

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DINÁMICA DE APORTE DE N Y S DE DISTINTAS FUENTES DE
FERTILIZANTES DISPONIBLES ACTUALMENTE EN URUGUAY**

por

**José Ignacio DALL'ORSO GARCÍA
Enzo Alberto FERNÁNDEZ LONG
Pedro Agustín URÍA MACHADO**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2016**

Tesis aprobada por:

Director:

.....
Ing. Agr. Esteban Hoffman

.....
Ing. Agr. Nicolás Fassana

.....
Ing. Agr. Carlos Perdomo

Fecha: 14 de diciembre de 2016

Autores:

.....
José Ignacio Dall' Orso García

.....
Enzo Alberto Fernández Long

.....
Pedro Agustín Uría Machado

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer en primer lugar a nuestras familias por el apoyo incondicional prestado durante todo el desarrollo de este trabajo, especialmente a la familia Dall'Orso por habernos abierto las puertas de su hogar y brindarnos todas las comodidades para trabajar.

También queremos agradecer al Ing. Agr. Esteban Hoffman, tutor de esta tesis, por la confianza depositada en nosotros y la dedicación prestada a este trabajo, así como a todo su equipo, quienes ayudaron a efectuar un correcto desarrollo de la etapa de campo, pero especialmente al Ing. Agr. Nicolás Fassana, quien durante todo el desarrollo de esta tesis estuvo presente y a disposición para lo que necesitáramos.

Tampoco podemos dejar de agradecer a la Ing. Agr. Mónica Cadenazzi por el tiempo dedicado y su aporte para la correcta elaboración de la parte estadística de esta tesis, al Ing. Agr. Carlos Perdomo por su valiosa colaboración en la culminación de este trabajo, así como también a la Lic. Sully Toledo por su disposición y tiempo dedicado.

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>	3
2.1 CICLO Y DINÁMICA DEL NITRÓGENO	3
2.2 RESPUESTA VEGETAL AL AGREGADO DE NITRÓGENO.....	3
2.3 CICLO Y DINÁMICA DEL AZUFRE.....	5
2.4 RESPUESTA VEGETAL AL AGREGADO DE AZUFRE	6
2.5 DINÁMICA DE ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE.....	7
2.6 EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO Y EL EFECTO DEL AZUFRE	8
2.7 FUENTES DE NITRÓGENO Y AZUFRE.....	12
2.7.1 <u>Comportamiento en el suelo</u>	12
2.7.2 <u>Respuesta vegetal a las distintas fuentes</u>	14
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	16
3.1 UBICACIÓN.....	16
3.2 TRATAMIENTOS.....	16
3.2.1 <u>Descripción de las fuentes</u>	17
3.3 DISEÑO Y MODELO ESTADÍSTICO	18
3.4 MANEJO DEL CULTIVO	19
3.5 DETERMINACIONES DURANTE EL CULTIVO.....	20
3.6 DETERMINACIONES POST COSECHA	21
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	22
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO.....	22
4.2 VARIACIÓN DEL RENDIMIENTO EN GRANO Y	

SUS COMPONENTES	24
4.3 CRECIMIENTO Y ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE.....	30
4.3.1 <u>Crecimiento del cultivo</u>	30
4.3.2 <u>Dinámica de la absorción de nitrógeno</u>	34
4.3.3 <u>Dinámica de absorción de azufre</u>	39
4.4 INFLUENCIA DEL AZUFRE EN LA EFICIENCIA DEL USO DEL NITRÓGENO.....	42
4.5 EFECTO DE LAS FUENTES EN LA DINÁMICA DE LA ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE.....	45
4.5.1 <u>Curvas de absorción de nitrógeno y azufre para las distintas fuentes evaluadas</u>	48
4.5.2 <u>Efecto de las fuentes en la EUN y sus componentes</u>	53
4.5.3 <u>Efecto de las fuentes en la RAN</u>	55
5. <u>CONCLUSIONES</u>	58
6. <u>RESUMEN</u>	60
7. <u>SUMMARY</u>	62
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	63
9. <u>ANEXOS</u>	63

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Descripción y composición de las fuentes de fertilizantes y dosis de N y S aplicados a Z 22.....	17
2. Descripción de grupos de tratamientos para análisis en bloques completos al azar	19
3. Análisis de la varianza del rendimiento para los tratamientos agrupados según el agregado de N y S a Z 22 y N a Z 30 y separación de medias	27
4. Componentes del rendimiento, índice de cosecha y biomasa según el agregado de N y S a Z 22 y Z 30.....	29
5. Eficiencia de uso, eficiencia fisiológica, recuperación de nitrógeno según el agregado de N y S a Z 22 y Z 30.	43
6. Biomasa a cosecha, índice de cosecha y rendimiento en grano en función de las fuentes utilizadas a Z 22, para el promedio de N agregado Z 30.....	47
7. Análisis de la varianza del N absorbido a Z 65 en función de la fuente, el agregado de N a Z 30 y la interacción entre ellas.	47
8. Biomasa, concentración y kg ha^{-1} de N a Z 65 en función de las fuentes utilizadas a Z 22, para el promedio de N agregado a Z 30....	48
9. Análisis de la varianza del S absorbido a Z 65 en función de la fuente, el agregado de N a Z 30 y la interacción entre ellas.	51
10. EUN, RAN y EFN para las distintas fuentes aplicadas a Z 22.	53

Figura No.

1. Precipitaciones y temperatura media mensual para el año 2014 y promedio histórico de 30 años para Paysandú durante el ciclo de crecimiento del cultivo.....	22
2. Precipitación decádicas durante el ciclo del cultivo y temperatura para el año 2014 y media histórica de 30 años para Paysandú.	23
3. Rendimiento e índice de cosecha en función de la biomasa a cosecha (a), rendimiento, *rendimiento estimado (con peso de grano cte. de 34 mg) y peso de grano en función del número de granos por metro cuadrado (b).....	25
4. Granos m ⁻² en función de las espigas m ⁻² (a) y espigas m ⁻² en función de los granos espiga ⁻¹ (b).	25
5. Rendimiento de los tratamientos agrupados en función del agregado de N y S a Z 22 y Z 30.	27
6. Rendimiento en grano en función de la tasa de crecimiento de Z 30 a Z 65 (a), rendimiento en función de la tasa de crecimiento entre Z 65 y cosecha (b), tasa de crecimiento de Z 65 a cosecha en función de la tasa de crecimiento de Z 30 a Z 65 (c) y rendimiento en función de la tasa de crecimiento entre Z 30 y cosecha (d).	31
7. Producción de biomasa acumulada a lo largo del ciclo del cultivo, agrupado en función del agregado de N y S y principales variables medidas a Z 30.....	32
8. Acumulación de N entre Z 30 y Z 65 en función de la acumulación de biomasa en el mismo periodo (a), y tasa de acumulación de N entre Z 30 y Z 65 en función de la tasa de acumulación de biomasa en el mismo periodo según el agregado de N y S a Z 22 y N a Z 30(b).	34

9. Rendimiento en grano en función del N absorbido a Z 65 (a), y rendimiento en grano en función del N absorbido a cosecha (b).....	35
10. Absorción de N acumulada a lo largo del cultivo, tasa de crecimiento y tasa de absorción de N entre Z 30 y Z 65, agrupado en función de N y S agregados a Z 22 y Z 30.....	37
11. N total a cosecha en función de la cantidad de N absorbido a Z 65 (a) y relación entre la cantidad de N absorbido a Z 65 y la variación posterior a este estadio (b).	38
12. S absorbido a Z 65 en función del N absorbido a Z 65 agrupados según el agregado de N y S (a), y S absorbido a cosecha en función del N absorbido a cosecha según el agregado de N y S (b).....	40
13. Absorción de S, tasas de acumulación y crecimiento en el cultivo según el agregado de N y S a Z 22 y N a Z 30.....	41
14. S absorbido a cosecha en función de lo absorbido a Z 65 (a) y relación entre el S absorbido a Z 65 y la variación de S posterior a este estadio (b).	42
15. Absorción de nitrógeno a Z 65 según el agregado adicional de N y S a Z 22 y N a Z 30 según origen del N, tomando como referencia de base los 121 kg de N aportados por el suelo cuando el cultivo no fue fertilizado post siembra.	45
16. Absorción de N a Z 65 de las distintas fuentes evaluadas, con y sin agregado de N a Z 30.	49
17. Acumulación de N a lo largo del ciclo del cultivo según fuente, en promedio (a), sin el agregado de N a Z 30 (b) y con N a Z 30 (c).	50
18. Acumulación de S a lo largo del ciclo del cultivo según fuente, sin el agregado de N a Z 30 (a) y con N a Z 30 (b).....	52

19. Nitrógeno absorbido por sobre el testigo, según el momento, con y sin agregado de S a Z 22 (a), nitrógeno absorbido por sobre el testigo según el momento, para las distintas fuentes (b). 56

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de trigo (*Triticum aestivum*), es el principal cultivo de invierno sembrado en el país, ocupando un área de 400.000 ha en el año 2014, aunque sigue descendiendo el área de siembra (MGAP. DIEA, 2015). En la primera década del 2000 entre otros grandes cambios, se registró un proceso de intensificación del uso de la tierra en el Uruguay, incrementándose la proporción de doble cultivo de cereales de invierno-soja de 2ª, con predominio de la secuencia trigo-soja (Hoffman et al., 2014b). En la segunda década del siglo XXI con un sistema agrícola que no rota con pasturas por casi 10 años, se hace evidente el estancamiento de la productividad de los cereales de invierno, en parte explicado por el desajuste en las necesidades de nitrógeno (N, Hoffman y Perdomo 2011, Hoffman et al. 2013, Hoffman et al. 2015b). Las crecientes necesidades de este nutriente, no son acompañadas por el agregado de N a nivel de producción, aunque se registra un aumento en la dosis total de N (Ernst 2014, Hoffman et al. 2014b, Mazzilli, citado por Hoffman et al. 2015b). El incremento en la demanda de N de los nuevos cultivares en uso a nivel productivo (Hoffman et al., 2014b) y la caída en la oferta por parte del suelo (Hoffman et al., 2013), son la base del incremento de las necesidades de N.

Concomitantemente, el uso continuado de fuentes fosforadas con nula concentración de azufre (S), mayor extracción por incremento en la intensidad agrícola y productividad de los cultivos, y reducción del ingreso por lluvia (Schnug, de Ruiten y Martin, Scherer, citados por Ercoli et al., 2012), también han llevado a que la disminución de la oferta de N, sea acompañada por una caída en la oferta de S.

Lo anteriormente descrito provoca el aumento del gasto en fertilizantes, llevando a que se transforme en el principal componente del costo de los cereales de invierno, cobrando relevancia el uso eficiente de este tipo de insumos (Hoffman et al., 2015b).

La eficiencia de uso de N tanto como del S, y los componentes que la determinan, cobran importancia creciente en la medida que incrementamos las dosis de nutrientes. El riesgo de pérdidas y el potencial contaminante de estos nutrientes, en este escenario es mayor. El diagnóstico preciso, la tecnología relacionada con la fertilización, así como las fuentes empleadas para corregir la deficiencia pasan a tener un papel destacado. Según Bruulsema et al. (2013), para una correcta fertilización se debe tener en cuenta cuatro requisitos básicos: la dosis, el momento, el lugar y la fuente (4 R).

En la actualidad en el mercado hay una variada oferta de distintas fuentes de N-S, con aparentes grandes diferencias. Las mismas combinan distinta relación N-S, líquidas, sólidas, con distinta velocidad en la oferta tanto

de N como de S, algunas de ellas con marcadas diferencia en la solubilidad de estos dos nutrientes.

La escasa información contemporánea acerca de la dinámica en suelo del N y S de las distintas fuentes, el cambio en la medida que las condiciones ambientales difieren, en un escenario de alta demanda; la eficiencia de uso puede estar severamente condicionada si no se sincroniza la oferta con la demanda.

Por lo tanto, se plantea como hipótesis que la diferencia en la relación N-S, así como la formulación y el tipo de fuente de fertilizante, condiciona la cantidad, velocidad y relación de N y S absorbida por un cultivo de trigo a nivel de campo.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar distintas fuentes nitrógeno-azufradas disponibles en el mercado.

Por su parte, como objetivos específicos, se busca caracterizar distintas fuentes de fertilizantes nitrógeno azufrados a través de las curvas de absorción en el cultivo de trigo, estudiar la relación entre las distintas curvas de absorción de N y S, sobre la producción de biomasa y rendimiento en grano, así como también, cuantificar la eficiencia de uso de N y S, y las variaciones en los componentes que la determinan para las distintas fuentes.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para poder tener un correcto entendimiento acerca del funcionamiento de distintas fuentes de N y S, debemos disponer de información de cómo se da la absorción de los nutrientes en el tiempo y cómo repercuten en la respuesta y en la eficiencia de uso.

2.1 CICLO Y DINÁMICA DEL NITRÓGENO

Las plantas superiores utilizan el N_2 gas como producto final, aunque este se encuentre en la atmósfera en un 78% aproximadamente, debe ser tomado por las raíces, las cuales son capaces de utilizar solo el nitrógeno inorgánico que se encuentra en formas de: nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y nitrito (NO_2^-), siendo las primeras las formas más comunes. Para esto el N_2 debe llegar al suelo a través de la fijación biológica, el agregado de fertilizantes sintéticos o en menor medida la lluvia (Tisdale et al., 1993).

En el suelo, este nutriente se encuentra mayormente de forma orgánica, cercano a un 98%, esto hace que su dinámica esté regulada por procesos biológicos. Dentro de estos procesos se destacan la mineralización e inmovilización siendo esto el pasaje de nitrógeno orgánico a inorgánico y viceversa (Tisdale et al. 1993, Perdomo y Barbazán 1999c).

El amonio por ser un catión, se adsorbe a los coloides del suelo, lo que hace difícil su pérdida por lixiviación, opuesto a esto los aniones nitrato y nitrito son altamente susceptibles a perderse por esta vía, además estos pueden perderse por desnitrificación cuando el suelo se encuentra en condiciones de anaerobiosis por parte de microorganismos del suelo. Las pérdidas de $N-NH_4$ pueden darse por volatilización como amoníaco sobre todo cuando se encuentra en superficie (Tisdale et al., 1993).

2.2 RESPUESTA VEGETAL AL AGREGADO DE NITRÓGENO

La respuesta en términos absolutos es dependiente de la oferta de nitrógeno por parte del suelo, cuanto menor es el aporte que puede hacer el suelo, mayor es la respuesta al agregado (Perdomo y Bordolli 1999a, Hoffman et al. 2010, Hoffman et al. 2013).

En el Uruguay, para cultivos de invierno la respuesta ha sido ampliamente estudiada y la Facultad de Agronomía ha contribuido destacadamente al desarrollo de herramientas de diagnóstico o predicción de respuesta al N (Perdomo et al. 1999b, Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001, Hoffman et al. 2010).

La propuesta maneja tres momentos de diagnóstico, estos son: siembra, donde el indicador utilizado es $N-NO_3$ en suelo a los 20 cm, con un

nivel crítico (Nc) de 16-18 ppm; al estadio Zadoks Z 2.2 (Z 22, Zadoks et al., 1974) con un Nc de 14-15 ppm; y al estadio Zadoks Z 3.0 (Z 30, Zadoks et al., 1974) donde el indicador es la concentración de nitrógeno en planta, con un Nc que varía en función del potencial a concretar (Baethgen, 1992).

Para el primer momento de diagnóstico, el equivalente fertilizante a utilizar es dependiente de la capacidad de aporte del suelo pos siembra (grupo de respuesta) dentro del cual se encuentre la chacra, siendo de 3 kg de N por ppm por debajo del nivel crítico para grupo de baja respuesta esperable al N, hasta un máximo de 30 kg ($y=48-3x$), y 5 kg de N por ppm por debajo del nivel crítico para chacras donde es esperable una alta respuesta, con un máximo de 45 kg ($y=90-5x$). Para el segundo momento de diagnóstico el equivalente de fertilizante es de 6-7 kg de N por ppm por debajo del nivel crítico, encontrándose respuesta hasta 65-70 kg de N aplicados ($y=80-5,7x$), hasta mediados de la primera década del año 2000, topeado en 45-50 kg de N ha⁻¹, dado el riesgo de alta proteína en grano de entonces en cebada cervecera (Hoffman et al., 2001). Por último, para el tercer momento se reporta como necesario agregar 45 kg ha⁻¹ N por cada punto porcentual por debajo del crítico, hallándose hasta ese momento una respuesta lineal hasta los 60 kg ($y=185-45x$, Baethgen 1992, Perdomo et al. 1999c, Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001, Hoffman et al. 2010).

Hoffman y Perdomo (2011), validaron el modelo anteriormente mencionado, arribando a la conclusión de que este seguía siendo eficiente en predecir la respuesta esperada. A su vez mencionan que en chacras viejas hay respuesta por encima de los 45 kg de N ha⁻¹ para el segundo momento y que a Z 30 es esperable una respuesta lineal hasta agregados de 100 kg con una eficiencia similar, llegando a un plateau debido posiblemente a restricciones impuestas por otras limitantes.

Para este momento existe abundante información nacional y regional que indicaría que habría una disminución de oferta de N por parte del suelo en chacras con muchos años de agricultura continua (García Lamothe et al. 2009, Siri y Ernst 2009, Hoffman y Perdomo 2011, Quincke y Sawchick 2011, Sainz Rosas et al. 2011) y por otro lado existe una mayor demanda por parte de los nuevos materiales genéticos con mayores potenciales de rendimiento (Sinclair y Horie 1989, Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2014b).

Actualmente el modelo se podría estar quedando corto en el agregado de este nutriente, dado el aumento en la brecha entre la oferta y la demanda aún frente a mayores cantidades agregadas por los productores (Hoffman y Perdomo 2011, Centurión y Chinazzo 2012, Hoffman et al. 2013, Ernst 2014, Hoffman et al. 2014b, Mazzilli, citado por Hoffman et al. 2015b, Hoffman et al. 2015b). En este sentido Centurión y Chinazzo (2012), Hoffman et al. (2013),

encontraron respuestas al agregado de hasta un 50% más del recomendado por el modelo a Z 30.

2.3 CICLO Y DINÁMICA DEL AZUFRE

En Argentina Echeverría et al. (1996), encontraron que en sistemas bajo agricultura continua, el nitrógeno es el primer nutriente que aparece como deficiente en relación al azufre. Considerando la opinión de McGill y Cole, citados por Echeverría et al. (1996), en cuanto a que el azufre es más resistente a la mineralización que el nitrógeno, parece lógico que en una primera fase de la agricultura se oxide más rápido el N y consecuentemente se ingrese primero a una fase de deficiencia, que posteriormente le siga el S.

En el suelo, el azufre se encuentra en más de un 95% de forma orgánica. Esta particularidad hace que el ciclo de este nutriente se encuentre asociado a la dinámica de la materia orgánica y por tanto sea similar al ciclo del nitrógeno (Tisdale et al., 1993).

La dinámica del S en el suelo está dominada por los procesos de mineralización, inmovilización y oxidación. En la mineralización se pueden distinguir dos formas: una biológica la cual es similar a la del N y otra bioquímica. Esta última está asociada a la hidrólisis enzimática. La velocidad de aporte depende del "pool" de esteres sulfato del cual provenga, pudiendo ser de S-O (a corto plazo) y S-C (a largo plazo, Haneklaus et al., 2007).

En su mayoría el azufre es absorbido como sulfato, y los mecanismos que priman en cuanto a la dinámica de absorción radicular son el flujo de masa y/o difusión (Tisdale et al., 1993). Por su parte Haneklaus et al., citados por Torres Duggan (2011), afirman que el aporte gaseoso es poco significativo, esto se agudizó con el progreso tecnológico que ha disminuido la deposición atmosférica (Schnug, de Ruiten y Martin, Scherer, citados por Ercoli et al., 2012). Sin embargo, en algunas circunstancias la absorción por vía foliar puede alcanzar valores entre el 25 y el 30 % de los requerimientos (Echeverría, 2005). Según Tisdale et al. (1993), el ingreso de S al suelo por medio de las lluvias puede variar entre 1,1 kg y 112 kg ha⁻¹ según las cercanías a centros industriales.

El SO₄²⁻ en solución, varía su concentración desde 2 o menos mg de S por kg de suelo en regiones húmedas y subhúmedas, hasta 1000 mg de S kg⁻¹ en regiones áridas o semiáridas (Tabatabai, 2005). A su vez en el suelo el S se encuentra adsorbido en la fase sólida y formando parte de minerales (Tisdale et al., 1993). Para que las plantas puedan absorber el S que se encuentra en el suelo como azufre elemental y polisulfuro, este debe ser convertido a la forma sulfato. Este proceso también debe ocurrir cuando se agrega un fertilizante (Tisdale et al., 1993). El pasaje del azufre elemental a formas absorbibles por la

planta depende de la oxidación del mismo que está regulada por la microflora del suelo, la temperatura, la humedad, el pH y en caso de un fertilizante, del grado de finura del material aplicado (Tisdale et al., 1993).

Uno de los mecanismos de pérdidas de mayor relevancia es el lavado, y se encuentra muy asociado a las propiedades del suelo, ya que estas influyen directamente en la movilidad de agua dentro del mismo (Melgar y Gearhart, 2006). De la misma forma Haneklaus et al., citados por Torres Duggan (2011), afirman que las salidas del sistema por extracción de los cultivos y por escurrimiento también son muy importantes, no siendo de tanta relevancia las pérdidas gaseosas desde la superficie del suelo o desde las plantas.

2.4 RESPUESTA VEGETAL AL AGREGADO DE AZUFRE

El contexto actual, de larga historia agrícola, siembra directa (SD) y dominancia del cultivo de soja, ha determinado que la dinámica del N se vea modificada, logrando que una gran cantidad de chacras sean deficientes en el aporte de este nutriente (Siri y Ernst 2009, Hoffman y Perdomo 2011). Ineludiblemente, afecta también la dinámica del S volviéndose cada vez más frecuente e importante la respuesta al agregado de este nutriente (García y Salvagiotti 2009, Mazzilli y Hoffman 2010, Hoffman et al. 2013). A esto se le suma el uso de fertilizantes más concentrados y la disminución de emisiones ya mencionada (Hoffman y Ernst, 2008).

Los primeros trabajos en relación a la respuesta al S, daban cuenta hace una década, de ganancia de rendimiento asociadas a las dosis óptimas observadas en ensayos de respuesta relativamente bajas (entre 250 y 500 kg ha⁻¹, García Lamothe 2002, Salvagiotti et al. 2004, Zhao et al. 2005, Torres Duggan et al. 2006). Actualmente, en una recopilación de trabajos por parte de IPNI, Steinbach y Álvarez (2014), encontraron respuestas a este nutriente de mayor magnitud que las anteriores, llegando en algunos casos, hasta los 1620 kg.

A pesar de que existe evidencia de esta respuesta, persisten las dificultades para establecer un diagnóstico objetivo, en la medida que aún no se encuentra un indicador confiable que permita predecir aquellos sitios en lo que es posible esperar respuesta al agregado (Pagani y Echeverría, 2011).

Algunos autores señalan que además de provocar incrementos de rendimiento en grano, la fertilización azufrada mejora la calidad panadera del grano de trigo (Rendig, citado por Morón et al. 1996, Zhao et al. 1999). Sin embargo, existen otros trabajos que no son concluyentes en cuanto a los efectos sobre la calidad de grano (Reussi et al., 2006).

Al respecto, Castellarin et al. (2009), cuando se agregó azufre a un cultivo de trigo, observaron incrementos en biomasa después de antesis,

explicados por la acumulación de materia seca en la espiga. Resultados similares fueron hallados por Salvagiotti et al. (2009), Jamal et al. (2010), los cuales también encontraron aumentos en la producción de biomasa.

A pesar de que aún no se han podido desarrollar indicadores precisos para corregir las deficiencias de azufre, y tampoco existe una respuesta clara a este nutriente en rendimiento en grano, varios trabajos muestran cómo el azufre tiene efecto en la recuperación del nitrógeno, lo que en ocasiones puede llevar a mayores rendimientos como se verá más adelante (Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2013, Hoffman et al. 2015b).

2.5 DINÁMICA DE ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE

En esta situación de creciente demanda por parte de los cultivos y disminución de la capacidad de aporte de los suelos (Hoffman et al., 2013), se hace necesario comprender cómo se da la absorción de los nutrientes para mejorar la sincronización de la oferta y demanda y así mejorar la eficiencia de uso (García, 2004).

En este sentido, Perdomo y Barbazán (1999c) mencionan que la acumulación de N en las plantas describe una curva sigmoideal, donde al inicio la acumulación es escasa, luego ocurre una etapa de máxima absorción, que se corresponde con una etapa de activo crecimiento, para que finalmente se reduzca la misma. García Lamothe, citado por García (2004), señala que al principio del macollaje la tasa de absorción diaria puede llegar a estar entre 1,5 y 2 kg de N ha⁻¹, dándose las máximas durante el encañado, llegando a tasas que pueden ser de hasta 4 y 5 kg N ha⁻¹. Es importante destacar que las tasas de absorción y la duración de cada una de estas etapas definen la cantidad de N absorbido, dependiendo de factores tales como: fecha de siembra, variedad, capacidad de aporte del suelo, etc. (Perdomo y Bordolli 1999a, Hoffman et al. 2015b).

Cha y Durán (2001), encontraron que en trigo, la etapa más importante se ubica entre Z 30 y estadio Zadoks Z 4.7 (Z 47) siendo la absorción en este periodo de 90 kg N ha⁻¹. Dentro de este periodo aparece como de mayor relevancia la etapa entre estadio Zadoks Z 3.3 (Z 33) y Z 47, donde se absorbe más del 50 % del total del N absorbido durante el encañado.

