

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

INFLUENCIA DEL MANEJO DEL SUELO EN VERANO SOBRE LA
PRODUCTIVIDAD Y RESPUESTA AL N EN EL CULTIVO DE TRIGO

por

Lucia MARZIOTTE BARTABURU
Emmanuela VAN VERSEDAAL PIREZ

Trabajo final de grado presentado como
uno de los requisitos para obtener
el título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO
URUGUAY
2023

Trabajo final de grado aprobado por:

Director: -----

Ing. Agr. Esteban Hoffman

Ing. Agr. (MSc.) Nicolás Fassana

Ing. Agr. Guillermo Siri-Prieto

Fecha: 27 de febrero de 2023

Autor: -----

Lucia Marziotte Bartaburu

Emmanuela van Versendaal Pirez

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer en primer lugar a nuestras familias y amigos por el apoyo durante toda la carrera. Al Ing. Agr. Esteban Hoffman, tutor de esta tesis, por la posibilidad que nos brindó de realizar este trabajo y el tiempo dedicado al mismo. Asimismo, al Ing. Agr. (Mag.) Nicolás Fassana, quien nos ayudó a lo largo de todo el proceso. A Alejandro Akerman y Matías van den Dorpel por su gran ayuda durante el trabajo de campo y en etapas posteriores, y a todo el personal del laboratorio de la EEMAC.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	<u>1</u>
<u>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>2</u>
2.1. EL EFECTO CULTIVO ANTECESOR.....	2
2.2. LA PREPARACIÓN DEL BARBECHO	5
2.3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA NUTRICION NITROGENADA DEL CULTIVO DE TRIGO.....	7
<u>2.3.1. El impacto de la nutrición nitrogenada sobre el rendimiento en grano</u>	<u>8</u>
<u>2.3.2. El impacto de la nutrición nitrogenada sobre la calidad de grano</u>	<u>9</u>
<u>2.3.3. Fertilización nitrogenada y su interacción con el agua en suelo</u>	<u>11</u>
<u>3. MATERIALES Y MÉTODOS</u>	<u>13</u>
3.1. UBICACIÓN	13
3.2. TRATAMIENTOS.....	13
3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL	14
3.4. MANEJO DE LOS CULTIVOS.....	15
<u>3.4.1. Manejo del cultivo de soja</u>	<u>15</u>
<u>3.4.2. Manejo del cultivo de trigo</u>	<u>15</u>
3.5. DETERMINACIONES DURANTE EL CULTIVO DE TRIGO.....	17
<u>3.5.1. Suelo.....</u>	<u>17</u>
<u>3.5.2. Planta.....</u>	<u>17</u>
<u>3.5.3. Determinación de rendimiento y componentes.....</u>	<u>17</u>
3.6. DETERMINACIONES POST COSECHA	17
<u>3.6.1. Rendimiento y componentes</u>	<u>17</u>
<u>3.6.2. Calidad de grano</u>	<u>18</u>
<u>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	<u>19</u>
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO	19
<u>4.1.1. Precipitaciones</u>	<u>19</u>
<u>4.1.2. Temperatura y coeficiente fototermal</u>	<u>21</u>
4.2. EFECTO DEL ANTECESOR	22
<u>4.2.1. Efecto del antecesor sobre el balance hídrico</u>	<u>22</u>
<u>4.2.2. Rendimiento de los antecesores</u>	<u>25</u>
<u>4.2.3. Análisis del suelo hasta la siembra del trigo</u>	<u>26</u>

4.3. COMPONENTES ECOFISIOLÓGICOS GENERALES DEL CULTIVO DE TRIGO	28
4.4. EFECTO DEL CULTIVO ANTECESOR.....	32
4.4.1. <u>Rendimiento y componentes del rendimiento</u>	<u>32</u>
4.4.2. <u>Crecimiento del cultivo de trigo</u>	<u>34</u>
4.4.3. <u>Absorción de nitrógeno</u>	<u>36</u>
4.5. RESPUESTA AL AGREGADO DE NITRÓGENO	39
4.5.1. <u>Rendimiento y componentes del rendimiento</u>	<u>39</u>
4.5.2. <u>Crecimiento y tasa de crecimiento del cultivo</u>	<u>42</u>
4.5.3. <u>Absorción de N durante el ciclo de cultivo</u>	<u>45</u>
4.6. EFECTO DE LA INTERACCIÓN DE TRATAMIENTOS EN EL CULTIVO DE TRIGO	47
4.6.1. <u>Rendimiento y componentes del rendimiento</u>	<u>47</u>
4.6.2. <u>Crecimiento y absorción de nitrógeno.</u>	<u>51</u>
4.7. CALIDAD DE GRANO DEL CULTIVO DE TRIGO	55
5. <u>CONCLUSIONES</u>	<u>58</u>
6. <u>RESUMEN</u>	<u>60</u>
7. <u>SUMMARY</u>	<u>61</u>
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>62</u>
9. <u>ANEXOS</u>	<u>74</u>

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Tratamientos realizados.	14
2. Nivel de nitrógeno, fósforo y potasio en suelo previo a la siembra del cultivo de trigo y dosis aplicadas al momento de la siembra del trigo según tratamiento del cultivo antecesor.....	16
3. Niveles de fósforo, nitrógeno y potasio en suelo, en R4.5 y a cosecha de la soja y nivel de nitrógeno a la siembra del trigo.	26
4. P-valor, MDS y promedio de $N-NO_3^-$ en suelo en los diferentes momentos de muestreo.	27
5. Componentes del rendimiento según efecto del cultivo antecesor.	33
6. Promedio, p-valor y MDS para la biomasa total acumulada y tasa de crecimiento en los diferentes periodos y estadios del cultivo.	35
7. Biomasa total acumulada en el estadio Z 30 en trigo, teniendo en cuenta los diferentes antecesores.....	36
8. Promedio, p-valor y MDS para el nitrógeno absorbido y tasa de absorción de nitrógeno en los diferentes periodos y estadios del cultivo.....	37
9. Dosis aplicadas en cada estadio del cultivo y índice de nutrición nitrogenada según tratamiento nitrogenado realizado en el cultivo de trigo.	41
10. Componentes del rendimiento según tratamiento nitrogenado en trigo.....	42
11. Promedio, p-valor y MDS para biomasa acumulada y tasa de crecimiento del cultivo en los diferentes estadios y periodos de crecimiento del cultivo según tratamientos nitrogenados.	43
12. Biomasa total acumulada en el estadio Z 30, para los diferentes tratamientos nitrogenados.	44
13. Promedio, p-valor y MDS para nitrógeno absorbido y tasa de acumulación de nitrógeno en los diferentes estadios y periodos de crecimiento del cultivo según tratamientos nitrogenados.	45
14. Componentes del rendimiento en trigo según interacción de tratamientos realizados.....	50
15. Promedio, p-valor y MDS para biomasa acumulada (BT) y tasa de crecimiento del cultivo (TC) en los diferentes periodos y estadios del cultivo.	53

16. Promedio, p-valor y MDS para el nitrógeno absorbido y tasa de absorción de nitrógeno en los diferentes periodos y estadios del cultivo.....	54
17. Eficiencia agronómica de nitrógeno y nitrógeno agregado para las diferentes interacciones, tomando como testigo el NR a siembra para cada antecesor.	55

Figura No.

1. Comparación de precipitaciones en soja de zafra 2019/20 con promedio histórico de 30 años (a). Comparación de precipitaciones en trigo de zafra 2020 con promedio histórico de 30 años (b).....	20
2. Temperatura año 2020 y promedio (izquierda). Coeficiente fototermal año y promedio 30 años en agosto, setiembre y octubre (derecha).	22
3. Diagrama del cultivo antecesor, su finalización y duración del barbecho según antecesor.....	23
4. Balance hídrico según tratamiento de soja.....	24
5. Rendimiento en soja en función de los tratamientos realizados	25
6. Evolución del nitrógeno como $N-NO_3^-$ desde R3 en el cultivo de soja hasta Z 22 en el cultivo de trigo.....	27
7. Rendimiento y peso de mil granos según número de granos producidos (a) Rendimiento e índice de cosecha según biomasa total producida (b). Número de granos por metro cuadrado en función al número de espigas por metro cuadrado (c). Número de granos por por metro cuadrado (d)	30
8. Tasa de crecimiento en período Z 33-Z 65 según tasa de crecimiento en Z 30- Z 33.....	31
9. Rendimiento en función de los tratamientos en soja.....	33
10. Biomasa total acumulada según tratamiento de soja en función del tiempo (izquierda). Tasa de crecimiento según tratamiento de soja en función del periodo de crecimiento (derecha).....	35
11. Nitrógeno absorbido según tratamiento en soja en función del tiempo (izquierda). Tasa de absorción de Nitrógeno según tratamiento en soja en función del tiempo (derecha).....	37
12. Rendimiento en función de los tratamientos realizados en trigo.	40
13. Biomasa total acumulada según tratamiento nitrogenado en trigo en función del tiempo (a). Tasa de crecimiento según tratamiento nitrogenado en trigo en función del periodo de crecimiento (b).	43

14. Nitrógeno absorbido según tratamiento nitrogenado en función del tiempo (izquierda). Tasa de absorción de Nitrógeno según tratamiento nitrogenado en trigo en función del tiempo (derecha).	45
15. Rendimiento en función de los tratamientos realizados.....	48
16. Biomasa total acumulada según tratamientos realizados, en función del tiempo	52
17. Nitrógeno absorbido durante el cultivo de trigo. Interacción tratamiento soja V8 y tratamientos de N (a), tratamiento soja R3 y N (b), cosecha P50 y N (c), y cosecha P100 y N (d)..	54
18. Relación entre rendimiento y proteína según tratamiento nitrogenado.	56
19. Proteína en grano en porcentaje para la interacción de los tratamientos de cultivo antecesor y nitrogenado.	57

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente los cultivos de invierno fueron los que ocuparon mayor superficie cosechada en Uruguay. Dentro de estos, el trigo es el que se ha sembrado en mayor superficie hasta el 2000. Luego del año 2000 se han registrado importantes cambios en la producción agrícola nacional, impulsado principalmente por el incremento del área sembrada del cultivo de soja, la disminución del área que rota con pasturas perennes, y se deja de labrear los suelos.

