60	0	80	20
5) N20-N60-S20-S10	20	20	60	10	80	30
6) N80-N20-S20-S10	80	20	20	10	100	30
7) N40-N120-S30-S0	40	30	120	0	160	30
8) N40-N80-S30-S0	40	30	80	0	120	30

Se aplicaron distintas dosis de N y S fraccionadas a la siembra e inicio de elongación (C1). El tratamiento 6 es el que recibió mayor N a la siembra (80 kg ha⁻¹). En cuanto al S los tratamientos que recibieron mayor aporte a la siembra fueron el 7 y 8 (30 kg ha⁻¹), mientras que el 1 y 2 no fueron fertilizados con este nutriente. En el estadio de C1 el tratamiento que recibió mayor cantidad de N fue el 7 (120 kg ha⁻¹) y los únicos tratamientos que recibieron aporte de S fueron el 5 y 6 (10 kg ha⁻¹). En total el tratamiento que recibió mayor cantidad de N fue el tratamiento 7 con 160 kg ha⁻¹ de los cuales 120 kg fueron aportados en C1. En cuanto al S los tratamientos que tuvieron mayor aporte fueron el 5, 6, 7 y 8 con 30 kg ha⁻¹ cada uno.

Las fuentes de fertilizantes utilizados fueron urea para nitrógeno (46% N), sulfato de amonio en caso de tratamientos con N y S (21 % N, 24% S) y superfosfato triple (0-46/46-0) y cloruro de potasio (0-0/0-60) como fuente de P y K respectivamente.

3.2. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.2.1. Muestreo de suelo

Una vez instalado los ensayos, se tomaron muestras en el mismo día, en cada parcela de cada bloque a dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) utilizándose calador. En total se recolectaron dos muestras compuestas por cada bloque (una de cada profundidad), cada muestra estaba compuesta por 8 tomas. Las muestras fueron analizadas para conocer la disponibilidad de nutrientes y caracterizar el sitio. Por lo que se evaluó contenido de N-NO₃, textura y materia orgánica (Cuadro No. 3). En todos los casos las muestras fueron secadas a 40°C durante 48 horas en estufa de aire forzado previo al envío a laboratorio.

Cuadro No. 3. Resultados análisis de suelo

Sitio	Bloque	ppm NO ₃ ⁻ suelo siembra (0-20cm)
La Carolina	1	15,6
La Carolina	2	11,8
La Carolina	3	16,3
Las Cumbres	1	9,5
Las Cumbres	2	8,0
Las Cumbres	3	10,5

3.2.2. Muestreo de biomasa y rendimiento

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron 3 determinaciones de biomasa: en el estadio fenológico C1, plena floración (F2) y cosecha. En C1 y F2 se cortó con tijera 1 metro lineal entre 2 surcos de ambos lados en cada uno de los tratamientos (sembrado a 0,19 metros), registrándose en cada caso el número de plantas. A cosecha el procedimiento fue el mismo variando en este caso los metros cosechados (4 metros lineales). Además, a cosecha se contabilizó el número de silicuas por unidad de superficie. La totalidad de las muestras fueron secadas a estufa a 60°C hasta masa constante, embolsándose en bolsa de arpillera y almacenándose hasta su procesamiento.

En los estadios C1, floración y cosecha la muestra de biomasa fue utilizada para determinar la concentración de N y S, y por tanto estimar la absorción de N y S en cada tratamiento. Para obtener el rendimiento de cada parcela, se realizó cosecha manual, donde cada muestra se colocó en un recipiente de plástico, en el cual se procedió al pisado para su desgrane, luego se tamizó y mediante máquina de viento se eliminaron las impurezas de cada muestra, pesándose luego para calcular el rendimiento por unidad de superficie para cada parcela, se analizó de forma separada el contenido de N y S en grano del ubicado en la biomasa. El % N se determinó por el método Kjeldhal.

Los componentes del rendimiento que fueron medidos son: el número de granos por unidad de superficie, peso de grano y silicuas por planta. El número de granos por unidad de superficie fue determinado mediante la relación entre el rendimiento y el peso de grano. Se contabilizó la cantidad de silicuas por planta, y a partir de ese dato fue posible obtener el número de granos por silicua. El índice de cosecha de grano se calculó como la relación entre el rendimiento en grano y la biomasa aérea total para cada tratamiento.

Los granos fueron utilizados para estimar en el laboratorio de Calidad de Granos de INIA el % de materia grasa, la determinación fue realizada a través del método indirecto. Se realizó la determinación de contenido de aceite (%) en grano para cada parcela, expresado como porcentaje de materia grasa (% MG); luego fue multiplicado por el rendimiento en grano a los efectos de calcular el rendimiento de aceite (kg ha^{-1}).

3.3. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

El diseño experimental fue de bloques completos al azar (DBCA), con 8 tratamientos y 3 repeticiones. Cada tratamiento fue representado por una parcela de 3 metros de ancho y 10 metros de largo.

Diseño experimental: bloques completos al azar (DBCA)

Modelo: $y_{ij} = \mu + \tau_i + p_j + \epsilon_{ij}$

Donde,

Y_{ij} : variable aleatoria observada (kg ha^{-1})

μ : media general "conceptual"

τ_i : efecto del i-ésimo tratamiento

p_j : efecto del j-ésimo bloque

ϵ_{ij} : variable aleatoria no observada, error experimental

Siendo,

i: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

j: 1, 2, 3

Supuestos del modelo,

ϵ_{ij} : variables independientes e idénticamente distribuidas (IID), se distribuye normalmente.

Ho: los tratamientos son todos iguales $t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = t_5 = t_6 = t_7 = t_8$

Ha: existe al menos una diferencia entre tratamientos.

Se realizaron descripciones estadísticas (media, máximo, mínimo, coeficiente de variación) para las variables rendimiento, biomasa, índice de cosecha, materia grasa. A su vez para los componentes numéricos también se le realizaron las mismas descripciones estadísticas.

Para evaluar el efecto de los tratamientos se realizaron análisis de varianza con el software estadístico Infostat y se evaluó el efecto tratamiento mediante un test de LDS Fisher, usando 0.05 nivel de significancia.

Por último, se estudiaron regresiones entre variables y se analizaron a partir de análisis de varianza de la regresión.

3.3.1 Eficiencia de uso del nitrógeno y azufre

El análisis de la eficiencia en el uso del nitrógeno se basó en la relación entre el rendimiento en grano, la absorción de nitrógeno y el nitrógeno agregado durante el ciclo (De Wit, 1953). Para estimar el N absorbido por el cultivo, primero se determinó la concentración de N en el grano a través de una digestión sulfúrica con el método micro-Kjeldahl.

Se determinaron tres eficiencias: (i) la eficiencia agronómica del uso del nitrógeno (EAUN= kg de grano kg N agregado⁻¹) estimada como la pendiente (en la porción lineal) de la relación entre el rendimiento y el nitrógeno agregado (ii) la eficiencia fisiológica del uso del nitrógeno (EFUN= kg grano kg N absorbido⁻¹) que surgió de la relación entre el rendimiento y la cantidad de nitrógeno absorbido (en la porción lineal); y (iii) la eficiencia de absorción del N agregado (EAN= kg N absorbido kg N agregado⁻¹) estimada como la pendiente de la relación entre nitrógeno absorbido y el nitrógeno disponible por el cultivo. Estos mismos análisis se repitieron para el caso del azufre.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZAFRA

4.1.1. Precipitaciones

Las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo para ambos ensayos fueron muy similares, siendo 771 mm para el caso de "Las Cumbres" y 786 mm para "La Carolina" (Figura No. 2). Picca et al., citados por Aguirre y Uriarte (2010) sostienen que el cultivo puede consumir entre 400 y 500 mm en situaciones hídricas favorables, por lo que el total de precipitaciones podría calificarse como no limitante para el cultivo. El problema es que fueron variables en cantidad y frecuencia durante el ciclo del cultivo, existiendo períodos en los que fueron abundantes (desde C1 hasta fin de floración) y otros donde las lluvias ocurridas no serían limitantes (llenado de grano).

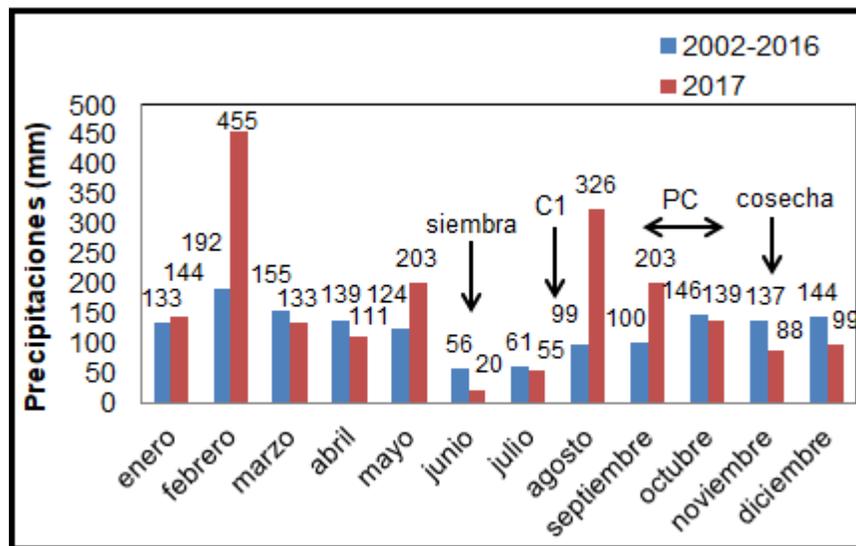


Figura No. 2. Precipitaciones mensuales acumuladas promedio para el año 2017 en relación a la serie histórica 2002-2016 para Paysandú

Las precipitaciones registradas fueron un 46% superior a las esperadas para el ciclo del cultivo, para los meses de agosto y setiembre fue donde se observó la mayor diferencia, siendo las precipitaciones dos y tres veces mayores a lo esperado respectivamente, posiblemente generando algunos problemas de exceso de agua a nivel de campo. A su vez, las precipitaciones del mes de mayo no permitieron la siembra durante ese periodo.

4.1.2. Temperatura

En cuanto a la temperatura media registrada, se observa una mayor temperatura en los meses de invierno, mientras que la primavera no presentó grandes variaciones, en comparación con la serie histórica (2002-2016, Figura No. 3). Según Si y Walton, citados por Agosti (2011) la temperatura media y las precipitaciones en post-floración serían los factores ambientales de mayor influencia sobre las variables de rendimiento y calidad de grano, determinando que cuando el llenado de grano ocurre a bajas temperaturas medias (en el rango de 12 a 18 °C), se obtiene un mayor rendimiento. Para el caso de este trabajo solo en el mes de noviembre se registraron temperaturas medias mayores al rango determinado lo que indica condiciones favorables para el cultivo desde el punto de vista térmico.

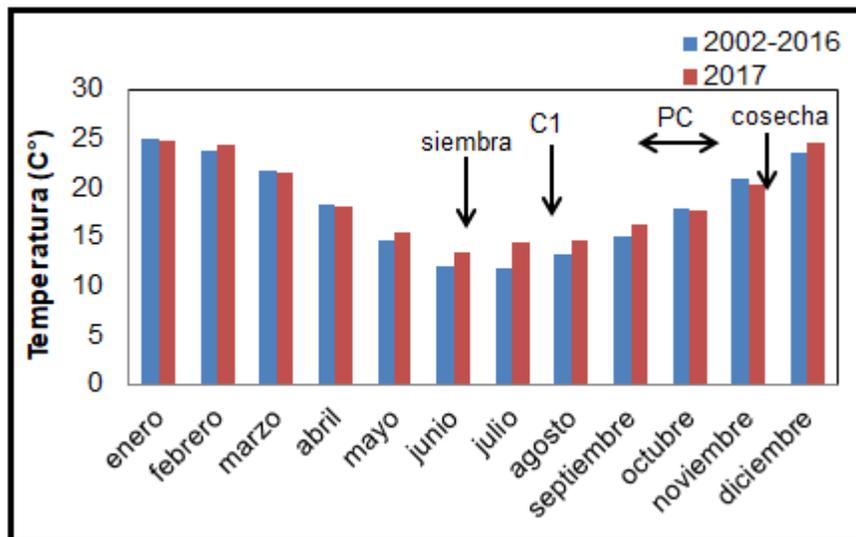


Figura No. 3. Temperatura media mensual promedio para el año 2017 en relación a la serie histórica 2002-2016 para la localidad de Paysandú

La información presentada permite concluir que para el ciclo del cultivo en el año 2017 la curva de temperatura tuvo igual comportamiento que la serie histórica. La temperatura promedio fue de 16 °C para ambos ensayos, siendo una unidad superior al promedio para la serie histórica (15 °C). Con respecto a las precipitaciones, éstas acumuladas durante los ensayos fueron superiores a la serie histórica (778 mm y 530 mm respectivamente), siendo no limitantes para el cultivo.