Por otra parte, es importante destacar, que la curva de absorción de nitrógeno acompaña a la curva de acumulación de materia seca. Al compararlas, son similares, pero la de N la antecede (Perdomo y Barbazán, 1999c). Cha y Durán (2001), reportan para un conjunto de experimentos realizados en la región litoral W del Uruguay, hacia fines de la década del 90, que la absorción de N hasta Z 47, mantiene una relación de 33 kg de nitrógeno absorbido por cada 1000 kg de MS ha⁻¹ producida.

Por su parte, la absorción de S está muy vinculada a la asimilación de C y N, existiendo una coordinación entre la asimilación de S y N (Zhao et al., 1999). Dijkshoorn y Van Wijk, citados por De Bona et al. (2011), sugieren que la absorción y asimilación de estos nutrientes depende de la relación de ellos dentro de la planta. Sin embargo, hasta la etapa de antesis el cultivo de trigo absorbe entre un 50 y 60% del S que tendrá a madurez fisiológica (Monaghan et al. 1999, Zhao et al. 1999), mientras que llega acumular para el mismo periodo entre un 70 y 80 % del N (Pyare Lal y Sharma, citados por González y Trujillo 1995, García y Bernardo, citados por Reussi et al. 2012). Si nos enfocamos en la relación N/S en el correr del ciclo del cultivo, más específicamente desde el comienzo del macollaje hasta elongación, según Reussi et al. (2012), esta relación va disminuyendo, explicado por una baja dilución del S con respecto a la de N. Es así que Zhao et al. (1999), remarcan la importancia de que se mantenga un nivel adecuado de S durante todo el cultivo.

Por su parte Hoffman y Ernst, citados por Cha y Durán (2001), determinaban que el potencial se alcanzaba con 130 o 140 kg de N por ha⁻¹ absorbidos a espigazón, y que por lo tanto, mayores cantidades absorbidas conllevaban a una caída en la eficiencia de uso del N (EUN) e incrementos en la cantidad de N en grano (40 kg más absorbidos por aumentos del 1%), mientras que las cantidades de S requeridas por el trigo para un óptimo crecimiento podrían variar entre 15 y 20 kg ha⁻¹ para la época (Zhao et al., 1999). En el 2011 en la red de experimentos de manejo de N en trigo, Hoffman et al. (2015b), reportaron como crítico 110 kg de N absorbido a Z65 para alcanzar los potenciales de rendimiento en chacras comerciales (plateau=4740 kg de grano, Hoffman et al., 2015b).

2.6 EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO Y EL EFECTO DEL AZUFRE

En el escenario actual, donde son necesarios mayores agregados de N (Hoffman y Perdomo 2011, Centurión y Chinazzo 2012), donde se da un aumento en los costos de producción y una baja en los precios de los cereales, cobra una mayor relevancia el uso eficiente de los nutrientes, en especial el uso del nitrógeno, por su importancia relativa (Hoffman et al., 2015b). Numerosos trabajos muestran cómo aumentos en el agregado de N llevan a una disminución en la EUN así como también un aumento en el riesgo de contaminación, por lo tanto estaríamos en un escenario de retroalimentación negativa (Cassman et al. 2003, Dobermann 2007, Salvagiotti et al. 2009).

Reafirmando lo mencionado anteriormente, García Lamothe (1994), señala que la EUN está inversamente relacionada con las cantidades agregadas, no así el rendimiento y las cantidades absorbidas, las cuales en general aumentan con mayores agregados, llegando a un techo determinado por el rendimiento potencial genético-climático (Dobermann, 2007).

La EUN se puede descomponer en dos componentes principales, la eficiencia de absorción o recuperación aparente (RE o RAN), y la eficiencia de utilización o fisiológica (EFN, Huggins y Pan, 1993), siendo la EUN el producto de estas dos ($EUN = RAN \times EFN$).

En el Uruguay, siguiendo el modelo propuesto por la Facultad de Agronomía, para la fertilización nitrogenada en cebada y trigo, explicado anteriormente (Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001), se reportaba para fines de la década de los noventa, que la EUN a siembra y Z 22 sería de 20 kg de grano por cada kg de nitrógeno agregado o mayores. Las evaluaciones recientes, que comprobaron la vigencia del modelo, mostraron EUN igual o mayores a las antes mencionadas, del entorno a los 30 kg (Hoffman y Perdomo, 2011).

A Z 30 la EUN tiende a variar dependiendo del potencial de rendimiento, el ambiente y el estado nutricional del cultivo, entre 8 y 20 kg de grano por kg de N aplicado (Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001). Similares resultados fueron obtenidos a nivel internacional por Raun y Johnson (1999), Malakouti, citado por Malakouti et al. (2008), en los cuales mencionan que el promedio a nivel mundial es cercano a 20 kg de grano por kg de N. García y Salvagiotti (2009), por su parte encontraron en Argentina que la EUN variaba desde los 10 a los 25 kg kg⁻¹ en trigo, similares a los resultados publicados por Novoa y Loomis, así como por Cassman et al., citados por Dobermann (2007). Estos mismos autores mencionan que la eficiencia puede variar con el manejo de la fertilización y la oferta del suelo.

En los últimos años ha cobrado relevancia el estudio de la RAN por ser este el componente con mayor efecto en la variación de la EUN (Salvagiotti y Miralles 2008, Salvagiotti et al. 2009), por este motivo es importante mencionar los métodos de cálculo que aparecen en la bibliografía.

El aprovechamiento del nitrógeno aplicado como fertilizante, puede ser estimado en base a las técnicas isotópicas (isótopo N¹⁵), o al método de las diferencias en la absorción entre un testigo sin fertilizar y un tratamiento fertilizado (RAN, Terman y Brown, citados por Daniel et al., 1986).

Rao et al. (1992), mencionan que ambos métodos están sujetos a errores bajo diferentes condiciones. En este sentido el método isotópico puede llevar a subestimaciones debido a la sustitución de N marcado por N edáfico (¹⁵N por ¹⁴N) por parte de los microorganismos. El método por diferencia puede sobrestimar la recuperación debido a un efecto de interacción entre el suelo y el nitrógeno (ANI, de sus siglas en inglés added nitrogen interaction, Jenkinson et al., citados por Zagal et al., 2003). Este efecto es causado por dos fenómenos, siendo los mismos, el aumento de la mineralización del N causado por una estimulación de la flora microbiana (Jenkinson et al., Raun et al., citados por

López et al., 2001) y un aumento en crecimiento de las raíces que lleva a una mayor absorción (Aleksic et al., Monen Balba et al., Yoshida et al., citados por Daniel et al., 1986). Rao et al. (1992), destacan a su vez, que el efecto ANI puede acentuar la subestimación del método isotópico, remarcando que dicho efecto tiene mayores probabilidades de presentarse en suelos con altos contenidos de materia orgánica en descomposición, López et al. (2001), señalan la importancia de la humedad para que se dé este proceso.

La sobrestimación que ocurre con el método de diferencia puede llevar a valores superiores al 100% poniendo en evidencia el efecto ANI anteriormente mencionado, de esta forma Pilbeam et al., citados por López et al. (2001), obtuvieron valores de RAN mayores al 100%.

En cuanto a la RAN, Fixen et al. (2015), encontraron grandes variaciones asociadas a las regiones, cultivos, clima, suelo y manejo de la fertilización, de entre 40 y 65%. Estos mismos autores reportan una eficiencia de recuperación del N de 55% y lo comparan con valores muy similares hallados por otros autores, como ser las estimaciones globales de Smil, Sheldrick et al., citados por Fixen et al. (2015), siendo estas 50% y 57% respectivamente.

Novoa y Loomis, Cassman et al., citados por Dobermann (2007), afirman que la RAN tendería a variar entre 30%-50%, pudiendo alcanzar valores de entre 50% y 80% en sistemas bien manejados, con bajo agregado de N o con baja oferta de N por parte del suelo. Por su parte Balasubramanian et al., citados por Fixen et al. (2015), compararon las RAN entre las condiciones agrícolas de 2004 y las parcelas de investigación, encontrando una eficiencia para parcelas de investigación que variaron entre 25% - 49%, estando los máximos entre 55% - 96 % muy superiores a las determinadas bajo condiciones de producción (17% - 33%). García Lamothe (1994), menciona que en los experimentos llevados a cabo en la Estanzuela entre el 1985 y el 1991 la recuperación aparente del nitrógeno fue en promedio de 40%, para aplicaciones de 30 a 60 kg de N ha⁻¹, pero con un amplio rango de variaciones (9 a 75%).

En la red de ensayos realizado por UdelaR. Facultad de Agronomía, en los departamentos de Paysandú y Río Negro en los años 2011 y 2012 y siguiendo el método de aplicación propuesto por Facultad de Agronomía (Baethgen 1992, Perdomo et al. 1999b, Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001), se consiguieron recuperaciones por debajo de 50% (Hoffman et al., 2015b).

Es abundante la información que demuestra la existencia de una interacción entre el N y el S, y cómo esta tiene un impacto en la RAN y concomitantemente en la EUN, haciéndose más evidente a dosis de N altas (Zhao et al. 1999, Salvagiotti y Miralles 2008, Hoffman et al. 2013, Fontanetto et

al., García, citados por Hoffman et al. 2015b), no encontrándose efecto en la eficiencia de utilización o fisiológica donde se mantuvo con resultados similares en varios experimentos, tanto en trigo como en arroz (McDonald, Cassman et al., citados por Salvagiotti et al., 2009).

En este sentido, en la misma red de ensayos mencionada anteriormente, se obtuvieron resultados que mostraron un impacto significativo del agregado de S en la RAN. En la situación donde hubo agregado de este nutriente, la RAN estuvo casi siempre por encima con respecto a las situaciones donde no hubo agregado de S (Hoffman et al., 2015b). Salvagiotti et al. (2009), encontraron para el promedio de dos genotipos y tres sitios experimentales que con agregados de 100 kg de N y 20 kg de S la RAN aumentaba de 35% a 47%.

Los antecedentes muestran que las deficiencias de azufre disminuyen la absorción y uso del nitrógeno en la planta (Clarkson et al., citados por De Bona et al., 2011). Algunos autores mencionan que posiblemente se explique entre otros motivos porque el azufre es un componente esencial de enzimas encargadas del metabolismo del nitrógeno, como la nitrato reductasa y nitrito reductasa (Campbell, Mendel, Swamy et al., citados por Salvagiotti et al., 2009).

Existe evidencia también, que demuestra que el agregado de S puede provocar un efecto similar al ANI anteriormente mencionado, ya que al igual que el agregado de N, puede provocar un aumento en la mineralización del suelo por favorecer a la microflora, así como también aumentar la exploración radicular. De esta forma se estaría sobrestimando la RAN (Rao et al. 1992, Dobermann 2007, Katterer et al., Mandal et al., Giller et al., citados por Hoffman et al. 2015b).

Como fue mencionado anteriormente la EUN, está compuesta por dos sub componentes: la RAN y la EFN. Esta última tiende a tener una baja y errática relación con la variación de la EUN, debido a que varía poco dentro de un mismo genotipo, o menos que la RAN (Salvagiotti y Miralles 2008, Salvagiotti et al. 2009). Esta a su vez se encuentra fundamentalmente ligada a efectos genéticos y ambientales (Huggins y Pan 1993, Rouanet 1994, Salvagiotti et al. 2009).

Por su parte, Huggins y Pan (1993), Rouanet (1994), Salvagiotti et al. (2009), mencionan que la EFN varía en distintos trabajos entre 25 y 65 kg de grano por kg de N recuperado, mientras que Hoffman et al. (2015b), siguiendo el modelo de Baethgen (1992), logró EFN entre los 20 y 50 kg de grano por kg de N recuperado aparente, encontrando una baja relación entre la EFN y la dosis agregada de este nutriente ($r^2=0.24$).

Por lo tanto, dado el momento que está atravesando el agro en el país, en cuanto al elevado costo de insumos y una disminución en el precio de los granos, así como por la impostergable necesidad de contribuir a que el impacto

de la agricultura sobre el ambiente sea de la menor magnitud posible, se hace esencial recuperar el N sin importar de donde provenga, como es sugerido por Salvagiotti et al. (2009). Para esto es necesario utilizar una correcta combinación del N y S, y de esta forma lograr también un aumento en la producción de biomasa y en el rendimiento en grano (Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2015b).

2.7 FUENTES DE NITRÓGENO Y AZUFRE

La elección de la fuente correcta es uno de los pilares de las 4R de la nutrición de las plantas propuesto por Bruulsema et al. (2013), para un correcto y eficiente manejo de la fertilización. Un aspecto importante de las fuentes a la hora de elegir entre una y otra, es conocer la concentración de los distintos nutrientes que puede contener, la velocidad de aporte de estos, además de que cada una puede adecuarse mejor a distintos tipos de ambientes (humedad, pH, etc., Bruulsema et al., 2013).

Por su parte Tisdale et al. (1993), afirman que conociendo y manejando de manera correcta las distintas propiedades de las fuentes de fertilizantes, como ser, formación de ácido, contenido de elementos secundario o de trazas de elementos así como el método de aplicación y colocación, es probable que una fuente de fertilizante nitrogenado sea tan eficaz como cualquier otra desde el punto de vista de la respuesta en rendimiento.

2.7.1 Comportamiento en el suelo

Al aplicar sulfato de amonio (SA) rápidamente se divide en amonio y sulfato, si permanece en superficie el amonio puede perderse gaseosamente en condiciones alcalinas, por lo que se recomienda incorporarlo al suelo o aplicarlo previo a un periodo de riego o una precipitación (Bruulsema et al., 2013). Otro aspecto a considerar, es que el proceso de nitrificación produce acidez, por lo cual el uso repetido del mismo disminuye el pH del suelo, aspecto común a todas las fuentes amoniacales (Perdomo y Barbazán, 1999c).

Debido a que la fracción de N se encuentra bajo forma de amonio, es frecuentemente utilizado en suelos anegados donde las fuentes nítricas no son recomendables debido a las altas pérdidas por desnitrificación (Bruulsema et al., 2013).

La urea también es una fuente amoniacal. En cuanto a su comportamiento en el suelo, primero la urea debe hidrolizarse para liberar el amonio, proceso que está catalizado por la enzima ureasa la cual es afectada por la temperatura y humedad. En este proceso se da un aumento del pH el cual favorece las pérdidas de NH_3 por volatilización, aunque en última instancia se da una reacción ácida a causa de la desnitrificación ion amonio. A su vez la

volatilización es afectada por la capacidad buffer del suelo, su capacidad de intercambio catiónico (CIC), así como de la dosis y el método de aplicación entre otros factores (Tisdale et al. 1993, Boswell et al., citados por García 1996, Hargrove, citado por Barbieri et al. 2003, García 2004). Por su alta solubilidad puede disolverse en agua y aplicarse al suelo en forma líquida, agregarse al agua de riego o rociarse sobre las plantas (Melgar y Torres Duggan, 2014).

Por otro lado, se encuentra el UAN, el cual presenta el N en un 25% bajo la forma de nitrato, un 25% bajo la forma de amonio que puede ser directamente asimilada por las plantas pero en general es rápidamente oxidada, y el 50% restante está como urea (Bruulsema et al., 2013).

El UAN presenta parte del nitrógeno en forma de nitrato y amonio lo cual permite que parte del N este rápidamente disponible para las plantas aún en condiciones de baja humedad. Por otra parte, podría tener problemas de lixiviación (Tisdale et al. 1993, Bruulsema et al. 2013).

El solmix es un fertilizante líquido, que aporta N y S, para su elaboración se realizan mezclas de UAN y tiosulfato de amonio (TSA, Gowariker et al., citados por Melgar y Torres Duggan, 2014).

Luego de la aplicación el TSA es transformado a tetracionato para que luego se forme el sulfato, este proceso en suelos templados dura entre una y dos semanas. La reacción que este causa en el suelo cuando se aplica es ácida y se libera en partes iguales SO_4 y azufre elemental (Gowariker et al., citados por Melgar y Torres Duggan, 2014). Se ha comprobado que la mezcla de TSA mejora la eficiencia de uso del nitrógeno amoniacal ya que actúa como inhibidor de la ureasa (Goos y Fairlie, citados por Melgar y Torres Duggan, 2014).

El Entec 26[®] presenta la mayoría del N de forma amoniacal, complementándose con N en forma nítrica, también aporta S (26 % N y 13 % S). Cuenta con una molécula 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) que inhibe la nitrificación en el suelo, lo que mejora la eficiencia permitiendo una lenta transformación del amonio a nitrato. El suministro de N dura entre 6 y 12 semanas dependiendo de las condiciones del suelo (Empresa Agroenfoque, s.f.).

El azufertil es una fuente azufrada elaborada en base a sulfato de calcio, posee gran solubilidad en agua en comparación con este. Su solubilidad depende de condiciones de humedad y edáficas, liberándose al disolverse Ca^{2+} y SO_4^{2-} , sin ningún impacto directo significativo sobre el pH (ASP s.f., Bruulsema et al. 2013). No fue posible encontrar información precisa acerca de la solubilidad de este fertilizante.

2.7.2 Respuesta vegetal a las distintas fuentes

Pese a la gran diferencia encontrada en los fertilizantes anteriormente descritos, es importante destacar que se halló poca información en cuanto a la dinámica en el suelo y la absorción, así como también en cuanto a la respuesta en producción de biomasa o rendimiento. A continuación, se citan una lista de trabajos que se enfocaron en cuantificar estas diferencias, sin encontrarse ningún trabajo similar a este experimento.

García (1996), trabajando con maíz en Tandil utilizando como fuente de nitrógeno al UAN, nitrato de amonio calcáreo (CAN), urea y urea con inhibidor de la ureasa, aplicados a V6, variando la aplicación la cual se realizó sobre la superficie o en el entresurco, encontró igual respuesta exceptuando a la urea en superficie que presentó un rendimiento significativamente menor. Sin embargo, ese mismo autor trabajando en trigo en el sudeste bonaerense no encontró diferencia en rendimiento cuando se aplicaron UAN, CAN y urea a siembra y macollaje en dosis de 60 kg de N ha⁻¹.

De la misma forma Bordolli et al., citados por Mazzilli (2004), tampoco encontraron diferencias entre fuentes cuando aplicaron a siembra y Z 22 urea, nitrato de amonio, CAN, y sulfato de amonio (SA). Las dosis utilizadas fueron en este caso de 30 kg N ha⁻¹ para los dos momentos.

No obstante, Lotfollahi et al., citados por Malakouti et al. (2008), trabajando en Irán, observaron en trigo, que solamente por el hecho de cambiar la urea pre siembra por urea recubierta de azufre, aumentó el rendimiento, así como también la recuperación aparente del nitrógeno de un 20% a un 30%.

Comparando distintas fuentes de fertilizantes nitrogenados, Volk, citado por Bologna y Rincón (1997), determinó en maíz, que el rendimiento y la absorción de nitrógeno, fue superior con la utilización de nitrato de amonio y SA con respecto a utilizar urea y UAN sin incorporar a un suelo no laboreado.

Zubillaga et al., citados por Mazzilli (2004), encontraron que utilizando fertilizantes de liberación lenta, a pesar de que incrementan la disponibilidad de nitratos y amonio en comparación con la urea, generaron menor concentración de proteína en grano.

Por otro lado, Mesa y Rodríguez¹ trabajando en cebada cervecera no encontraron diferencias entre el agregado de Entec 26 o SA, reportando un efecto por el agregado de S.

En cuanto a las fuentes azufradas si se compara al azufre elemental con los sulfatos, se ha observado que para igualar su eficiencia el primero debe ser finamente molido e incorporado al suelo. En cambio, si los comparamos a

¹ Mesa, P.; Rodríguez, M. 2015. Fertilización en cebada con azufre (sin publicar).

los dos aplicados sobre la superficie del suelo se observa que el sulfato puede llegar a las raíces por aguas de percolación y el azufre elemental primero debe oxidarse a sulfato por lo que el proceso es más lento (Tisdale et al., 1993). Lo mismo sucede para el caso de polisulfato, para que puedan ser absorbidos por las plantas. La proporción de azufre elemental oxidado dependerá de la temperatura, la humedad y el tamaño de partícula, por lo que en suelos secos en los meses más fríos será lentamente absorbido (Tisdale et al. 1993, Torres Duggan et al. 2010). Por esto, para lograr una acción inmediata, y además un efecto lento y residual a la vez, se debe aplicar una mezcla que contenga una pequeña cantidad de sulfuro y azufre elemental fino y grueso para aportar en los distintos momentos respectivamente (Tisdale et al., 1993).

Torres Duggan y Rodríguez (2009), mencionan que no habría diferencias en el método de aplicación comparando entre hacerlo en banda y al voleo al aplicar fertilizantes con S como SO_4^{2-} , debido a la movilidad del mismo en el suelo. Por su parte Tisdale et al. (1993), mencionan que la eficiencia de las fuentes azufradas es independiente del catión acompañante.

Torres Duggan et al., Gutiérrez Boem et al., citados por Torres Duggan et al. (2010), tomaron en cuenta fuentes de alto solubilidad en agua como superfosfato simple de calcio y SA, como otras poco solubles, por ejemplo, el yeso agrícola, no encontrando diferencias entre las fuentes. Resultados similares a los anteriores fueron encontrados por Tysko y Rodríguez (2006), en Balcarce, Argentina.

De los experimentos anteriormente mencionados, se desprende que en general no existen diferencias en cuanto a la eficiencia y respuestas de las fuentes de azufre y que las diferencias en las fuentes de N, solo se observan en situaciones particulares. Igualmente cabe destacar que no es abundante la información en cuanto a la dinámica de absorción y su efecto en el rendimiento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN

El experimento se realizó en la zafra de invierno 2014 (mayo a noviembre) en la estación experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, ubicada en la ruta nacional número 3, km 363, departamento de Paysandú, Uruguay.

El ensayo se instaló en el campo experimental de EEMAC (32° 22' 36.42''S, 58° 03' 37.87''O, elevación 51m), el cual presentó como antecesor en el invierno anterior una avena para cobertura seguido del cultivo de moha con destino a corte en el verano.

La variedad de trigo utilizada fue Fuste, la cual se caracteriza por presentar ciclo medio y gran potencial de rendimiento según evaluación de cultivares (INIA e INASE 2015, Hoffman et al. 2015a), evitando de esta forma que el potencial de rendimiento sea una limitante para el ensayo.

El área donde se instaló el ensayo se encuentra sobre la unidad Young (MAP. DSF, 1979), presentando como tipo de suelo dominante un Brunosol Éutrico Típico Fr. según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, escala 1:1.000.000 (MAP. DSF, 1979). Correspondiente a la formación Fray Bentos y se clasifica dentro del grupo CONEAT 10.9 (MAP. CONEAT, 1979).

3.2 TRATAMIENTOS

El experimento consistió en 10 tratamientos, incluyendo un testigo sin fertilizar, los cuales implicaron la utilización de diferentes fuentes de fertilizante con dosis de N recomendada en base a nivel crítico (Nc) de $N-NO_3^-$ en los primeros 20 cm de suelo (15 ppm) y 7 kg de N por cada ppm por debajo del Nc como equivalente fertilizante a Z 22, y agregado de urea a Z 30 en cantidades equivalentes a 0 y 50 unidades de N por hectárea (UN). Los diferentes tipos de fuentes de fertilizantes aplicadas a Z 22 fueron las siguientes:

- Urea
- UAN
- Urea azufrada (75% urea-25% sulfato de amonio)
- Urea con azufertil
- Urea 50% + sulfato de amonio 50%
- Entec 26[®]
- Sulfato de amonio
- Líquido 28N-5S
- Líquido 24N-10S

La cantidad de azufre agregada estuvo definida por la relación N-S que presentara cada fuente de fertilizante.

Cuadro 1. Descripción y composición de las fuentes de fertilizantes y dosis de N y S aplicados a Z 22.

Fuente	Composición N-S	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Dosis S (kg ha ⁻¹)	Relación N/S
Urea	46-0	50	0	-
UAN	32-0	50	0	-
Urea azufrada	40-6	50	7.5	6.7
Urea con azufertil	34-5	50	7.5	6.7
Urea 50% + SA 50%	34-12	50	17.6	2.8
Entec 26 [®]	26-13	50	25	2.0
Sulfato de amonio	21-24	50	57	0.9
Líquido 28N-5S	28-5	50	9	5.6
Líquido 24N-10S	24-10	50	21	2.4

3.2.1 Descripción de las fuentes

Sulfato de amonio: se comercializa granulado y es un cristal altamente soluble. Luego de su aplicación al suelo rápidamente se divide en amonio y sulfato. En cuanto al sulfato liberado es una fuente rápida de aporte de S ya que se encuentra de forma biodisponible para las plantas (Bruulsema et al., 2013, cuadro 1).

Urea: se presenta de forma granulada. Su alto contenido de N hace que sea eficiente su transporte y aplicación a campo (Bruulsema et al. 2013, Melgar y Torres Duggan 2014). Debe hidrolizarse para liberar el amonio, por lo cual no está rápidamente biodisponible (Tisdale et al., 1993, cuadro 1).

UAN: presenta un 25% del N bajo la forma de nitrato, un 25% bajo la forma de amonio que puede ser directamente asimilada por las plantas pero en general es rápidamente oxidada, y el 50% restante está como urea (Bruulsema et al., 2013, cuadro 1).