El crecimiento de la secuencia de agricultura continua de Soja – Trigo durante gran parte de este período, trajo como resultado un incremento de las pérdidas de suelo por erosión y un empobrecimiento del nivel de nutrientes en el suelo. Producto de esta secuencia, la edad de chacra (años o número de cultivos pos-pastura) ha incrementado, condicionando el rendimiento alcanzable de los cereales de invierno. Esto, sumado a los aumentos del potencial del rendimiento de trigo, han provocado un fuerte incremento en la necesidad de agregado de nitrógeno vía fertilizantes.

En la década de 1990, el suelo brindaba el 70% de los requerimientos nitrogenados del cultivo, en la actualidad aporta el 20%, llegando a existir situaciones en las cuales el cultivo requiere dosis por encima de los 200 kg N ha⁻¹. No solo han aumentado las dosis requeridas por el cultivo, sino que también se espera respuesta al agregado de N en etapas más avanzadas del mismo, pasando de encontrar respuestas a la fertilización nitrogenada hasta Z 30, a esperar respuestas al agregado de fertilizante en Z 33 (Hoffman et al., 2015, Fassana, 2019).

El cultivo de soja, en la zafra 2017/2018, ocupó una superficie de 1099 mil ha (MGAP. DIEA, 2019). Este cultivo no se fertiliza con nitrógeno, provocando balances aparentes negativos de nitrógeno en suelo. Esto se debe a que el cultivo extrae más de lo que fija, provocando deficiencias nutricionales en el cultivo siguiente.

El objetivo general de este trabajo es evaluar el impacto de la presencia y el nivel de productividad del cultivo de soja sobre la productividad y respuesta al nitrógeno en el cultivo siguiente.

La hipótesis principal, es que el nivel de productividad del cultivo de soja antecesor no impacta en la productividad del cultivo siguiente, y no afecta la disponibilidad de nitrógeno en suelo durante el ciclo de trigo. Y que el tratamiento nitrogenado siguiente revierte dicho efecto.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. EL EFECTO CULTIVO ANTECESOR

Si bien el ciclo de un cultivo comienza con la siembra de este, es de crucial importancia conocer la historia agrícola, el cultivo antecesor y el manejo del barbecho, ya que estos pueden afectar al cultivo predecesor (Ernst et al., 2002, Ernst y Siri-Prieto, 2009, Massaro, 2010, Forján y Manso, 2016b, Ernst et al., 2020).

El antecesor puede modificar la disponibilidad de nutrientes (principalmente nitrógeno) y agua en suelo en el cultivo siguiente (Fontanetto et al., 2005, Studdert y Echeverría, 2006, Forján y Manso, 2016a, Ernst et al., 2020). Asimismo, su efecto varía dependiendo tanto de su nivel de producción como el tipo de rastrojo que generan (Ernst et al., 2002, Forján y Manso, 2018).

Un estudio realizado por Studdert y Echeverría (2006) en trigo, muestra que el rendimiento, la materia seca acumulada, y el nitrógeno total en la biomasa del cultivo varían dependiendo de cuál fue el antecesor. Siendo este resultado producto de la calidad de los residuos del antecesor y de la forma en que ocurre el proceso de descomposición.

La velocidad de descomposición de los residuos depende de su composición química, la temperatura y si se encuentran enterrados o en superficie. A su vez, la composición química depende de la especie, del estado fenológico de la planta y la proporción de tallos, hojas y raíces de esta. Cuanto más madura es la planta incorporada al suelo, mayor es la proporción de la pared celular con relación al contenido celular, siendo más difícil su descomposición (Baethgen, 1996).

Al mismo tiempo, existe una relación lineal entre el peso seco del rastrojo y el tiempo de descomposición sobre el suelo. La tasa de descomposición de maíz (cultivo de elevado peso seco de rastrojo) es entre 2,1 y 2,5 veces menor que la de trigo y soja respectivamente (Ernst et al., 2002). Relacionado a esto, Studdert y Echeverría (2006), demostraron que tener como antecesor al cultivo de maíz se asoció a peores valores de rendimiento, materia seca acumulada y nitrógeno total en biomasa en el cultivo de trigo.

Por otra parte, Forján y Manso (2016b) expusieron, que cuando se realizó monocultivo de trigo, en comparación con dos situaciones de rotación donde si existió cultivo de verano, el rendimiento del trigo era inferior. Según Miller y Dexter (1982) hay un aumento en el rendimiento de un 40% cuando se introducen cultivos de soja en verano, en comparación a cuando se hace trigo sobre trigo de primavera, manteniéndose la diferencia aún con el agregado de nitrógeno. Esto concuerda con Badaruddin y Meyer

(1994), los cuales mencionan que el rendimiento de trigo sin fertilizar después de una leguminosa fue equivalente o mayor que un trigo fertilizado con 75 kg de N ha⁻¹.

En contraste, en un estudio previo realizado por Fontanetto et al. (2005) se encontró un efecto negativo provocado por tener un antecesor soja. En dicho estudio, el cultivo de trigo maximizó su rendimiento cuando obtuvo altas dosis de nitrógeno con los antecesores maíz y sorgo, como consecuencia de acumular mayor cantidad de agua al momento de la siembra de trigo en comparación con antecesor soja.

Otros estudios (Álvarez et al., 1995, Salvagiotti et al., 2016a, Tamagno et al., 2017, Forján y Manso, 2018) demuestran que las secuencias de cultivos que tienen mayor presencia de soja presentan balances negativos de nitrógeno. Esto se explica por el elevado porcentaje de proteína que presenta su grano y el bajo aporte de fertilizante que recibe el cultivo (Salvagiotti et al., 2016a, Tamagno et al., 2017). Este desbalance se da aun cuando se considera una fijación biológica de nitrógeno estimada en un 40% (Forján y Manso, 2016a), esto coincide con Salvagiotti et al. (2016a) quienes dicen que con una fijación del 46% de los requerimientos el balance es negativo. Además, la repetida presencia de dicho cultivo provoca un deterioro de la fertilidad del suelo, acelerando la mineralización y pérdida de MO (Forján y Manso, 2016a).

Tal como se mencionó previamente, la disponibilidad y variabilidad del nitrógeno en suelo es afectado por el cultivo antecesor y la descomposición de su rastrojo (Baethgen, 1996, Perdomo, 1996, Studdert y Echeverría, 2006). Para realizar un correcto diagnóstico de fertilización nitrogenada en trigo se debería no sólo considerar el nitrógeno mineral en suelo al momento de la siembra, sino también el que se mineraliza durante el periodo de crecimiento del cultivo (Echeverría et al., 1994). La estimación de esta última fracción es compleja debido a que es afectada por diferentes factores que inciden en la dinámica del carbono y del nitrógeno del suelo, y están estrechamente relacionados con los procesos de inmovilización y mineralización que afectan la disponibilidad de nitrógeno en suelo (Loiseau et al., 1994).

Los rastrojos de alta relación C:N, como es el caso de maíz y sorgo, provocan una competencia entre el cultivo siguiente en crecimiento y los microorganismos del suelo, los cuales utilizan N del suelo para formar su proteína. Como consecuencia, estos microorganismos inmovilizan una gran proporción de nitrógeno que no estará disponible en el corto plazo. Por otro lado, cuando los rastrojos poseen una baja relación C:N (como son los de girasol o soja), la inmovilización de nitrógeno mineral del suelo es mucho menor (Forján y Manso, 2016b).

Un estudio realizado por Studdert et al. (2000), muestra que cuando el antecesor fue girasol o maíz, se encontraron menores contenidos de nitrógeno inorgánico en suelo en los momentos de pre-siembra y de espiguilla terminal en trigo, en comparación a cuando el antecesor era soja o trigo. La duración del barbecho cuando el antecesor fue trigo y la calidad del rastrojo del antecesor cuando este fue soja podrían ser la justificación de una mayor mineralización del nitrógeno. En el mismo estudio se demuestra que a pesar de que hubo más nitrógeno inorgánico en el cultivo de trigo cuando el antecesor fue trigo, el rendimiento obtenido fue menor que cuando el antecesor fue soja, relacionándose esto a problemas de enfermedades asociadas al rastrojo de trigo.

Asimismo, el rendimiento del cultivo antecesor también posee alta incidencia en el balance de nitrógeno del cultivo siguiente (Studdert y Echeverría, 2006). En cultivos como maíz y soja, la exportación de nitrógeno está directamente relacionada con el rendimiento obtenido (Forján y Manso, 2016b).

Estudios previos demuestran que el cultivo de soja requiere entre 57 – 80 kg N para producir 1 tonelada de grano (Salvagiotti et al., 2009, Oyhançabal y Narbondo, 2012). Estos requerimientos son satisfechos con nitrógeno proveniente del suelo y de la fijación biológica de nitrógeno (FBN), fluctuando el aporte de este último entre 50-80% (Hungria et al., 2006, Oyhançabal y Narbondo, 2012, Salvagiotti et al., 2016a). La contribución de nitrógeno por parte de la FBN varía dependiendo de las condiciones climáticas, el tipo de suelo, y el rendimiento del cultivo de soja, relacionándose positivamente con el incremento del rendimiento (Salvagiotti et al., 2016a, 2016b).