4.2. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS

En este capítulo se analizarán los efectos de los nutrientes N y S en el desarrollo y rendimiento del cultivo, la interacción entre ellos y los componentes del rendimiento. Las variables mencionadas serán analizadas estadísticamente para determinar la significancia de los valores comparados.

En ambos sitios el rendimiento medio fue similar, entorno a los 2500 kg ha⁻¹. La Carolina tuvo menor variabilidad y el máximo de este sitio fue menor al de Las Cumbres. Cabe destacar que el tratamiento que maximizó los rindes fue diferente en cada sitio. En La Carolina se dio con el tratamiento 7, dicho tratamiento en Las Cumbres tuvo un rendimiento considerablemente menor. El mejor tratamiento en Las Cumbres es el 6 y en La Carolina el rendimiento de ese tratamiento es similar, por lo que fue el que presentó el rendimiento más alto promedio de ambos sitios. Lo esperado era que el tratamiento 7 tuviera el rendimiento más alto en ambos ensayos ya que era el que recibió mayor aporte de N (160 kg ha⁻¹) de los cuales 40 fueron aplicados a la siembra y 120 en C1. El tratamiento 6 en cambio recibió un menor aporte de N total (100 kg ha⁻¹) pero tuvo un mayor aporte de N a la siembra (80 kg ha⁻¹). En cuanto al azufre el tratamiento 6 y 7 tuvieron el mismo aporte, sin embargo, lo que varió fue el momento, uno recibió 30 kg a la siembra y en el otro caso 20 a la siembra y 10 en C1 (Figura No. 4).

Al observar los resultados generales se puede decir que el mejor tratamiento fue el que tuvo mayor aporte de N a la siembra (80 kg ha⁻¹) y una aplicación de S fraccionada, 20 kg ha⁻¹ a la siembra y 10 kg ha⁻¹ en C1. En cuanto a los rendimientos mínimos se observa que el tratamiento testigo fue el menor para ambos ensayos, y este se ubicó en los 1800 kg ha⁻¹ aproximadamente.

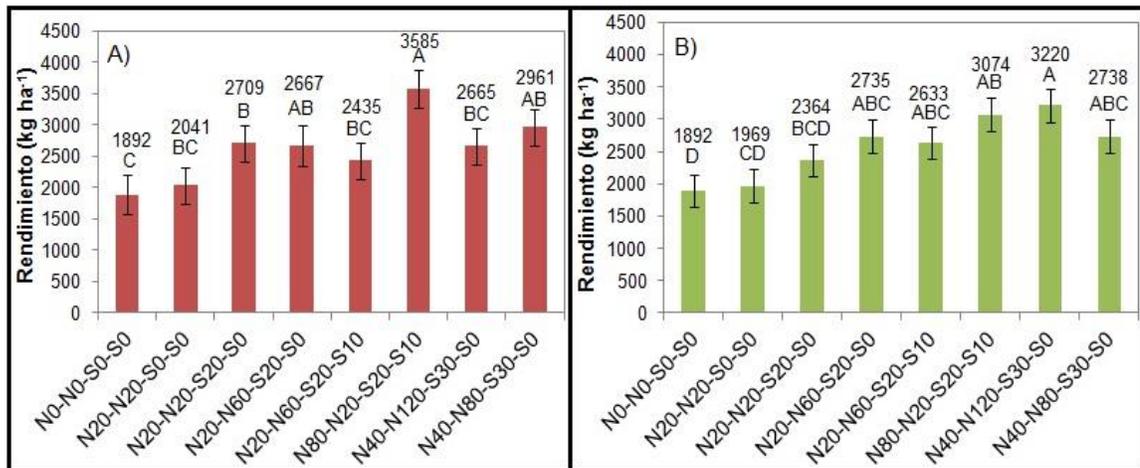


Figura No. 4. Rendimiento y desvío estándar por tratamiento A) Las Cumbres y B) La Carolina

4.2.1. Evolución de la población y su efecto en el rendimiento

La población de plantas no fue significativamente diferente entre tratamientos en ninguno de los dos ensayos, en ningún momento de evaluación ($P < 0.8660$ y $P < 0.7330$ para la Carolina y Las Cumbres respectivamente). No obstante, se detectaron disminuciones en los niveles de población, asociadas al momento de evaluación y no al tratamiento aplicado. En términos medios la población disminuyó un 38% (Figura No. 5). Es probable que parte de esta disminución esté asociada a la competencia por luz, aunque también existen reportes de raleo natural asociado a la competencia intraespecífica. Pozzolo et al. (2014) afirman que altas densidades de siembra aumentan la competencia intraespecífica debilitando la población en forma marcada, sobre todo, cuando se dan condiciones ambientales o de fertilidad desfavorables para el cultivo.

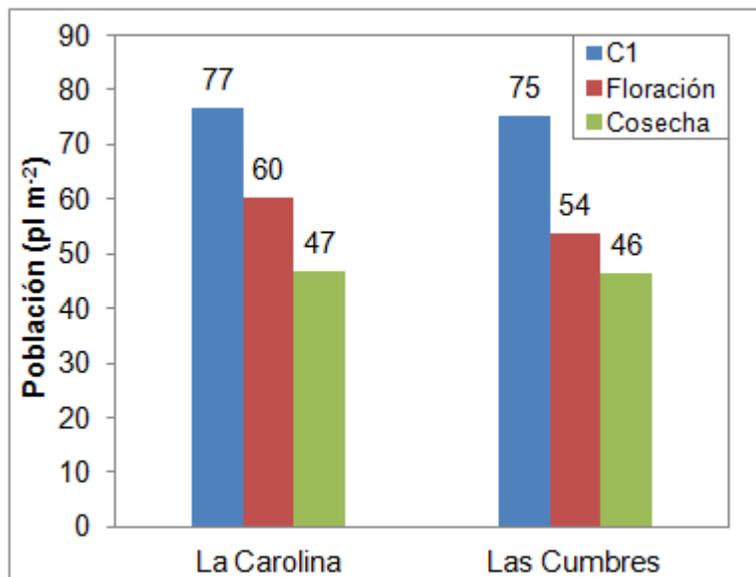


Figura No. 5. Población evaluada en diferentes estadios del cultivo para los dos sitios

En un trabajo realizado por Geisler et al. (1987), el comportamiento del cultivo fue similar, se evaluaron diferentes poblaciones y se mostró cómo se modificaron a lo largo del ciclo del cultivo. A bajas poblaciones (< a 10 plantas m^{-2}), no se produjeron pérdidas hasta la cosecha. A 45 plantas m^{-2} , hubo pérdidas en el rango de aproximadamente 10% de las plantas. Con 80 plantas m^{-2} se perdieron el 20% de las plantas, mientras que a 185 plantas m^{-2} la tasa de pérdida se incrementó al 50%.

Por otra parte, y a pesar de las diferencias en la población entre parcelas, que tienen un rango de 33 a 70 plantas m^{-2} , para ningún sitio pudo observarse una respuesta a la población. Estos resultados coinciden con lo reportado por Geisler et al. (1987) que afirman que hay compensación adecuada para densidades de planta de 45-90 plantas m^{-2} . Resultados similares se encontraron en un trabajo de Mazzilli et al. (2015) donde la respuesta a la población asociados a los trabajos de preparación de suelos indican una importante flexibilidad del cultivo y pocos cambios en los rendimientos con poblaciones que varían entre 80 y 150 pl, m^{-2} . En el mismo trabajo también se intentó identificar alguna relación entre el rendimiento según población lograda para las zafas 2011, 2012 y 2013; los resultados generales indicaron que para los materiales evaluados (primaverales) sin importar el ciclo, no existió asociación entre la población lograda y el rendimiento en grano para un rango de poblaciones de 20 a 70 pl. m^{-2} , a su vez se observó una tendencia a disminuir a partir de esa población.

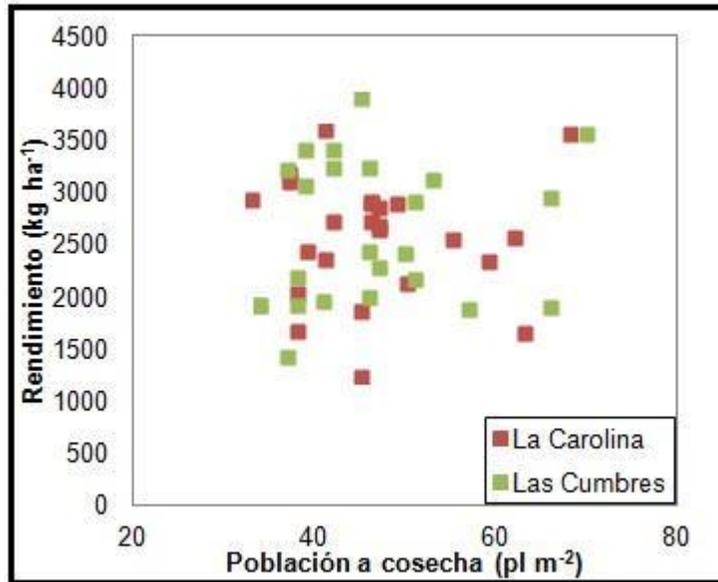


Figura No. 6. Relación entre población a cosecha y rendimiento en grano

4.2.2. Análisis de componentes de rendimiento

Los tratamientos aplicados generaron una importante dispersión en los rendimientos y los componentes. El número de grano m⁻² tuvo un coeficiente de variación del entorno al 20% y el número de silicuas m⁻² tuvo un coeficiente de variación de 13 % para el sitio de La Carolina y un 22 % para Las Cumbres (Cuadro No. 4). En términos medios se generaron 6591 silicuas m⁻², valor que representa el 81% de los reportados por Adrover y Ferreira (2012) para *Brassica napus*. Estos mismos autores reportaron en promedio 177.000 granos m⁻², valor muy por encima al obtenido en este trabajo. Estas diferencias se explican por el rendimiento obtenido por Adrover y Ferreira (2012) que fue 3900 kg ha⁻¹. Otro trabajo de López y Verocai (2016) para *Brassica napus* obtuvieron un rendimiento medio de 1648 kg ha⁻¹, se generaron 2769 silicuas m⁻² y tuvo un promedio de 47901 granos m⁻². El rendimiento fue un 37% menor que el de este trabajo y en cuanto a las silicuas m⁻² y granos m⁻² fue un 58 y 32% menor respectivamente.

Cuadro No. 4. Componentes de rendimiento para ambos sitios

Sitio	Tratamiento	Rendimiento (kg MS ha ⁻¹)	Biomasa (kg MS ha ⁻¹)	IC	Materia grasa (%)	No. de granos m ⁻²	Peso de grano (g)	Silicuas m ⁻²
La Carolina	N0-N0-S0-S0	1892 C	8575	0,22	50	46344 D	4,1	4539 D
	N20-N20-S0-S0	1969 C	7588	0,26	49	49981 CD	3,9	4966 CD
	N20-N20-S20-S0	2364 BC	8816	0,27	51	60171 BCD	3,9	5868 BCD
	N20-N60-S20-S0	2735 AB	10373	0,26	50	69254 AB	3,9	6046 BC
	N20-N60-S20-S10	2633 ABC	9934	0,27	51	67726 ABC	3,9	6823 AB
	N80-N20-S20-S10	3074 AB	10680	0,29	51	80260 A	3,8	7009 AB
	N40-N120-S30-S0	3220 A	12325	0,26	50	79060 A	4,1	8121 A
	N40-N80-S30-S0	2738 AB	10570	0,26	50	71312 AB	3,8	6725 AB
	P valor	0,0168	0,0670	0,2828	0,2460	0,0112	0,620	0,0018
	% C.V	16,57	16,44	10,59	1,82	16,17	4,24	12,82
M.D.S	748,04	2837	0,048	1,60	18554	0,292	1405	
Promedio	2578	9857	0,26	50	65513	3,94	6262	
Las Cumbres	N0-N0-S0-S0	1892 C	7982 D	0,24	52	53973	3,5	5533
	N20-N20-S0-S0	2041 C	8794 CD	0,23	52	58015	3,5	5377
	N20-N20-S20-S0	2709 ABC	11184 ABCD	0,24	52	77597	3,5	7036
	N20-N60-S20-S0	2667 BC	9846 BCD	0,28	52	74100	3,6	6288
	N20-N60-S20-S10	2435 BC	12610 AB	0,19	51	75044	3,2	7555
	N80-N20-S20-S10	3585 A	13882 A	0,26	51	97798	3,7	9211
	N40-N120-S30-S0	2665 BC	10877 ABCD	0,24	50	75820	3,5	6870
	N40-N80-S30-S0	2961 AB	11886 ABC	0,26	51	90228	3,3	7482
	P valor	0,0292	0,0285	0,5231	0,3682	0,0645	0,090	0,1842
	% C.V	19,44	17,28	19,91	2,35	21,01	4,53	23,6
M.D.S	891,94	3293,88	0,085	2,11	27713	0,270	2859	
Promedio	2619	10883	0,24	51	75322	3,48	6919	

Por otro lado, el peso medio de grano fue de 3,7 gramos variando entre 4,2 y 3,1, valor superior a los reportados por Agosti (2011), Adrover y Ferreira (2012), cuyos promedios fueron 2,95 y 3,2 gramos, respectivamente para la especie *Brassica napus*, ambos con rendimientos superiores a este trabajo. En el trabajo de López y Verocai (2016) el peso de grano promedio fue de 3,49 gramos. El peso de mil granos para la especie *Brassica carinata* presenta un rango entre 2,9 y 3,2 gramos (Seepaul et al., 2016) valor inferior al reportado en este trabajo. Cuando se compara entre sitios se observa que para el caso de Las Cumbres el número de silicuas m^{-2} tuvo en promedio 700 silicuas más que La Carolina, pero el peso de grano fue 0,5 gramos menor. Esto puede deberse al menor número de fosas disponibles para llenar, pero dada la capacidad de compensación, ambos ensayos tuvieron el mismo rendimiento.