Líquidos solmix: fertilizantes líquidos que contienen nitrógeno y azufre en distintas proporciones, para su elaboración se realizan mezclas de UAN y tiosulfato de amonio (TSA, Gowariker et al., citados por Melgar y Torres Duggan, 2014, cuadro 1).

Entec 26[®]: fertilizante granular, presenta un inhibidor de la nitrificación. Este fertilizante presenta el N bajo la forma amoniaca en un 71 % y nítrico en el 29% restante, en su formulación tiene la molécula 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) que inhibe la nitrificación en el suelo, lo que mejora la eficiencia

permitiendo una lenta transformación del amonio a nitrato. El suministro de nutriente dura entre 6 y 12 semanas dependiendo de las condiciones del suelo, en cuanto al azufre está presente totalmente soluble al agua (Empresa Agroenfoque, s.f., cuadro 1).

Azufertil: fertilizante granulado que se basa en el sulfato de calcio. Posee gran solubilidad en agua, liberándose al disolverse Ca^{2+} y SO_4^{2-} , (ASP s.f., Bruulsema et al. 2013, cuadro 1).

3.3 DISEÑO Y MODELO ESTADÍSTICO

El diseño utilizado corresponde a un factorial completo con parcelas divididas en bloques completos al azar con tres repeticiones. El factor aplicado a las parcelas mayores fue un testigo sin N y S y 50 kg de N con las fuentes de fertilizante a Z 22, y el factor aplicado a las sub parcelas a Z 30 fueron dos niveles de N, un testigo sin N y 50 kg de N ha^{-1} con urea granulada.

El modelo estadístico utilizado para el análisis fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_j + A_j + \delta_{ij} + B_k + (AB)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ijk} = Variable de respuesta

μ = Media general

β_j = Efecto del j-ésimo bloque

A_j = Efecto del j-ésimo nivel de fuente

δ_{ij} = Error debido a la interacción fuente y bloque

B_k = Efecto del k-ésimo nivel del agregado de N a Z 30

$(AB)_{jk}$ = Efecto de la interacción entre el j-ésimo nivel fuente y el k-ésimo nivel de N a Z 30

ε_{ijk} = Error debido a la interacción fuente y N a Z 30

Los tres bloques se ubicaron en función de la pendiente. La unidad experimental correspondiente a la parcela mayor presentó un tamaño de 12m^2 (4m x 3m), mientras que la superficie de la unidad experimental correspondiente a la sub parcela fue de 6m^2 (2m x 3m).

Dado que el análisis de las distintas fuentes no permitió observar las diferencias esperables, y que solamente existieron diferencias contra el testigo, ocasionado por un efecto de agregado de fertilizante y no por un efecto fuente, se prosiguió a realizar un re-análisis de los datos, con la formación de 6 grupos de tratamientos (cuadro 2), siendo importante mencionar que se producen

efectos confundidos por las diferencias en las fuentes que están agrupadas en los tratamientos, así como por las diversas cantidades de S que son promediadas.

De esta forma los datos son reanalizados según un diseño en bloques completos al azar.

Es así que el modelo estadístico de análisis para este caso sería:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + A_i + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} = Variable de respuesta

μ = Media general

β_j = Efecto del j-ésimo bloque

A_i = Efecto del i-ésimo nivel de fuente

ε_{ij} = Error experimental

Cuadro 2. Descripción de grupos de tratamientos para análisis en bloques completos al azar.

Tratamientos	N Z 22 (kg N ha ⁻¹)	S Z 22	N Z 30 (kg N ha ⁻¹)
Sin N Z 22/Sin N Z 30 (Testigo)	0	No	0
Sin N Z 22/Con N Z 30	0	No	50
Con N Z 22/Sin N Z 30	50	No	0
Con N Z 22/Con N Z 30	50	No	50
Con N Z 22/Con S Z 22/Sin N Z 30	50	Si*	0
Con N Z 22/Con S Z 22/Con N Z 30	50	Si*	50

*La dosis de S aplicada a Z 22 promediando los tratamientos que lo contenían fue de 21 Kg S ha⁻¹

En ambos análisis, los datos fueron analizados estadísticamente con el programa InfoStat.

3.4 MANEJO DEL CULTIVO

El cultivo se sembró el 21 de junio de 2014, con una población objetivo recomendada para el cultivar de 45 plantas por metro lineal (Hoffman et al., 2015a) y una distancia entre hileras de 17 cm, lo que conforma un total de 265 plantas.m⁻². La emergencia del mismo se dio el 4 de julio.

Los análisis de suelo a la siembra se realizaron con muestra compuesta de los primeros 20 cm de profundidad, siendo esta una única muestra

compuesta para el ensayo. Los resultados mostraron que el suelo presentaba 4 ppm de N-NO₃ (método de potenciómetro por electrodo de actividad específica), 8 ppm de P (fósforo disponible por método Bray no.1), 0,75 meq K/100grs de suelo (según método de K int. extraído con acetato de NH₄). La fertilización basal a todo el ensayo fue de 150 kg ha⁻¹ de 18-46.

El cultivo alcanzó el estadio Z 22 el 28 de julio, un día posterior se aplicó Clerb (25 gr ha⁻¹) para el control de malezas de hoja ancha. Nuevamente se realizaron análisis de suelo cuando el cultivo estaba a Z 22 tomando una muestra compuesta por bloque tomada de los primeros 20 cm, los resultados arrojaron los siguientes valores de N-NO₃⁻; bloque I, 6ppm y los bloque II y III 9 ppm.

El 31 de julio, en el estadio de Z 22, se aplicaron los tratamientos correspondientes a las unidades experimentales como se detalló anteriormente, para esto el ajuste de la dosis fue calculado a través de la propuesta de diagnóstico y recomendación de dosis de N (Perdomo et al. 1999b, Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001, Hoffman et al. 2010).

El 19 de agosto el cultivo alcanzó el estadio Z 30, dos días después se realizó la fertilización con 50 kg ha⁻¹ en las subparcelas de los tratamientos con agregado de urea, en las restantes subparcelas se dejó sin agregado de N.

El 22 de agosto se aplicó 1 lt ha⁻¹ de Opera para control de enfermedades de hoja, principalmente *Pyrenophora tritici-repentis*. Posteriormente, el 1 de octubre el cultivo alcanzó el estadio Z 65, donde se realizó una aplicación de Swimg plus, fungicida de acción sistémica a razón de 1.5 lts ha⁻¹, como preventivo a *Fusarium graminearum*, luego el 14 de este mismo mes se realizó una nueva aplicación del producto con el mismo fin.

La cosecha del cultivo se realizó el 28 de noviembre. Se cortaron 6 líneas centrales de cada parcela en todo el largo (3 m) a 5 cm sobre el nivel del suelo, lo que hace un total de 3.06 m². Posteriormente se realizó la trilla con una máquina estacionaria experimental, luego se procedió a limpiar los granos con una sopladora, para eliminar restos y suciedades de la trilla.

3.5 DETERMINACIONES DURANTE EL CULTIVO

Las determinaciones realizadas durante el cultivo fueron las siguientes; a Z 22 se cuantificó producción de biomasa y concentración de nitrógeno y azufre en planta de muestra compuesta por bloque.

A Z 30 se midió nuevamente biomasa (muestras de 0.09 m²) y concentración de nitrógeno y azufre en planta, esta vez se lo realizó tomando la muestra de cada una de las parcelas mayores de cada tratamiento.

En el estadio de Z 65 se realizaron las mismas mediciones que a Z 30 pero esta vez fue en cada una de las subparcelas. Además, en este estadio, se contabilizó el número de espigas en cada tratamiento a través de la medición en dos hileras paralelas de un metro lineal.

Por último, se midió biomasa total a cosecha (grano más paja) pero en este caso el tamaño de la muestra fue de 3.06 m² en cada subparcela.

3.6 DETERMINACIONES POST COSECHA

Luego de la cosecha se prosiguió a realizar el procesamiento físico de las muestras de grano, a cada uno de los tratamientos se les realizaron las mismas determinaciones, las que correspondieron a; peso total de la muestra y su transformación a kg ha⁻¹, peso de grano, porcentaje de humedad de grano, peso hectolitro y concentración de N (combustión seca por Dumas) y S (analizador de azufre Leco) en grano.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO

El año 2014 fue un año que se caracterizó por una primavera lluviosa y con temperaturas superiores a la media. Durante la estación de crecimiento del cultivo (junio-noviembre), se produjeron precipitaciones por un total de 812 mm, siendo casi un 40% mayor al promedio histórico, y la temperatura media durante estos meses, se ubicó 1,3 °C por encima de la media histórica (figura 1).

Las lluvias producidas antes de la siembra en el 2014, permitieron que el suelo se encontrara con suficiente agua disponible para una correcta implantación del cultivo. Después de un agosto muy seco, el exceso de precipitaciones se centró en la primavera. En los meses de setiembre, octubre y noviembre las precipitaciones fueron superiores al promedio. Cabe destacar que de los 276 mm que sucedieron en noviembre (figura 1), aproximadamente 114 mm se dieron luego de la cosecha, entre el 29 y 30, sin embargo 162 mm ocurrieron en el periodo de fin de llenado de grano pudiendo afectar los rendimientos y/o la calidad.

En cuanto a la temperatura, esta puede caracterizarse como desfavorable para los cereales de invierno (figura 1).

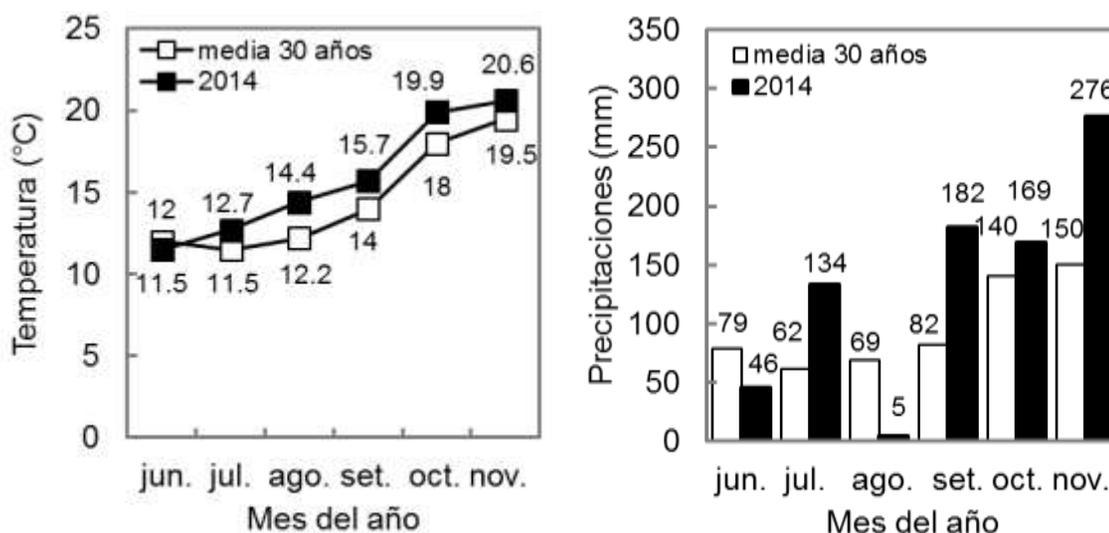
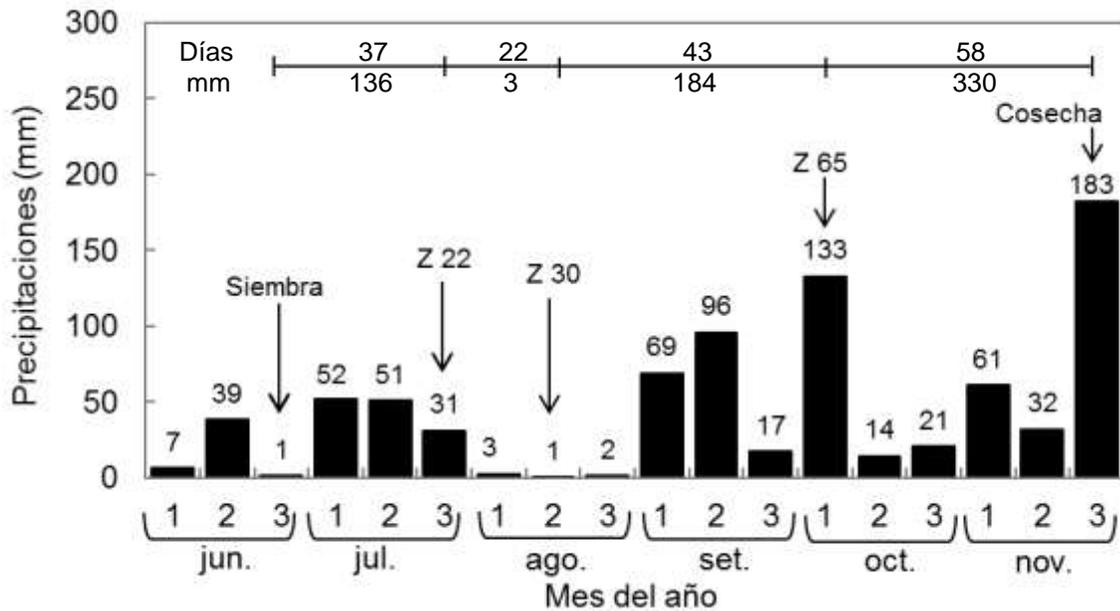


Figura 1. Precipitaciones y temperatura media mensual para el año 2014 y promedio histórico de 30 años para Paysandú durante el ciclo de crecimiento del cultivo (Fuente: FA. EEMAC. Estación Meteorológica, 2014).



	junio	julio	agosto	setiembre	octubre	noviembre
	----- temperatura (°C) -----					
Año 2014	11,5	12,7	14,4	15,7	19,9	20,6
Promedio histórico	12	11,5	12,2	14	18	19,5

Figura 2. Precipitaciones decádicas durante el ciclo del cultivo y temperatura para el año 2014 y media histórica de 30 años para Paysandú (Fuente: FA. EEMAC. Estación Meteorológica, 2014).

Por otra parte, las precipitaciones en torno al periodo crítico (fin de setiembre y principio de octubre) generaron un coeficiente fototermal (Q) similar al promedio (datos no mostrados), ($1.55 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Los tratamientos a Z 22 se realizaron a fines de julio momento en el que el suelo se encontraba con suficiente agua, aunque posteriormente fue seguido de un período seco hasta Z 30, lo que a priori hace esperable bajas pérdidas por lixiviación (Tisdale et al., 1993). El escaso tiempo transcurrido entre Z 22 y Z 30, comparándolo con años anteriores, seguramente obedezca a las elevadas temperaturas ocurridas en ese periodo (Hoffman y Fassana, 2014a). Esto implica que el efecto que pudieran ocasionar las distintas fuentes no pueda expresarse completamente a Z 30.

Luego de Z 30 las condiciones climáticas, no habrían ofrecido severas limitantes para el crecimiento del cultivo, sin embargo las altas temperaturas y

abundantes precipitaciones a final de ciclo no permitieron crecimientos óptimos (figura 2).

4.2 VARIACIÓN DEL RENDIMIENTO EN GRANO Y SUS COMPONENTES

El rendimiento promedio fue de 4599 kg ha⁻¹, siendo similar al obtenido en el programa de caracterización de cultivares de trigo en el mismo año y fecha de siembra (Hoffman et al., 2015a). Los rendimientos variaron desde un máximo por tratamiento de 6160 kg ha⁻¹ a un mínimo de 2847 kg ha⁻¹.

Cabe destacar que el testigo sin N y S en pos-siembra arrojó un rendimiento de casi 3000 kg ha⁻¹, y 70 kg ha⁻¹ de N a cosecha arrojando una productividad parcial del N (PPN) de 43 kg de grano por kg de N. A Z 65 el cultivo sin N y S pos-siembra, absorbió 120 kg ha⁻¹ de N lo que puede ser tomado como un indicador del elevado aporte de N del suelo para el sitio experimental (Hoffman et al., 2015b).

La variación del rendimiento en grano, se asoció estrechamente a la variación del total de biomasa producida a cosecha ($r^2=0,95$; p-valor< 0.0001, figura 3a).

El rendimiento estuvo directamente relacionado al número de granos (NG, el 94% del rendimiento esta explicado por este componente, figura 3b). Como el PG aparece inversamente relacionado con NG, podemos asegurar que el potencial se encontró en parte limitado por el PG. Esta situación seguramente haya estado afectada por el “trade-off” esperable cuando es muy elevado el NG (Calderini y Reynolds, 2000). Las altas temperaturas mencionadas anteriormente en el periodo de llenado de grano, seguramente contribuyeron a agudizar la pérdida de PG frente a elevados NG (Acreche y Slafer 2005, Lizana y Calderini 2013). La estimación del rendimiento a PG constante, permite pensar en una pérdida potencial de hasta 25% del rendimiento por PG en los valores elevados de NG, siendo en el promedio del experimento de 10%. Es preciso mencionar que este cultivar obtuvo PG de 36 mg con 24000 granos m⁻² (Hoffman y Fassana, 2014a). Esto hace que la estimación realizada, en la cual se supone que no se cae el PG, para los valores obtenidos de NG sea posible.

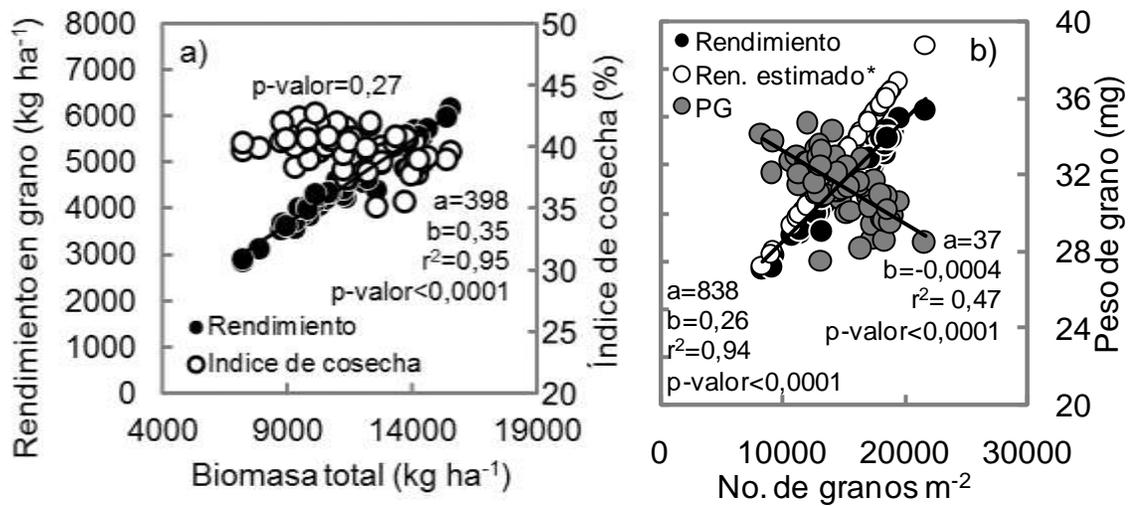


Figura 3. Rendimiento e índice de cosecha en función de la biomasa a cosecha (a), rendimiento, rendimiento estimado (*con peso de grano cte. de 34 mg) y peso de grano en función del número de granos por metro cuadrado (b).

El aumento en NG obedeció a un mayor número de espigas.m⁻² (EM), registrándose una baja relación competitiva con el tamaño de espigas (granos espiga⁻¹ - GE, figuras 4a y b).

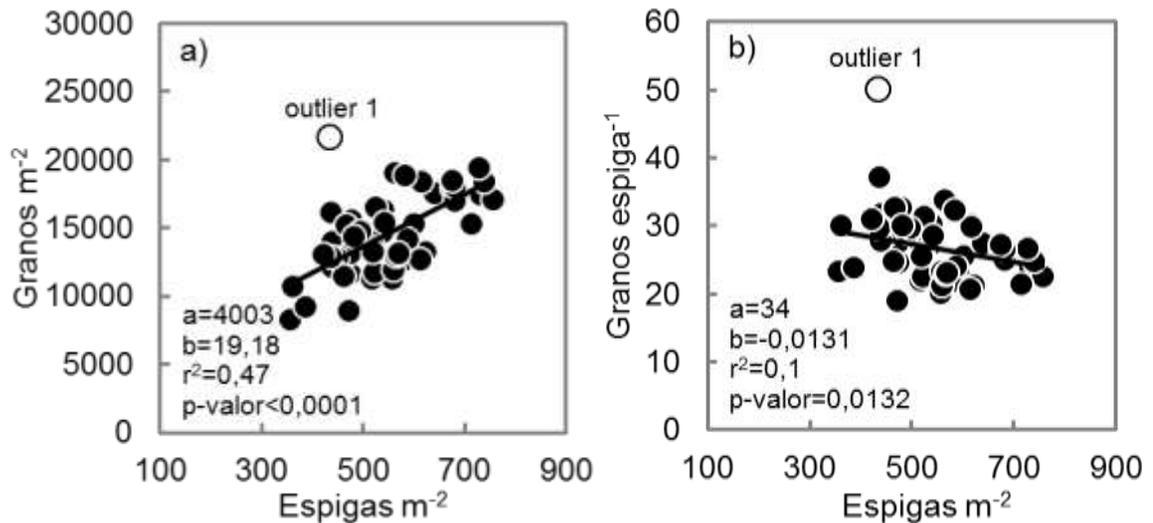


Figura 4. Granos m⁻² en función de las espigas m⁻² (a) y espigas m⁻² en función de los granos espiga⁻¹ (b).

El agregado de 50 kg de N ha⁻¹ a Z 22 generó una respuesta aproximadamente de 1300 kg independientemente del agregado de S, logrando una eficiencia de uso de 26 kg por kg de N, la cual está muy cercana a los 30 kg por kg de N reportados por Hoffman y Perdomo (2011). Considerando que a Z 22 los análisis de suelo dieron como resultado 8 ppm y se agregaron 50 kg ha⁻¹ (siguiendo el modelo de facultad de agronomía), la respuesta obtenida en rendimiento en grano estuvo dentro de lo esperable. La respuesta en promedio al agregado de 50 kg de N ha⁻¹ a Z 30 del entorno a los 1000 kg ha⁻¹ (pasando en promedio de 4102 kg a 5116 kg), significó una elevada EUN (20 kg grano kg N⁻¹, Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001), llevando a que los mayores rendimientos promedio se alcanzaran corrigiendo el N a Z 22 y Z 30, independientemente del agregado S a Z 22. Ya que los análisis de N en planta arrojaron como resultado 2,8% y se agregaron 50 kg de N ha⁻¹ siguiendo el modelo Baethgen (1992), una respuesta promedio de 1000 kg ha⁻¹, también estaría enmarcada dentro de lo esperable. En promedio para todas las fuentes utilizadas, por el agregado de 100 kg de N ha⁻¹ y 21 kg de S ha⁻¹ el rendimiento se incrementó desde los 2956 kg ha⁻¹ en el testigo sin fertilizar en pos-emergencia, hasta los 5248 kg ha⁻¹, llevando a que la eficiencia de uso por el total de nutrientes agregados en pos-emergencia fuese de 19 kg de grano kg⁻¹ (figura 5).

Para realizar la siguiente ANAVA (cuadro 3), se procedió a agrupar los tratamientos según momento (Z 22 y/o Z 30) y dosis (0, 50 o 100 kg) de N recibida, así como también por el hecho de si recibieron S o no.

Luego se obtuvieron los promedios para cada uno de los grupos de tratamientos y se compararon las medias usando Tukey ($\alpha=0,05$).

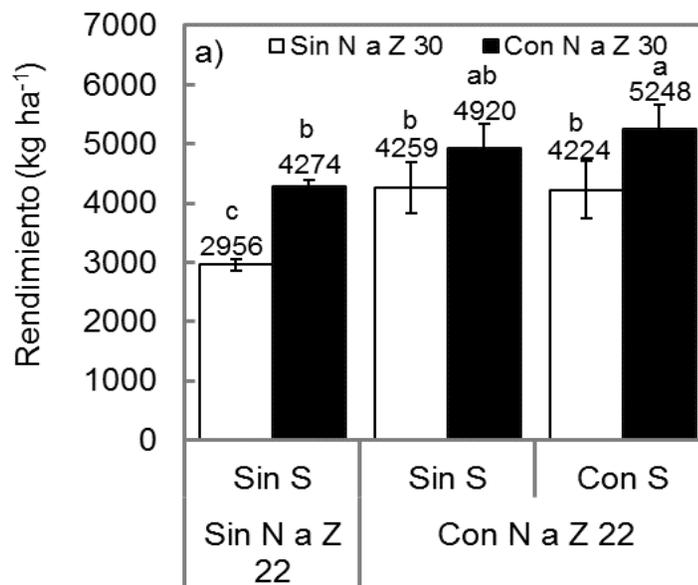
Cuadro 3. Análisis de la varianza del rendimiento para los tratamientos agrupados según el agregado de N y S a Z 22 y N a Z 30 y separación de medias (CV = 9,9%).

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	21591706,24	7	3084529,46	14,74	<0,0001
Bloque	74965,63	2	37482,82	0,18	0,8366
Z22 / Z30 (S)	21516740,60	5	4303348,12	20,56	<0,0001
Error	10884882,75	52	209324,67		
Total	32476588,98	59			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=817,88089 Error: 209324,6682 gl: 52

Z22 / Z30 (S)	Medias	n	E.E.		
Con / Con (con S)	5247,90	21	99,84	A	
Con / Con (sin S)	4920,33	6	186,78	A	B
Sin / Con (sin S)	4273,67	3	264,15		B
Con / Sin (sin S)	4259,33	6	186,78		B
Con / Sin (con S)	4224,14	21	99,84		B
Sin / Sin (sin S)	2956,33	3	264,15		C

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$)



Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$)

Figura 5. Rendimiento de los tratamientos agrupados en función del agregado de N y S a Z 22 y Z 30. Las barras corresponden al desvío estándar.