La fijación máxima de nitrógeno por parte del cultivo de soja ocurre entre el periodo de desarrollo R3 y R5 (Zapata et al., 1987), y cualquier brecha entre la demanda de nitrógeno por parte del cultivo y su suministro mediante la FBN debe cubrirse con la absorción de nitrógeno del suelo (Salvagiotti et al., 2008).

Examinando el cultivo de soja y sus requerimientos, se pueden distinguir tres periodos: vegetativo (emergencia – R1), reproductivo temprano (R1 – R5), asociado a la determinación del N° de granos, y reproductivo tardío o llenado de grano (R5 – R7). Los requerimientos de nutrientes serán de mayor magnitud en las etapas reproductivas (Salvagiotti, 2009). La demanda de nitrógeno tiene un pico en el estadio de R3 (Hanway y Weber, 1971). En R7, cuando se da la máxima acumulación de materia seca, se da la máxima de absorción de nitrógeno (Salvagiotti et al., 2008).

Al mismo tiempo, a pesar del incremento de la FBN cuando aumenta el rendimiento, la demanda de nitrógeno por parte del cultivo de soja con altos rendimiento crece sustancialmente para soportar tanto la biomasa aérea como las semillas con alto

contenido de proteínas (Salvagiotti et al., 2008). Un estudio realizado por Tamagno et al. (2017), demuestra que a medida que incrementa el rendimiento de soja aumenta la absorción de nutrientes.

Como consecuencia de ello, el cultivo de soja se puede asociar a un balance negativo de nitrógeno en suelo. Esto se debe a que es incapaz de fijar el 100% de sus requerimientos de la atmósfera, por lo que absorbe parte de estos del suelo (Ferrari, 2010, García, 2011).

Cabe mencionar que, a pesar de encontrarse diversos estudios sobre la relación entre la productividad de soja y la extracción de nutrientes, no se encontraron trabajos previos sobre como este factor influye en el cultivo de invierno siguiente, aspecto importante para este trabajo.

2.2. LA PREPARACIÓN DEL BARBECHO

El periodo de barbecho es definido como el tiempo que transcurre entre la muerte de un cultivo existente, producto de la aplicación del herbicida, y la siembra del cultivo siguiente (Ernst, 2000, Ernst y Siri-Prieto, 2009). El periodo óptimo es variable según cual sea el cultivo antecesor y las condiciones climáticas en ese año (Ernst, 2000, Ernst y Siri-Prieto, 2008).

El tiempo de barbecho influye en la descomposición del rastrojo. Cuanto más largo, mayor la descomposición, y esto adquiere mayor relevancia cuando la relación C:N y el volumen se incrementan, como ocurre para rastrojos de maíz y sorgo (Studdert y Echeverría, 2006).

Realizar un barbecho con una longitud adecuada, posibilita aumentar los rendimientos del cultivo siguiente (Gambaudo et al., 1987, Ernst, 2000, Ernst y Siri-Prieto, 2009), como consecuencia de la acumulación de mayor cantidad de agua en suelo y del incremento en la disponibilidad de nitrógeno en suelo a la siembra. Además, permite hacer un adecuado control de malezas y lograr una óptima preparación física de la cama de siembra (Gambaudo et al., 1987).

La presencia de un cultivo creciendo en verano provoca naturalmente la existencia de barbechos cortos previo a la siembra de un cultivo de invierno. A su vez, este barbecho corto suele coincidir con un periodo de temperaturas más bajas y menor evaporación. Cuando el antecesor es un cultivo de invierno, el periodo de barbecho es más prolongado, favoreciendo la acumulación de agua y nitrógeno, aunque las altas temperaturas de verano pueden aumentar la pérdida por evaporación (cuando no existe

cultivo de verano). El largo excesivo del barbecho aumenta la probabilidad de pérdidas de nitrógeno en verano y a principios de otoño (Forján y Manso, 2016b).

En sistemas con siembra directa, el periodo de barbecho determina la disponibilidad de nitrógeno al momento de la siembra. Esto es debido a que, la muerte del cultivo o maleza permite que se inicie la descomposición de los residuos orgánicos subterráneos y cesa la absorción de agua y N-NO_3^- del suelo (Ernst, 2000).

Asimismo, el manejo del barbecho influye en las posibles pérdidas de nitrógeno en el sistema, dado que al no existir un cultivo creciendo activamente se aumentan las pérdidas por desnitrificación. Estas pérdidas son producto de que, por un lado, no hay un cultivo absorbiendo N-NO_3^- , aumentando la concentración de soluto, y además no se absorbe agua, lo que provoca que más agua pase a través del suelo (Perdomo y Barbazán, 2015).

Aparte de ello, la presencia del rastrojo en superficie aumenta la cantidad de agua que infiltra en relación con la que escurre, provocando un aumento en la probabilidad de lavado o lixiviado (Perdomo y Barbazán, 2015).

Simultáneamente, la duración del barbecho actúa fundamentalmente sobre la cantidad de agua almacenada al momento de la siembra (Forján y Manso, 2016b). Cortos periodos de barbecho, producto de algunas secuencias de cultivos, frecuentemente limitan la recarga del perfil del suelo y consecuentemente el uso consuntivo posterior (Quiroga et al., 2005).

La práctica de mantener el suelo cubierto por rastrojo en el periodo de barbecho incrementa la proporción de agua que ingresa al suelo por la lluvia y disminuye la evaporación de esta. Este manejo podría contraer riesgos para los cultivos de invierno una vez que el suelo se encuentra saturado (en ambiente con abundantes lluvias en el invierno), pero para los cultivos de verano trae grandes ventajas apreciables (Ernst y Siri-Prieto, 2009).

Es por ello que diversos estudios difieren sobre la importancia del barbecho en cuanto a la acumulación de agua para el trigo siguiente ya que, en esta región, por lo general, durante el otoño se registra una buena recarga del perfil. Según Forján y Manso (2016b), solamente se logran encontrar diferencias en el agua disponible a la siembra de trigo en los años que las precipitaciones de otoño son inferiores a la normal. En ese caso, aquellas chacras que provienen de soja o maíz registran menor disponibilidad de agua al momento de la siembra. Abeledo y Miralles (2011), declaran que mayores contenidos de agua en el suelo redundan en aumentos del rendimiento independientemente de la situación nitrogenada. A su vez, un estudio realizado en la zona semiárida del sudoeste

bonaerense demostró la existencia de un efecto de la cobertura durante el barbecho de verano. Observándose un aumento del agua disponible en el suelo con el aumento de cobertura del mismo, no solo en los primeros 0-20 cm del suelo, (López et al., 2014).

Asimismo, Abeledo y Miralles (2011), demostraron que cuanto mayor contenido de agua en suelo al momento de la siembra, menos dependiente es el cultivo a las precipitaciones posteriores. Siendo este hecho de gran importancia debido a que, condiciones de estrés hídrico luego de Z 32 restringen las posibilidades de alcanzar elevados rendimientos en grano (Hoffman et al., 2009).

2.3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA NUTRICION NITROGENADA DEL CULTIVO DE TRIGO

Cuando no hay limitante de agua u otro factor ambiental de crecimiento, tanto la producción de biomasa como el rendimiento final del cultivo de trigo están estrechamente relacionados a la disponibilidad de nitrógeno (García Lamothe, 2004, Berger et al., 2015).

El nitrógeno es el nutriente que más está limitando la producción de los cereales de invierno (Hoffman y Perdomo, 2011, Hoffman et al., 2013), explicando la mayor proporción de la brecha de rendimiento (Ernst et al., 2016). Por ello es probable que no exista otro nutriente del cual se puedan derivar más beneficios económicos al ser manejado eficientemente.

Se ha demostrado una estrecha relación entre la demanda de este y los incrementos en rendimientos (Perdomo y Barbazán, 2015, Hoffman et al., 2017). El cultivo de trigo ha experimentado un crecimiento del rendimiento potencial, incrementado aproximadamente un 60 % su rendimiento (Berger et al., 2014, Hoffman et al., 2017). Estos altos niveles de rendimientos implican altos niveles de absorción y acumulación de nitrógeno durante el período crítico (Hoffman et al., 2017). Este hecho podría estar determinando el techo de rendimiento en Uruguay ya que el período de llenado de grano es relativamente corto, comparado con otros países que poseen mayor potencial de rendimiento, y las oportunidades de absorción tardía si bien existen, son menores (Berger et al., 2015).

Se estima que la demanda de nitrógeno por parte del cultivo de trigo, desde el año 2000 hasta el 2015, ha crecido a una tasa de 6 kg de N ha⁻¹ año⁻¹. Si se comparan los nuevos cultivares con los cultivares de fines de los años 90, sin importar el aporte de nitrógeno de los suelos, este incremento implica 100 kg adicionales de N ha⁻¹ (Hoffman et al., 2017).

Por otra parte, la oferta de nitrógeno por parte del suelo ha disminuido, producto del descenso de las rotaciones con pasturas al menos hace 10 años. Esto sumado al incremento en la demanda de nitrógeno, ha llevado al crecimiento de las dosis óptimas del mismo (Hoffman et al., 2017). El nitrógeno óptimo en pos-emergencia basado en los niveles de N-NO_3^- en suelo en Zadoks 22 y en planta en Zadoks 30, aumentó en 7 kg ha^{-1} , por cada año de agricultura pos-pastura (Hoffman y Perdomo, 2011). En 15 años, el suelo pasó de cubrir un 70% de los requerimientos totales de nitrógeno de los cultivos, a cubrir solamente un 20%. Además, en dicho periodo las dosis de nitrógeno óptimas para el máximo rendimiento aumentaron a cantidades o superiores a los 200 kg N ha^{-1} (Hoffman et al., 2017).