El rendimiento estuvo fuertemente asociado al número de granos m^{-2} , siendo el componente que mejor explica los cambios en rendimiento. La relación encontrada en el experimento fue similar a la obtenida por Aguirre y Uriarte (2010), siendo el coeficiente de determinación de 88% (Figura No. 7). En una revisión realizada por Agosti (2011) se menciona que los trabajos en los que se observaron incrementos del rendimiento por agregado de N, el componente que mejor explicó las diferencias en rendimiento fue el número de granos por unidad de superficie. Por otro lado, no se encontró asociación directa entre el rendimiento y peso de grano es decir que aumentos en el peso de grano no necesariamente se traducen en aumentos en rendimiento (Figura No. 7).

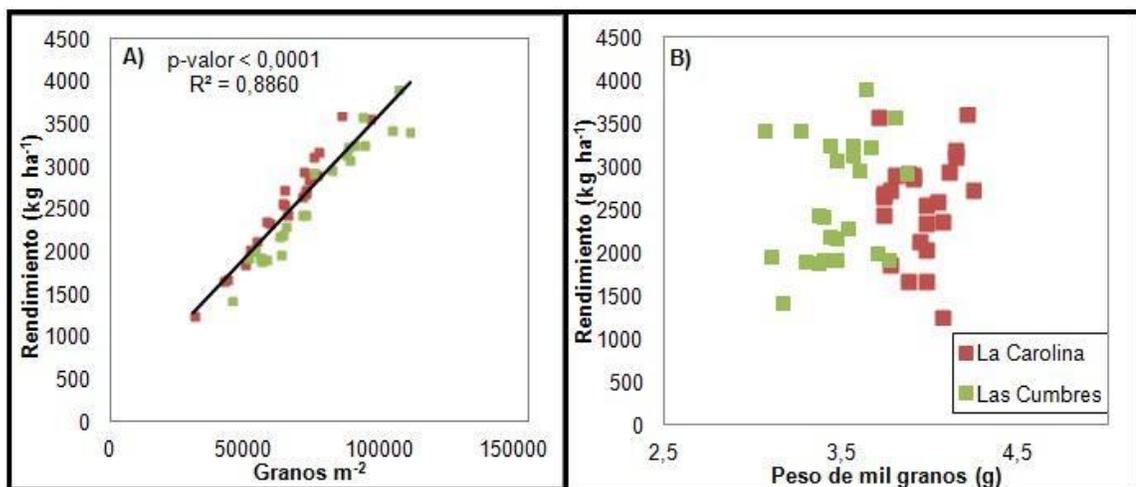


Figura No. 7. Relación entre rendimiento $kg\ ha^{-1}$ y granos m^{-2} ; y rendimiento $kg\ ha^{-1}$ y peso de grano

Al igual que el número de granos por m^{-2} las silicuas por m^{-2} presentan una relación lineal y positiva con el rendimiento. Bajo un buen índice nutricional y condiciones climáticas el número de silicuas m^{-2} aumenta, por lo que también aumenta el rendimiento. Lo mencionado anteriormente coincide con lo reportado con Agosti (2011) quien afirma que aumentos en el número de silicuas y grano por m^{-2} conlleva a aumentos en el rendimiento. Los mayores rendimientos se asocian a aumentos en el número de silicuas por m^{-2} , de esta forma se logró mayor número de granos por m^{-2} ya que el número de granos por silicua fue en general estable ante variaciones en el número de silicuas por m^{-2} (Figura No. 8)

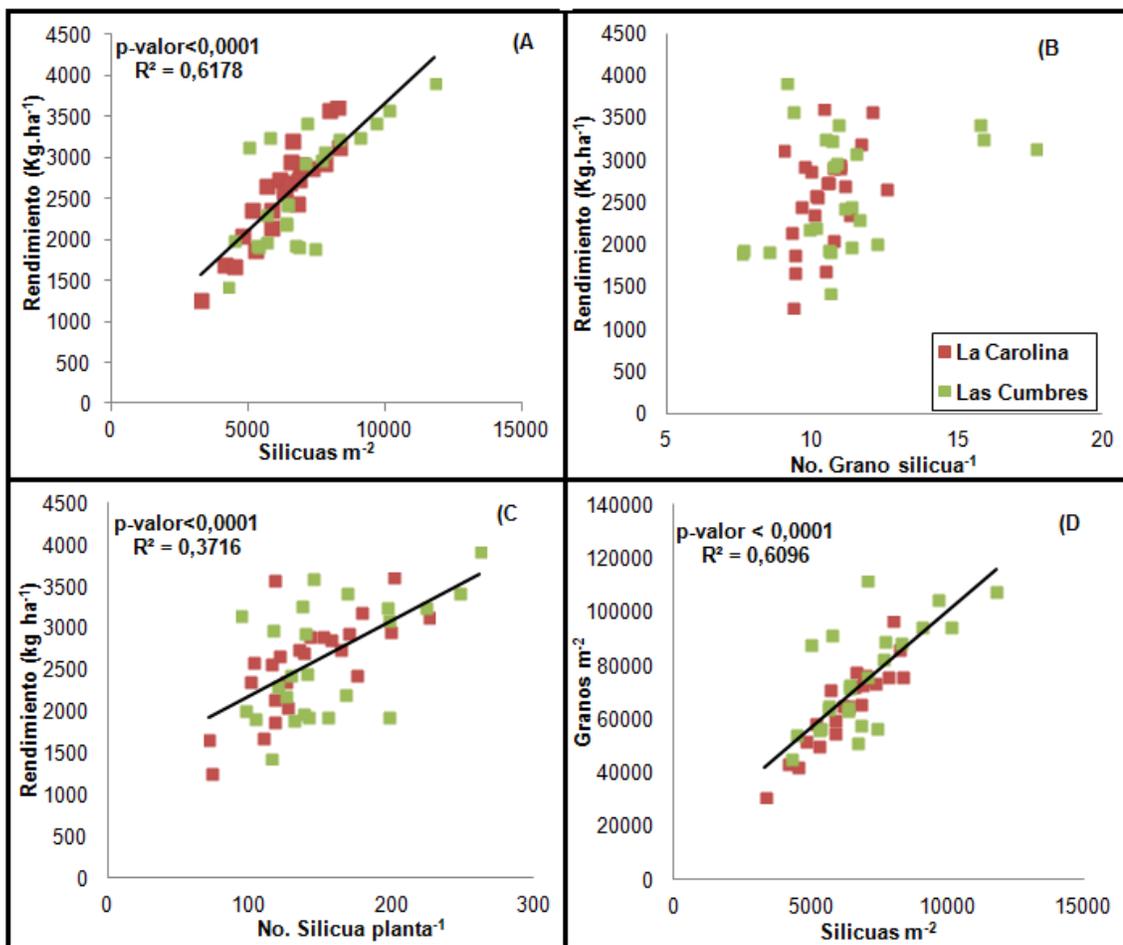


Figura No. 8. Relación entre rendimiento $kg\ ha^{-1}$ y componentes numéricos m^{-2}

En cuanto a las silicuas por planta se observa una débil asociación entre número de silicuas por planta y rendimiento. Tampoco se observa una clara asociación entre el número de granos por silicua y el rendimiento. Para un

mismo número de granos por silicua hay rendimientos entre 1200 y de 4000 kg ha⁻¹.

Por otro lado, se observa una relación lineal y positiva entre la biomasa total acumulada a cosecha y el rendimiento (Figura No. 9). El valor promedio de biomasa para La Carolina fue de 9857 kg ha⁻¹ (Cuadro No. 4), mientras que para Las Cumbres la biomasa total promedio fue de 10883 kg ha⁻¹ (Cuadro No. 4). Esta fuerte asociación indica que para el rango estudiado la proporción de biomasa cosechada como grano fue estable, lo que se traduce una baja variación en el índice de cosecha (Figura No. 10)

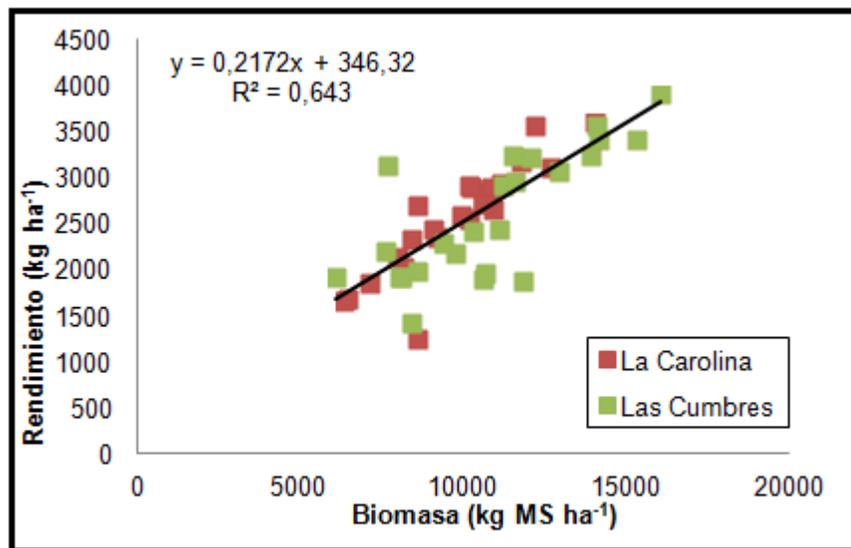


Figura No. 9. Variación del rendimiento en grano para ambos sitios, en función de la biomasa total producida a cosecha

En cuanto al índice de cosecha se puede observar que es estable ante diferentes rendimientos y tratamientos, por lo que es importante lograr altos valores de biomasa. Los valores de IC para este trabajo se ubican en torno a 0,25 con un máximo de 0,29 y mínimo de 0,19 valor inferior al reportado por Gesch et al. (2015) de 0,35 para la especie. Los menores valores de IC fueron los obtenidos por los testigos en ambos sitios, esto puede deberse a que en situaciones de estrés el índice de cosecha puede ser sustancialmente menor debido a un menor número de silicuas (Si y Walton, citados por Aguirre y Uriarte, 2010). Esto se puede ver para uno de los testigos en el predio de La Carolina.

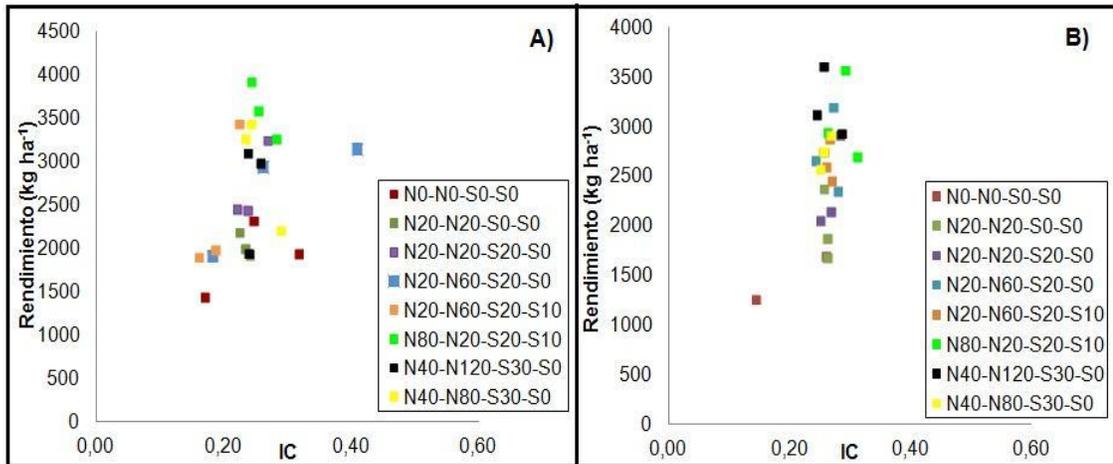


Figura No. 10. Relación entre rendimiento e índice de cosecha (IC) en A) Las Cumbres y B) La Carolina

El contenido de materia grasa es un punto a destacar, ya que el destino final de la producción es la elaboración de biocombustible. En tal sentido se aprecia claramente que no existe relación entre el porcentaje de materia grasa y rendimiento, pero si hay una relación lineal y positiva entre rendimiento y kg de materia grasa producida. El porcentaje de materia grasa en este trabajo osciló entre 48 y 54 %, con un promedio de 50,9%. Estos valores son superiores a los reportados en la literatura, donde se menciona 45,6 % para *B. napus* y 40,2 % para *B. carinata*. Cabe señalar que la industria bonifica la producción de *B. napus* con un contenido mayor al 42% de materia grasa. Si esta condición se extrapola a la producción de *B. carinata*, sería una ventaja comercial.