El agregado de N a Z 30, como ya se mencionó, tuvo un gran impacto en el rendimiento. La mayor respuesta se observó en los tratamientos que no se

habían fertilizado a Z 22, siendo la misma de 1300 kg y logrando una EUN de 26 kg de grano por kg de N. En el caso de los tratamientos que solo habían recibido N a Z 22, fue donde se observó la menor respuesta al agregado de N a Z 30, sin diferenciarse estadísticamente de los tratamientos que no tuvieron N en este estadio. Cuando el cultivo fue fertilizado con N y S en Z 22, la respuesta por el agregado de N a Z 30 fue de alrededor de 1000 kg, quedando en evidencia la interacción del N y S (Zhao et al. 1999, Salvagiotti y Miralles 2008, Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2013, Hoffman et al. 2015b).

Cuando solamente se agregó 50 kg N ha⁻¹, independientemente del momento (Z 22 o Z 30) no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento en grano (cuadro 3). Los tratamientos con agregado de 100 kg de N, cuando no se agregó S, no se diferenciaron de aquellos que tuvieron 50 kg de N, mostrando entonces una interacción negativa ya que como fue descrito anteriormente el agregado de N a Z 22 y a Z 30 por si solos generaron aumentos en rendimientos. Vale aclarar que cuando además se le agregó 21 kg de S (en promedio), se logra el rendimiento máximo, logrando diferenciarse estadísticamente de los tratamientos que solamente tuvieron 50 kg de N agregado, no así de los tratamientos que tuvieron 100 kg de N agregado en total. Similar fue el comportamiento de las restantes variables principales (cuadro 4).

Es importante destacar, que el que no existan diferencias significativas en rendimiento en grano entre los tratamientos que recibieron 100 kg de N total pero se diferenciaron en el agregado de S, no se puede atribuir a una baja en el peso de grano como consecuencia del aumento en número (de 15300 a 17400 GM) ya que si el peso de grano se hubiera mantenido en el mayor peso observado (33,6 gr), las diferencias en rendimiento continuarían siendo no significativas.

Cuadro 4. Componentes del rendimiento, índice de cosecha y biomasa según el agregado de N y S a Z 22 y Z 30.

Tratamientos			Componentes del rendimiento							
Z 22		Z 30	EM*	GE*	GM*	PG*	RES*	RE*	IC*	BMT
N	S	N	(Nº)	(Nº)	(Nº)	(mg)	(g)	(kg ha ⁻¹)	(%)	(kg MS ha ⁻¹)
Sin	Sin	Sin	404 c	22,2	8877 c	33,3 a	742	2956 c	40	7397 d
		Con	542 ab	23,9	12718 b	33,6 a	803	4274 b	39,8	10746 bc
Con	Sin	Sin	469 bc	28,3	13181 b	32,4 ab	915	4259 b	40,2	10575 c
		Con	561 ab	27,3	15271 ab	32,3 ab	880	4920 ab	38,7	12756 ab
	Con	Sin	512abc	26,3	13314 b	31,8 ab	836	4224 b	40,4	10465 c
		Con	627 a	28,5	17436 a	30,2 b	858	5248 a	39,7	13252 a
Promedio			519	26	13466	32	840	4314	40	10865
p valor			<0,000 1	0,25	<0,0001	<0,000 1	0,62	<0,0001	0,19	<0,0001
CV			13,51	18,2	3,93	11,2	17,5	9,96	3,27	10,32
MDS			132	8,82	2,211	2941	265	817	2,33	2130

Medias con una letra común no son significativamente diferentes en misma columna Tukey ($\alpha=0,05$). *EM; espigas.m⁻²; GE: granos.espigas⁻¹; GM: granos.m⁻²; PG: peso de grano; RES: rendimiento.espigas⁻¹; RE: rendimiento en grano; IC: índice de cosecha; BMT: biomasa a cosecha.

En cuanto a la producción de biomasa total a cosecha (BMT), el testigo logró acumular casi 7400 kg MS ha⁻¹. El agregado de 100 kg N ha⁻¹, generó un aumento de biomasa en un 75%, mientras que los que solo tuvieron 50 kg de N lo hicieron en un 40% (cuadro 4). Considerando que el índice de cosecha no varió, los incrementos en la BMT se tradujeron en diferencias de rendimiento en grano (cuadro 3 y figura 3a). La biomasa de los tratamientos con 100 kg de N de todos modos fue inferior a la obtenida en este mismo año y lugar, en los ensayos de caracterización de la EEMAC (> 17000 kg de MS ha⁻¹ a cosecha).

Hoffman et al. (2015a), sostienen que este cultivar en parte basa su superioridad genética en su potencial de producción de biomasa. Para los años 2013 y 2014 fue el cultivar que obtuvo mayor rendimiento y BMT en los ensayos de caracterización. En cuanto al IC, el de este trabajo fue similar al obtenido en el ensayo de caracterización de ese año, explicando así la diferencia en rendimiento.

4.3 CRECIMIENTO Y ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE

4.3.1 Crecimiento del cultivo

Como fue mencionado en el capítulo anterior la biomasa a cosecha estuvo altamente correlacionado con el rendimiento en grano (RE), sin embargo, el crecimiento hasta Z 30 no mostró relación estrecha con el RE (ver anexo 1). El rendimiento varió directamente con la tasa de crecimiento posterior, desde Z 30 hasta cosecha ($R^2=0,94$; p-valor < 0.0001, figura 6d). El período Z 30 - cosecha puede ser dividido en dos, por un lado el período Z 30 – Z 65 y por otro lado el período Z 65–cosecha, estando ambos implicados en el rendimiento (figuras 6a y b). Dentro de estos dos períodos el aporte de cada uno en cuanto a la producción de rendimiento es muy similar siendo de 46% y 54% respectivamente, aunque la relación fue más estrecha en el segundo período. Cabe destacar que no existió relación entre las tasas de crecimiento de estos dos períodos (figura 6c).

A nivel general el crecimiento del cultivo es bien representado por una curva sigmoide de tipo logística como es reportado por Viega, citado por Mazzilli (2004). Se observa un bajo crecimiento entre siembra - Z 30, el cual fue de 22 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ estando por debajo de los reportados por Cha y Durán (2001), Mazzilli (2004), que reportan 25 y 30 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ respectivamente, luego un crecimiento acelerado entre Z 30 - Z 65, el cual fue de 180 kg MS ha⁻¹ día⁻¹, siendo una tasa elevada si se la compara con los casi 104 o 100 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ que obtuvo Cha y Durán (2001), Mazzilli (2004) como promedio. Cabe destacar que el NC de TC entre Z 30 - Z 65 fue de 277 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ para poder alcanzar un rendimiento de 5400 kg ha⁻¹, siendo esta tasa de crecimiento muy superior a la antes mencionada (figura 6a). Hacia final del ciclo la TC comienza a disminuir, entre Z 65 - cosecha la misma es de 41 kg MS ha⁻¹ día⁻¹, igualmente esta es superior a la obtenida por Mazzilli (2004), para una variación del rendimiento en grano de 3000 a 4000 kg (figura 7). Hasta Z 65 tanto los tratamientos que tuvieron agregado de N a Z 30 como los que no, lograron tasa de acumulaciones similares. Hacia finales de ciclo, los tratamientos que no recibieron agregado de N a Z 30 no logran mantener el crecimiento, pudiendo explicar de esta forma la falta de relación entre el crecimiento Z 30 - Z 65 y Z 65 - cosecha ($r^2=0.097$). A su vez los tratamientos que lograron mayores TC posteriores a Z 65 fueron los que obtuvieron los mayores rendimientos (figuras 6 y 7).

La biomasa y el N absorbido a Z 65 logrados en este trabajo, eran suficientes para alcanzar un rendimiento mayor al obtenido, sin embargo esto no sucedió, similar fue lo ocurrido este mismo año en el trabajo de caracterización de cultivares (Hoffman et al., 2015a). Probablemente esto se explique por las altas temperaturas ocurridas durante el ciclo del cultivo, así

como también por las lluvias en el período de llenado de grano y un coeficiente fototermal ($1,55 \text{ MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) inferior al de 2013 ($2,03 \text{ MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, Hoffman y Fassana, 2014a).

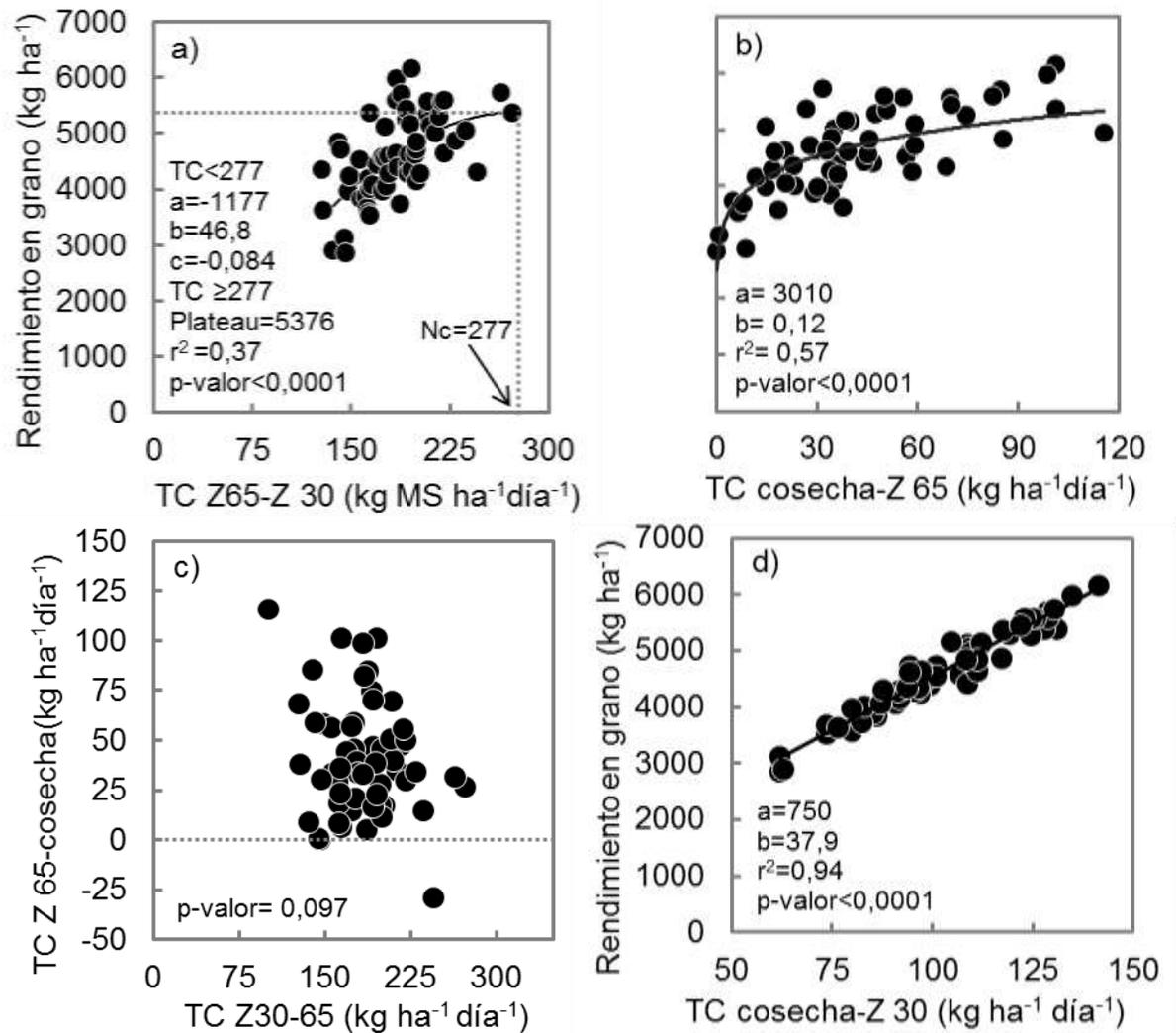
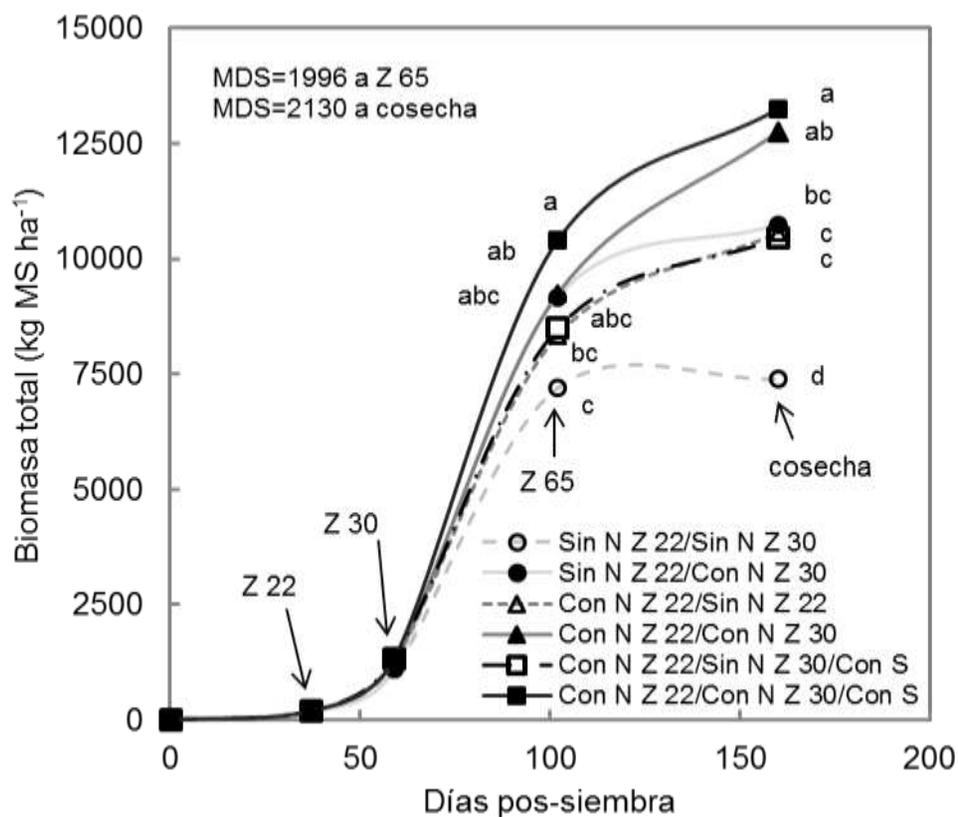


Figura 5. Rendimiento en grano en función de la tasa de crecimiento de Z 30 a Z 65 (a), rendimiento en función de la tasa de crecimiento entre Z 65 y cosecha (b), tasa de crecimiento de Z 65 a cosecha en función de la tasa de crecimiento de Z 30 a Z 65 (c) y rendimiento en función de la tasa de crecimiento entre Z 30 y cosecha (d).



Z30								
Tratamientos	Biomasa (Kg ha ⁻¹)	Contenido de N (%)	Absorción de N (Kg.ha ⁻¹)	Contenido de S (Mg g S)	Absorción de S (Kg ha ⁻¹)	Relación N/S	SPAD	LCCh
Testigo	1098	2,9	32	2,42	2,65	11,95	39	3,3
Con N	1291	2,7	35	2,33	3,00	11,62	30	3,5
Con N y S	1333	2,9	39	2,37	3,16	12,46	39	3,5
Promedio	1241	2,8	35	2,37	2,94	12,01	36	3,4
p-valor	0,6568	0,3984	0,5667	0,9955	0,8033	0,6157	0,4849	0,702
CV	22,87	11,12	25,47	12,07	26,07	11,56	10,97	11,36
DMS	532	0,6	17,06	0,512	1,44	2,53	7,70	0,7038

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Las curvas sigmoideas son dibujadas.

Figura 6. Producción de biomasa acumulada a lo largo del ciclo del cultivo, agrupado en función del agregado de N y S y principales variables medidas a Z 30.

Cuando el cultivo alcanzó Z 30 aún no se observaban diferencias entre tratamientos realizados a Z 22 (figura 7), esto puede estar explicado por el escaso tiempo entre Z 22 y Z 30 y el bajo crecimiento en el período (considerando que ninguno de los tratamientos logró el valor crítico de biomasa de 2330 kg MS ha⁻¹, Hoffman et al., 2013), encontrándose a su vez por debajo de los 2535 kg MS ha⁻¹ reportados por Mazzilli (2004, figura 7). Cabe mencionar que también durante el período previo a Z 30, la absorción de N pudo haber estado limitada, ya que a pesar de la baja biomasa producida y por tanto escasa dilución, los valores de N en planta fueron bajos, sin efecto tratamiento (Baethgen, 1992). Esto llevó a que la RAN estimada a Z 30 fuera tan solo de 6 y 14% cuando se agregó N o N y S respectivamente, aplicados a Z 22. Este fenómeno puede estar explicado por las condiciones climáticas del año, con temperaturas elevadas y pocas lluvias, que ocasionaron un período Z 22 - Z30 muy corto (22 días, 19 desde la aplicación) comparándolo con la duración en otros años (31 días, invierno 2013, Hoffman y Fassana, 2014a), el cual no permitió el crecimiento necesario y por lo tanto tampoco se dio la absorción de N y S esperada. Sin embargo, los nutrientes no se perdieron, permaneciendo en el suelo, dado que luego se expresan las diferencias a Z 65 como se verá más adelante (figura 7).

A pesar de la baja concentración de nitrógeno en planta a Z 30, la tasa de acumulación de nitrógeno desde Z 22 hasta Z 30 fue mayor a 1 kg ha⁻¹día⁻¹ (datos no mostrados), semejante a lo reportado García Lamothe, citado por García (2004) y a los 0,82 kg N ha⁻¹día⁻¹ que obtuvieron en promedio Cha y Durán (2001). Tampoco existieron diferencias en los índices indirectos del estatus nutricional como los índices de verde y clorofila (LCCh y SPAD respectivamente). Importa destacar, que no se encontró relación entre los dos índices anteriormente mencionados y la concentración de N en planta ($r^2= 0,02$ y 0,001 para SPAD y LCCh respectivamente).

A Z 65, los tratamientos que tuvieron agregado a Z 22 y Z 30 se diferenciaron del testigo, mientras que los tratamientos que tuvieron agregado de fertilizante solamente en uno de estos estadios, muestran diferencias, pero las mismas no fueron significativas.

A cosecha las diferencias observadas demuestran el efecto que tuvo el agregado de N a Z 22 en biomasa (figura 7) y en rendimiento (como fue mencionado en el capítulo anterior). Esto va acorde al modelo de facultad de agronomía, que predecía respuesta a dicho agregado, dado los niveles de N-NO₃- existentes en el suelo (8 ppm promedio, Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001, Hoffman et al. 2010). A su vez el agregado de N a Z30 también tuvo la respuesta esperada en base a la concentración del N en planta (2,8%, Baethgen, 1992), permitiendo obtener los mayores rendimientos y la mayor acumulación de biomasa a cosecha (figura 7).

4.3.2 Dinámica de la absorción de nitrógeno

La absorción del nitrógeno está ligada al crecimiento del cultivo (Perdomo y Barbazán, 1999c). La figura 8, muestra una relación entre el crecimiento y la absorción de N de forma lineal entre Z 30 y Z 65, donde el crecimiento explica en un 77% las diferencias en absorción de N. En este caso la relación fue de 35 kg de N absorbidos por cada 1000 kg de MS ha⁻¹ producidos, similar a los 33 kg de N reportados por Cha y Durán (2001).

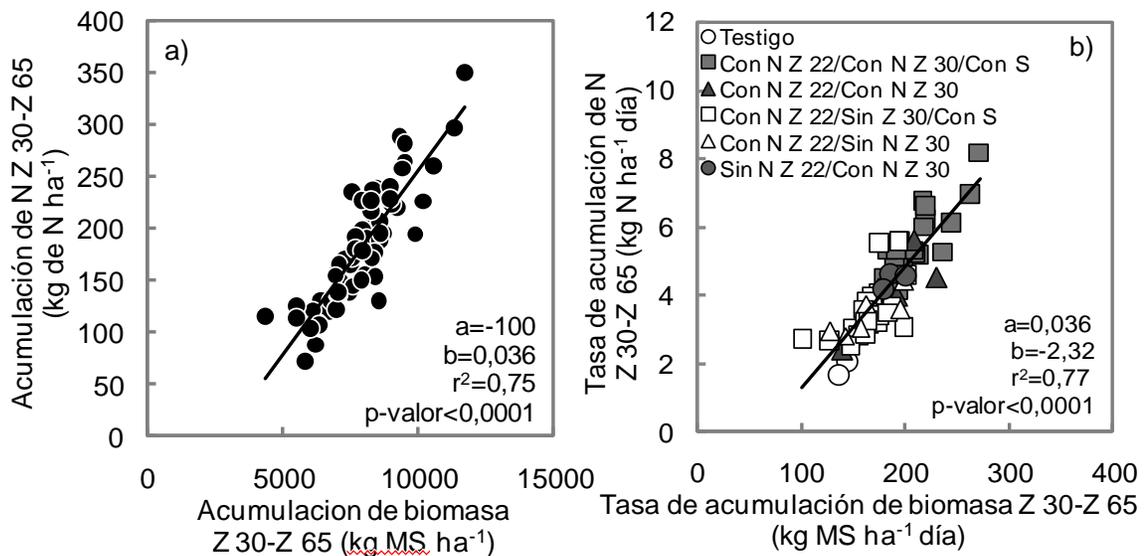


Figura 7. Acumulación de N entre Z 30 y Z 65 en función de la acumulación de biomasa en el mismo período(a), y tasa de acumulación de N entre Z 30 y Z 65 en función de la tasa de acumulación de biomasa en el mismo período según el agregado de N y S a Z 22 y N a Z 30(b).

Vista la relación entre crecimiento y absorción de N, es esperable que la acumulación de N muestre relación con el rendimiento (figura 9). Cuando se observa la absorción de N a Z 65 y cosecha con respecto al rendimiento, se ve que el nivel crítico de N absorbido a cosecha coincide con lo reportado por Cha y Durán (2001), mientras que el encontrado para Z 65 es un valor muy superior si se los compara con los 110 kg reportados en 2011 en la red de experimentos de manejo de trigo (Hoffman et al., 2015b). Este valor crítico de 270 kg de N ha⁻¹ a Z 65, en promedio implicó una pérdida aproximada a los 120 kg de N hasta la cosecha. Como ya fue mencionado anteriormente, el cultivo tuvo un bajo crecimiento entre la siembra y Z 30, lo que habría motivado que luego de este estadio, cuando las condiciones climáticas fueron favorables, que el cultivo creciera a una tasa elevada provocando alta absorción de N (figura 8). A su vez

la disponibilidad del N, debido al alto aporte por parte del suelo, y al estímulo que podría haberse dado por el agregado de N (se discutirá más adelante), también podrían estar involucrados en la alta absorción de N, explicando así el alto valor crítico encontrado a Z 65.

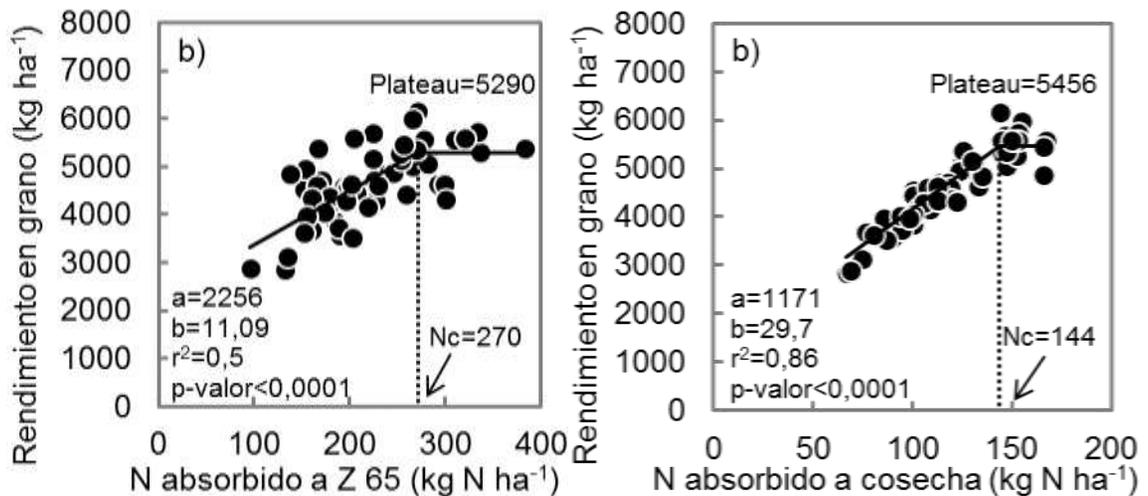


Figura 8. Rendimiento en grano en función del N absorbido a Z 65 (a), y rendimiento en grano en función del N absorbido a cosecha (b).

Viega, citado por Mazzilli (2004), describe para la absorción del nitrógeno una curva sigmoideal, en este trabajo ocurre un máximo de absorción a Z 65 y luego una caída hasta la cosecha (figura 10), similares resultados fueron reportados por Cha y Durán (2001).