A su vez, es necesario mencionar que las condiciones climáticas influyen en la eficiencia del uso de nitrógeno (García Lamothe, 2004). Es por ello que la única forma de ajustar correctamente este nutriente es disponiendo de un indicador de la situación nitrogenada en un determinado momento, para deducir que capacidad tendrá el suelo de reponerlo cuando el cultivo comience la extracción y disponer de información que permita su interpretación objetiva (Hoffman et al., 1997, Hoffman et al., 2010).

2.3.1. El impacto de la nutrición nitrogenada sobre el rendimiento en grano

La necesidad de fertilizar con nitrógeno, en contraste con los otros nutrientes, no solo está asociada a la capacidad de aporte del nutriente del suelo, sino que además está ligada al potencial de rendimiento (Berger et al., 2015).

La acumulación de nitrógeno por parte de la planta en función del tiempo sigue una curva sigmoide, donde al inicio la acumulación es escasa, dado que la planta crece a bajas tasas y se está desarrollando. Luego ocurre una etapa de máxima absorción, que corresponde a una etapa de activo crecimiento, y por último la tasa de acumulación se reduce durante la fase final de llenado de los granos. Es importante destacar que la curva de absorción de nitrógeno acompaña a la curva de acumulación de materia seca. Estas son similares pero la de nitrógeno la antecede (García Lamothe, 2004, Álvarez, 2006, Berger et al., 2015, Perdomo y Barbazán, 2015).

En concordancia, diversos estudios demuestran la clara relación entre la cantidad de materia seca acumulada durante todo el crecimiento, el nitrógeno absorbido por parte del cultivo y el rendimiento en grano (Cha y Durán, 2001, Mazzilli, 2004, Dall' Orso et al., 2016, Berger et al., 2017). Esta estrecha relación influye en mayor medida el rendimiento que el índice de cosecha. Entonces, el rendimiento en grano es afectado por la acumulación de materia seca pre-antesis, la cual no solo está ligada a la formación de estructuras, como los tallos, espigas, espiguillas y granos, sino que está también asociada

a la cantidad de nitrógeno removible durante el llenado de grano. Por ende, es importante generar altas tasas de crecimiento, y por consiguiente altas cantidades de acumulación de materia seca y nitrógeno absorbidos (Berger et al., 2014).

Un adecuado suministro de nitrógeno en las etapas iniciales del cultivo de trigo es crucial para incrementar el vigor y la sobrevivencia de macollos que llegan a ser espiga (García Lamothe, 1998, 2004, Martínez et al., 2015). Con el correcto manejo de este nutriente, se promueve un 80% de sobrevivencia de macollos que producirán espiga, mientras que un cultivo común produce un 60% (García Lamothe, 2004). A su vez, suministrar nitrógeno en macollaje permite comenzar a construir un alto potencial de producción y, como parte del nitrógeno agregado en este estadio se absorbe entorno a Z 30, se estaría comenzando a asegurar que el cultivo no se vea sometido a deficiencias de nitrógeno en el período de inicio de fijación del potencial (Hoffman et al., 2010). El agregado de nitrógeno en Z 33, estadio en el cual comienza la máxima tasa de crecimiento (Dall' Orso et al., 2016, Berger et al., 2017, Fassana et al., 2017), determina el aumento en rendimiento a través del incremento del número de granos m^{-2} (García Lamothe, 2004, Mazzilli, 2004, Miralles et al., 2014, Hoffman et al., 2015, Fassana et al., 2017).

2.3.2. El impacto de la nutrición nitrogenada sobre la calidad de grano

En trigo es de gran importancia obtener un grano con alto contenido de proteína (Fischer et al., 1993, Perdomo y Barbazán, 2015). Esto es debido a que la calidad panadera de la harina se ve perjudicada cuando el contenido proteico de la misma es bajo, disminuyendo la elasticidad de la masa y su capacidad de leudar (Johansson et al., 2008, Perdomo y Barbazán, 2015). Es por ello que a nivel industria, la proteína en grano recomendable es de al menos 11,5% (Vázquez, 2009).

Tanto el efecto año, como las condiciones de producción y la disponibilidad de nitrógeno ejercen gran influencia sobre el nivel de proteína en grano (Fischer et al., 1993, García Lamothe, 2004, Hoffman et al., 2010, Vázquez et al., 2019). Si se dan condiciones que favorecen un elevado potencial de rendimiento del cultivo y baja disponibilidad de nitrógeno en primavera, el agregado del mismo evita que se diluya el nitrógeno en grano (Ernst et al., 1999), logrando un adecuado nivel de proteína en grano para la comercialización (Berger et al., 2015).

El nitrógeno puede ser limitante durante el periodo de llenado de grano y en la práctica, en muchos casos, se observa una relación negativa entre rendimiento y la proteína en grano. En años en donde hay condiciones para lograr elevados rendimientos, según la cantidad de biomasa acumulada en espigazón, los niveles de proteína en grano bajan (Berger et al., 2015).

A su vez, como consecuencia de los incrementos en rendimiento en trigo, se ha observado una fuerte dilución de nitrógeno en grano, lo cual conduce a caídas significativas en los niveles de proteína cruda (Berger et al., 2015, Hoffman et al., 2017). Los niveles de dilución son aproximadamente 0,5% de proteína cruda en grano por cada tonelada de incremento del rendimiento, aunque dicho valor también depende de la oferta total de nitrógeno en suelo (Hoffman et al., 2017).

La proteína que se acumula en el cultivo durante el llenado de grano proviene del nitrógeno removilizado desde otras partes de la planta y absorbido desde el suelo (Zörb et al., 2018). Según Vázquez et al. (2019), las dosis de nitrógeno aplicadas son el factor que más incide sobre el contenido de proteína en grano. Cada tonelada de grano formada contiene 20 kg de nitrógeno aproximadamente, para esto el cultivo debió absorber desde el suelo una cantidad superior, y en este debió haber disponible aún más, dado que la eficiencia de absorción es entorno al 40-70% (Berger et al., 2015). Asimismo, a pesar de haberse incrementado las dosis de nitrógeno aplicadas en el cultivo de trigo, estas siguen siendo insuficientes o ineficientes debido a que cuando las condiciones climáticas favorecen el alto rendimiento, los niveles de proteína en grano son muy bajos en relación con lo que requiere la industria (Hoffman et al., 2017).

Según Frolla et al. (2017), agregar altas dosis de N a la siembra no es una estrategia eficiente para mejorar el contenido de proteína en grano. A su vez, las aplicaciones posteriores son efectivas cuando la fertilización base fue apropiada y se encuentra una adecuada disponibilidad hídrica en macollaje. Estudios nacionales demuestran que las aplicaciones posteriores son para aumentar la concentración proteica del grano (García Lamothe, 2004, Vázquez et al., 2019). Tanto Ernst et al. (1999) como García Lamothe (2004), relatan que el manejo de la fertilización con nitrógeno en estadios tardíos del desarrollo, tienden a elevar el tenor proteico del grano (Ernst et al., 1999, García Lamothe, 2004, Johansson et al., 2013, Vázquez et al., 2019).

También se debe tener en cuenta que, cualquier factor ambiental que acelere el envejecimiento de las hojas, normalmente favorece la formación de granos chicos con mayor nivel de proteína, pero con menor peso específico. Una apropiada disponibilidad de nitrógeno provoca, por lo general, el efecto de retardar la muerte del follaje, extender la síntesis de proteína y la funcionalidad de las raíces, además de incrementar la biomasa. De esta manera, contribuye a aumentar la cantidad de nitrógeno que va a llegar al grano (García Lamothe, 2004).

2.3.3. Fertilización nitrogenada y su interacción con el agua en suelo

El estrés hídrico y la disponibilidad de nitrógeno son dos principales limitantes en la producción de cultivos (Sinclair y Rufty, 2012). Rouphael et al. (2012), mencionan que las pérdidas en rendimiento de los cultivos inducidas por el estrés hídrico probablemente superen las pérdidas por todas las demás causas, ya que tanto la gravedad como la duración de este son críticas.

Diferentes estudios han demostrado la estrecha relación entre el agua disponible en suelo y la eficiencia en el uso del nitrógeno (García Lamothe, 1998, Nielsen y Halvorson, 1991, Tilling et al., 2007, Saint Pierre et al., 2008, Kunrath et al., 2020). Para un correcto manejo de la fertilización nitrogenada en trigo se debe tener en cuenta la disponibilidad de agua en suelo que presenta el cultivo para su crecimiento, ya que un mal manejo podría generar grandes efectos negativos para el cultivo (van Herwaarden et al., 1998, Kibe et al., 2006). Dado que la absorción de nitrógeno depende del estado del agua del suelo y de la planta, idealmente, el nitrógeno debe aplicarse solo cuando en el suelo hay suficiente agua disponible para las plantas (Tilling et al., 2007).

Las restricciones de agua tienen un doble efecto en el crecimiento de los cultivos. Un efecto directo por el cual el crecimiento del cultivo se reduce proporcionalmente a la reducción de la transpiración, y un efecto indirecto producto de un déficit de nitrógeno en el cultivo inducido por la sequía (Kunrath et al., 2020). Asimismo, García Lamothe (1998), manifiesta que la escasez de agua limita la respuesta a los fertilizantes debido a que retarda los tres procesos involucrados en la nutrición mineral: difusión, flujo de masa e interceptación por raíces.