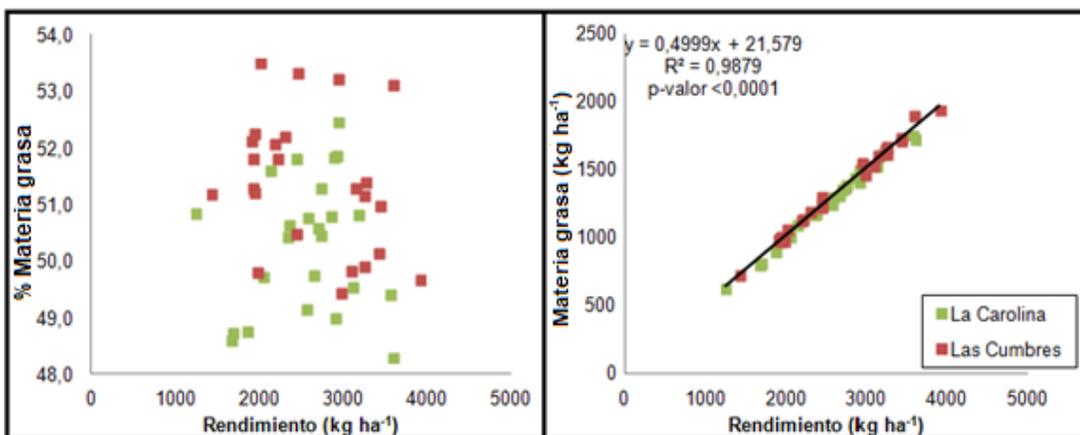
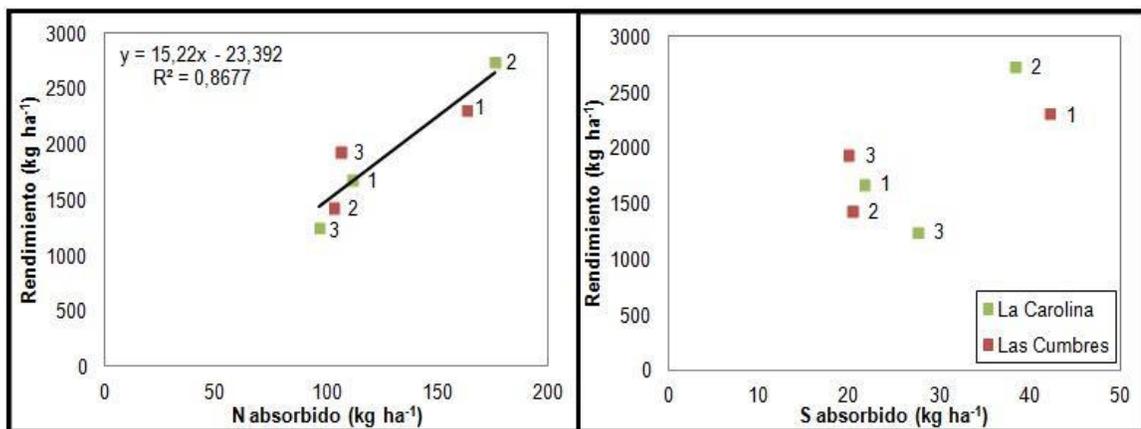


Figura No. 11. Materia grasa (%) en función del rendimiento en grano; y producción de materia grasa por unidad de superficie en función del rendimiento en grano

4.2.3. Absorción de N y S

Resulta relevante evaluar los niveles de N y S absorbidos por los testigos sin fertilización de N y S, ya que esta absorción permite estimar el aporte por parte del suelo sin agregado de fertilizante durante todo el ciclo del cultivo. Como puede observarse en la figura, los valores de N absorbido estuvieron entre 100 y 170 kg N ha⁻¹, mientras que el S estuvo entre 20 y 40 kg ha⁻¹ (Figura No. 12). Si se relacionan estos valores a los respectivos rendimientos de cada testigo da como resultado que absorbieron 67 y 15 kg de N y S respectivamente por tonelada de rendimiento. Estos valores son levemente superiores a los indicados por el IPNI, de 60 y 12 kg de N y S requeridos por *Brassica napus* para producir una tonelada de grano.



Los números representan el bloque al que pertenece cada testigo

Figura No. 12. Absorción de N y S de los testigos a cosecha.

En cuanto al N se observa que para lograr altos rendimientos se tienen que absorber altas cantidades de nitrógeno (Figura No. 13), esto concuerda con lo reportado Malagoli (2005), Rathke (2006) quienes afirman que las brassicas requieren tasas de agregado relativamente altas para la obtención de rendimientos óptimos. Además, se puede apreciar que los tratamientos que absorbieron más nitrógeno son los tratamientos que se fertilizaron con 100, 120 y 160 kg ha⁻¹ de N, no observándose diferencia entre ellos. Para el caso de los tratamientos testigos se puede observar que es el tratamiento con menor absorción de N.

Con respecto al azufre se puede ver que, si bien existe la misma tendencia que para el nitrógeno, la correlación no es tan alta por lo que a una misma cantidad de S absorbido se pueden concretar altos y bajos rendimientos

(Figura No. 13). En el sitio La Carolina los tratamientos que absorbieron más azufre fueron los de mayor dosis (30 kg ha⁻¹). Para Las Cumbres la respuesta fue más errática.

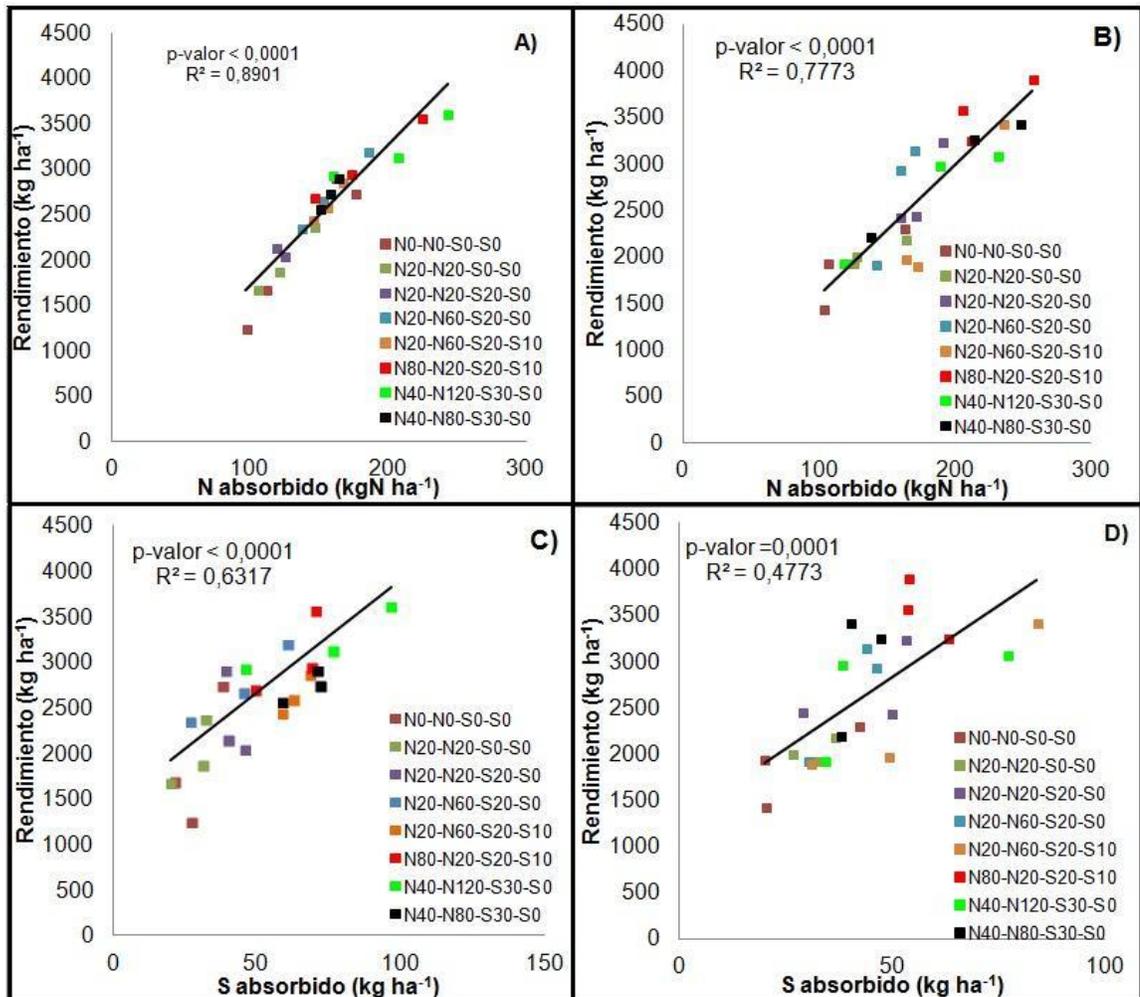


Figura No. 13. Nitrógeno absorbido a cosecha por los diferentes tratamientos en relación al rendimiento para A) La Carolina y B) Las Cumbres; y azufre absorbido a cosecha por los diferentes tratamientos en relación al rendimiento para C) La Carolina y D) Las Cumbres

Como indicaron Zamora y Massigoge (2008), para obtener una producción más elevada y estable del cultivo de canola es necesario que la nutrición nitrogenada sea acompañada con un contenido de S adecuado, el cual también mejoraría el índice de eficiencia del N. Es por esto que hay una mayor correlación entre nitrógeno absorbido y rendimiento que para azufre absorbido.

4.2.4. Estado nutricional del cultivo

En el siguiente cuadro se presentan los valores medios y variabilidad del estado nutricional del cultivo al estadio de C1, la producción de biomasa y el rendimiento en grano obtenidos a partir de los dos experimentos.

Cuadro No. 5. Estado nutricional del cultivo al estadio de C1

Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	D.E	C.V (%)
N C1 (%)	5,32	6,63	4,47	0,49	9%
S C1 (%)	0,83	1,04	0,58	0,12	14%
Biomasa C1 (kg ha ⁻¹)	609	1233	307	227	37%

N C1= nitrógeno en C1, S C1= azufre en C1, DE= desvío estándar, CV= coeficiente de variación

El contenido medio de N al estadio C1 fue de 5,32%, lo que se ubica muy por encima de lo reportado por Zhou et al. (1997) quienes citan valores de 2,98% de N en elongación de tallo como valor crítico para *Brassica napus*, no citando valores de biomasa. En cuanto al azufre se puede ver que hay un contenido promedio de 0,83%, valor superior al que encontró Pouzet (1995) como limitante del rendimiento para *Brassica napus* de 0,6%. Por otra parte, la biomasa acumulada a inicio de elongación (C1) fue en promedio 609 kg ha⁻¹ con un máximo de 1233 y un mínimo de 307 kg ha⁻¹, es el valor que presenta mayor coeficiente de variación con un 37%. Este valor es inferior al reportado por Ferreira y Ernst (2014) para *Brassica napus* en el que el rango de variación en biomasa estuvo entre 550 y 5970 kg ha⁻¹ de materia seca.

Independientemente de los niveles medios, existió una importante variabilidad en la acumulación de biomasa al estadio de C1 (Figura No. 14), a su vez la mayoría se encuentran por debajo de las curvas de dilución ajustadas para *Brassica napus* por Ferreira y Ernst (2014), tanto para N como S en el estadio de C1, por lo tanto, se debería esperar respuesta al agregado de estos nutrientes en la mayor parte de las parcelas. Esto indica que la estrategia de fertilización aplicada previo a C1 no permitió lograr niveles de suficiencia en la mayoría de las parcelas.