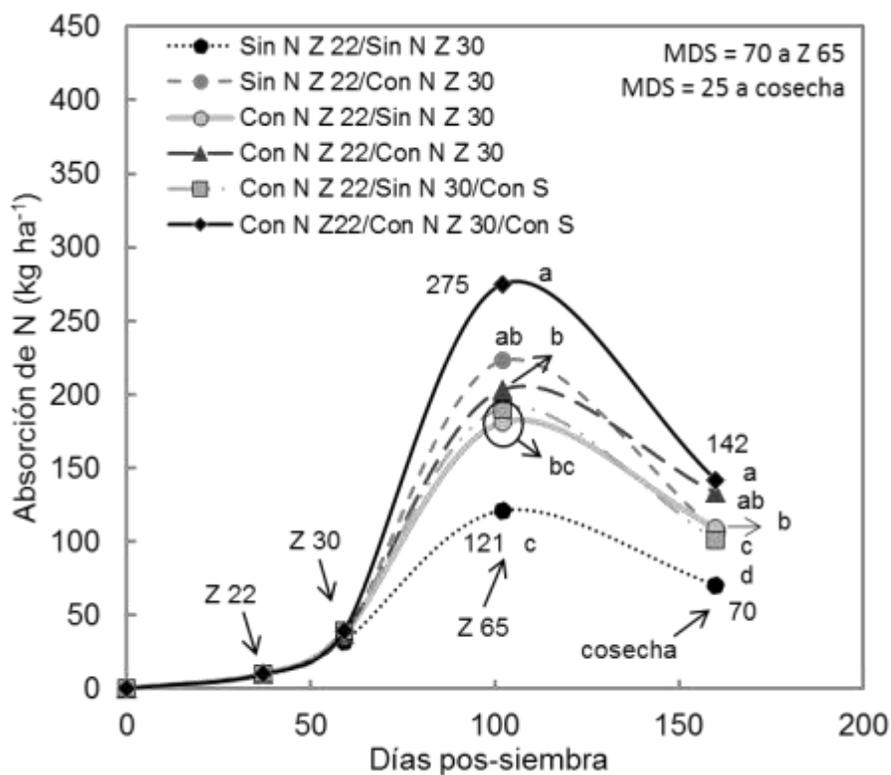
A Z 65 el tratamiento que presento mayor acumulación de biomasa y N, fue el que recibió N y S a Z 22 y N a Z 30, lográndose acumulaciones totales próximas a los 280 kg de N ha⁻¹, con una tasa absorción muy elevada de 5,5 kg de N ha⁻¹ día⁻¹ en el período Z 30 - Z 65, superando así los máximos de 4 - 5 kg de N ha⁻¹ día⁻¹ que reporta García Lamothe, citado por García (2004), como tasas de absorción de N que absorbería un trigo en ese período. Estos resultados fueron similares a los máximos citados por Cha y Durán (2001) trabajando en chacras comerciales con agregados de hasta 90 kg de N. Cabe destacar que en promedio Cha y Durán (2001), obtuvieron absorciones para este período menores a 2,5 kg N ha⁻¹ día⁻¹. A su vez en algunos tratamientos se lograron tasas de 8 kg N ha⁻¹ día⁻¹ (figura 8).

Por su parte el testigo sin agregados de N pos siembra acumuló 120 kg de N superando así los 110 kg reportados en 2011 en la red de experimentos de manejo de trigo (Hoffman et al., 2015b), a pesar de esto el rendimiento fue

de 3000 kg ha⁻¹ (figura 5). Nuevamente queda en evidencia el alto aporte de N del suelo en el cual se realizó este trabajo, así como también las limitantes climáticas que posiblemente no permitieron la obtención de mayores rendimientos.

Pese a que el testigo y los tratamientos que no recibieron N a Z 30 son estadísticamente iguales hasta Z 65, existe una gran diferencia por el agregado de N a Z 22. Esta diferencia no es estadísticamente significativa como consecuencia de una MDS alta (figura 10), sin embargo, trabajando con Tukey al 0.1 el que recibió N y S a Z 22 fue superior al testigo (MDS=63 kg).

Cuando se agregó N a Z 22 y Z 30 el agregado de S permitió absorber 70 kg ha⁻¹ más de N, esto concuerda con lo mencionado por De Bona et al. (2011), en donde se expresa que el S permite incrementar la absorción de N, repercutiendo en la recuperación aparente de N (RAN) como se verá posteriormente. Hoffman et al. (2015b), mencionan que para lograr tasas altas de N recuperado es necesario una buena disponibilidad de S, aumentando su importancia cuanto mayor es la dosis de N necesaria. Resultados similares se observan en la figura 10.



Tratamientos			Tasas	
Z 22		Z 30	T.C Z 30 - Z 65	T.Abs N Z 30 - Z 65
N	S	N	(kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	(kg ha ⁻¹ día ⁻¹)
Sin	Sin	Sin	142 c	2,06 c
		Con	188 ab	4,44 ab
Con	Sin	Sin	164 bc	3,40 bc
		Con	185 abc	3,91 b
	Con	Sin	167 abc	3,51 bc
		Con	211 a	5,49 a
Promedio			176	3,89
p-valor			<0,0001	<0,0001
CV			13,83	20,98
MDS			45,36	1,6

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Las curvas sigmoideas son dibujadas.

Figura 9. Absorción de N acumulada a lo largo del cultivo, tasa de crecimiento y tasa de absorción de N entre Z 30 y Z 65, agrupado en función de N y S agregados a Z 22 y Z30.

Desde Z 65 a cosecha todos los tratamientos perdieron N (figuras 10 y 11). Los que presentaron las mayores cantidades de N absorbidas a Z 65 fueron los que más perdieron hacia el final del ciclo, coincidiendo con lo reportado por algunos autores (Kanwarpal y Waines, Bulman y Smith, citados por Cha y Durán 2001, Cha y Durán 2001). Mediante una línea punteada de referencia en la figura 11a se indica la absorción esperable en caso de que no se produjeran pérdidas ni ganancias entre el N absorbido a Z 65 y a cosecha. Que todos los valores estén por debajo pone de manifiesto que en todos los casos se produjeron pérdidas luego de Z 65. Algo a destacar a cosecha es el cambio de ranking del tratamiento que tuvo solo N Z 30 y el tratamiento que recibió N a Z 22 y Z 30. Como era de esperar el testigo fue el que presentó la menor absorción de N, a pesar de esto se observaron pérdidas de N (figura 10).

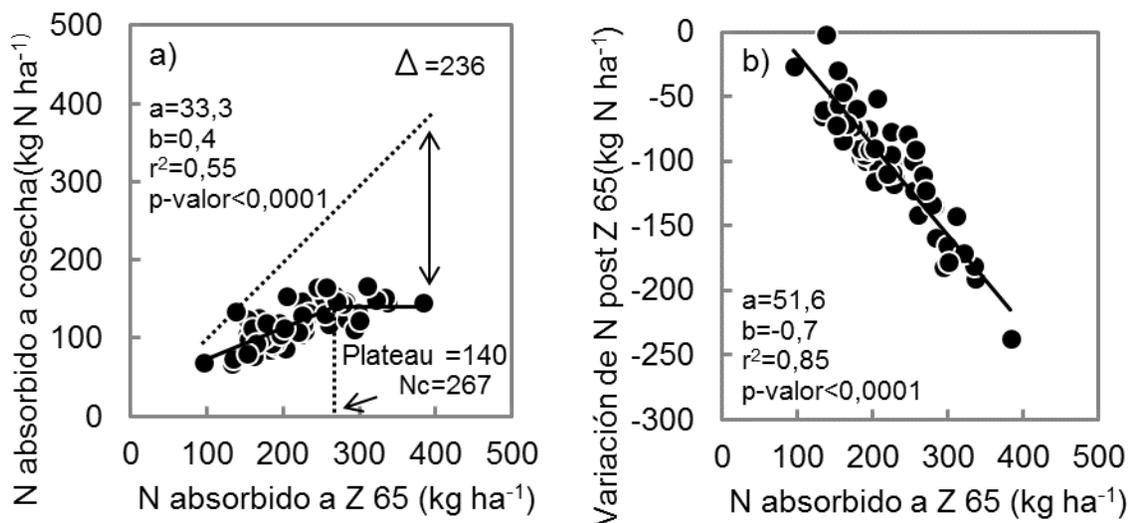


Figura 10. N total a cosecha en función de la cantidad de N absorbido a Z 65 (a) y relación entre la cantidad de N absorbido a Z 65 y la variación posterior a este estadio (b).

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la cantidad de N absorbido a Z 65 explicó un 55% del N a cosecha. Por su parte, Cha y Durán (2001), en su trabajo encontraron que solo el 36% de N absorbido a Z 47 explica el N que hay a cosecha, igualmente algunos autores señalan que podría llegar a explicar entre el 70 y 80 % (Pyare Lal y Sharma, citados por González y Trujillo 1995, García y Bernardo, citados por Reussi et al. 2012).

Es preciso mencionar que mayores cantidades de N absorbidos en este estadio no siempre llevan a mayores cantidades de N al final del ciclo, en este trabajo luego de 267 kg de N a Z 65 se produjo un plateau (figura 11a). Esto debería llevar a que luego de este punto las pérdidas no fuesen lineales sino de

forma cuadrática, pero no se observó una relación cuadrática significativa para la figura 11b (p-valor: 0.122). En base a estos resultados, se pueden llegar a perder hasta 240 kg de N, evidenciando las ineficiencias en el uso del N cuando las cantidades absorbidas son elevadas, coincidiendo con lo reportado por Vansanford y Mackown, citados por Mazzilli (2004), los cuales plantean que cuanto mayor es la acumulación de N en los tejidos pre antesis, más ineficiente se vuelve el proceso de retranslocación (figura 11b). Similares pérdidas encontraron Cha y Durán (2001) entre Z 47 y cosecha las cuales tuvieron un máximo de 207 kg N ha⁻¹.

4.3.3 Dinámica de absorción de azufre

La absorción del S está relacionada a la del N (Zhao et al., 1999). En este sentido, la absorción de azufre está condicionada por el N agregado, dado que cuando no se agregó N a Z 30 no se lograron altos contenidos de S (figura 12a, ver anexo 2).

Por su parte Dijkshoorn y Van Wijk, citados por De Bona et al. (2011), sugieren que la absorción y asimilación de estos nutrientes depende de la relación entre ellos dentro de la planta. En este sentido se encontró una relación exponencial entre el N y el S absorbido a Z 65 (figura 12a), siendo el punto de inflexión 270 kg de N y 24 kg de S. Hasta este punto la relación se mantiene casi lineal, siendo la misma de entre 10 y 12 ($r^2=0,7$), coincidiendo con lo planteado por Reussi et al. (2012). A cosecha la relación es lineal ($r^2=0,6$, figura 12b), los niveles críticos de N y S absorbidos para obtener los máximos rendimientos se corresponden (figura 9 y anexo 3), destacándose que la relación entre estos dos nutrientes disminuye a 8, lo que coincide con lo mencionado por Reussi et al. (2012), los cuales plantean una menor dilución del azufre a medida que avanza el ciclo. Por lo tanto, como mencionan Zhao et al. (1999), sería importante mantener niveles adecuados de S durante todo el ciclo.

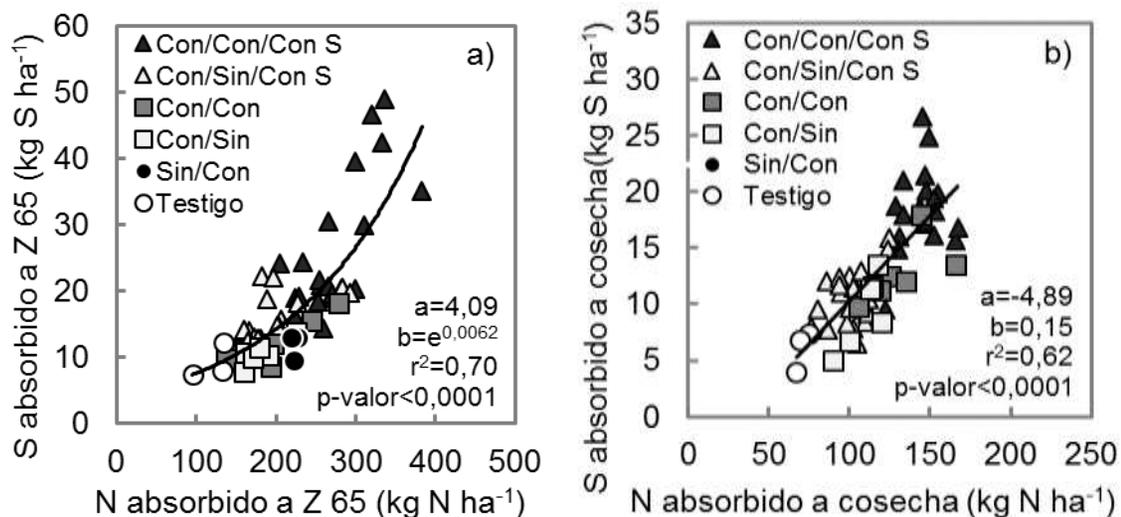
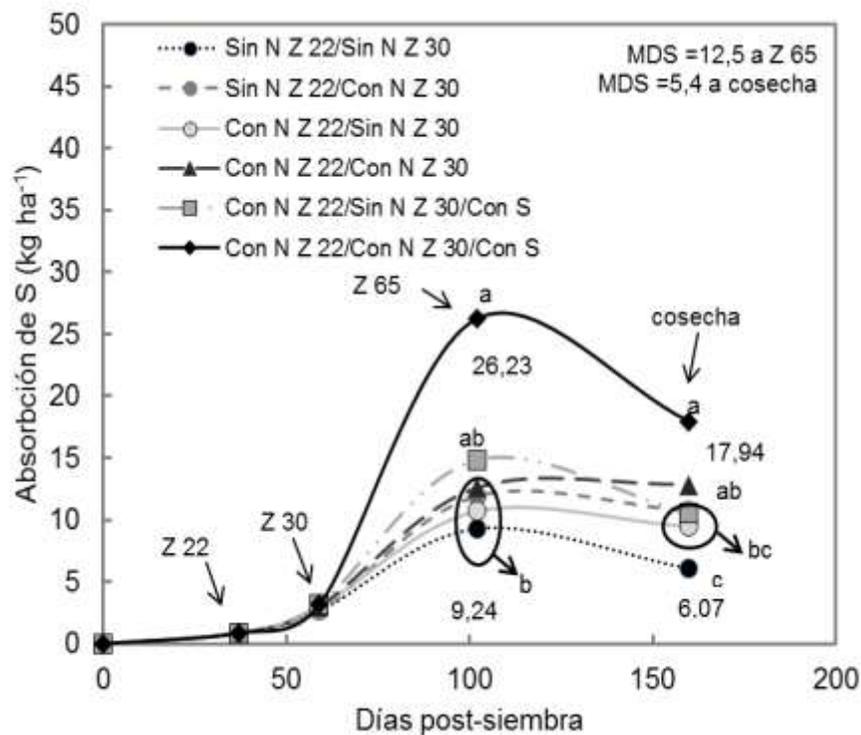


Figura 11. S absorbido a Z 65 en función del N absorbido a Z 65 agrupados según el agregado de N y S (a), y S absorbido a cosecha en función del N absorbido a cosecha según el agregado de N y S (b).

Si estudiamos la acumulación del azufre, este tiene un comportamiento similar al del nitrógeno, dado que tienden a obtenerse las máximas acumulaciones a Z 65 (figura 13). Estas altas absorciones de S a Z 65 pueden estar provocadas por la alta absorción de N mencionadas anteriormente, reafirmando así lo dicho sobre la relación que mantienen el azufre y el nitrógeno dentro de la planta (Dijkshoorn y Van Wijk, citados por De Bona et al., 2011).

Por otra parte, los tratamientos que contaron con agregado de S pero se diferenciaron en la dosis de N a Z 30, muestran la importancia del agregado de N para la absorción de S (Zhao et al., 1999, figura 13). A pesar de que los tratamientos que recibieron N y S a Z 22 pero se diferenciaron en la dosis de N a Z 30 (siendo la misma de 50 kg ha^{-1} o 0 kg ha^{-1}) no fueron estadísticamente diferentes usando Tukey al 0.05, si existen diferencias cuando se utiliza Tukey al 0.1 (MDS= 11,26).

Entre Z 65 y cosecha la cantidad de S total en planta disminuyó (figuras 13 y 14), similar a lo ocurrido con el N, aunque esta caída fue relativamente menor a la del N por la baja en la relación mencionada anteriormente, destacándose que en algunos tratamientos no se manifestaron pérdidas pudiendo en ocasiones generarse aumentos (figuras 13 y 14).



Tratamientos			Tasas	
Z 22	Z 30		T.C Z 30 - Z 65 (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	T.Abs S Z 30 - Z 65 (kg ha ⁻¹)
N	S	N		
Sin	Sin	Sin	142 c	0,15 b
		Con	188 ab	0,22 b
Con	Sin	Sin	164 bc	0,18 b
		Con	185 abc	0,22 b
	Con	Sin	167 abc	0,27 ab
		Con	211 a	0,54 a
Promedio			176	0,26
p-valor			<0,0001	<0,0001
CV			13,83	46,64
MDS			45,36	0,285

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Las curvas sigmoideas son dibujadas.

Figura 12. Absorción de S, tasas de acumulación y crecimiento en el cultivo según el agregado de N y S a Z 22 y N a Z 30.

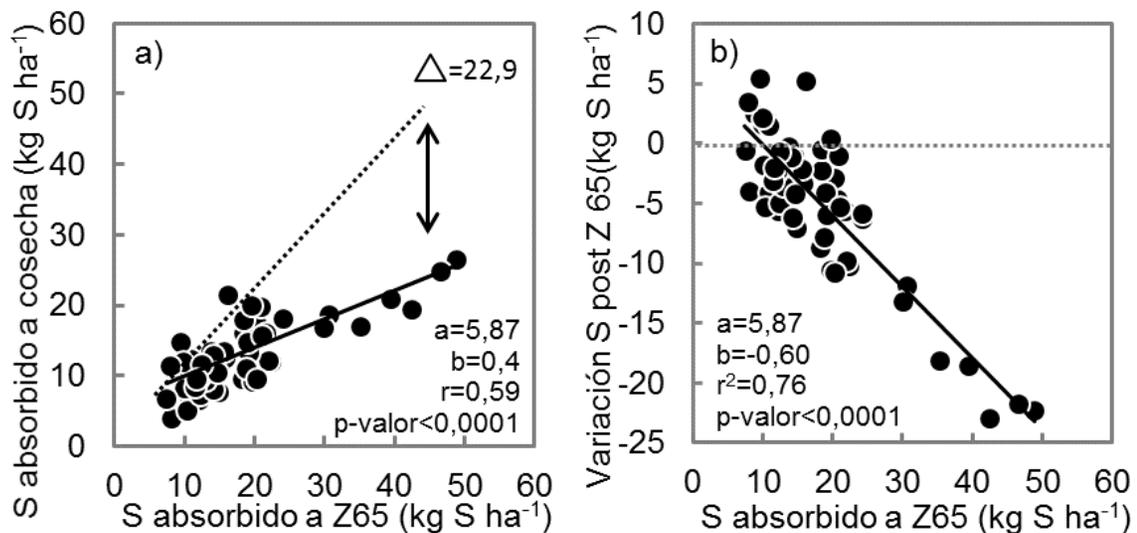


Figura 13. S absorbido a cosecha en función de lo absorbido a Z 65 (a) y relación entre el S absorbido a Z 65 y la variación de S posterior a este estadio (b).

Cuando analizamos la relación entre el azufre a Z 65 y a cosecha (figura 14), observamos que al igual que para el nitrógeno, mayores absorciones de azufre a Z 65 generan mayores pérdidas de éste a cosecha. Por otra parte, el S absorbido a Z 65 explica el 60% de lo que hay a cosecha, coincidiendo con lo reportado por Zhao et al. (1999), Reussi et al. (2012). Hay que destacar que en la bibliografía no se encontró información de cambios de la cantidad de S absorbido entre Z 65 y cosecha (figura 13), pero sí coincide con lo planteado anteriormente de que tiene que existir una relación en planta, aunque la relación N:S disminuye hacia final de ciclo, si se pierde N son esperables pérdidas de S (Dijkshoorn y Van Wijk, citados por De Bona et al. 2011, Reussi et al. 2012).

4.4 INFLUENCIA DEL AZUFRE EN LA EFICIENCIA DEL USO DEL NITRÓGENO

Algunos autores como Dobermann (2007), Salvagiotti et al. (2009), Hoffman et al. (2015b), describen que el azufre repercute en la EUN, y principalmente sobre la RAN, no siendo tan importante su efecto sobre la EFN.

Para analizar el efecto que tiene el azufre en la EUN, se confeccionó el cuadro 5 en base a lo sugerido por Dobermann (2007). La EUN se ubicó entorno a los 20 kg de grano kg de N⁻¹, estando dentro de lo esperado según lo reportado por distintos autores (Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001,

Hoffman y Perdomo 2011), sin diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tratamientos.

Cuadro 5. Eficiencia de uso, eficiencia fisiológica, recuperación de nitrógeno según el agregado de N y S a Z 22 y Z 30.

N agregado a Z 22 (§)	Sin N		Con N			
	Sin S		Sin S		Con S	
S agregado a Z 22	Sin N	Con N	Sin N	Con N	Sin N	Con N
N agregado a Z 30 (§)	Sin N	Con N	Sin N	Con N	Sin N	Con N
N agregado Z 22 (kg ha ⁻¹)	0	0	50	50	50	50
N agregado Z 30 (kg ha ⁻¹)	0	50	0	50	0	50
N ABS Z 22 (kg ha ⁻¹)*	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7
N ABS Z 30 (kg ha ⁻¹)*	32	32	35	35	39	39
N ABS Z 65 (kg ha ⁻¹)*	121	223	181	203	190	275
Δ N ABS Z 30-Z 22 (kg ha ⁻¹)	22,3	22,3	25,2	25,2	29,2	29,2
Δ N ABS Z 65-Z 30 (kg ha ⁻¹)	89	191	146	168	151	236
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	2956	4274	4259	4920	4224	5248
EUN (kg kg ^{**})(p valor: 0,35)	-	26,4	26,1	19,6	25,4	22,9
RAN (%) ***	-	204a	120ab	82b	138ab	154ab
EF(kg kg ^{**})(p valor: 0,2)	-	12,9	21,7	24	18,4	14,9

* Z 22: 37 dps; Z 30: 59 dps; Z 65: 102 dps. §.- agregado de 50 kg de N ha⁻¹.

** kg de grano por kg de N.

***letras distintas muestran diferencias significativas según Tukey ($\alpha=0,05$), p-valor: 0,024.

No existieron diferencias significativas entre las EFN (cuadro 5). Los valores encontrados fueron relativamente bajos (en promedio 18,38) si lo comparamos con los reportados por distintos autores que muestran valores que van desde 20 a 65 kg de grano por kg de N (Huggins y Pan 1993, Rouanet 1994, Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2015b). Una de las causas que podría estar involucrada en los bajos valores de EFN, podría haber sido el hecho de no haber logrado concretar el potencial de producción de grano que el N absorbido podría permitir (Huggins y Pan 1993, Rouanet 1994, Salvagiotti et al. 2009).

Los tratamientos que recibieron solamente 50 kg ha⁻¹ de N a Z 30, lograron valores de RAN superiores que los que recibieron 100 kg de N (cuando los que reciben 100 kg de N no recibieron S, cuadro 5). Esto es coherente con lo dicho por distintos autores, donde menores agregados se asocian a una mayor recuperación aparente de N (García Lamothe 1994, Dobermann 2007, Hoffman et al. 2015b).

El agregado de S no logró incrementar la RAN de forma significativa, por lo que tuvo más efecto la dosis de N que el agregado de S. Pese a esto,

cuando se agregaron 100 kg de N, aunque el efecto no llega a ser significativo existe una gran diferencia, posiblemente debido al agregado de S, coincidiendo así con lo reportado (Zhao et al. 1999, Salvagiotti y Miralles 2008, Hoffman et al. 2013, Fontanetto et al., García, citados por Hoffman et al. 2015b).

Cuando se analiza la RAN (cuadro 5), se puede ver que en la mayoría de los casos supera el 100%. Estos resultados de recuperación aparente del N mayor al 100 % coincide con los encontrados por Terman y Brown, citados por Daniel et al. (1986), posiblemente asociados al fenómeno ANI (Pilbeam et al., citados por López et al., 2001), que será discutido a continuación.