Entonces, cuando el suelo está seco, la absorción de nitrógeno por parte de la planta puede reducirse más que la reducción en la demanda del mismo, lo que lleva a una limitación de nitrógeno inducida por el estrés hídrico (Kunrath et al., 2020).

Relacionado a ello, en Australia existe un fenómeno conocido como “Haying-off”, en el cual el cultivo de trigo falla en rendimiento con respecto al potencial que presentaba en estado vegetativo. Atribuyéndole esta respuesta en rendimiento negativo al agotamiento de agua en suelo debido al elevado crecimiento vegetativo producto de altos niveles de nitrógeno en suelo (van Herwaarden et al., 1998). Las condiciones que más comúnmente provocan el fenómeno de “Haying-off” es un rápido crecimiento vegetativo en respuesta a un adecuado nivel de agua y nitrógeno en suelo, seguido de una determinante sequía (McDonald, 1992).

Aplicaciones de fertilizantes nitrogenados en momentos de extremadas sequías trae severas consecuencias como, reducción de la asimilación de nitrógeno y reducción en

la capacidad del cultivo de extraer agua del suelo (van Herwaarden et al., 1998). Concomitante, García Lamothe (2004), relata que, bajo condiciones de escasez hídricas para el cultivo de trigo, la respuesta al agregado de nitrógeno puede ser escasa, nula o incluso negativa. Esta eficiencia negativa se ha determinado en situaciones donde las condiciones son extremadamente secas, por ende, el agua se torna el factor de mayor limitación para el cultivo.

En términos generales, se acepta que una mayor aplicación de nutrientes no mejorará el crecimiento de las plantas cuando el nutriente ya está presente en cantidades suficientes en el suelo y la sequía es severa (Rouphael et al., 2012).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

El experimento se realizó en la Estación experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC), Facultad de Agronomía, ubicada en la ruta 3 en el km 363, Paysandú, Uruguay. El trabajo de campo comenzó en el año 2019 con la siembra del cultivo de soja y finalizó en noviembre del 2020 con la cosecha del cultivo de trigo.

El ensayo se instaló sobre un Brunosol Eutrico Típico de la unidad San Manuel, según la carta de reconocimientos 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 16 tratamientos (Cuadro 1). Surgiendo estos de la combinación de 4 antecesores de verano y 4 alternativas de manejo nitrogenadas durante el cultivo de trigo.

El primer antecesor es un cultivo de soja hasta V8, simulando un verano prácticamente sin cultivo. El siguiente tratamiento es un cultivo de soja hasta R3, el cual simula un cultivo que, no lleno el grano y no se cosechó, o un cultivo de cobertura de una leguminosa. El tercer antecesor consistió en soja raleada al 50 % en R 4.5-5 (soja a cosecha P50), para poder contar con un cultivo a cosecha de menor rendimiento en grano. El cuarto antecesor es un cultivo de soja a población normal (soja a cosecha P100).

Sobre cada uno de los antecesores de verano se realizaron 4 tratamientos de manejo del N en el cultivo de trigo siguiente. Estos tratamientos fueron: un testigo fertilizado solo a siembra (NR a S), en base al modelo de nitrógeno recomendado (NR) de la Facultad de agronomía (Hoffman et al., 2010); el segundo tratamiento consistió en NR a la siembra y Z22 (NR S – Z 22); el tercer tratamiento nitrogenado consistió en NR a siembra, Z 22 y Z 30 (NR S – Z 30) según el modelo de facultad de agronomía (Hoffman et al., 2010); y el cuarto tratamiento, fue pensado como un tratamiento sin limitantes nitrogenadas (N no limitante) con 233 kg de N ha⁻¹. El nitrógeno fue distribuido en siembra, Z 22, Z 30 y Z 33 (23, 80, 70 y 60 kg ha⁻¹, respectivamente).

Cuadro 1. Tratamientos realizados.

Parcela mayor (PM) – Factor 1	Parcela menor (Pm) – Factor 2
Soja hasta V7-8	Testigo NR a S. (P, K, S y Zn sin limitantes)
Soja hasta R3	NR S – Z 22. (P, K, S y Zn sin limitantes)
Soja a cosecha P50	NR S – Z 30 (S, Z22 y Z30). (P, K, S y Zn sin limitantes)
Soja a cosecha P100	N no limitante (23-80-70-60). (P, K, S y Zn sin limitantes)

3.3.DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño utilizado corresponde a un arreglo factorial en bloques completos al azar con parcelas divididas con 3 repeticiones. El factor aplicado a las parcelas mayores fueron los cuatro tratamientos del cultivo antecesor, y en las subparcelas, los niveles de fertilización nitrogenada durante el cultivo de trigo.

Las parcelas mayores midieron 32 m x 7,3 m, mientras que las menores tuvieron un tamaño de 8 m x 7,3 m.

El modelo estadístico utilizado para el análisis fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + PM_i + \delta_{ik} + Pm_j + (PM*Pm)_{ij} + B_k + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} : Rendimiento de cada parcela menor.

μ : rendimiento promedio de todo el experimento.

PM_i : Efecto del i-ésimo tratamiento de soja.

δ_{ik} : Error experimental asociado a la parcela mayor.

Pm_j : Efecto del j-ésimo tratamiento de nitrógeno.

$(PM*Pm)_{ij}$: Efecto de la interacción entre la i-ésima parcela mayor (tratamiento de soja) y la j-ésima parcela menor (tratamiento de nitrógeno).

B_k : Efecto del k-ésimo bloque.

ϵ_{ijk} : Error experimental asociado a la interacción entre la i-ésima parcela mayor (tratamiento de soja) y la j-ésima parcela menor (tratamiento de nitrógeno).

Siendo: $i=1, 2, 3, 4$ (tratamientos de soja); $j=1, 2, 3, 4$ (tratamientos de nitrógeno); $k= 1, 2, 3$ (bloques).

Los datos fueron analizados con el programa InfoStat, realizando ANAVA a los modelos utilizados y empleando el test de Tukey para la separación de medias.

3.4.MANEJO DE LOS CULTIVOS

3.4.1. Manejo del cultivo de soja

El cultivo de soja fue sembrado el 11 de noviembre del año 2019, con la variedad DM 60i62 IPRO, a una densidad de 16 semillas m^{-1} con el objetivo de tener 12 plantas m^{-1} a 38 cm de distancia entre hileras. La fertilización basal consistió en el agregado de 60 $kg\ ha^{-1}$ de Azufertil, el cual contiene en su formulación 24% de azufre, 22% de calcio, 4% de magnesio, 2% de Zinc y 0.60% Boro. Adicionalmente se agregaron 120 $kg\ ha^{-1}$ de 7-40, el cual posee 7% de nitrógeno y 40% de fosforo.

El 2 de enero de 2020, cuando el cultivo se encontraba en V8, se cortó el mismo en las parcelas pertenecientes al tratamiento soja hasta V8. El día 11 de febrero, cuando el cultivo se encontraba en R3, se procedió a cortar la soja en las parcelas del tratamiento soja hasta R3. En dicho día, además, se realizó análisis de suelo para determinar P, N y K.

La soja alcanzó el estadio R 4.5-5.0 el 26 de febrero. Efectuándose en ese momento el raleo del 50% de las plantas en las parcelas del tratamiento soja a cosecha P50.

La cosecha de los antecesores soja a cosecha P50 y soja a cosecha P100, se llevó a cabo el día 20 de abril del 2020. También fueron realizados análisis de suelo para N, P y K inmediatamente posterior a la cosecha.

3.4.2. Manejo del cultivo de trigo

La variedad utilizada fue Baguette 620. Esta se caracteriza por tener ciclo intermedio, capacidad de macollaje media y requerimientos mínimos de frío (Hoffman et al., 2020). La siembra se realizó el 3 de junio de 2020, con una densidad de 50 semillas m^{-1} con el objetivo de tener 40 plantas m^{-1} a una distancia entre hileras de 19 cm.

Se llevó a cabo una fertilización basal el 4 de junio, aplicándose KCl y fosfato de calcio para realizar un ajuste de los nutrientes K y P, respectivamente. Dicha fertilización se efectuó en base a análisis de suelos (Cuadro 2), los cuales fueron ejecutados previamente a la siembra del cultivo de trigo. En cuanto a la fertilización nitrogenada, se realizó el 11 de junio siguiendo el modelo de nitrógeno recomendado de Facultad de

Agronomía (Hoffman et al., 2010) en base a análisis de suelo (Cuadro 2). Dicho análisis se realizó por parcela mayor, y el fertilizante utilizado fue urea azufrada. El cultivo emergió el 15 de junio, y en los días siguientes se detectó presencia de heladas, provocando manchas necróticas.

Cuadro 2. Nivel de nitrógeno, fósforo y potasio en suelo previo a la siembra del cultivo de trigo y dosis aplicadas al momento de la siembra del trigo según tratamiento del cultivo antecesor.

Tratamiento	N (ppm)	Fertilización (UN ha ⁻¹)	P (ppm)	Fertilización (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	K (ppm)	Fertilización (kg K ₂ O ha ⁻¹)
Soja hasta V7-V8	7	23	31	70	0,54	150
Soja hasta R3	9	20	31	70	0,52	150
Soja a cosecha P50	9	20	30	70	0,45	150
Soja a cosecha P100	7	27	48	70	0,50	150

Soja a cosecha P50: soja raleada al 50% en R4.5-5; Soja a cosecha P100: soja a cosecha con 100% de la población.