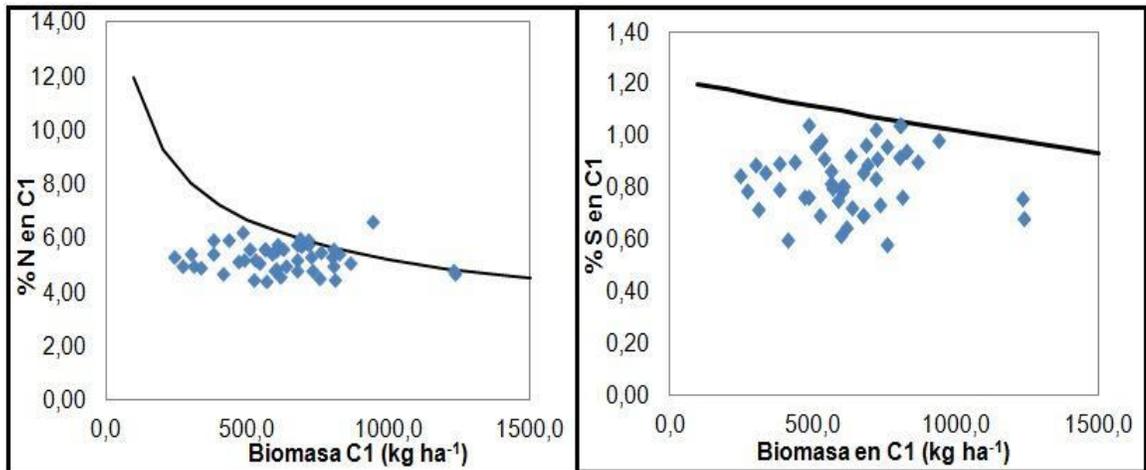


Figura No. 14. Concentración de N y S en C1 (ensayos)

Con respecto a los índices críticos de nutrición para nitrógeno y azufre propuestos por Ferreira y Ernst (2014) de 1,04 y 0,88 respectivamente, para la máxima producción de biomasa en elongación (C1), se observa que salvo una parcela correspondiente al tratamiento N80-S20 todas las otras se encuentran por debajo del índice crítico de nutrición para nitrógeno. En cuanto al azufre, hay un efecto sitio, donde La Carolina logró en varias parcelas niveles de suficiencia para el tratamiento N40-S30, mientras que en Las Cumbres la mayoría de los tratamientos se encuentran por debajo del índice crítico (Figura No. 15).

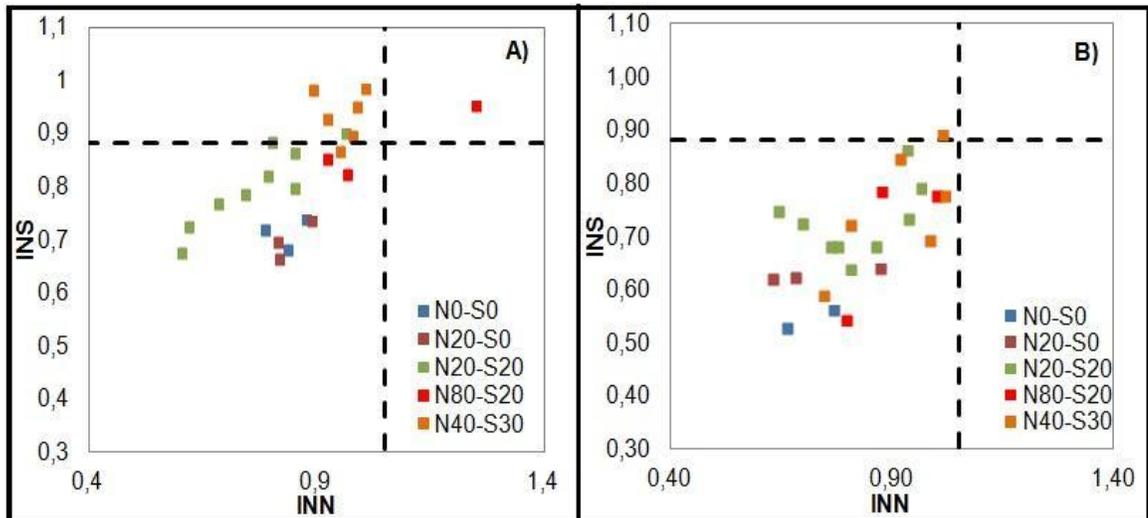
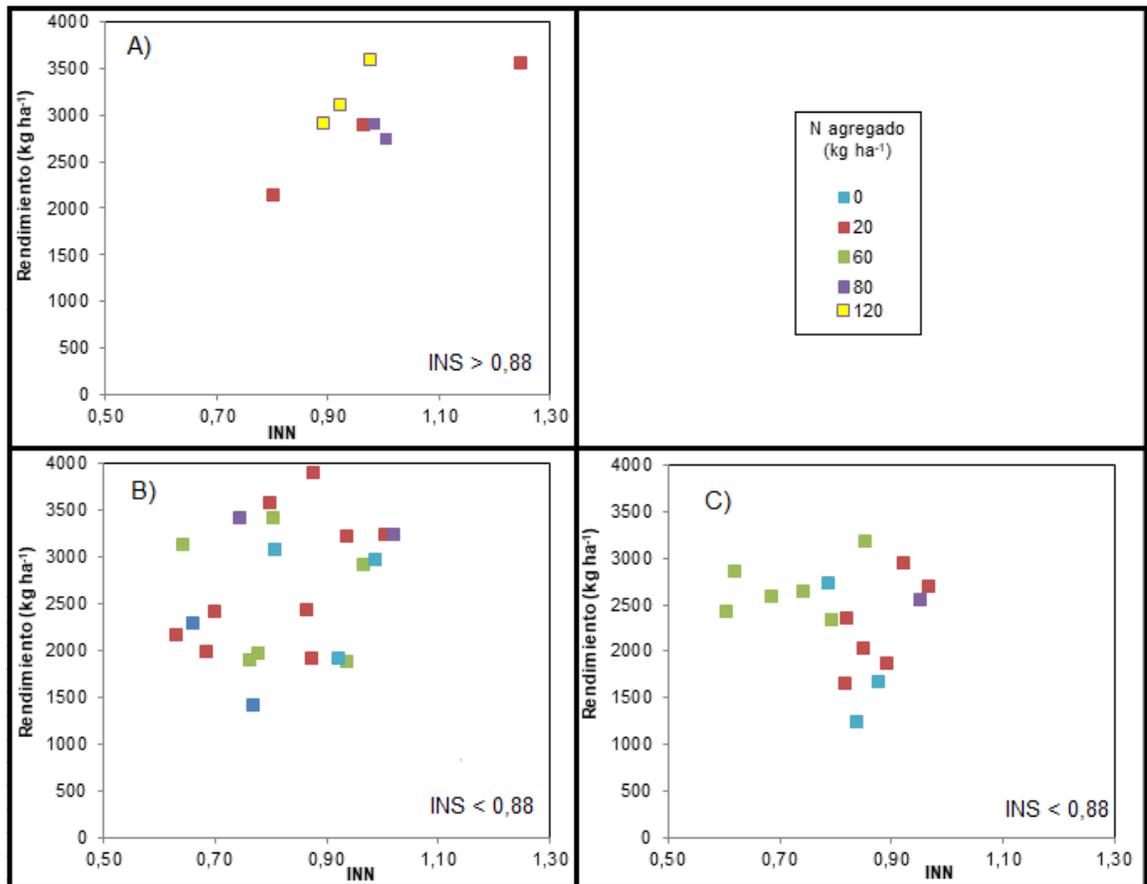


Figura No. 15. Relación entre índice de nutrición nitrogenada y azufrada para A) La Carolina y B) Las Cumbres

Para lograr una buena respuesta a la fertilización nitrogenada es necesario una buena nutrición azufrada, esto concuerda con lo dicho por Hocking et al. (1997), quienes muestran que la baja disponibilidad de S limita el número de granos por silicua, inclusive cuando la disponibilidad de N es adecuada. Para el caso de La Carolina (Figura A) No 16), se lograron identificar algunos tratamientos con un INS superior al crítico propuesto por Ferreira y Ernst (2014) de 0,88. En estos sitios, se observa una clara respuesta a la fertilización nitrogenada en el estadio de C1 (Figura No. 16). En contraparte, en el ensayo de Las Cumbres, solo una parcela logró un INS superior al crítico y por tanto no es posible observar una clara respuesta.



En el cuadrante superior derecho no se presenta figura ya que no hubo tratamientos.

Figura No. 16. Rendimiento en relación al INN para los tratamientos con INS superior a 0,88 en A) La Carolina a distintos niveles de agregado de N. y Rendimiento en relación al INN para los tratamientos bajo INS inferior a 0,88 para las diferentes dosis de N agregado en B) Las Cumbres y C) La Carolina.

En los sitios donde el nivel de S fue limitante (Figura B) y C) No. 16), es decir un INS menor a 0,88, no es posible detectar una clara respuesta a la fertilización con N y/o N +S, lo que muestra que bajo condiciones de deficiencia de S en el estadio de C1 la repuesta a la fertilización nitrogenada se ve limitada. Por lo tanto, es imprescindible conocer que manejo previo a C1 permitió lograr niveles de S no limitante.

En ese sentido, es interesante destacar que para lograr un buen INS y llegar al nivel crítico propuesto, el cultivo debe absorber en torno a 7 kg ha⁻¹ a estadio de C1 (Figura No. 17). Este valor es similar al publicado por Ferreira y Ernst (2014) para *Brassica napus*, quienes afirman que para llegar al nivel

crítico propuesto debe absorber como mínimo 6 kg ha^{-1} . Para lograr esta absorción hay que fertilizar a la siembra, para el caso en estudio 30 kg ha^{-1} fueron necesarios para alcanzar el nivel crítico, de esta forma se lograría un mayor aprovechamiento del N agregado.

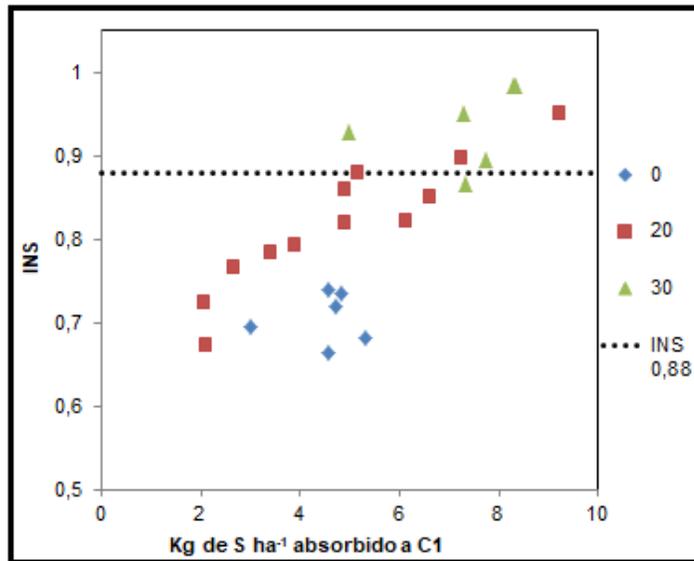


Figura No. 17. INS en relación a los kg ha^{-1} de S absorbidos a C1 para las diferentes dosis en La Carolina

Para el caso del INN (Figura No. 18), solo una parcela logró superar el nivel crítico propuesto, lo que nos estaría indicando que las dosis a siembra estarían siendo limitantes. Por otro lado, se puede concluir que para lograr altos índices es necesario que el cultivo absorba una mayor cantidad de N, lo que se estaría logrando con las mayores dosis. Una absorción de 40 kg ha^{-1} sería necesaria como mínimo para lograr un buen INN. Ferreira y Ernst (2014) publicaron que el nivel crítico de N absorbido necesario para alcanzar un INN no limitante en planta a C1 fue de 54 kg ha^{-1} .

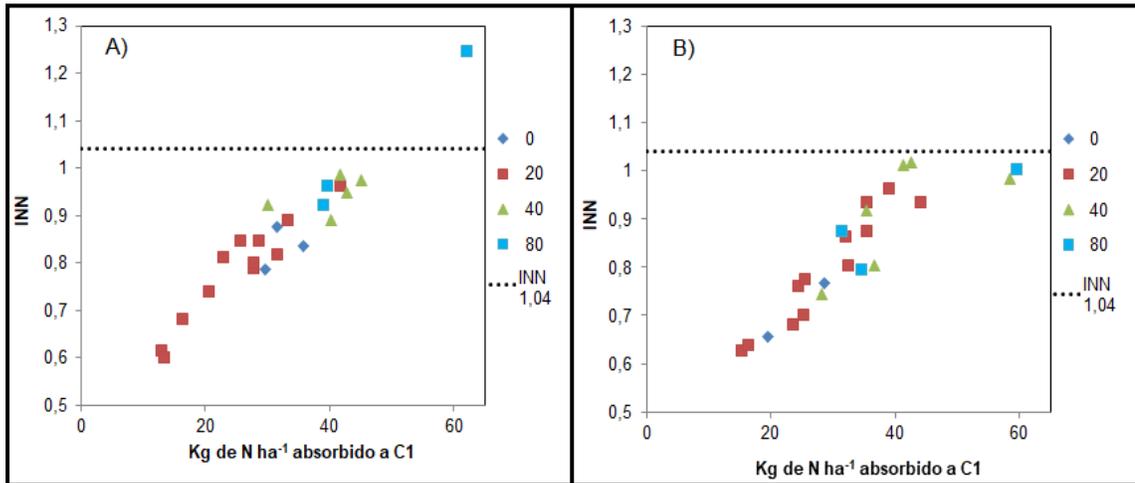


Figura No. 18. INN en relación a los kg ha⁻¹ de N absorbidos a C1 para las diferentes dosis en A) La Carolina y B) Las Cumbres

4.2.5. Eficiencia de uso de nutrientes

La eficiencia agronómica (EAUN) mostró una relación negativa con el nivel de nitrógeno agregado (Figura No. 19). Para el rango analizado en el año del experimento, a medida que el N agregado aumenta, la eficiencia se reduce, teniendo un valor mínimo de 20 kg grano por kg N agregado ha⁻¹, valor superior al reportado por Agosti (2011) de 8.3 kg ha⁻¹ para *Brassica napus*.