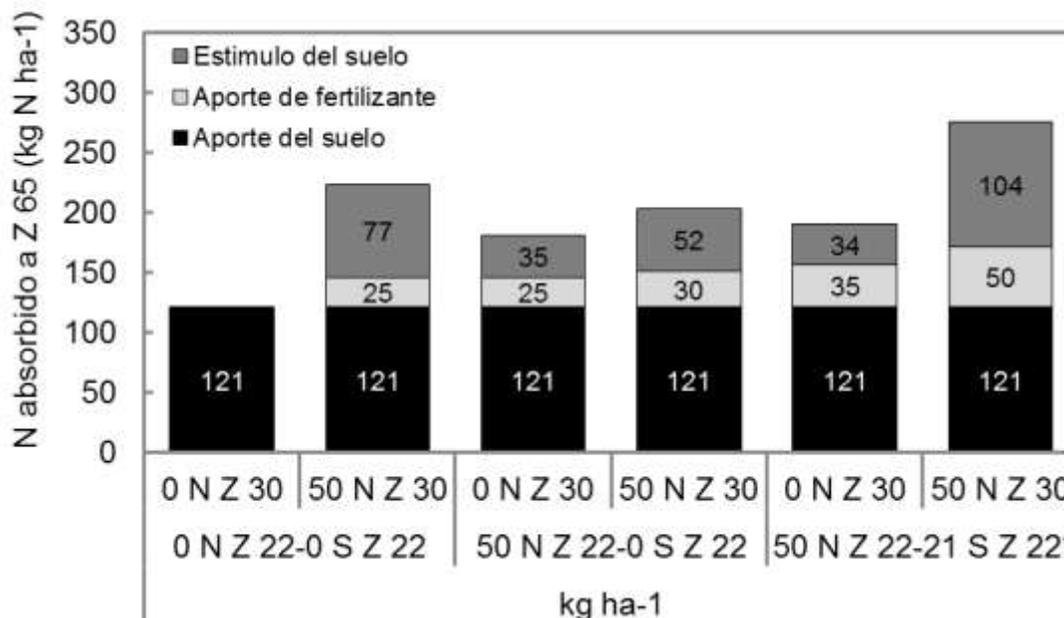
Una RAN superior al 100% resulta del fenómeno de estimulación al aporte de N por parte del suelo. Este fenómeno llamado ANI (Added Nitrogen Interaction), se trata de un aumento de la mineralización del nitrógeno del suelo causada por la estimulación que genera en la flora microbiana el agregado de nutrientes (Jenkinson et al., Raun et al., citados por López et al., 2001) o un aumento en crecimiento de las raíces que lleva a una mayor absorción (Aleksic et al., Monen Balba et al., Yoshida et al., citados por Daniel et al., 1986).

El sitio en donde se instaló el experimento, está sobre suelos que originalmente tenían elevados contenidos de MO (>5,0%) en el primer horizonte según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (MAP. DSF, 1979). Además se trata de una chacra joven rotada con pasturas con leguminosas, haciendo que sea más probable que ocurra el fenómeno ANI (Rao et al., 1992). Tampoco hubo limitantes en humedad del suelo pos Z 22, dado que de haber sido así, podría haberse limitado la mineralización del N y S del mismo (López et al., 2001).

Para poder visualizar en forma gráfica este efecto se procedió a realizar una estimación de la cantidad de N que surge como resultado de este estímulo (figura 15). Para esto se tomaron en cuenta en primer lugar la estimación de lo aportado por el suelo sin fertilización como base del cálculo (la absorción de N a nivel del testigo a Z 65). Luego se asumieron valores de recuperación del nitrógeno esperables sugeridos por Dobermann (2007), ya que si utilizáramos los obtenidos en este trabajo no podríamos analizar el efecto ANI debido a que este efecto está involucrado en la RAN obtenida. De esta forma, cuando se agregaron 50 Kg de N en total, asumiendo una RAN de 50% y 70 % sin y con aplicación S respectivamente, cuando el agregado fue de 100 Kg de N en total, las RAN fueron de 30% y 50% sin y con aplicación de S respectivamente.

La estimación con estos supuestos muestra que cuando el agregado de N fue de 50 kg a Z 22 el estímulo fue el menor observado, sin tener efecto el agregado de S. Pese a esto, cuando se agregaron 100 Kg de N en total, el S sí tuvo fuerte impacto, haciendo que lo estimado como estímulo del suelo se duplicara, llegando a 104 kg (figura 15). Este efecto del S puede estar asociado

al impacto que este nutriente tiene en la absorción de N (Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2015b) así como también a la posibilidad de que genere un efecto similar al ANI, reportado por Rao et al. (1992).



*21 S corresponde a kg S ha^{-1} aplicado en promedio por todas las fuentes.

Figura 14. Absorción de nitrógeno a Z 65 según el agregado adicional de N y S a Z 22 y N a Z 30 según origen del N, tomando como referencia de base los 121 kg de N aportados por el suelo cuando el cultivo no fue fertilizado post siembra.

También se puede observar que cuando solamente se agregaron 50 kg de N (sin S), el estímulo varió según el estadio del cultivo, siendo superior cuando el agregado se realizó a Z 30 (figura 15).

Como resumen de la figura 15 se podría decir que el mayor estímulo al suelo se observó con las mayores dosis de N en presencia de S.

Considerando que estos resultados ocurrieron en un suelo con una alta capacidad de aporte de N, dado que el testigo absorbió a Z 65 120 kg de N superando el crítico reportado en la red de experimentos de manejo de trigo en el 2011 (Hoffman et al., 2015b), un efecto ANI de esta magnitud (máximo estímulo observado 104 kg de N), podría ser dependiente de que el suelo aún conserve parte de su capacidad de aporte de N. Rao et al. (1992), mencionan la importancia de que el suelo tenga capacidad de aporte de N, por lo que en suelos con caídas en el PMN (cada vez más común en Uruguay según lo reportado por Hoffman et al., 2013) podría no darse este tipo de estímulo.

4.5 EFECTO DE LAS FUENTES EN LA DINÁMICA DE LA ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE

Las bajas precipitaciones pos aplicación y la elevada temperatura durante el ciclo del cultivo anteriormente discutidas, seguramente afectaron el comportamiento de las fuentes evaluadas. Es por ello que los resultados en este trabajo deben ser analizados en el marco de las condiciones del experimento, bajas precipitaciones pos aplicación, destacándose además que entre el agregado de las distintas fuentes entre Z 22 y Z 30 solo transcurrieron 19 días, y como fue mencionado anteriormente la producción de biomasa y la absorción de N hasta este período fue muy baja para todos los tratamientos, sin diferenciarse entre ellos ni con el testigo.

Si bien luego de la aplicación las precipitaciones fueron escasas, es posible inferir que la humedad en suelo (por la baja demanda atmosférica y lluvias anteriores a Z 22) no hubiese limitado la respuesta al N de fuentes amoniacales. Por otro lado, la ausencia de condiciones favorables para lixiviación y desnitrificación, establece una condición general en la que no deberían esperarse grandes diferencias entre las fuentes evaluadas (Tisdale et al., 1993).

Para Entec 26[®], una fuente con escasa información disponible en cuanto a la dinámica de entrega del N y S, solo se cuenta con la información que suministra la empresa. Es una fuente con alta concentración de S en relación al N, lenta liberación de N, apropiado para condiciones de lixiviación. Esta fuente podría haber mostrado peor desempeño en una situación deficitaria de N, sin embargo logro igual rendimiento y absorción de N que el resto de las fuentes, posiblemente explicado por un efecto del S, o porque la liberación de N fue más rápida de lo esperado.

Si bien el objetivo principal del trabajo fue evaluar las diferencias entre fuentes en cuanto a las curvas de absorción de N y S, las distintas fuentes no generaron diferencias entre ellas, ni en rendimiento, ni en biomasa, ni tampoco en IC (cuadro 6).

El agregado de N a Z 30 (analizado en capítulos anteriores), no mostró interacción con las fuentes, por lo que el estudio se realiza para el promedio de con y sin N a Z 30 (cuadros 6 y 7). En promedio, la única diferencia estadística en rendimiento observada, se dio entre el testigo sin N y la urea azufrada.

Cuadro 6. Biomasa a cosecha, índice de cosecha y rendimiento en grano en función de las fuentes utilizadas a Z 22, para el promedio de N agregado a Z 30.

Fuente	Dosis S (kg ha ⁻¹)	BI (kg ha ⁻¹)	IC (%)	RE (kg ha ⁻¹)
Testigo	0	9071	40	3615b
Urea	0	11223	40	4397ab
UAN	0	12108	40	4783ab
Urea azufrada	7,5	12620	40	5051a
Urea con azufertil	7,5	11136	40	4527ab
Urea 50 + s. amonio 50	17,6	12078	40	4810ab
Entec 26 [®]	25	11904	40	4788ab
Sulfato de amonio	57	11767	40	4674ab
Líquido N 28 - S 5	9	11648	40	4719ab
Líquido N 24 - S 10	21	11857	39	4582ab
Promedio		11541	40	4595
CV		7,22	3,05	7,26
p-valor Fuente		0,07	0,48	0,038
p-valor N Z30		<0,0001	0,02	<0,0001
p-valor Fuente*NZ30		0,426	0,74	0,21
DMS		3280	2,9	1209

Medias con una letra común no son significativamente diferentes en misma columna Tukey ($\alpha=0,05$).

Tampoco se encontró interacción entre las fuentes y el agregado de N a Z 30, para la biomasa, el N en planta (%) y el N en kg ha⁻¹ a Z 65 (cuadros 7 y 8).

Cuadro 7. Análisis de la varianza del N absorbido a Z 65 en función de la fuente, el agregado de N a Z 30 y la interacción entre ellas (CV=15,6%).

F. Variación	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo	185229,60	39	4749,48	4,11	0,0007	
Bloque	5898,23	2	2949,12	2,55	0,1031	
Fuentes	52331,93	9	5814,66	3,47	0,0119	
Bloque*fuentes	30170,77	18	1676,15	1,45	0,2101	(Bloque*fuentes)
Z 30	82288,07	1	82288,07	71,17	<0,0001	
Fuentes*Z 30	14540,60	9	1615,62	1,40	0,2539	
Error	23124,33	20	1156,22			
Total	208353,93	59				

Cuadro 8. Biomasa, concentración y kg ha^{-1} de N a Z 65 en función de las fuentes utilizadas a Z 22, para el promedio de N agregado a Z 30.

Fuente	Dosis S (kg ha^{-1})	BI Z65 (kg ha^{-1})	N Z65 (%)	N Z65 (kg ha^{-1})
Testigo	0	8189	2,05b	172 b
Urea	0	9208	2,13b	196 ab
UAN	0	8372	2,22ab	188 ab
Urea azufrada	7,5	8370	2,37ab	199 ab
Urea con azufertil	7,5	9873	2,47ab	246 ab
Urea 50 + s. amonio 50	17,6	10133	2,53ab	260 a
Entec 26 [®]	25	10072	2,26ab	230 ab
Sulfato de amonio	57	9841	2,65a	265 a
Líquido N 28 - S 5	9	8804	2,41ab	214 ab
Líquido N 24 - S 10	21	9032	2,36ab	214 ab
Promedio		8372	2,345	218
CV		8,73	10,6	15,6
p-valor Fuente		0,0804	0,0087	0,0119
p-valor N Z30		<0,0001	<0,0001	<0,0001
p-valor Fuente*NZ30		0,4063	0,1282	0,2539
DMS		2599	0,482	84,7

Medias con una letra común no son significativamente diferentes en misma columna Tukey ($\alpha=0,05$).

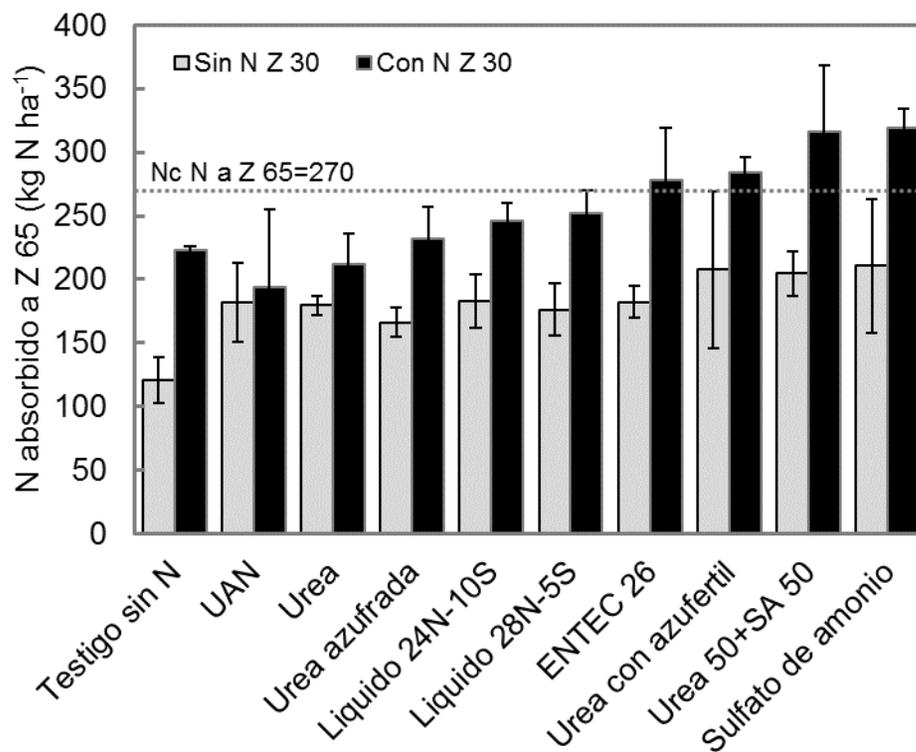
Una acumulación de MS inferior a lo esperado para el cultivar sembrado y la elevada absorción de N a Z 65 (cuadro 8), seguramente sean parte de las causas de elevada concentración de N en planta (en promedio 2,3 %, Diovisalvi et al., 2014). En este sentido el SA y la mezcla de urea + SA al 50 % fueron las únicas fuentes que lograron diferenciarse del testigo en cuanto a absorción de N a Z 65 (cuadro 8).

4.5.1 Curvas de absorción de nitrógeno y azufre para las distintas fuentes evaluadas

Uno de los objetivos de este trabajo era caracterizar la dinámica de absorción de N y S de distintas fuentes nitrógeno azufradas. En este sentido es esperable que las velocidades de aporte, la relación de N-S u otras diferencias entre fuentes, tengan un impacto en la forma en la que se absorbe el N y S.

En primer lugar, sin N a Z 30, ninguna de las fuentes logró absorber los 270 kg de N a Z 65 mencionados anteriormente como crítico para obtener el máximo rendimiento en grano (figuras 16 y 17b).

Con 100 kg de N total agregado, las fuentes que lograron superar este crítico fueron urea con azufertil, urea con SA, SA y el Entec 26[®], presentando todas S en su formulación, aunque con dosis muy variadas, teniendo presente que la urea con azufertil adicionó 7,5, la urea con SA 17,6, el Entec 26[®] 25 y el SA 57 kg S ha⁻¹ y presentaron una absorción de N a Z 65 de 284, 316, 278 y 319 kg N ha⁻¹ respectivamente (figuras 16 y 17c).



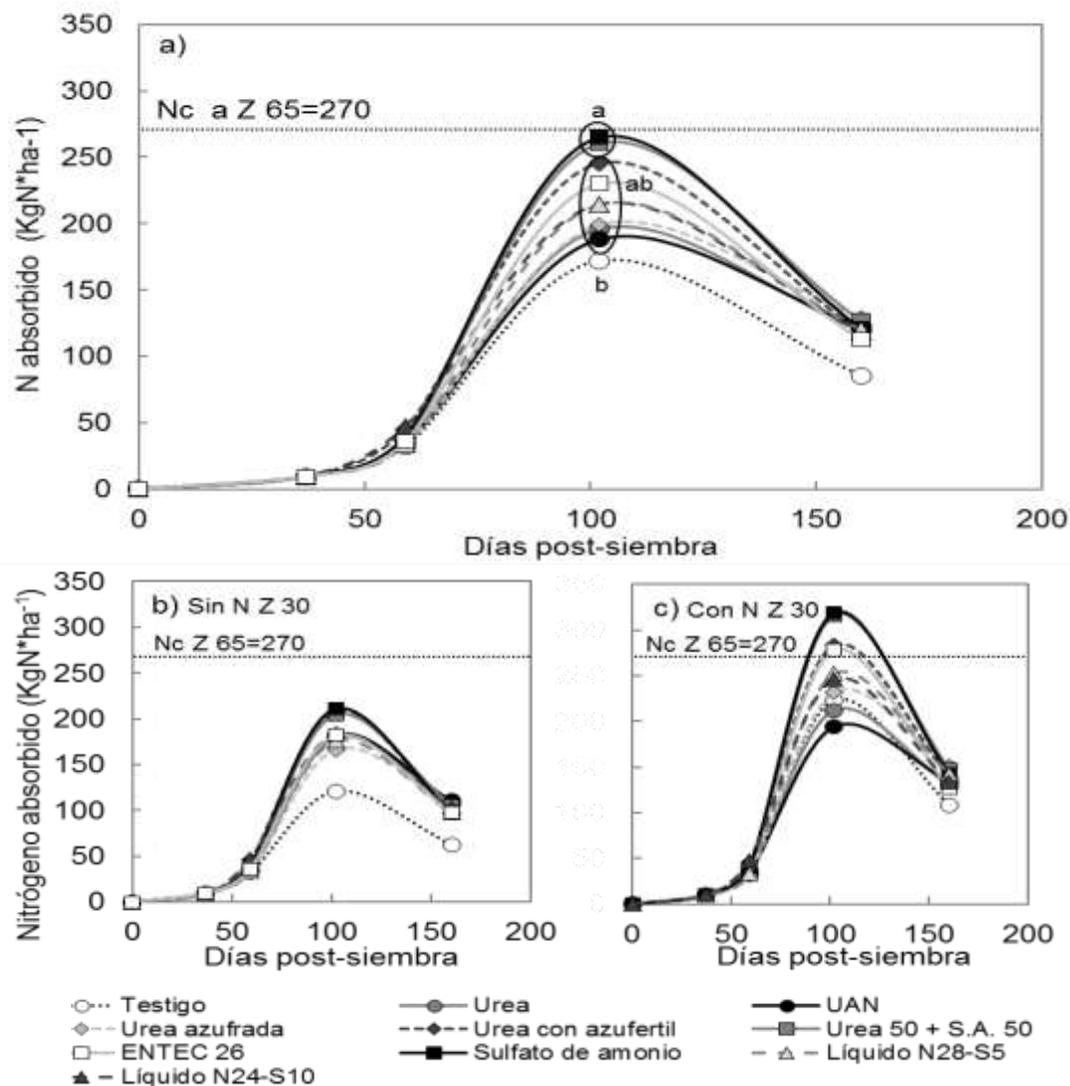
* Se utiliza el desvío estándar ya que al no poder realizar análisis estadístico no corresponde usar el error estándar.

Figura 15. Absorción de N a Z 65 de las distintas fuentes evaluadas, con y sin agregado de N a Z 30. Las barras corresponden al desvío estándar*.

A cosecha, las diferencias entre las fuentes disminuyeron, en sintonía con lo analizado anteriormente, en donde a mayor acumulación de N genera mayores pérdidas (Cha y Durán, 2001), es así que en cuanto al N absorbido a cosecha no existieron diferencias estadísticas (figura 17a).

Es preciso mencionar, que como fue descrito en capítulos anteriores, solo se encontraron diferencias en la absorción de N a Z 65 cuando se agruparon los tratamientos según las dosis de N y/o el agregado de S.

Para estas condiciones de producción y condiciones climáticas, en cuanto a rendimiento en grano no fue relevante la elección de la fuente, siendo entre otros el costo de los nutrientes el que podría definir el criterio de elección, para un ambiente como el del experimento.



Media con letra distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Las curvas sigmoideas son dibujadas.

Figura 17. Acumulación de N a lo largo del ciclo del cultivo según fuente, en promedio (a), sin el agregado de N a Z 30 (b) y con N a Z 30 (c).

El N a Z 30, permitió mayor absorción de N a Z 65 y a cosecha. Por otra parte, las fuentes que lograron superar el nivel crítico de N absorbido a Z 65 para rendimiento en grano son aquellas que contienen más S en su formulación y que recibieron N a Z 30 (figuras 17b y c).

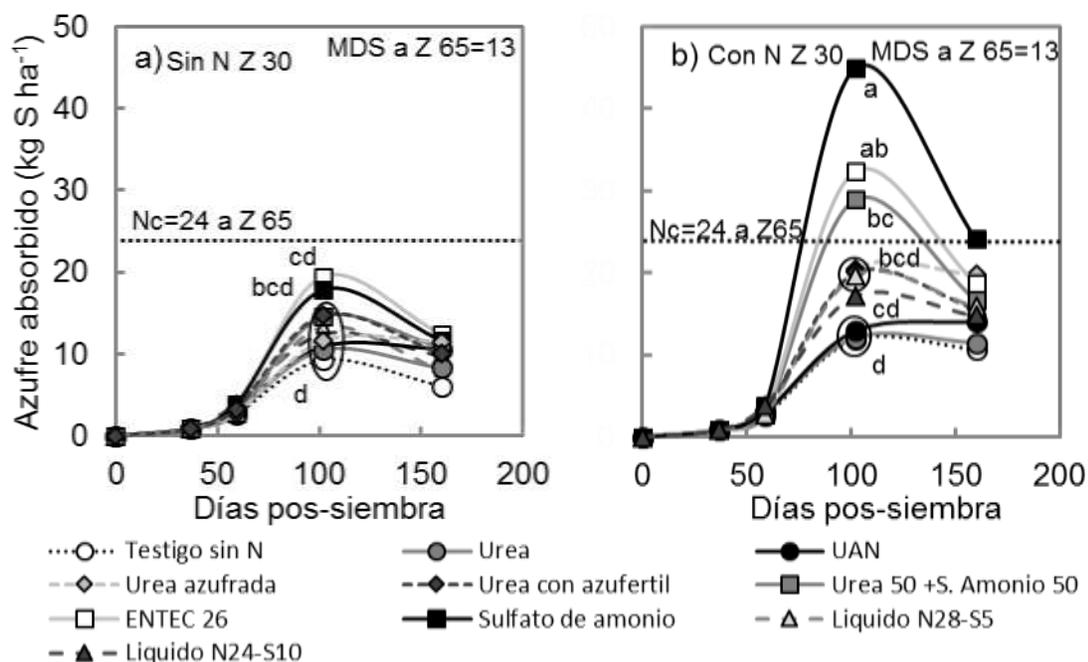
A diferencia de lo ocurrido con la absorción de N a Z 65 para el S absorbido en este estadio existió interacción entre las fuentes y el agregado de N en Z 30.

Cuadro 9. Análisis de la varianza del S absorbido a Z 65 en función de la fuente, el agregado de N a Z 30 y la interacción entre ellas (CV=22,2%).

F. Variación	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo	4704,68	39	120,63	7,75	<0,0001	
Bloque	1,98	2	0,99	0,06	0,9387	
Fuentes	2456,56	9	272,95	15,98	<0,0001	
Bloque*fuentes	307,48	18	17,08	1,10	0,4181	(Bloque*fuentes)
Z 30	1111,38	1	1111,38	71,36	<0,0001	
Fuentes*Z 30	827,28	9	91,92	5,90	0,0005	
Error	311,50	20	15,57			
Total	5016,18	59				

Con el S absorbido a Z 65, al igual que lo ocurrido con el N en este estadio, cuando no se agregó N a Z 30, ninguna fuente logró superar el nivel crítico de 24 kg de S absorbido a Z 65 para lograr los máximos rendimientos (ver anexo 4 y figura 18a), sin embargo el promedio de las fuentes que tienen S permiten mayor absorción de S que las que solamente cuentan con N, como fue analizado anteriormente.

Con N a Z 30, el Entec 26[®], el SA y urea más SA logran superar los 24 kg de S agregados, destacándose que son las fuentes con mayor concentración de S (ver anexo 4 y figura 18b). En este sentido observamos que el SA y la urea+SA fueron las únicas fuentes que se diferenciaron del testigo en absorción de N a Z 65, siendo esto coherente con lo visto anteriormente, en donde la absorción de N y S están relacionadas (Zhao et al. 1999, Dijkshoorn y Van Wijk, citados por De Bona et al. 2011).



Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Las curvas sigmoideas son dibujadas.

Figura 16. Acumulación de S a lo largo del ciclo del cultivo según fuente, sin el agregado de N a Z 30 (a) y con N a Z 30 (b).

Cuando no se aplicó N a Z 30, independientemente de la fuente utilizada, la absorción de S a Z 65 fue la menor desde el punto de vista estadístico. Cuando se agregó N a Z 30 y no se fertilizó a Z 22 o la fertilización consistió únicamente en N, las absorciones de S a Z 65 también estuvieron dentro de los menores valores observados (ver anexo 4).

En el otro extremo, vemos que las dos fuentes que aportaron más azufre ($SA=57 \text{ kg ha}^{-1}$ y Entec 26[®] $=25 \text{ kg ha}^{-1}$) con agregado de N a Z 30, fueron las que alcanzaron la mayor absorción de S a Z 65 ($SA=45 \text{ kg}$ y Entec 26[®] $=32 \text{ kg}$), siendo esto coherente con lo reportado por la bibliografía (Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2015b).

Las diferencias mencionadas anteriormente entre fuentes tienden a disminuir a cosecha lo cual puede ser explicado por las pérdidas ocurridas entre estos dos momentos al igual que lo observado con el N. Esto implica que en aquellos trabajos en los cuales solamente se mide el S o el N a cosecha, se podría estar subestimando la recuperación de los fertilizantes por parte del cultivo.

A cosecha la absorción de S debe analizarse en promedio de con y sin agregado de N a Z 30 ya que no existió interacción entre las fuentes agregadas a Z 22 y el N agregado a Z 30. Es así que la urea azufrada, el Entec 26[®] y el

SA, logran en promedio, diferenciarse de la urea y el testigo. Posiblemente esto pueda estar explicado por el aporte de S de las fuentes nombradas anteriormente. Igualmente, no se generaron diferencias en cuanto al rendimiento o la biomasa.

4.5.2 Efecto de las fuentes en la EUN y sus componentes

Luego de analizar como las distintas fuentes afectan la dinamica de la absorción de N y S, se hace preciso discutir el efecto sobre la eficiencia de uso del N, por su importancia economica y ambiental.

En este sentido, se calculó la RAN, EFN y la EUN a Z 65 y a cosecha, dado que se obtiene valores de absorcion distintos por las pérdidas que ocurren, afectando la RAN y EFN. Para su cálculo se utilizó la metodología de las diferencias planteada por Dobermann (2007, cuadro 10).