El trigo alcanzó el estadio Z 22 aproximadamente el 15 de julio. Se realizó la fertilización el 21 de dicho mes, basándose en los análisis de suelo para los tratamientos NR S - Z 22 y NR S - Z 30 (Anexo 1).

El cultivo alcanzó el estadio Z 30 el 7 de agosto. A partir de este estadio solo se fertilizan dos parcelas menores, siendo estos los tratamientos de N no limitante y NR S - Z 30. El tratamiento NR S - Z 30 se debía fertilizar según el porcentaje de nitrógeno en planta, con el modelo de curva de dilución, a través del índice de nutrición nitrogenada (Fassana, 2019). Producto de que el cultivo no presentaba deficiencias de nitrógeno, no se debería de haber fertilizado, sin embargo, esto se realizó para a diferenciarlo del tratamiento que solo llevo nitrógeno a siembra y Z22 (Anexo 1).

El 4 de setiembre, cuando el cultivo se encontraba en Z 33, se fertilizó únicamente el tratamiento N no limitante (Cuadro 1). En cuanto al tratamiento NR S - Z 30, se detectó que se encontraba en suficiencia, por lo que no se fertilizó.

El manejo de malezas durante el crecimiento del trigo se realizó en dos momentos para el control de hoja ancha. El 11 de julio, se colocó 1,5 litros ha⁻¹ del herbicida Curtail y el 4 de agosto se aplicó una dosis de 120 cc y 15 gramos respectivamente del herbicida Lontrel con Clerb.

El manejo de enfermedades foliares y de espiga, se realizó en forma preventiva mediante dos aplicaciones de fungicidas. El 8 de setiembre se aplicó xantho 1,2 lt ha⁻¹ para roya y mancha amarilla. El 7 de octubre Swing plus 1,5 lt ha⁻¹ para la prevención de fusarium.

3.5.DETERMINACIONES DURANTE EL CULTIVO DE TRIGO

3.5.1. Suelo

Se tomaron muestras de suelo por parcela mayor en dos momentos durante el cultivo de trigo, a siembra y en Zadoks 22 (inicio de macollaje). Ambas muestras se realizaron a 20 cm de profundidad, para obtener valores de nitrógeno. Es de mencionar que durante el cultivo de soja (previo al cultivo de trigo) se realizaron muestreos de suelo a R3 y cosecha. En este caso se obtuvieron datos de nitrógeno, fósforo y potasio.

3.5.2 Planta

Se realizaron muestreos de biomasa en Z 22, Z 30, Z 33, Z 65 y cosecha. Estos muestreos se realizaron al azar dentro de cada parcela menor, con la finalidad de obtener materia seca, la cual se obtuvo secando en estufa a 60°. Luego, las muestras fueron enviadas al laboratorio donde se determinó la concentración de nitrógeno en planta.

Los datos obtenidos a Z 30 y Z 33 se utilizaron como base para determinar las dosis de fertilización de las parcelas que llevaban nitrógeno recomendado completo.

3.5.3. Determinación de rendimiento y componentes

A Z 22 se realizó el conteo del número de plantas en cuatro metros lineales por parcela menor. En estos mismos cuatro metros lineales se contaron los macollos a Z 30 y se realizó el conteo de espigas a Z 70.

En cuanto al índice de cosecha, este se calculó a través de la biomasa obtenida cosechando manualmente los cuatro metros lineales y el rendimiento alcanzado en esa misma superficie. El rendimiento se obtuvo cosechando a máquina, con una cosechadora de 1,3 metros de ancho, realizando dos pasadas por cada parcela menor.

3.6.DETERMINACIONES POST COSECHA

3.6.1. Rendimiento y componentes

El número de granos por espiga se obtuvo a través del peso de mil granos y el peso total de los granos. Para esto, se trillaron los fardos obtenidos de los cuatro metros lineales en cada parcela menor. Se pesaron tres muestras de 100 granos para luego calcular el peso de mil granos. A su vez, se pesó el total de granos por fardo cosechado. Teniendo en cuenta estos dos resultados y el número de espigas, se halló el número de granos por

espiga. En cuanto al rendimiento en grano, surge del peso de lo cosechado a máquina en 17,3 m².

3.6.2. Calidad de grano

Los valores de peso hectolítrico y humedad en grano se obtuvieron en laboratorio con una submuestra de lo cosechado a máquina en cada parcela menor. Asimismo, se molió una submuestra de los granos, la cual fue enviada al laboratorio para obtener el valor de proteína en grano.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO

4.1.1. Precipitaciones

Las precipitaciones durante el periodo de crecimiento del cultivo de soja en la zafra 2019/2020 estuvieron por debajo de la media histórica de 30 años. Se acumularon un total de 363 mm durante todo el cultivo (Figura 1), siendo este valor inferior a los 500 mm requerido por una soja de primera (Scianca et al., 2010).

Durante la etapa vegetativa del cultivo de soja las lluvias fueron similares a la media de los últimos 30 años. En el mes de febrero, cuando comienza el periodo crítico, las precipitaciones fueron notablemente inferiores, acumulando un total de 105 mm por debajo del promedio histórico en dicho mes (66% inferior). Este hecho seguramente este explicando el rendimiento en grano observado, considerando que la deficiencia hídrica en la etapa vegetativa y en el periodo crítico pueden provocar una disminución de un 30% del rendimiento (Giménez, 2017).

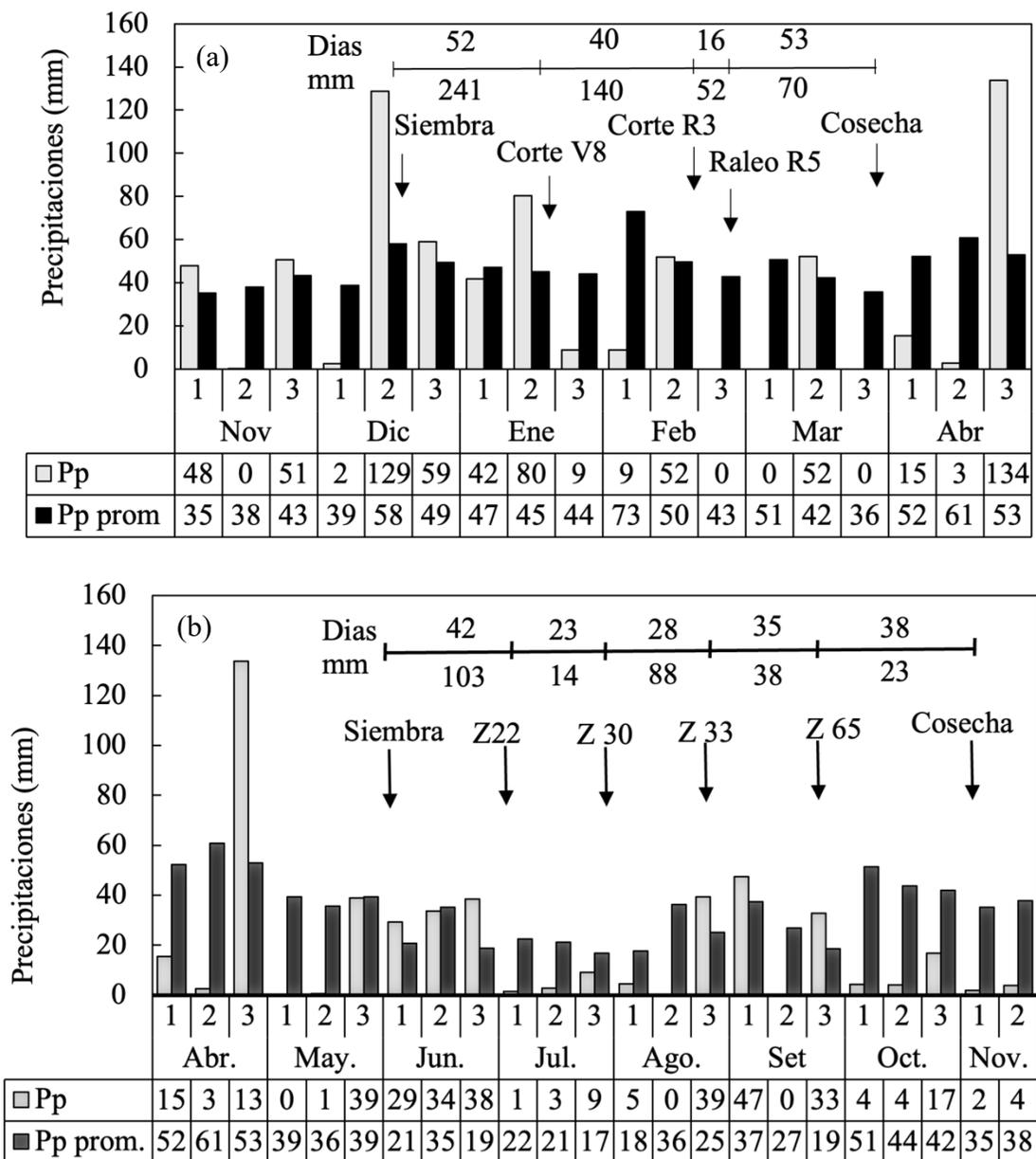


Figura 1. Comparación de precipitaciones en soja de zafra 2019/20 con promedio histórico de 30 años (a). Comparación de precipitaciones en trigo de zafra 2020 con promedio histórico de 30 años (b). Pp: precipitaciones; Pp prom.: promedio de precipitaciones históricas de 30 años en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni.