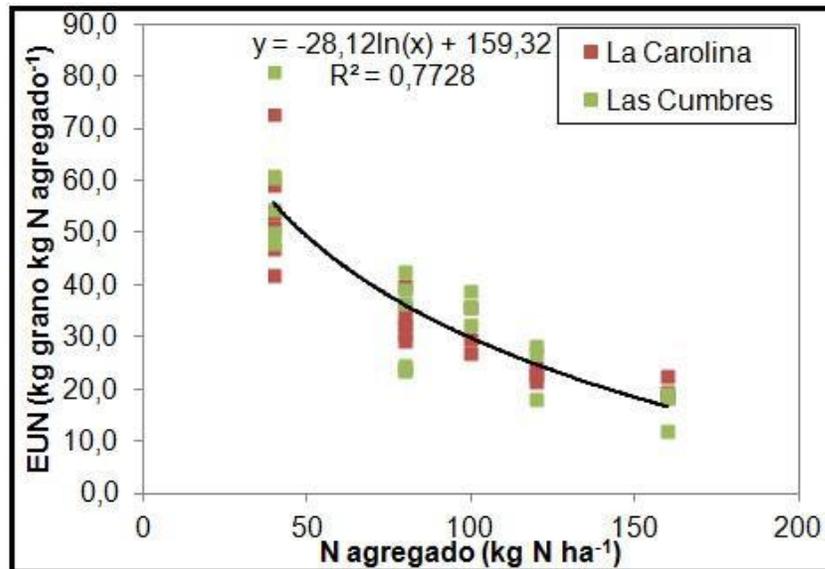


Figura No. 19. Eficiencia agronómica de uso de nitrógeno

Al analizar estadísticamente las eficiencias de recuperación entre los tratamientos no se encontraron diferencias significativas. La eficiencia de recuperación de N de Las Cumbres fue mayor que La Carolina (Figura No. 20), esto puede deberse a que hubo tratamientos testigos en La Carolina con alto rendimiento. También se puede concluir que en Las Cumbres el suelo aportó menos N y por esto el fertilizante agregado se recupera con mayor eficiencia que para La Carolina.

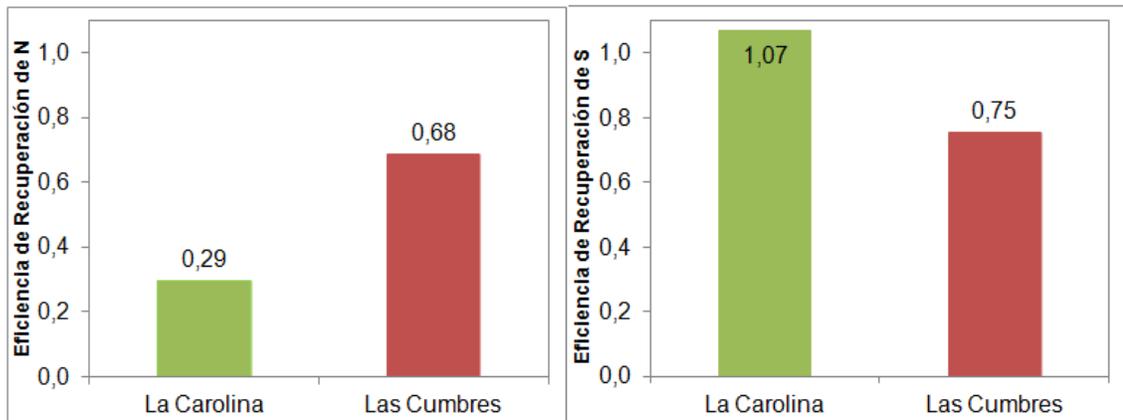


Figura No. 20. Eficiencia de recuperación aparente del fertilizante agregado para ambos sitios

En cuanto a la recuperación de S, lo primero que se destaca es que los valores de recuperación son más elevados que para N. Esto puede deberse a la mayor eficiencia de las brassicas en la utilización de dicho nutriente y/o a que el crecimiento del cultivo consecuencia de la respuesta a N permita mejorar la absorción de S.

Aumentos en la cantidad de N absorbido generan mayor rendimiento en grano (Figura No. 21 A) lo cual es coincidente con lo reportado por Agosti (2011) quien obtuvo un coeficiente de 0,87 para estas dos variables para la especie *Brassica napus*. Por otra parte, los aumentos en los niveles de N agregado logran aumentos decrecientes en el rendimiento hasta la dosis máxima agregada de 160 kg ha⁻¹. También se puede ver que el rango de rendimientos posibles para la misma dosis de N en términos medios es de 1400 kg ha⁻¹ y este valor aumenta cuando la dosis agregada es mayor, lo que indica que hay otras limitaciones además del nitrógeno para lograr altos rendimientos.

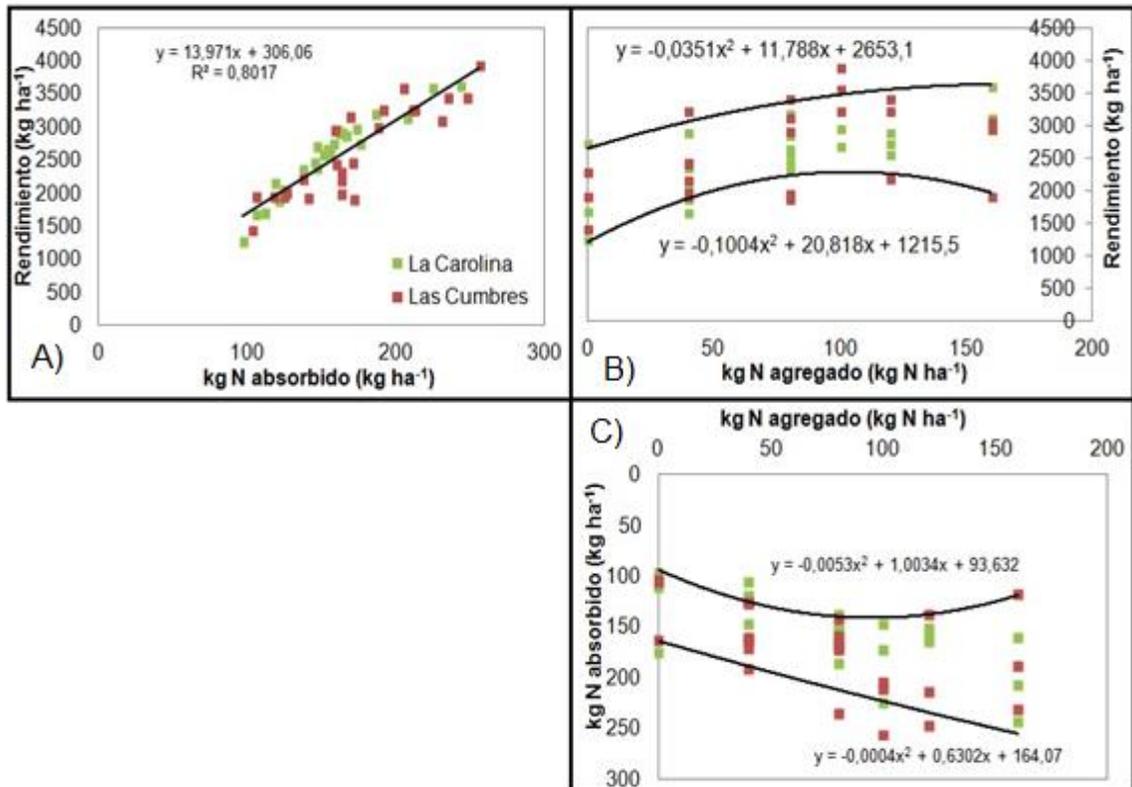


Figura No. 21. A) Relación entre N absorbido y rendimiento, B) N agregado y rendimiento, C) N agregado y N absorbido, todos en kg ha⁻¹

Por último, a mayor dosis de N aumentan los kg ha⁻¹ de N absorbidos. Cuando se observan las dosis más altas se ve que la respuesta es más errática, si bien presenta repeticiones con niveles elevados de absorción, también hay otras con menor nivel. A dosis menores se observa una respuesta con menor variabilidad. Una posible causa es que a dosis tan altas pueden causar un exceso de N el cual no puede ser absorbido en un momento dado y se pierda. A pesar de que en términos generales se observó una respuesta positiva al agregado de N, se puede ver una importante variabilidad en la absorción.

Con respecto al azufre se observa que este nutriente condiciona el rendimiento en *Brassica carinata* ya que al aumentar los kg ha⁻¹ de azufre agregados y absorbidos el rendimiento tiende a ser mayor (Figura No. 22). En la Figura A) No. 22 se observa que en tratamientos sin azufre el rendimiento no supera los 2600 kg ha⁻¹ y hay más de una repetición con rendimientos menores a 1500 kg ha⁻¹. Se aprecia una mayor variabilidad a medida que se aumenta la dosis.

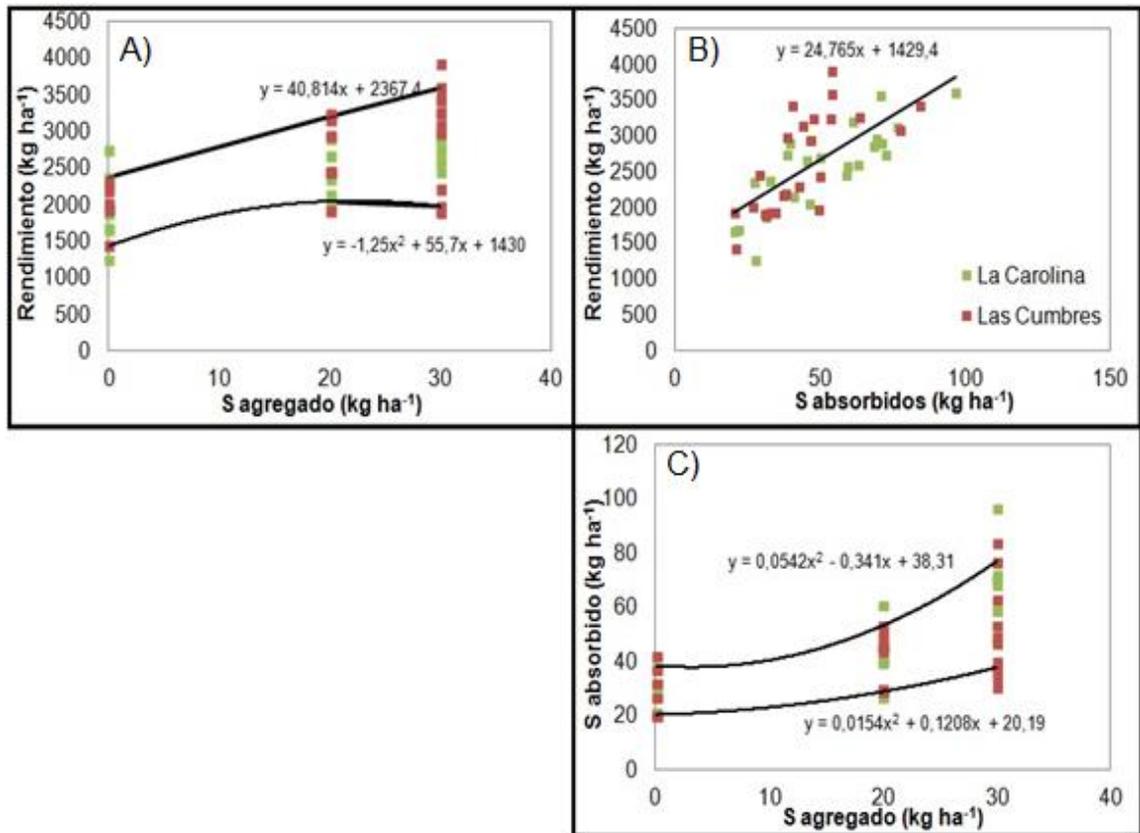


Figura No. 22. A) Relación entre S agregado y rendimiento, B) S absorbido y rendimiento, C) S agregado y S absorbido, todos en kg ha⁻¹

Por su parte, al igual que para el caso del N, el rendimiento aumenta en la medida que aumenta la absorción de S, aunque existe una mayor dispersión que para el caso de nitrógeno. Por último, se observa una relación positiva entre el S agregado y el S absorbido lo que demuestra que a mayor aporte de azufre se da una mayor absorción. La media para S0 es 29 kg S ha⁻¹, para S20 es de 41 kg S ha⁻¹ y para S30 es 60 kg S ha⁻¹. Estos valores son superiores a los reportados por López y Verocai (2016) que presentaron una media para S0 de 23 kg S ha⁻¹, para S20 de 30 kg S ha⁻¹ y para S30 de 36 kg S ha⁻¹ para *Brassica napus*. También se puede observar que la variabilidad para una misma dosis de fertilizante aumentó a medida que aumenta la dosis aplicada.