En primer lugar, la EUN no cambia con la fuente (cuadro 10). La media fue muy elevada (28 kg de grano por kg de N aplicado), cercano a lo reportado por Hoffman y Perdomo (2011) usando el modelo de facultad de agronomía (Baethgen 1992, Perdomo et al. 1999c, Perdomo et al. 1999d, Hoffman et al. 2001, Hoffman et al. 2010).

Cuando se analizó la RAN y la EFN a Z 65, tampoco se encontraron diferencias (cuadro 10). Sin embargo como fue mencionado en capítulos anteriores, si promediamos las fuentes con S en Z 22 y las comparamos con aquellas que no tuvieron S, a pesar de no ser significativos, se logran aumentos en la RAN, lo que coincidiría con lo mencionado por distintos autores (Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2015b).

A cosecha, como era de esperarse por las pérdidas de N, la RAN disminuye, y se aproxima a los valores reportados por Dobermann (2007), aunque en promedio siguen siendo elevados (cuadro 10).

La EFN a cosecha es la única que varía (cuadro 10), existiendo diferencias significativas entre el Entec 26[®], la urea, urea con azufertil y SA, pero esta no tuvo ningún efecto sobre la EUN, dado que presenta una asociación baja con esta variable ($r^2=0,13$ datos no mostrados) coincidiendo con lo reportado por la bibliografía (Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2015b).

Cuadro 10. EUN, RAN y EFN para las distintas fuentes aplicadas a Z 22.

Fuente	EUN (kg kg ^{**})	RAN Z65 (%)	EFN Z65 (kg kg ^{**})	RAN (C*) (%)	EFN (C*) (kg kg ^{**})
Testigo	-	-	-	-	-
Urea	22,9	104	22	79	28 b
UAN	34,3	98	35	84	31 ab
Urea azufrada	37,4	101	37	89	32 ab
Urea con azufertil	25,2	168	15	74	29 b
Urea 50+S.A 50	25,2	180	14	85	31 ab
ENTEC 26	26,4	139	19	68	45 a
Sulfato de amonio	22,6	188	12	76	30 b
Líquido N 28/S5	32,9	121	27	75	32 ab
Líquido N24/S10	22,3	124	18	75	31 ab
Promedio	27,6	136	22	78	32
P-valor	0,95	0,15	0,23	0,95	0,03
CV	26	38,6	75,2	26,3	20,7
MDS	19	130	37	59	14,5

Medias con una letra común no son significativamente diferentes en misma columna Tukey ($\alpha=0,05$).

*C: cosecha

** kg de grano por kg de N

Como puede observarse en el cuadro 10, dependiendo del momento del cultivo para el cual se realizan los cálculos, los componentes de la EUN toman distintos valores.

Se ha reportado que la EFN varía dependiendo del potencial del cultivo, condiciones ambientales, genotipo, y la dosis de N (Huggins y Pan 1993, Rouanet 1994, Salvagiotti et al. 2009). A pesar de esto en este trabajo las diferencias entre las fuentes para un mismo momento fueron mínimas a cosecha e inexistentes a Z 65. Cuando se observan los valores de la EFN a Z 65 se ve que son menores que los de cosecha, esto se explica por las grandes pérdidas de N entre Z 65 y cosecha como ya se mencionó anteriormente. A su vez esta diferencia debe de ser tomada en cuenta al comparar con la EFN que reportan algunos autores (Dobermann 2007, Salvagiotti et al. 2009).

En cuanto a la RAN, se han observado variaciones en función de la fuente, a través de aporte de S (Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2015b). Sin embargo, en este trabajo no se encontraron diferencias significativas entre las mismas, pudiendo ser una de las causas la elevada MDS (130%), así como también el efecto ANI (ver sección 4.4), al cual se le atribuye la obtención de RAN superiores al 100%.

Aunque en este trabajo las fuentes no hayan causado diferencias en la RAN obtenida, se hace necesario continuar trabajando sobre este aspecto dado

la variación en resultados económicos y ambientales que un correcto manejo de las fuentes podría traer aparejado.

4.5.3 Efecto de las fuentes en la RAN

Con el fin de diferenciar la recuperación de N aplicado a Z 22 del que se agregó a Z 30, se calculó la RAN por el método de diferencias (Terman y Brown, citados por Daniel et al., 1986) y luego realizó la figura 19. Para estimar el nitrógeno recuperado a Z 22 se realizó la comparación entre lo absorbido por el testigo y la absorbida por los distintos tratamientos que fueron fertilizados solo a Z 22. En el caso de la recuperación del aplicado a Z 30, la misma se realiza entre lo absorbido por cada fuente cuando recibió N a Z 30 y cuando no lo recibió (figura 19).

Si analizamos la RAN del fertilizante aplicado a Z 22, esta no varió entre las distintas fuentes, estando para todos los casos cercana o por encima de 100%. Esto nos indica que no son necesarias altas dosis para que se produzca el efecto ANI (explicado anteriormente) dado que con 50 kg de N ya se produce este efecto. A su vez las dosis bajas también se asocian a altas recuperaciones, por lo tanto, serían esperables altos valores de RAN (Cassman et al. 2003, Dobermann 2007, Salvagiotti et al. 2009). Por último, la ausencia de efecto del S está en sintonía con lo reportado por la bibliografía la cual menciona que el efecto de S está asociado a dosis altas de N (Zhao et al. 1999, Salvagiotti y Miralles 2008, Fontanetto et al., García, Hoffman et al., citados por Hoffman et al. 2015b).

Cuando se agregó N a Z 30, aquellas fuentes que no contenían S (UAN y urea), disminuyeron la RAN a 62%, siendo más cercana a los valores reportados por los distintos autores (Dobermann 2007, Salvagiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2015b), manteniendo coherencia con lo dicho por los mismos autores en cuanto a que mayores dosis llevan a una disminución en la recuperación del N (figura 19).

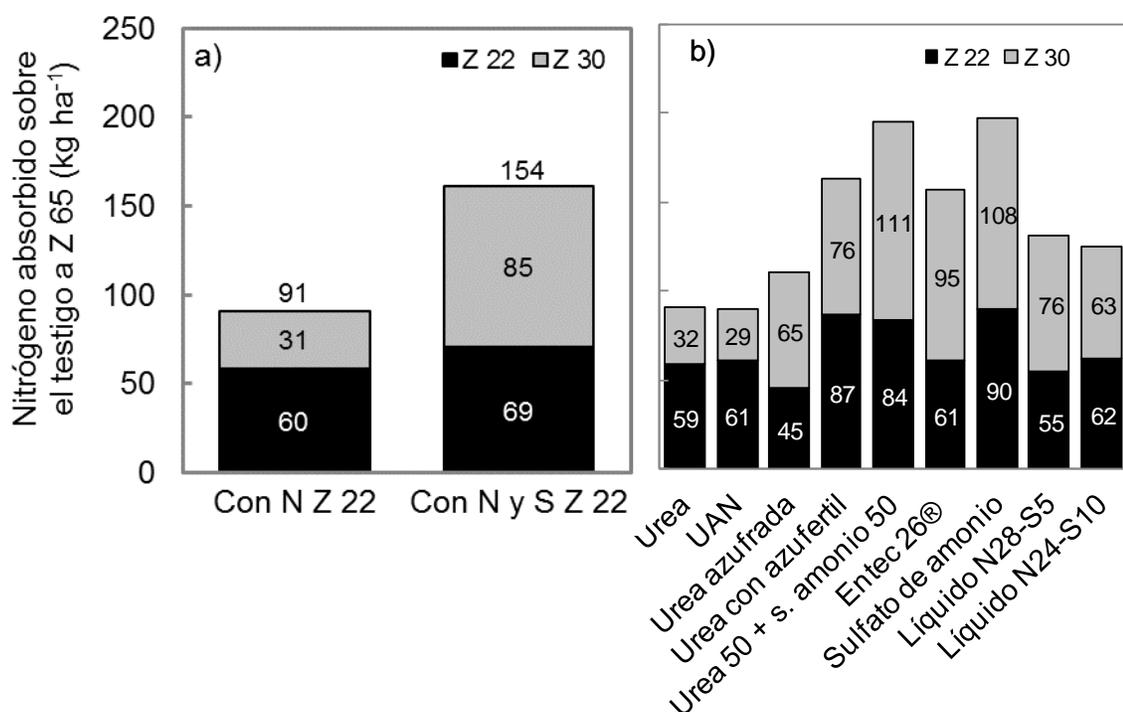


Figura 17. Nitrógeno absorbido por sobre el testigo, según el momento, con y sin agregado de S a Z 22 para los tratamientos con 100 kg de N total agregado(a), nitrógeno absorbido por sobre el testigo según el momento, para las distintas fuentes, para los tratamientos con 100 kg de N agregado (b).

Por su parte, las fuentes que contenían S, lograron a pesar del aumento en la dosis, mantener la RAN por encima de 100% (154% en promedio), dejando de manifiesto el efecto ya analizado del S.

En la figura 19b vemos que las fuentes con mayor concentración de S fueron las que lograron absorber a Z 65 mayor cantidad del N aplicado a Z 30, existiendo una diferencia de alrededor de unos 80 kg entre la fuente que más S contiene (SA) y las que no aportan este nutriente (urea y UAN). Este fenómeno va en consonancia con lo reportado por Salvagiotti et al. (2009), Hoffman et al. (2015b) ya comentado en reiteradas oportunidades acerca de que el S aumenta la absorción de N sobre todo cuando se aplican grandes cantidades de este nutriente.

Es posible que en ambientes con mayor potencial, estas altas cantidades de N absorbidas (provocadas por el S), no se pierdan y permitan concretar mayor rendimiento en grano (Hoffman et al., 2015b), y posiblemente niveles de N en grano también elevados.

En cuanto a la absorción de N, aunque no existieron grandes diferencias entre fuentes, en la figura 17a puede observarse que a Z 65 aquellas que tenían más S en su formulación fueron las que lograron diferenciarse del testigo en absorción de N. En el caso del azufre existieron diferencias en la absorción de S a Z 65 dependiendo de la fuente e interaccionando con el N aplicado a Z 30. Además, en la figura 12, se observa una tendencia donde mayor S absorbido está asociado con una mayor absorción de N, tanto a Z 65 como a cosecha, dejando en evidencia lo reportado en la bibliografía en cuanto a la relación entre estos dos nutrientes (Zhao et al. 1999, Dijkshoorn y Van Wijk, citados por De Bona et al. 2011).

En el escenario actual, se hacen necesarias aplicaciones de grandes cantidades de N, manifestándose también la necesidad de realizar aplicaciones de S en cultivos de invierno (Hoffman et al., 2015b). En base a lo observado y analizado en este trabajo y lo reportado en la bibliografía en cuanto a la relación entre estos dos nutrientes (Zhao et al. 1999, Dijkshoorn y Van Wijk, citados por De Bona et al. 2011), se impone la necesidad de seguir estudiando la relación entre ellos y obtener mayores EUN en ambientes que son típicos del invierno en Uruguay, diferente al que se dio en este trabajo.

5. CONCLUSIONES

- Es importante destacar que las conclusiones de este trabajo, son válidas para un contexto particular, dado por el efecto año y características del suelo de elevada capacidad de aporte de N.
- Por su parte, las condiciones climáticas del año no fueron propicias para que se expresara el potencial genético del cultivar, habiendo sido afectado por las elevadas temperaturas y abundantes precipitaciones sobre el final del ciclo, condicionado los resultados obtenidos.
- Existió respuesta significativa al agregado de N a Z 22 y a Z 30, la cual fue de 1300 y 1000 kg de grano para cada momento respectivamente, de acuerdo a lo esperable en base a las concentraciones de N-NO_3^- en suelo a Z 22 y N en planta a Z 30. Sin respuesta en rendimiento en grano al agregado de S en promedio.
- La EUN, en promedio fue de 26 y 20 kg para Z 22 y Z 30 respectivamente, sin diferencias significativas entre las fuentes utilizadas a Z 22.
- Frente al agregado de mayores dosis de N, el S permitió alcanzar los más altos niveles de N absorbido a Z 65 (275 kg), lográndose aumentos no significativos en la RAN (de 84 kg a 154 kg), sin efecto significativo de la fuente sobre la misma.
- La EFN mostró escasa variabilidad (entre 18 kg y 37 kg), sin diferencias entre fuentes a Z 65 y baja relación con la EUN ($r^2= 0,13$).
- Mayor absorción tanto de N como de S a Z 65 generaron incrementos proporcionales en las pérdidas de N y S desde Z 65 a cosecha, siendo las mismas de 100 kg en promedio para el N y 4,7 kg en promedio para el S.
- Cantidades por encima de 75 kg de N y 10 kg de S absorbidos a Z 65, dan como resultado tasas de pérdida de Z 65 a cosecha de 0,7 y 0,6 kg de nutrientes perdidos por kg de nutrientes absorbidos a Z 65, para el nitrógeno y el azufre respectivamente.

- En cuanto a las fuentes, no se encontraron diferencias entre ellas en cuanto a la absorción de N a Z 65, pudiendo diferenciarse del testigo solamente el SA y la urea con SA.
- Con respecto a la absorción de S a Z 65, cuando no se agregó nitrógeno a Z 30 las fuentes no se diferencian entre sí, ni contra el testigo. Sin embargo, cuando se agregó N a Z 30, se encuentran diferencias, pero estas se dan por encima del nivel crítico para rendimiento en grano (24 kg de S a Z 65), por lo que no generan efecto ni en biomasa, ni en rendimiento. A su vez, estas diferencias se acortan hacia la cosecha.
- Las diferencias en la relación N-S, formulación y tipo de fuente condicionaron la cantidad de S absorbido, no así la cantidad de N absorbido ya que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

6. RESUMEN

En los últimos años se ha incrementado la respuesta al agregado de S, principalmente en aquellas chacras con mayores necesidades de N. El aumento en la respuesta al N en presencia de S, permite mayor EUN, de la mano del incremento en la RAN. Como hipótesis principal se plantea que las diferencias en la relación N-S, formulación y tipo de fuente fertilizante, condicionan la cantidad, velocidad y relación de N y S absorbida por un cultivo de trigo. El objetivo general de este trabajo fue la evaluación de distintas fuentes nitrógeno-azufradas en cuanto a la mejora de la eficiencia del uso del nitrógeno, y la absorción de N y S. El experimento se instaló en el año 2014, en la EEMAC de la Facultad de Agronomía, departamento de Paysandú, utilizando el cultivar de trigo Fuste. El experimento consistió en un diseño en bloques completo con parcela dividida. En la parcela grande se evaluaron 9 fuentes de fertilizantes aplicados a Z 22 y un testigo sin fertilizar. La dosis de N fue fija (50 kg N ha^{-1}) mientras que la dosis de S estuvo dada por la fuente utilizada (urea y UAN 0 kg ha^{-1} , urea azufrada y urea con azufertil 7.5 kg ha^{-1} , líquido N28-S5 9 kg ha^{-1} , urea 50%+SA 50% 17.6 kg ha^{-1} , líquido N24-S10 21 kg ha^{-1} , Entec 26[®] 25 kg ha^{-1} , SA 57 kg ha^{-1}). En la parcela chica, el factor que se utilizó fue dosis de N a Z 30, una mitad se fertilizó a razón de 50 kg N ha^{-1} (urea), dejando la otra mitad sin fertilizar. Luego se realizó un re-análisis donde se agruparon los tratamientos según el agregado de N y S a Z 22 y N a Z 30. El rendimiento máximo fue en promedio de 5200 kg ha^{-1} , alcanzándose cuando se agregó 100 kg ha^{-1} de N con S. El testigo sin fertilizantes alcanzó un rendimiento en grano de 2956 kg ha^{-1} . La respuesta en grano al agregado de N a Z 22 como a Z 30, fue 1300 y 1000 Kg respectivamente, no existió respuesta en grano al agregado de S. Hasta Z 30 no existieron diferencias entre los distintos tratamientos en ninguna de las variables analizadas, incluyendo al testigo. La absorción de N a Z 65 fue muy elevada, lográndose en promedio $218 \text{ kg de N ha}^{-1}$, registrándose en promedio pérdidas de Z 65 a cosecha de 100 kg de N . La producción de biomasa total estuvo altamente relacionado a la absorción de N entre Z 30 y Z 65 ($r^2=0,77$), y a la absorción de S a Z 65 ($r^2=0,70$). La EUN en promedio fue de $25 \text{ kg de grano por kg de N}$, sin diferencias entre las fuentes, y estando poco relacionada a la EFN ($r^2=0.13$), la cual fue de $22 \text{ kg de grano por kg de N}$ absorbido. La RAN estimada a través del método de las diferencias, se ubicó por encima de 100%, poniendo de manifiesto el estímulo de la fertilización sobre la mineralización de N (efecto ANI). El agregado de S en los tratamientos con 100 kg de N permitió el incremento de la RAN de 82% a 154% (no significativo) y absorciones a Z 65 de 203 kg a $275 \text{ kg de N ha}^{-1}$. Estas diferencias no se expresaron en rendimiento en grano, probablemente asociado al menor potencial de rendimiento concretado. Las distintas diferencias en cuanto a la absorción de N, biomasa producida a Z 65 y rendimiento en grano,

resultaron no significativas y solo se diferenciaron en la absorción de S. De esta forma, queda la interrogante de que sucedería en un ambiente distinto o en un suelo con reducida capacidad de aporte de N, escenario dominante en nuestro país.

Palabras clave: Nitrógeno; Azufre; Fuente fertilizante; Recuperación aparente; Absorción de nutrientes; Eficiencia.

7. SUMMARY

In the past few years the response to the addition of S has been increased, mainly in those fields with higher N needs. The increase in the N response in the presence of S, allows higher NUE induced by an increase in NAR. The hypothesis of this work is that the differences in the N-S relationship, formulation and type of fertilizer source, determines the amount, speed and ratio of N and S absorbed by a crop of wheat at field level. The overall goal of this work was to evaluate different sources of nitrogen and sulfur considering the improvement and the efficiency of nitrogen use and the absorption of N and S. The experiment took place in 2014, in EEMAC Agronomy Faculty, Paysandú, using a wheat cultivar named Fuste. The experiment consisted of a complete block design with split-plot. In the large plot, 9 sources of fertilizer applied at Z 22 and an unfertilized witness were evaluated. The dose of N was fixed (50 kg N ha^{-1}), while the dose of S was given by the source used (Urea and UAN 0 kg ha^{-1} , sulfur urea and urea with azufertil 7.5 kg ha^{-1} , liquid N28-S5 9 kg ha^{-1} , urea 50%+SA 50% 17.6 kg ha^{-1} , liquid N24-S10 21 kg ha^{-1} , Entec 26[®] 25 kg ha^{-1} , SA 57 kg ha^{-1}). In the small plot, the factor used was dose of N at Z 30, one half was fertilized with 50 kg N ha^{-1} , leaving the other half unfertilized. Then a re-analysis was done, where treatments were grouped by the addition of N and S at Z 22 and N at Z 30. The maximum yield averaged was 5200 kg ha^{-1} , reached when added 100 kg ha^{-1} of N and S in addition. The yield of unfertilized witness was about 2956 kg ha^{-1} . Grain response to the addition of N at Z 22 and Z 30 were 1300 and 1000 kg respectively, no response was found to the addition of S. Until Z 30 no differences were found between treatments in any of the variables analyzed, including the witness. N uptake at Z 65 was very high, averaging 218 kg N ha^{-1} , averaging losses of 100 kg N between Z 65 and harvest. Biomass production was highly related to absorption of N between Z 30 and Z 65 ($r^2 = 0.77$), and the absorption of S at Z 65 ($r^2 = 0.70$). NUE was around 25 kg kg^{-1} , no differences between sources were found, being loosely related to the NFE ($r^2 = 0.13$), which was 22 kg kg^{-1} . The RAN estimated by the differences method, was above 100%, demonstrating the stimulus of fertilization on N mineralization (ANI effect). The addition of S in treatments with 100 kg of N allows a NAR increase in 82% to 154%, and absorptions at Z 65 in 203 kg to 275 kg N ha^{-1} . These differences were not expressed in grain yield, probably associated with lower yield potential materialized. Meanwhile the different sources did not generate differences in the absorption of N, biomass or grain yield, only differed by the absorption of S. Thus, the question is what would happen in a different environment or with reduced soil N supply capacity, scenario increasingly common in our country.

Keywords: Nitrogen; Sulphur; Fertilizer Source; Apparent recovery; Absorption of nutrients; Efficiency.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Acreche, M. M.; Slafer, G. A. 2005. Grain weight response to increases in number of grains in wheat in a mediterranean area. *Field Crops Research*. 98: 52-59.
2. ASP (Agroservicios Pampeanos, AR). s.f. Azufertil. (en línea). Buenos Aires. s.p. Consultado 6 mar. 2016. Disponible en <http://www.asp-la.com/productos.html>
3. Barbieri, P. A.; Echeverría, H. E.; Sainz Rozas, H. R. 2003. Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la fuente y al método de aplicación de nitrógeno. *Ciencia del Suelo*. 21 (1): 18-23.
4. Baethgen, W. 1992. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. Montevideo, INIA. 58 p. (Serie Técnica no. 24).
5. Bologna Rodríguez, J. L.; Rincón Puig, F. 1997. Efecto de la fuente nitrogenada, dosis y momento de aplicación en cebada sembrada sin laboreo con y sin rastrojo de sorgo en superficie. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 72 p.
6. Bruulsema, T. W.; Fixen, P.; Sulewsky, G. 2013. 4R de la nutrición de plantas: un manual para mejorar el manejo de los nutrientes de plantas. Buenos Aires, International Plant Nutrition Institute (IPNI). 140 p.
7. Calderini, D. F.; Reynolds, M. P. 2000. Changes in grain weight as a consequence of de-graining treatments at pre- and post-anthesis in synthetic hexaploid lines of wheat (*Triticum durum* x *T. tauschii*). *Australian Journal of Plant Physiology*. 27 (3): 183-191.
8. Cassman, K. G.; Dobermann, A.; Walter, D. T.; Yang, H. 2003. Meeting cereal demand will protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*. 28: 315-358.
9. Castellarín, J. M.; Pedrol, H. M.; Dignani, D.; Ferraguti, F.; Salvagiotti F. 2009. Interacción del nitrógeno con el azufre y sus efectos sobre la producción de biomasa y el rendimiento en diferentes genotipos de trigo. INTA. Trigo. Para Mejorar la Producción. no. 40: 45-52.

10. Centurión, A. H.; Chinazzo, M. V. 2012. Rendimiento alcanzable en trigo en función de los años de agricultura. Relevamiento de chacras. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 72 p.
11. Cha, G.; Durán, J. M. 2001 Respuesta al agregado de nitrógeno tardío (Z 3.0 y Z 4.7) en rendimiento y calidad en trigo (*Triticum aestivum*). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 90 p.
12. Daniel, P. E.; Álvarez, R.; Lemcoff, J. K.; Casanova, D. 1986. Efecto de los procesos de inmovilización y mineralización en el suelo sobre la determinación isotópica, del aprovechamiento del fertilizante nitrogenado en maíz. *Ciencia del Suelo*. 4 (1): 85-89.
13. De Bona, F. D.; Fedoseyenko, D.; Von Wirén, N.; Monteiro, F. A. 2011. Nitrogen utilization by sulfur-deficient barley plants depends on the nitrogen form. *Environmental and Experimental Botany*. 74: 237-244.
14. Diovisalvi, N. V.; Reussi Calvo, N. I.; Berardo, A. 2014. Acumulación de nitrógeno en trigo; efecto de fuente. *In*: Congreso Argentino de Ciencias del Suelo (24°. , 2014, Bahía Blanca, AR). Actas. Buenos Aires, AACS (Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo). s.p.
15. Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency-measurement and managment. *In*: IFA International Workshop on Fertilizer Best Managment Practices (2007, Brussels, BE). Proceedings. Paris, IFA. p. irr.
16. Echeverría, H. E.; San Martín, N. F.; Bergonzi, R. 1996. Mineralización de azufre y su relación con la de nitrógeno en suelos agrícolas. *Ciencia del Suelo*. 14: 107-109.
17. _____. 2005. Azufre. *In*: Echeverría, H. E.; García, F. O. eds. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Buenos Aires, INTA. pp. 139-160.
18. Empresa Agroenfoque, UY. s.f. ENTEC 26. (en línea). Canelones. s.p. Consultado 13 mar. 2016. Disponible en <http://www.agroenfoque.com.uy/fertilizantes/entec-26.php>

19. Ercoli, L.; Arduini, I.; Mariotti, M.; Lulli, L.; Masoni, A. 2012. Management of sulphur fertilizer to improve durum wheat production and minimise S leaching. *European Journal of Agronomy*. 38: 74-82.
20. Ernst, O. 2014. Efecto de los años de agricultura continúa sobre el rendimiento actual y alcanzable en trigo en Uruguay. (en línea) *In*: Congreso Uruguayo de Ciencias del Suelo (1°.), Encuentro de la SUCS (6°., 2014, Colonia, UY). Intensificando el conocimiento del suelo y medio ambiente para producir más y mejor. s.n.t. s.p. Consultado 10 mar. 2016. Disponible en <http://www.suelos.com.uy/pdf/p/i-t.pdf>
21. FA. EEMAC (Facultad de Agronomía. Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni". Estación Meteorológica, UY). 2014. Resumen climatológico del año 2014. (en línea). Paysandú. s.p. Consultado 20 ene. 2015. Disponible en <http://www.eemac.edu.uy/index.php/servicios/estacion-meteorologica-automatica>
22. Fixen, P.; Brentrup, F.; Bruulsema, T.; García, F.; Norton, R.; Zingore, S. 2015. Nutrient/fertilizer use efficiency; measurement, current situation and trends. (en línea). *In*: Dreschel, P.; Heffer, P.; Magen, H.; Mikkelsen, R.; Wichelns, D. eds. *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*. Paris, FR, IFA/IWMI/IPNI/IPI. cap. 2, pp. 8-38. Consultado 20 feb. 2016. Disponible en [http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/B9C003FF28F9C9EF85257DE1007607CC/\\$FILE/2015_ifa_ipni_iwmi_ipi.pdf](http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/B9C003FF28F9C9EF85257DE1007607CC/$FILE/2015_ifa_ipni_iwmi_ipi.pdf)
23. García, F. O. 1996. Fertilizantes nitrogenados; evaluación de fuentes alternativas. *In*: Seminario de Actualización Técnica (3°., 1996, Buenos Aires, AR). Trabajos presentados. Buenos Aires, CPIA-SRA. p. irr.
24. _____. 2004. Reacciones de los fertilizantes nitrogenados en el suelo. Buenos Aires, AR, INPOFOS Cono Sur. 5 p.
25. _____.; Salvagliotti, F. 2009. Nutrient use efficiency of cropping systems in the southern cone of Latin American. *In*: Symposium Nutrient Use Efficiency (18th., 2009, San José, Costa Rica). Proceedings. Buenos Aires, IPNI. pp.35-46.