En cuanto a la zafra de trigo, también se caracterizó por precipitaciones inferiores a la media histórica (Figura 1). En esta se acumularon un total de 270 mm en todo el ciclo, siendo este valor altamente inferior al límite de 380-400 mm a partir del cual el cultivo

comienza a estar limitando por el agua, afectando la concreción del potencial (Hoffman et al., 2009). En junio, mes que se realizó la siembra, las precipitaciones fueron mayores a la media histórica (101 mm vs 75 mm). Entre siembra y Z 22, lo cual se dio a finales de junio y principios de julio, las precipitaciones fueron similares a la histórica debido a las elevadas lluvias de junio, por lo que el cultivo no sufrió deficiencias hídricas.

A partir de allí, las precipitaciones en la zafra 2020 se ubicaron por debajo de la media histórica en todos los periodos. En el periodo Z 22 – Z 30 las precipitaciones fueron un 60 % inferiores al promedio histórico. Entre Z 30 a Z 33, se observaron escasas o nulas precipitaciones. En el periodo siguiente (Z 33 a Z 65), se registraron precipitaciones superiores a la media histórica en la última decena de agosto – primera decena de setiembre, pero en su total no lograron superar a la histórica de 30 años en dicho periodo. En la última etapa del cultivo (Z 65 – cosecha), las precipitaciones nuevamente fueron escasas.

4.1.2. Temperatura y coeficiente fototermal

Si bien el año 2020 se presentó con temperaturas similares a la media histórica durante el periodo de crecimiento del trigo, en el período crítico, ubicado mayormente en el mes de setiembre, la temperatura estuvo 1°C por debajo de la media histórica. Esto resulta beneficioso, ya que está asociado una mayor duración del periodo de formación de granos (Miralles, 2004).

El coeficiente fototermal (Q) presentó valores superiores a la media histórica de 30 años durante el periodo de crecimiento del trigo (Figura 2). Entre principios de setiembre y principios de octubre, donde ocurrió el periodo crítico, los valores de Q fueron altos, teniendo un valor promedio de $1,3 \text{ Mj m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ en el mes de setiembre, en relación con $1,1 \text{ Mj m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ la media histórica. Es por ello que, sin considerar la limitación por agua, desde este punto de vista el potencial de rendimiento en grano debiera ser muy elevado (Miralles, 2004).

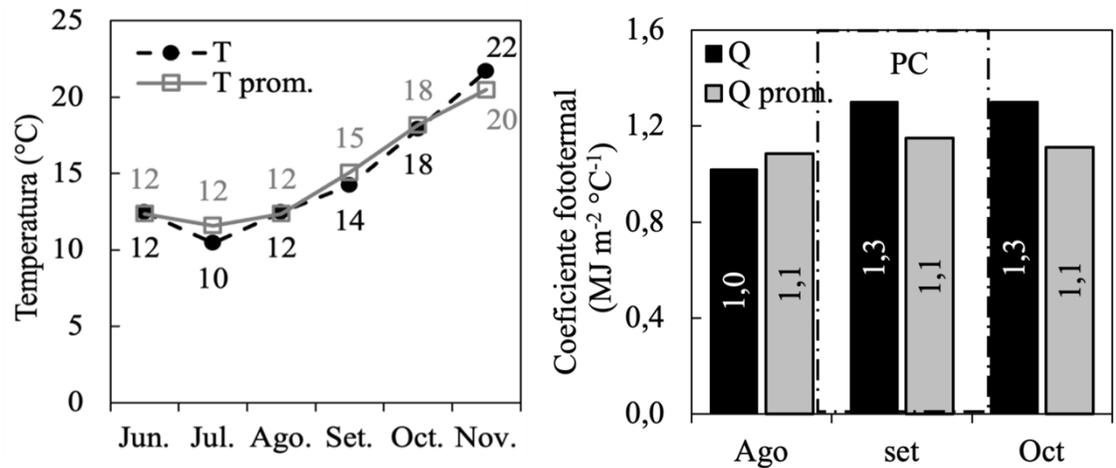


Figura 2. Temperatura año 2020 y promedio (izquierda). Coeficiente fototermal año y promedio 30 años en agosto, setiembre y octubre (derecha). T: temperatura media; T prom.: promedio de temperatura media históricas de 30 años en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni Q: coeficiente fototermal; PC: periodo crítico; Q prom.: promedio del coeficiente fototermal histórico de 30 años en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni.

4.2. EFECTO DEL ANTECESOR

4.2.1. Efecto del antecesor sobre el balance hídrico

Como se puede ver en el diagrama siguiente, previo a la siembra del cultivo de soja se realizó un barbecho de 30 días (Figura 3). Luego de ello, producto del manejo de los diferentes tratamientos del antecesor soja, se generaron distintos largos de barbecho. Analizando los antecesores que no fueron cosechados, se observó que el antecesor soja hasta V8 dejó un barbecho muy largo (153 días), siendo esto posiblemente favorable para una mayor producción del trigo siguiente, debido a una mayor acumulación de agua y nitrógeno en suelo (Gambaudo et al., 1987), aunque el suelo permaneció un tiempo considerable descubierto. El antecesor soja hasta R3 se finalizó en el comienzo de la fijación máxima de nitrógeno (Zapata et al., 1987), y el inicio del pico de demanda de nitrógeno (Hanway y Weber, 1971). Provocando este antecesor un rastrojo que cubrió el suelo durante el barbecho, y posiblemente aportó nitrógeno al mismo. El antecesor soja hasta R3 generó un barbecho de menor duración que el anterior (113 días), aunque continúa siendo un barbecho largo. Según Gambaudo et al. (1987) y Ernst y Siri-Prieto (1995), los días de barbecho óptimo para el cultivo de trigo es de entre 50 y 70 días dependiendo de la edad de chacra y el método para la preparación del barbecho empleado. Según estos autores (Gambaudo et al., 1987, Ernst y Siri-Prieto, 1995), los antecesores

que llegaron a cosecha tuvieron un periodo de barbecho por debajo de la duración mínima recomendada, siendo este de 44 días.

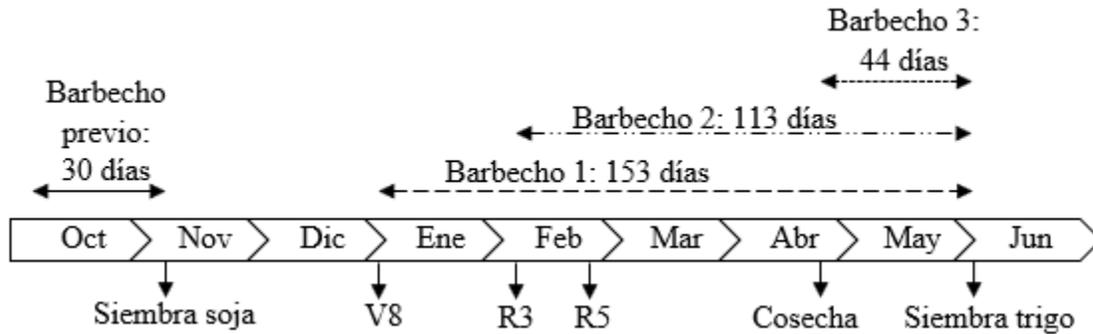


Figura 3. Diagrama del cultivo antecesor, su finalización y duración del barbecho según antecesor.

Examinando el balance hídrico del suelo que se presenta en la figura 4, podemos observar que, en todos los antecesores, excepto soja hasta V8, el cultivo de soja creció bajo condiciones de déficit hídrico en parte de su ciclo.

Este déficit hídrico según Andriani (2002), puede verse reflejado en una disminución de la producción de biomasa y rendimiento en grano en el cultivo de soja, si se ubica durante el periodo crítico (PC). Para la soja cosecha P50 y Cosecha P100, esta falta de agua seguramente sea la causa principal de los bajos rendimientos observados (Figura 5). Según Andriani (2002), deficiencias severas en el periodo R1-R5 pueden tener como consecuencia disminuciones de un mínimo de 20% sobre el rendimiento de grano, debido a que es en dicho periodo en el cual se determina el número de granos por unidad de área. El periodo R5-R7 es el más afectado por deficiencias hídricas ya que si bien se ven alterado tanto el número de vainas como el de granos por vaina, el peso de grano es el componente mayormente perjudicado, por lo que deficiencias en este estadio podrían causar pérdidas de 40% o más (Andreani, 2002), eso concuerda con Salvagliotti et al. (2010).

La marcada deficiencia hídrica en la zafra de verano previa provocó alteraciones en la situación hídrica a la siembra del cultivo de trigo, dependiendo de cada antecesor. Cuando el antecesor no llegó a cosecha, se logró alcanzar capacidad de campo (CDC) antes o poco después de la siembra del trigo. Mientras que cuando el trigo se sembró posteriormente a un antecesor de soja que se cosecho, no alcanzó a estar a CDC en ningún momento de su ciclo (Figura 4). De igual forma, desde Z 22 hasta Z 33 la diferencia en agua en suelo entre estos (antecesor no cosechado vs antecesor cosechado) fue de 23 mm.

A pesar de estas diferencias, todos los tratamientos tuvieron deficiencias hídricas desde el PC en adelante. Según Hoffman et al. (2009) el cultivo de trigo requiere un mínimo de 380-400 mm para no sufrir deficiencias hídricas. En este trabajo, durante el periodo de crecimiento del cultivo, las precipitaciones acumuladas fueron un total de 266 mm, siendo un 30 – 33,5 % menor al mínimo requerido.