5. CONCLUSIONES

Las condiciones de precipitación ocurridas durante el mes de mayo no permitieron la siembra en dicho mes (fecha óptima) y esta tuvo que posponerse al mes de junio, condicionando la respuesta de los tratamientos estudiados ya que el mayor potencial de rendimiento es logrado con siembras tempranas.

El N y S agregado, modifican en forma importante los componentes de rendimiento, siendo el número de granos m^{-2} el componente de rendimiento que mejor explicó los cambios en el rinde, determinado principalmente por el número de silicuas m^{-2} , ya que el número de granos por silicua se mantuvo estable para un amplio rango de oferta de nutrientes.

Con respecto a las diferentes dosis agregadas de nitrógeno, se concluye que fueron limitantes para alcanzar a C1 valores en el índice de nutrición nitrogenada superiores a los rangos de no respuesta, lo que nos estaría indicando que las dosis aplicadas a siembra fueron insuficientes, aun cuando existieron agregados de hasta 80 kg ha^{-1} . A su vez las parcelas que se acercaron al $INN > 1,04$ absorbieron al menos 60 kg ha^{-1} .

En cuanto al azufre, el cultivo debe absorber al menos 7 kg ha^{-1} al estadio de C1 para llegar al nivel crítico propuesto, esto se logró para el caso en estudio con una dosis de 30 kg ha^{-1} de azufre.

Bajo condiciones de deficiencia de S en estadio C1, no fue posible detectar una clara respuesta a la fertilización con N y/o N+S, por lo que la respuesta a la fertilización nitrogenada se vió limitada. Dicho de otra manera, la respuesta al N disminuyó cuando el S fue limitante.

Para el año del experimento la eficiencia agronómica (EAUN) mostró una relación negativa con el nivel de nitrógeno agregado, teniendo un valor mínimo de 20 kg de grano por kg de N agregado ha^{-1} . Este valor es interesante ya que es superior a lo reportado para *Brassica napus*.

La falta de parcelas con INN superior al crítico dificultó la validación de los índices, es necesario realizar ensayos con mayores dosis de N y S a siembra para conocer verdaderamente si las herramientas de decisión generadas para *Brassica napus* son aplicables a *Brassica carinata*.

6. RESUMEN

El cultivo de *Brassica carinata* está disponible comercialmente en Uruguay desde la zafra 2015. En la zafra 2017/2018 se sembraron 7000 hectáreas siendo el país con mayor área sembrada del mundo. Es una alternativa valiosa a los cultivos de invierno tradicionales como trigo y cebada, sin embargo hacen falta conocimientos productivos y/o comerciales para que el cultivo se establezca y aumente el área. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta de N y S en *Brassica carinata* y conocer si los índices de nutrición nitrogenada y azufrada generados para *Brassica napus*, predicen la respuesta a la fertilización en este cultivo a inicio de elongación; para ello se instalaron dos ensayos durante el invierno de 2017, uno en el predio comercial “Las Cumbres” ubicado en el departamento de Paysandú, y el segundo en el establecimiento “La Carolina” ubicado en el límite entre el departamento de Paysandú y Río Negro. Se aplicaron distintas dosis de N y S fraccionadas a la siembra e inicio de elongación (C1). Durante el desarrollo del cultivo se realizaron 3 determinaciones de biomasa y contenido de N y S: en el estadio fenológico C1, plena floración (F2) y cosecha. Se evaluó el rendimiento en grano y materia grasa, además se estimaron los componentes numéricos del rendimiento. También se calcularon las eficiencias de uso para los nutrientes evaluados y la eficiencia de uso del fertilizante. Al evaluar los componentes numéricos del rendimiento se pudo observar que el número de granos m^{-2} es el componente que mejor explica el rendimiento, presentando la mayor variación frente a cambios en la disponibilidad de N y S, mientras que el peso de grano y el número de granos por silicua se mantuvieron estables ante cambios en el rendimiento. A su vez, el índice de cosecha y el % de materia grasa también se mantuvieron estables para los distintos tratamientos. La eficiencia agronómica (EAUN) mostró una relación negativa con el nivel de nitrógeno agregado, teniendo un valor mínimo de 20 kg grano por kg N agregado ha^{-1} . Con las dosis agregadas para los diferentes tratamientos de N a siembra no fue posible obtener un índice nutricional nitrogenado no limitante, lo que dificultó la validación del modelo propuesto.

Palabras clave: *Brassica carinata*; Nitrógeno; Azufre; Rendimiento; C1.

7. SUMMARY

The cultivation of *Brassica carinata* is commercially available in Uruguay since the 2015 harvest. In the 2017/2018 harvest, 7,000 hectares were planted, being the country with the largest planted area in the world. It is a valuable alternative to traditional winter crops such as wheat and barley, however productive and / or commercial knowledge is needed to establish the crop and increase the area. The objective of this work was to evaluate the N and S response in *Brassica carinata* and to know if the nitrogen and sulfur nutrition indices generated for *Brassica napus*, predict the response to fertilization in this crop at the beginning of elongation for this, two trials were installed during the winter of 2017, one in the commercial property "Las Cumbres" located in the department of Paysandú, and the second in the establishment "La Carolina" located on the border between the department of Paysandú and Río Negro. Different doses of N and S were applied fractionated into the seeding and start of elongation (C1). During the development of the crop 3 determinations of biomass and content of N and S were made: in the phenological stage C1, full flowering (F2) and harvest. The yield in grain and fat was evaluated, in addition the numerical components of the yield were estimated. The use efficiencies for the nutrients evaluated and the efficiency of fertilizer use were also calculated. When evaluating the numerical components of the yield it was observed that the number of grains m^{-2} is the component that best explains the yield, presenting the greatest variation against changes in the availability of N and S, while the grain weight and the number of grains per pod remained stable between different yields. In turn, the harvest index and the oil % were also stable for the different treatments. Agronomic efficiency (EAUN) showed a negative relationship with the level of nitrogen added, with a minimum value of 20 kg grain per kg N added ha^{-1} . With the added doses for the different treatments of N to seeding, it was not possible to obtain a non-limiting nitrogenous nutritional index, which made it difficult to validate the model proposed.

Keywords: *Brassica carinata*; Nitrogen; Sulfur; Yield; C1.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Adrover, J.; Ferreira, M. 2012. Respuesta a la fertilización nitrogenada en elongación según nivel nutricional en el cultivo de canola (*Brassica napus*). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 79 p.
2. Agosti, M. B. 2011 Fertilización nitrógeno- azufrada y variabilidad genotípica en el rendimiento y la calidad de grano en colza-canola (*Brassica napus L.*) Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. 148 p.
3. Aguirre, M.; Uriarte, I. 2010. Respuesta del cultivo de colza-canola (*Brassica napus*) a las condiciones físico-químicas del suelo a nivel de chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 69 p.
4. Allen, E. J.; Morgan, D. J. 1972. A quantitative analysis of the effects of nitrogen on the growth, development and yield of oilseed rape. *Journal Agricultural Science (Cambridge)*. 78: 315-324.
5. Almond, J. A.; Dawkins, T. C. K.; Askew, M. F. 1986. Aspects of crop husbandry. In: Scarisbrick, D. H.; Daniels, R. W. eds. *Oilseed rape*. London, Collins. pp. 127-176.
6. Altaf Ahmad, I. K.; Abdin, M. Z. 2000. Effect of sulfur fertilization on oil accumulation, acetyl-CoA concentration, and acetyl-CoA carboxylase activity in the developing seed of rapeseed (*Brassica campestris L.*). *Australian Journal of Agriculture Research*. 51: 1023-1029.
7. Alves, D. 2000. Colza-canola; una nueva alternativa de invierno. (en línea). *Revista del Plan Agropecuario*. no. 90: s.p. Consultado 6 mar. 2018. Disponible en https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R90/R90_51.htm
8. _____. 2015. La colza se siembra en zonas que son aptas para el trigo. (en línea). *Todoelcampo.com*. s.p. Consultado 10 abr. 2018. Disponible en <http://www.todoelcampo.com.uy/espanol/la-colza-se-siembra-en-zonas-que-tambien-son-aptas-para-el-trigo-15?nid=16421>

9. Andrade, F. H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*. 41: 1-12.
10. Asare, E.; Scarisbrick, D. H. 1995. Rate of nitrogen and sulphur fertilizers on yield, yield components and seed quality of oilseed rape (*Brassica napus L.*). *Field Crops Research*. 44(1): 41-46.
11. Barbieri, P. A.; Sainz Rozas, H. Echeverría, H. E. 2008. Time of nitrogen application affects nitrogen use efficiency of wheat in the humid pampas of Argentina. *Canadian Journal Plant Science*. 88(5): 849-857.
12. Boaretto, A. E.; Muraoka, T.; Trevelin, P. 2008. Uso eficiente de nitrógeno nos fertilizantes convencionales. *Informaciones Agronómicas*. no. 68: 13-14.
13. Brennan R. F.; Bolland, M. D. 2008. Significant nitrogen by sulfur interactions occurred for canola grain production and oil concentration in grain on sandy soils in the Mediterranean-type climate of southwestern. *Australian Journal of Plant Nutrition*. 31(7): 1174-1187.
14. Burzaco, J. P.; Ciampitti, I.; García, F. 2009. Mejores prácticas de manejo para la nutrición del cultivo de colza-canola; una revisión. *Información Agronómica del Cono Sur*. no. 42: 1-8.
15. Cabalceta, G. 2010. Análisis de suelo y su interpretación. In: Murillo, A. U.; Llobet, J. A.; Serra, A. B.; Martín, A. E. eds. *Tecnología de suelos: estudio de casos*. Zaragoza, Universitat de Lleida. pp. 358-383.
16. Cassman, K. G.; Dobermann A.; Waltetrs, D. T. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*. 31(2): 132-140.
17. Castro, M. 2018. ¿Puede *Brassica carinata*, una nueva oleaginosa de invierno, contribuir a la diversificación del sistema agrícola?. (en línea). In: Encuentro Nacional de la Mesa de Tecnología de Oleaginosos (7º., 2018, Montevideo). *Oleaginosos de invierno*. Montevideo, INIA. s.p. Consultado 30 oct. 2018. Disponible en

http://7moencuentro.mto.org.uy/wp-content/uploads/2018/08/Presentaci%C3%B3n-Marina-Castro_15.08.2018.pdf

18. Cheema, M. A.; Malik, M. A.; Hussain A.; Shah, S. H.; Basra, S. M. A. 2001. Effects of Time and Rate of Nitrogen and Phosphorus Application on the Growth and the Seed and Oil Yields of Canola (*Brassica napus L.*). Journal of Agronomy and Crop Science. 186: 103-110.
19. Colnenne, C.; Meynard, J. M.; Reau, R.; Justes, E.; Merrien, E. 1998. Determination of critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. Annals of Botany. 81: 311-317.
20. Connor, D. J.; Sadras, V. O. 1992. Physiology of yield expression in sunflower. Field Crops Research. 30: 333-389.
21. De Caram, G.; Angeloni, P.; Prause, J. 2007. Determinación de la curva de dilución de nitrógeno en diferentes fases fenológicas del girasol. Agricultura Técnica. 67(2): 189-195.
22. Ernst, O.; Siri Prieto, G. 2011. La agricultura en Uruguay: su trayectoria y consecuencias. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (2º., 2011, Paysandú). No se llega, si no se sabe a dónde ir. El abordaje necesario para el proceso de expansión agrícola madure en Uruguay. Paysandú, Facultad de Agronomía. pp. 149-163.
23. Ferraris, G.; Salvagiotti, F.; Prystupa, P.; Gutiérrez Boem, F. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. In: Congreso de la Ciencia del Suelo (19º., 2004, Paraná Entre Ríos, Argentina). Trabajos presentados. Informaciones Agronómicas. no. 23: s.p.
24. Ferreira, G.; Ernst, O. 2014. Diagnóstico del estado nutricional del cultivo de colza (*Brassica napus*) en base a curvas de dilución de nitrógeno y azufre. Agrociencia (Uruguay). 18(1): 75-85.
25. Fismes, J.; Vong, P. C.; Guckert, A.; Frossard, E. 2000. Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus L.*) grown on a calcareous soil. European Journal of Agronomy. 12: 127-141.