26. García Lamothe, A. 1994. Manejo del nitrógeno para aumentar la productividad en trigo. Montevideo, INIA. 26 p. (Serie Técnica no. 54).
27. _____. 2002. Respuesta a la fertilización con azufre en trigo pan. In: Jornada de Cultivos de Invierno (2002, Colonia, UY). Trabajos presentados. Montevideo. INIA, UY. s.p. (Actividades de Difusión no. 282).
28. _____.; Morón, A.; Quincke, A. 2009. El indicador del potencial de mineralización (PMN); posible uso para recomendación de fertilización en trigo por el método de balance. In: Simposio de Fertilidad (2009, Rosario, AR). Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. Buenos Aires, Fertilizar Asociación Civil. pp. 218-220.
29. González, I.; Trujillo, A. 1995. Caracterización de la fenología y el llenado de grano en 8 variedades de cebada cervecera para la calibración y validación del modelo de simulación CERES-Barley. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 127 p.
30. Haneklaus, S.; Bloem, E.; Schnug, E. 2007. Sulfur interactions in crop ecosystems. In: Hawkesford, M. J.; Kok, L. J. eds. Sulfur in plants; an ecological perspective. Dordrecht, Springer. cap. 2, pp. 17-58.
31. Hoffman, E.; Perdomo, C.; Ernst, O.; Bordolli, M.; Pastorini, M.; Pons, C.; Borghi, E. 2001. Propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada para cultivos de invierno en Uruguay. In: Seminario Nacional de Discusión Técnica (2001, Paysandú, UY). Trabajos presentados. s.n.t. s.p.
32. _____.; Ernst, O. 2008. Diagnóstico del manejo de la fertilización en cultivos de secano en Uruguay. Cangüé. no. 30: 9-17.
33. _____.; Perdomo, C.; Ernst, O.; Bordolli, M.; Pastorini, M.; Pons, C.; Borghi, E. 2010. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. IPNI. Informaciones Agronómicas. no. 46: 13-18.

34. _____.; _____. 2011. Los nutrientes en el sistema de producción; manejo del nitrógeno en cereales de invierno, en un escenario de cambios del sistema agrícola uruguayo. In: Simposio Nacional de Agricultura (2°. , 2011, Paysandú, UY). No se llega si no se sabe a dónde ir; el abordaje necesario para que el proceso de expansión agrícola madure en Uruguay. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 45-60.
35. _____.; Fassana, N.; Perdomo, C. 2013. Manejo de nutrientes; cambios que genera la intensificación, manejo de nitrógeno en cereales de invierno. ¿Agregando más nos estamos quedando cortos? In: Simposio Nacional de Agricultura (3°. , 2013, Paysandú, UY). No se llega si no se sabe a dónde ir; pensar en las causas y no sólo medir las consecuencias. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 33-44.
36. _____.; _____. 2014a. Caracterización de cultivares de trigo. Paysandú, UY, Facultad de Agronomía. 45 p.
37. _____.; Arbeleche, P.; Fassana, N.; Locatelli, A.; Gutiérrez, G.; Viega, L.; Castro, A. 2014b. Relevamiento de cultivos de invierno. Estudio del posicionamiento tecnológico y estratégico de la cebada cervecera; zafra 2012. Montevideo, Facultad de Agronomía. 42 p.
38. _____.; Fassana, N.; Ackerman, A. 2015a. Caracterización de cultivares de trigo. Paysandú, UY, Facultad de Agronomía. 41 p.
39. _____.; _____.; Mazzilli, S.; Berger, A.; Ernst, O. 2015b. Eficiencia en el uso de los factores de producción; la productividad parcial de los nutrientes. La necesidad de incrementar la eficiencia de uso del nitrógeno. In: Simposio Nacional de Agricultura (4°. , 2015, Paysandú, UY). Buscando el camino para la intensificación sostenible para la agricultura. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 131-140.
40. Huggins, D. R.; Pan, W. 1993. Nitrogen efficiency component analysis; and evolution of cropping system difference in productivity. *Agronomy Journal*. 85: 898-905.
41. INIA; INASE (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY; Instituto Nacional de Semillas, UY). 2015. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de trigo ciclo intermedio; período 2014. Montevideo. 53 p.

42. Jamal, A.; Moon, Y-S.; Abdin, M. Z. 2010. Sulphur a general overview and interaction with nitrogen. *Australian Journal of Crop Science*. 4 (7): 523-529.
43. Lizana, X. C.; Calderini, D. F. 2013. Yield and grain quality of wheat in response to increased temperatures at key periods for grain number and grain weight determination; considerations for the climatic change scenarios of Chile. *The Journal of Agricultural Science*. 151 (2): 209-221.
44. López, S.; Guevara, E.; Maturano, M.; Melaj, M.; Bonetto, J. P.; Meira, S.; Martin, O.; Bárbaro, N. 2001. Absorción de nitrógeno en trigo en relación con la disponibilidad hídrica. *Terra*. 20: 7-15.
45. Malakouti, M. J.; Bybordi, A.; Lotfollahi, M.; Shahabi, A. A.; Siavoshi, K.; Vakil, R.; Ghaderi, J.; Shahabifar, J.; Majidi, A.; Jafarnajadi, A.; Dehghani, F.; Keshavarz, M.H.; Ghasemzadeh, M.; Ghanbarpouri, R.; Dashadi, M.; Babaakbari M.; Zaynalifard, N. 2008. Comparison of complete and sulfur coated urea fertilizers with pre-plant urea in increasing grain yield and nitrogen use efficiency in wheat. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 10: 173-183.
46. MAP. CONEAT (Ministerio de Agricultura y Pesca. Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra, UY). 1979. Índices de productividad grupos CONEAT. Montevideo. 167 p.
47. _____. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes). 1979. Carta de reconocimiento de suelo del Uruguay. Montevideo. t. 3, Apéndice pt. 2, pp. 142-273.
48. Mazzilli, S. 2004. Efecto de la dosis de nitrógeno y fuentes alternativas a la urea sobre la absorción, crecimiento y rendimiento en grano de trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 68 p.
49. _____.; Hoffman, E. 2010. Respuesta a la fertilización con azufre en el cultivo de colza-canola en suelos del litoral norte de Uruguay. IPNI. *Informaciones Agronómicas*. no. 46: 18-21.

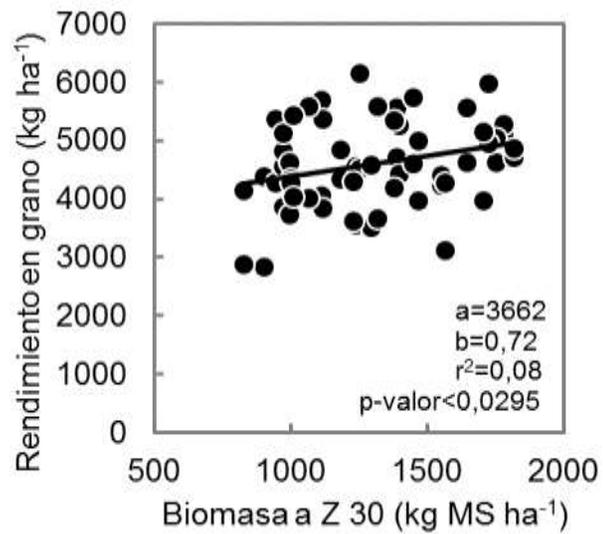
50. Melgar, R.; Gearhart Honeywell, M. 2006. Manejo del azufre y fertilizantes azufrados en siembra directa. (en línea). Buenos Aires, INTA. s.p. Consultado 15 nov. 2015. Disponible en <http://www.fertilizando.com>
51. _____.; Torres Duggan, M. 2014. Manual de fertilizantes fluidos; ¿cómo optimizar el uso de fertilizantes fluidos en Argentina y agro-sistemas sudamericanos? Buenos Aires, HorizonteA. 184 p.
52. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2015. Anuario estadístico agropecuario. (en línea). Montevideo. 215 p. Consultado 15 mar. 2016. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/>
53. Monaghan, J. M.; Scrimgeour, C. M.; Stein, W. M.; Zhao F. J.; Evans, E. J. 1999. Sulphur accumulation and redistribution in wheat (*Triticum aestivum*); a study using stable sulphur isotope ratios as a tracer system. *Plant, Cell and Environment*. 22: 831-839.
54. Morón, A. 1996. Azufre; consideraciones sobre su situación en Uruguay. In: Morón, A.; Martino, D. Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 73-79 (Serie Técnica no. 76).
55. Pagani, A.; Echeverría, H. 2011. Evaluación de métodos de diagnóstico de azufre en maíz; indicadores de suelo e indicadores vegetales. Utilidad del medidor de clorofila. IPNI. *Informaciones Agronómicas*. no. 2: 38-45.
56. Perdomo, C.; Bordolli, J. M. 1999a. Ajuste de la fertilización nitrogenada en trigo y su relación con el contenido de proteína en grano. In: Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo (1°. 1999, Mercedes, UY). Resúmenes. Montevideo, Mesa Nacional de Trigo. pp. 41-48.
57. _____.; Hoffman, E.; Pastorini, M.; Pons, C. 1999b. Fertilización en cebada cervecera. In: Jornadas de Investigación en Cebada Cervecera (8°. 1999, Minas, UY). Trabajos presentados. s.l., MNECC. s.p.
58. _____.; Barbazán, M. 1999c. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 72 p.

59. _____.; Hoffman, E.; Pons, C.; Pastorini, M. 1999d. Soil nitrate critical levels and nitrogen requirements for malting barley in Uruguay. In: Annual Meeting of the American Society of Agronomy (14th., 1999, Salt Lake, USA). Proceedings. s.n.t. p.312.
60. Quincke, A.; Sawchik, J. 2011. Manejo y conservación de suelos; elementos para mejorar el diseño de las rotaciones agrícolas. In: Jornadas de Divulgación (2011, Durazno, UY). Aportes a la zafra de cultivos de invierno. Trabajos presentados. Montevideo, INIA, UY. pp. 11-12 (Actividades de Difusión no. 646).
61. Rao, A. C. S.; Smith, J. J.; Parr, J. F.; Padendick, R. I. 1992. Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic dilution methods. *Fertilizer Research*. 33: 209-217.
62. Raun, W.; Johnson, G. 1999. Review and interpretation. *Agronomy Journal*. 91: 357-363.
63. Reussi Calvo, N.; Echeverría, H.; Sainz Rozas, H. 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 24 (1): 77-87
64. _____.; Echeverría, H.; Sainz Rozas, H. 2012. Stability of foliar nitrogen; sulphur ratiog in spring red wheat and sulphur dilution curve. *Journal of Plant Nutrition*. 35: 990-1003.
65. Rouanet, J. M. 1994. Eficiencia fisiológica de uso de nitrógeno por cultivos anuales en futura agricultura sustentable. *Agricultura Técnica*. 54 (2): 169-179.
66. Sainz Rosas, H.; Echeverría, H.; Angelini, H. 2011. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extra pampeana. IPNI. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. no. 2: 1-7.
67. Salvagiotti, F.; Gerster, G.; Bacigalupo, S.; Castellarín, J.; Galarza, C.; González, N.; Gudelj, V.; Novello, O.; Pedrol, H.; Vallone, P. 2004. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo*. 22 (2): 92-101.

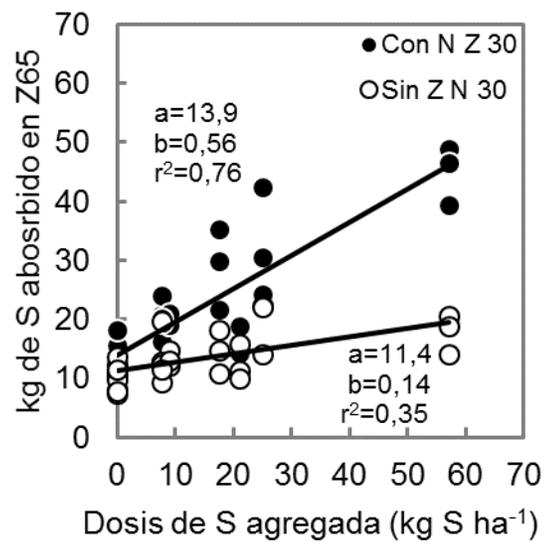
68. _____.; Miralles, D. J. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affect by the interaction of nitrogen and sulphur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy*. 28 (3): 282-290.
69. _____.; Castellarín, J. M.; Miralles, D. J.; Pedrol, H. M. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. (en línea). *Crops Research*. 113: 170-177. Consultado 5 oct. 2015. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/fcr>
70. Sinclair, T. R.; Horie, T. 1989. Leaf nitrogen, photo synthesis, and crop radation use efficiency. *Crop Science*. 29: 90-98.
71. Siri, G.; Ernst, O. 2009. Cambios en el contenido de carbono y nitrógeno del suelo; ¿hacia dónde va el sistema? *In: Simposio Nacional de Agricultura (1°. , 2009, Paysandú, UY). Agricultura de secano. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 111-123.*
72. Steinbach, H. S.; Álvarez R. 2014. Eficiencia de respuesta de trigo, maíz y soja a la fertilización azufrada en la región pampeana argentina. *IPNI. Informaciones Agronómicas de Hispanoamericana*. 13: 11-17.
73. Tabatabai, M. A. 2005. Chemisry of sulfur in soils. *In: Tabatabai, M. A.; Sparks, D. L. eds. Chemical processes in soils. Madison, USA, Soil Science Society of America. pp. 193-226.*
74. Tisdale, S. L.; Nelson, W. L.; Beaton, J. D. 1993. *Soil fertility and fertilizer* 5th. ed. New York, Macmillan. pp. 266-373.
75. Torres Duggan, M.; Gambaudo, S.; Quaino, O. 2006. Evaluación de fuentes azufradas en trigo en un suelo Argiudol Típico de Santa Fé, Argentina. *In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (20°. , 2006, Salta-Jujuy, AR). Actas. Buenos Aires, AACCS (Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo). pp. 44-48.*
76. _____.; Rodríguez, M. B. 2009. Buenas prácticas de manejo de fertilizantes azufrados; propiedades de las fuentes azufradas y su efectividad agronómica. *In: Simposio de Fertilidad (2009, Rosario, AR). Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. Buenos Aires, Fertilizar Asociación Civil. pp. 224-233.*

77. _____.; _____.; Lavado, R. S.; Melgar, R. 2010. Eficiencia agronómica del azufre elemental relativa a una fuente azufrada soluble en trigo en la región pampeana. *Ciencia del Suelo*. 28 (1): 67-77.
78. _____. 2011. Fuentes azufradas en cultivos de grano de la región pampeana. Tesis Magister. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 95 p.
79. Tysko, M. B.; Rodríguez, M. B. 2006. Respuesta de trigo-soja en doble cultivo a la fertilización con azufre elemental pretratado. *Ciencia de Suelo*. 24 (2): 139-146.
80. Zadoks, J.; Chang, T.; Konzak, C. 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Research*. 14: 415-421.
81. Zagal, E.; Rodríguez, N.; Vidal, I.; Hofmann, G. 2003. Eficiencia de uso y dinámica del nitrógeno en una rotación con y sin uno de residuos. *Agricultura Técnica*. 63 (3): 298-310.
82. Zhao, F. J.; Hawkesford, M. J.; McGrath, S. P. 1999. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. (en línea). *Journal of Cereal Science*. 30: 1-17. Consultado 15 set. 2015. Disponible en <http://www.idealibrary.com>
83. _____.; Fortune, S.; Barbosa, V. L.; Mc Grath, S. P.; Stobart, R.; Bilsborrow, P. E.; Booth, E. J.; Brown, A.; Robson, P. 2005. Effects of sulphur on yield and malting quality of barley. *Journal of Cereal Science*. 43: 369-377.

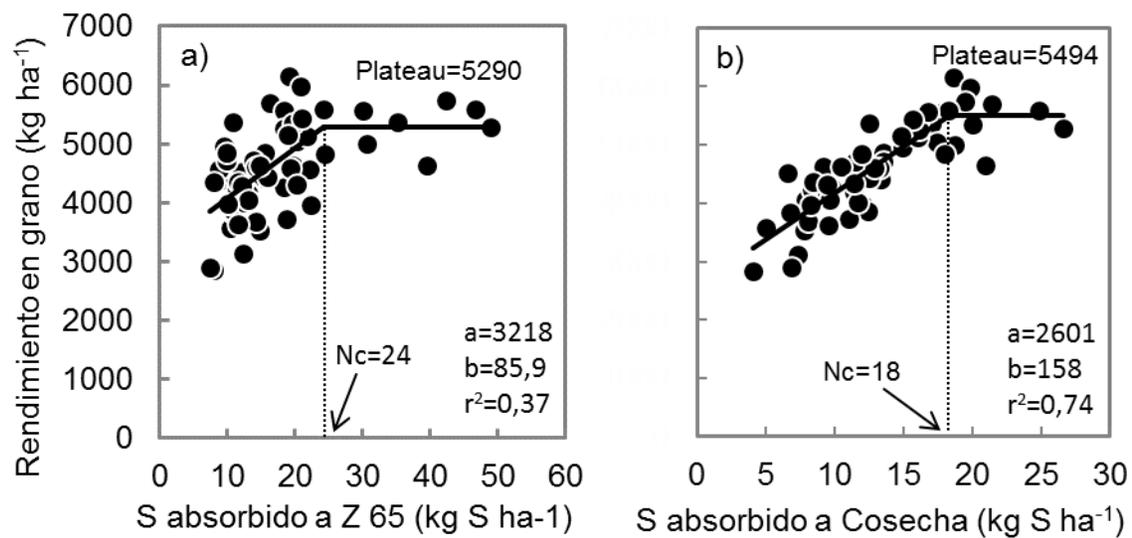
9. ANEXOS



Anexo 1. Rendimiento en grano en función de la biomasa acumulada a Z 30



Anexo 2. S absorbido a Z 65 en función del azufre agregado a Z 22 con y sin N agregado a Z 30



Anexo 3. Rendimiento en grano en función del S absorbido a Z 65 (a) y rendimiento en grano en función del S absorbido a cosecha (b).

a)	Dosis S*	Dosis N*	BI Z 65 kg ha ⁻¹	S Z 65 mg/g	kg S Z 65 kg ha ⁻¹	N Z 65 %	kg N Z 65 kg ha ⁻¹	BI Cosecha kg ha ⁻¹	RE kg ha ⁻¹
Testigo absoluto	0	0	8190	1,28	10,6	2,05 b	172 b	9071	3615 b
Urea	0	50	9208	1,23	11,3	2,13 b	196 ab	11223	4397 ab
UAN	0	50	8372	1,40	11,9	2,22 ab	188 ab	12108	4783 ab
Urea azufrada	7,5	50	8370	1,87	16,0	2,37ab	199 ab	12620	5051 a
Urea c/Azufertil	7,5	50	9873	1,76	17,4	2,47 ab	246 ab	11136	4527 ab
Urea 50+S. A 50	17,6	50	10132	2,08	21,8	2,53 ab	260 a	12078	4810 ab
ENTEC 26	25	50	10072	2,54	25,9	2,26 ab	230 ab	11904	4788 ab
S. amonio	57	50	9841	3,08	31,4	2,65 a	265 a	11767	4674 ab
Líquido N 28/S5	9	50	8804	1,86	16,5	2,41 ab	214 ab	11648	4719 ab
Líquido N24/S10	21	50	9031	1,63	14,8	2,36 ab	214 ab	11875	4582 ab
Promedio			9189	1,87	17,8	2,35	218	11541	4595
CV			8,73	16,47	22,23	10,63	15,57	7,22	7,26
p-valor Fuente			0,0804	<0,0001	<0,0001	0,0087	0,0119	0,07	0,038
p-valor Z 30			<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
p-valor Fuente*Z 30			0,4063	0,0002	0,0005	0,1282	0,2539	0,426	0,21
MDS			2599	1,02	13,02	0,482	84,75	3280	1209

Medias con una letra común no son significativamente diferentes en la misma columna (Tukey $\alpha=0,05$). *Dosis aplicada a Z 22.

b)	Dosis S*	Dosis N*	BI Z 65 kg ha ⁻¹	S Z 65 mg/g	kg S Z 65 kg ha ⁻¹	N Z 65 %	kg N Z 65 kg ha ⁻¹	BI Cosecha kg ha ⁻¹	RE kg ha ⁻¹
Testigo absoluto	0	0	7205	1,27 d	9,2 c	1,67	121,0	7397	2956
Urea	0	50	8520	1,24 d	10,6 bc	2,12	179,8	10463	4217
UAN	0	50	8170	1,31 d	10,8 bc	2,24	182,3	10686	4301
Urea azufrada	7,5	50	7468	1,54 cd	11,5 abc	2,25	166,3	10833	4345
Urea c/Azufertil	7,5	50	8400	1,74 cd	14,8 abc	2,43	207,5	10223	4151
Urea 50+S. A 50	17,6	50	9035	1,60 cd	14,6 abc	2,27	204,6	10566	4261
ENTEC 26	25	50	9144	2,16bcd	19,5 a	2,00	182,2	10637	4382
S. Amonio	57	50	8883	2,00bcd	17,8 ab	2,35	210,9	10278	4174
Líquido N 28/S5	9	50	8307	1,60 cd	13,3 abc	2,12	176,2	10790	4219
Líquido N24/S10	21	50	8227	1,50 d	12,4 abc	2,22	183,0	9924	4036
Media			8336	1,44	13,45	2,17	181,4	10180	4104
CV			8,73	16,47	22,23	10,63	15,57	7,22	7,26
p-valor Fuente			0,0804	<0,0001	<0,0001	0,0087	0,0119	0,07	0,038
p-valor Z 30			<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
p-valor Fuente*Z 30			0,4063	0,0002	0,0005	0,1282	0,2539	0,426	0,21
MDS			2599	1,02	13,02	0,482	84,75	3280	1209

Medias con una letra común no son significativamente diferentes en la misma columna (Tukey $\alpha=0,05$). *Dosis aplicada a Z 22.

(c)	Dosis S*	Dosis N*	BI Z 65	S Z 65	kg S Z 65	N Z 65	kg N Z 65	BI Cosecha	RE
Fuente			kg ha ⁻¹	mg/g	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Testigo absoluto	0	0	9174	1,29 d	11,9 d	2,43	223 ab	10746	4274
Urea	0	50	9896	1,21 d	12,1 d	2,15	212 ab	11983	4577
UAN	0	50	8574	1,48 d	13,0 d	2,21	194 b	13529	5264
Urea azufrada	7,5	50	9272	2,20bcd	20,4 bcd	2,49	232 ab	14406	5758
Urea c/Azufertil	7,5	50	11346	1,77 cd	20,1 bcd	2,51	284 ab	12048	4903
Urea 50+S. A 50	17,6	50	11229	2,55 bc	28,9 bc	2,79	316 a	13589	5359
ENTEC 26	25	50	11000	2,91 b	32,4 ab	2,52	278 ab	13170	5194
S. Amonio	57	50	10798	4,15 a	44,9 a	2,95	319 a	13257	5174
Líquido N 28/S5	9	50	9300	2,12bcd	19,7 bcd	2,71	252 ab	13371	5402
Líquido N24/S10	21	50	9835	1,75 cd	17,2 cd	2,50	246 ab	12925	4945
Media			10042	2,14	22,1	2,53	255	12902	5085
CV			8,73	16,47	22,23	10,63	15,57	7,22	7,26
p-valor Fuente			0,0804	<0,0001	<0,0001	0,0087	0,0119	0,07	0,038
p-valor Z 30			<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
p-valor Fuente*Z 30			0,4063	0,0002	0,0005	0,1282	0,2539	0,426	0,21
MDS			2599	1,02	13,02	0,482	84,75	3280	1209

Medias con una letra común no son significativamente diferentes en la misma columna (Tukey $\alpha=0,05$). *Dosis aplicada a Z 22.

Anexo 4. Biomasa, concentración en planta de N y S y absorción en kg de N y S a Z 65, biomasa a cosecha y rendimiento en grano, promediando el efecto del N abregado a Z 30 (a), sin N a Z 30 (b) y con N Z 30 (c).