26. García, F. 1996. El nitrógeno en ecosistemas agrícolas. INTA. Boletín técnico no. 140: 1-11.
27. Geisler, G.; Stoy, A. 1987. Untersuchungen zum Einfluß der Bestandesdichte auf das Ertragspotential von Rapspflanzen (*Brassica napus L.*). Journal of Agronomy and Crop Science. 159: 232-240.
28. Gesch, R. W.; Isbell, T. A.; Oblathb, E. A.; Allenc, B. L.; Archer, D. W.; Browne, J.; Hatfield, L. J.; Jabroc, D.; Kiniryg, J. R.; Long, D. S.; Vigil M. F. 2015. Comparison of several Brassica species in the north central U.S. for potential jet fuel feedstock. (en línea). Industrial Crops and Products. no. 75: 2-7. Consultado 15 jul. 2018. Disponible en https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/30980500/Comparison_of_several_Brassica_species.pdf
29. González Montaner, J.; Di Napoli, M. 2009. Manejo de la fertilización en cultivos de cosecha fina en el contexto actual de relaciones de precios y situación financiera de las empresas en la zona Mar y Sierras. In: Simposio de Fertilidad 2009 (2009, Rosario). Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. Rosario, Santa Fe, Argentina, Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 35-48.
30. Grant, C. A.; Bailey, L. D. 1993. Fertility management in canola production. Canadian Journal of Plant Science. 73: 651-670.
31. Hocking, P. J.; Randall, P. J.; Demarco, D. 1997. The response of dryland canola to nitrogen fertilizer: partitioning and mobilization of dry matter and nitrogen, and nitrogen effects. Field Crops Research. 54: 201-220.
32. Hoffman, E.; Fassana, N.; Perdomo, C. 2017. Manejo de nitrógeno en cereales de invierno ¿agregando más nos estamos quedando cortos? In: Simposio Nacional de Agricultura (3º., 2017, Paysandú). No se llega, si no se sabe a dónde ir. Pensar en las causas y no solo medir las consecuencias. Paysandú, Facultad de Agronomía. pp. 30-52.
33. Iriarte, L. B. 2002. Colza: cultivares, fecha de siembra, fertilización. Tres Arroyos, INTA. Chacra Experimental Integrada Barrow. 4 p.

34. Janzen, H. H.; Bettany, J. R. 1984. Sulfur nutrition of rapeseed II: Effect of time of sulfur application. *Soil Science Society of America Journal*. 48: 107-112.
35. Kukkonen, P. 2017. UPM apuesta al biocombustible: estudian el cultivo de Carinata en Uruguay. (en línea). *Todoelcampo.com s.p.* Consultado 10 abr. 2018. Disponible en <http://www.todoelcampo.com.uy/upm-apuesta-al-biocombustible-estudian-el-cultivo-de-carinata-en-uruguay-15?nid=29615>
36. López Berocay, S.; Verocai Britos, M. L. 2016. Ajuste de la fertilización nitrogenada y azufrada en relación a los indicadores objetivos de suelo y/o planta. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 87 p.
37. Malagoli, P.; Laine, P.; Rossato, L.; Ourry, A. 2005. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus*) from stem extension to harvest. *Annals of Botany*. 95: 853-861.
38. Malhi, S.; Gan, Y.; Raney, J. 2007. Yield, seed quality, and sulfur uptake of brassica oilseed crops in response to sulfur fertilization. *Agronomy Journal*. 99: 570-577.
39. Mancassola, V.; Casanova, O. 2010. Balance de nutrientes de los principales productos agropecuarios de Uruguay para los años 1990, 2000 y 2010. (en línea). IAH. no. 17:2-13. Consultado 10 abr. 2018. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/56C1A08E690484C785257EAB006DBC57/\\$FILE/Art%201.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/56C1A08E690484C785257EAB006DBC57/$FILE/Art%201.pdf)
40. Martino, D. L.; Ponce De León, F. 1999. Canola: una alternativa promisoriosa. Montevideo, INIA. 98 p. (Serie Técnica no. 105).
41. Maynard, D. G.; Stewart, J. W.; Bettany, J. R. 1983. Use of plant analysis to predict sulfur deficiency in rapeseed (*Brassica napus* and *Brassica campestris*). *Canadian Journal of Soil Science*. 63: 387-396.
42. Mazzilli, S.; Hoffman, E. 2010. Respuesta a la fertilización con azufre en el cultivo de colza-canola en suelos del litoral norte de Uruguay. (en línea). *Información Agronómica del Cono Sur*. no 46:18-21. Consultado 10 feb. 2018. Disponible en

[http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/09445A3EDC3625198525798400580E81/\\$FILE/18.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/09445A3EDC3625198525798400580E81/$FILE/18.pdf)

43. _____.; Ernst, O.; Sastre, A.; Terra, G. 2015. Disponibilidad de nitratos en sistemas agrícolas sin laboreo y su relación con variables ambientales y de manejo. *Agrociencia* (Uruguay). 19(1):131-139.
44. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2018. Anuario estadístico agropecuario. Montevideo. 74 p.
45. Miller, P. R.; Angadi, S. V.; Androsoff, G. L.; Mcconkey, B. G.; Mcdonald, C. L.; Brandt, S. A.; Cutforth, H. W.; Entz, M. H.; Volkmar, K. M. 2003. Comparing Brassica oilseed crop productivity under contrasting N fertility regimes in the semiarid northern Great Plains. *Canadian Journal of Plant Science*. 83(3): 489-497.
46. Mingeau, M. 1974. Comportement du colza e printemps a la sécheresse. *Informations Techniques*. 36:1-11.
47. Murphy, G. M.; Pascale, N.C. 1989. Agroclimatología de la colza de primavera (*Brassica napus* L. ssp oleifera (Metz) Sinsk F. annua) y su posible difusión en la Argentina. Facultad de Agronomía (Universidad de Buenos Aires). *Revista de la Facultad de Agronomía*. 10(3): 159-176.
48. Orlovius, K. 2003. Oilseed rape. In: Kirbky, E. A. ed. *Fertilizing for High Yield and Quality*. Kassel, Germany, International Potash Institute. pp. 45-55.
49. Peltonen-Sainio, P.; Jauhiainen, L. 2008. Association of growth dynamics, yield components and seed quality in long-term trials covering rapeseed cultivation history at high latitudes. *Field Crops Research*. 108: 101-108.
50. Perdomo, C. H.; Barbazán, M.; Durán Monzoni, J. M. 2008. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
51. Pérez Arrarte, C.; Bacchetta, L. V. 2018. El nuevo cultivo exclusivo que planea traer UPM a Uruguay.(en línea). Montevideo, Sudestada.com. s.p. Consultado 4 oct. 2018. Disponible en

https://www.sudestada.com.uy/articleId_ce199434-246d-4aaf-be8e-888d7ec80513/10893/Detalle-de-Noticia

52. Pinkerton, A. 1995. Critical sulfur concentrations in oilseed rape (*Brassica napus*) in relation to nitrogen supply and to planta age. Australian Journal of Experimental Agriculture. 38: 511-522.
53. Planchon Guigou, M.; Figares Espósito, H. J. 2004. Fertilización en colza-canola (*Brassica napus L.*). Fenología y época de siembra en cultivares de b. Napus, b. Rapa y b. Juncea. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 179 p.
54. Pouzet, A. 1995. Agronomy. In: Kimberr, D.; Mc. Gregor, D. I. eds. Brassica oilseeds, production and utilization. Wallingford, UK, CAB international. pp. 44-79.
55. Pozzolo, O.; Ferrari, H.; Curró, C. 2008. Colza canola implantación. (en línea). Concepción del Uruguay, s.e. s.p. Consultado 10 abr. 2018. Disponible en <http://www.agritotal.com/0/vnc/nota.vnc?id=1535>
56. Quincke, A.; Sawchik, J.; Morón, A. 2010. Siembra directa y rotación con pasturas: efectos sobre el carbono orgánico, nitrógeno total y potencial de mineralización de nitrógeno en suelo agrícola del SW de Uruguay. In: Seminario Dinámica de las Propiedades del Suelo bajo Diferentes Usos (2010, Colonia). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 60-90.
57. Rathke, G. W.; Christen, O.; Diepenbrock, W. 2005. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus L.*) grown in different crop rotations. Field Crops Research. 94: 103-113.
58. Réussi, N.; Echeverria, H.; Rozas, H. 2012. Stability of foliar nitrogen: sulfur ratio in spring red wheat and sulfur dilution curve. Journal of Plant Nutrition. 35(7): 990-1003.
59. Rondanini, D. P.; Gomez, N. V.; Agosti, M. B.; Miralles, D. J. 2012. Global trends of rapeseed grain yield stability and rapessed-to-wheat yield ratio in the last four decades. European Journal of Agronomy. 37: 56-65.

60. Rubio, G.; Scheiner, J. D.; Taboada, M. A.; Lavado, R. S. 2007. Distribución de nitrógeno, fósforo y azufre en un cultivo de colza: efectos sobre el ciclado de nutrientes. *Ciencia del Suelo*. 25 (2): 189-194.
61. Sarandón, S. J. A.; Chamorro, R.; Bezus; Gianibelli, M. C. 1993. Respuesta de la colza (*Brassica napus L* var. oleífera) a la fertilización nitrogenada. Efecto sobre la producción de biomasa, rendimiento de semilla y sus componentes. *Revista de la Facultad de Agronomía (La Plata)*. 69: 63-67.
62. Sastre, A.; Terra, G. 2014. Estudio de la relación entre el contenido de nitratos en el estrato de 0-20 cm y 20-40 cm, para distintos suelos y condiciones climáticas. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 64 p.
63. Scott, R. K.; Ogunremi, E. A.; Irvins J. D.; Mendham, N. J. 1973. The effect of fertilizers and harvest date by growth and yield of oilseed rape sown in autumn and spring. *Journal Agricultural Science (Cambridge)*. 81: 287-293.
64. Seepaul, R.; Bliss, C. M.; Wright, D. L.; Marois, J. J.; Leon, R.; Dufault, N.; George, S.; Olson, S. M. 2016. Carinata, the Jet Fuel Cover Crop: 2016 Production Recommendations for the Southeastern United States. (en línea). Gainesville, FL, University of Florida. IFAS. s.p. Consultado 10 abr. 2018. Disponible en <http://edis.ifas.ufl.edu/aq389>
65. Si, P.; Walton, G. H. 2004. Determinants of oil concentration and seed yield in canola and Indian mustard in the rainfall areas of western Australia. *Australian Journal of Agriculture Research*. 55: 367-377.
66. Siaudinis, G.; Butkutė, B. 2013. Responses of spring oilseed rape seed yield and quality to nitrogen and sulfur fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 44: 145-157.
67. Siri, G. 2009. Manejo del suelo y rotación con pasturas: efecto sobre rendimiento de los cultivos, su variabilidad y el uso de insumos. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1º., 2009, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Facultad de Agronomía. pp. 125-140.

68. Tamagno, L. N.; Chamorro, A. M.; Sarandon, S. J. 1999. Aplicación fraccionada de nitrógeno en colza (*Brassica napus* L. spp oleifera forma annua): efectos sobre el rendimiento y la calidad de la semilla. (en línea). Revista de la Facultad de Agronomía (La Plata). 104 (1): 25-32. Consultado 20 jun. 2018. Disponible en http://www.inta.gov.ar/paranainfobibliotecapublicacionesActTecActTec_N001_15.pdf
69. Thomas, P. 1995. Canola growers manual. (en línea). Manitoba, Canada, Canola Council of Canada. s.p. Consultado 24 abr. 2018. Disponible en <http://www.canolacouncil.org/crop-production/canola-grower's-manual-contents>
70. Zamalvide, J. P.; Otegui, O. 1995. Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). Boletín de Investigaciones no. 43. 32 p.
71. Zamora, M.; Massigoge, J. 2008. Fertilización de colza: respuesta a la aplicación de N y S en el centro sur bonaerense. In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (21°. 2008, San Luis). Trabajos presentados. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina, INTA. pp. 35-61.
72. Zhao, F. J.; Evans, E. J.; Bilsborrow, P. E.; Syers, J. K. 1992. Sulphur uptake and distribution in double and single low varieties of oilseed rape (*Brassica napus* L.). Newcastle, UK, The University Newcastle upon Tyne. Faculty of Agriculture and Biological Sciences. pp. 69-76.
73. Zhou, W.; Zhao, D.; Lin, X. 1997. Effects of waterlogging on nitrogen accumulation and alleviation of waterlogging damage by application of nitrogen fertilizer and mixtalol in winter rape (*Brassica napus* L). Journal of Plant Growth Regulation. 16(1): 47-53.