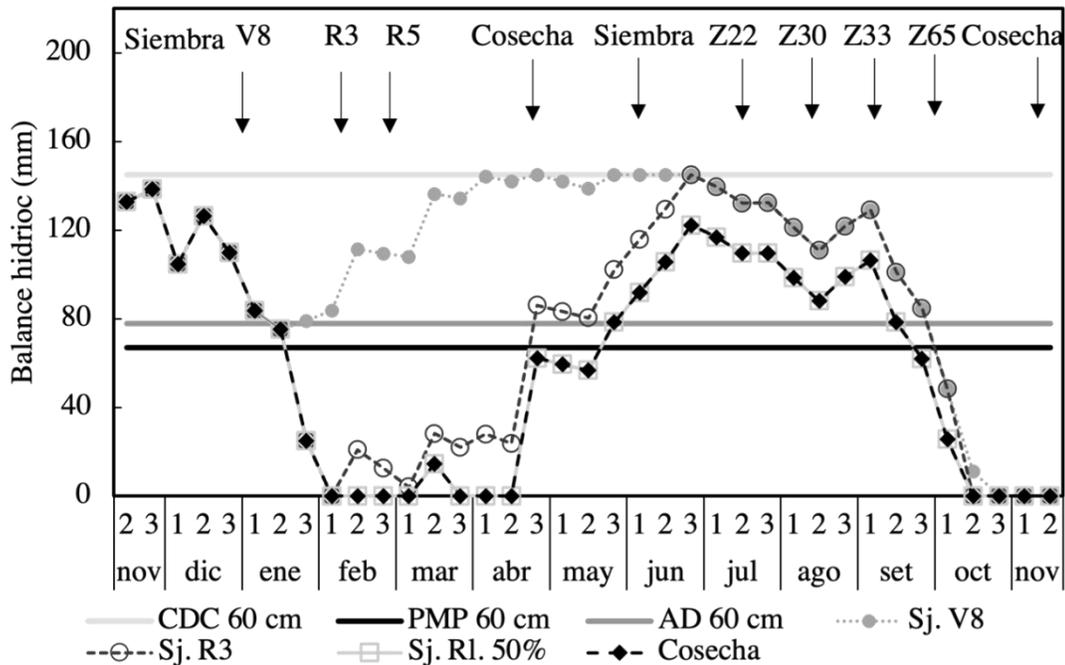


Figura 4. Balance hídrico según tratamiento de soja. CDC: Capacidad de campo en los primeros 60 cm de suelo; PMP: Punto de marchitez permanente en los primeros 60 cm de suelo; AD: Agua disponible en los primeros 60 cm de suelo; V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; Cosecha P50: soja raleada al 50% en R 4.5 -5; Cosecha P100: soja a cosecha.

El trigo con los antecesores que fueron cosechados (Cosecha P50 y Cosecha P100) alcanzó el punto de marchitez permanente (PMP), y sufrió deficiencias hídricas 10 días antes en comparación con el trigo con antecesores no cosechados (soja hasta V8 y soja hasta R3). Estos 10 días pudieron haber impactado en el rendimiento en grano, ya que se dieron durante el PC y es en este periodo donde se concreta el número de tallos fértiles, número de espiguillas y flores por espiguilla (Miralles, 2004). Asimismo, altos niveles de rendimiento en trigo implican altas tasas de crecimiento y absorción de nitrógeno durante el PC (van Herwaarden et al., 1998, Hoffman et al., 2017), pero estas tasas son altamente afectadas por la disponibilidad de agua en suelo (Kunrath et al., 2020). Además de esto, el suelo no volvió a completarse, por lo que la sequía pudo haber hecho

variar rendimiento en grano, peso y calidad del grano del cultivo en general (Pérez González, 2015).

4.2.2. Rendimiento de los antecesores

En cuanto al rendimiento en grano del cultivo de soja según tratamiento, se puede observar muy bajos rendimientos en grano (Figura 5), si se lo compara con trabajos previos (Capurro et al., 2017, Medina y Pereira, 2018). Este resultado puede ser producto, como ya se mencionó en el capítulo anterior, del déficit hídrico sufrido por el cultivo producto de las escasas precipitaciones en el PC (Andriani, 2002).

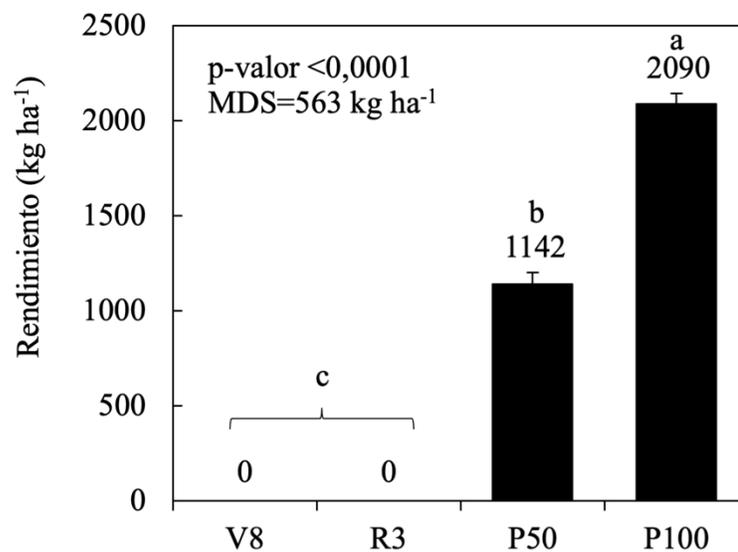


Figura 5. Rendimiento en soja en función de los tratamientos realizados. Las barras corresponden al error estándar. Medias con letras distintas son significativamente diferentes según prueba de Tukey ($\alpha=0,05$). V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; Cosecha P50: soja raleada al 50% en R4.5-5; Cosecha P100: soja a cosecha población 100%.

La soja a cosecha P100 logró un promedio de 2090 kg de grano ha⁻¹, mientras que el tratamiento cosecha P50 alcanzó un promedio de 1142 kg ha⁻¹. Se podría haber esperado una compensación por peso de grano en el cultivo de soja en este último tratamiento (Borrás et al., 2003), sin embargo, esto no fue lo ocurrido en este trabajo, como resultado el tratamiento cosecha P50 obtuvo un rendimiento 45% inferior al sin ralear. Esto pudo haber sucedido por la sequía severa a la que se vio sometido el cultivo de soja durante el PC (Kibe et al., 2006, Sinclair y Rufty, 2012).

4.2.3. Análisis del suelo hasta la siembra del trigo

Se realizaron dos análisis de suelo para nitrógeno, fósforo y potasio previo a la siembra del cultivo de trigo y un análisis al momento de la siembra. Según Tamagno et al. (2017), cuanto más rinde el cultivo de soja mayor es la absorción de nutrientes del suelo, por lo tanto era de esperarse que al momento de la cosecha de la soja los niveles de fósforo y potasio para el tratamiento soja a cosecha P100 fueran menores a los restantes. No obstante, soja a cosecha P100 presentó los mayores niveles de fósforo al momento de la cosecha de soja. Asimismo, los niveles de potasio de este tratamiento fueron superiores al tratamiento soja a cosecha P50 (Cuadro 3). No se encontró una explicación de este resultado, pudiendo deberse a errores en el muestreo.

Cuadro 3. Niveles de fósforo, nitrógeno y potasio en suelo, en R4.5 y a cosecha de la soja y nivel de nitrógeno a la siembra del trigo.

	Análisis a R4.5			Análisis a cosecha			Análisis siembra trigo
	P (ppm)	N (ppm)	K (meq. /100g)	P (ppm)	N (ppm)	K (meq. /100g)	N (ppm)
Sj. V8	34 b	4 b	0,56	31 b	8 b	0,54 a	7,7 b
Sj. R3	38 b	7 a	0,57	31 b	13 a	0,52 a	9,3 a
Cosecha P50	51 a	4 b	0,58	30 b	7 b	0,45 b	9,3 a
Cosecha P100				48 a	7 b	0,50 a	7,3 b
p-valor	0,0038	<0,0001	0,4032	<0,0001	<0,0001	0,0038	<0,0001
MDS	11,76	0,96	-	8,01	1,86	0,38	1,28

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Sj. V8: soja hasta V8; Sj. R3: soja hasta R3; Cosecha P50: soja raleada al 50% en R 4.5-5; Cosecha P100: soja a cosecha población 100%.

Además, se observó una disminución de estos nutrientes en el periodo R4.5 - cosecha de soja (Cuadro 3). Esto puede deberse a que fue un periodo seco precedido por un exceso de lluvias previo a la siembra de la soja, por lo que el suelo pudo haber retenido ambos minerales (Echeverri, 2018, Barbazán et al., 2011). De igual forma, los niveles de fósforo en ambas ocasiones fueron muy superiores al nivel crítico (14 ppm) para el cultivo de soja (Vega, 2022). En cuanto a los niveles de potasio, todos los tratamientos fueron superiores al nivel crítico en ambos momentos de análisis, siendo este 0,45 (Coitiño-López et al., 2016).

En cuanto a los niveles de nitrógeno en suelo, se observó un incremento para todos los tratamientos entre el estadio R 4.5 y cosecha del cultivo de soja (Cuadro 3, Figura 6). El tratamiento que alcanzó los mayores niveles de este nutriente fue soja hasta R3. Este resultado puede estar relacionado a que este tratamiento finalizó su ciclo cuando comenzaba a tener su pico máximo de demanda de nitrógeno (Hanway y Weber, 1971). A su vez, ocasionó un barbecho de 69 días previo a la siembra del trigo, siendo esto positivo para una adecuada descomposición del rastrojo (Ernst y Siri-Prieto, 2009).

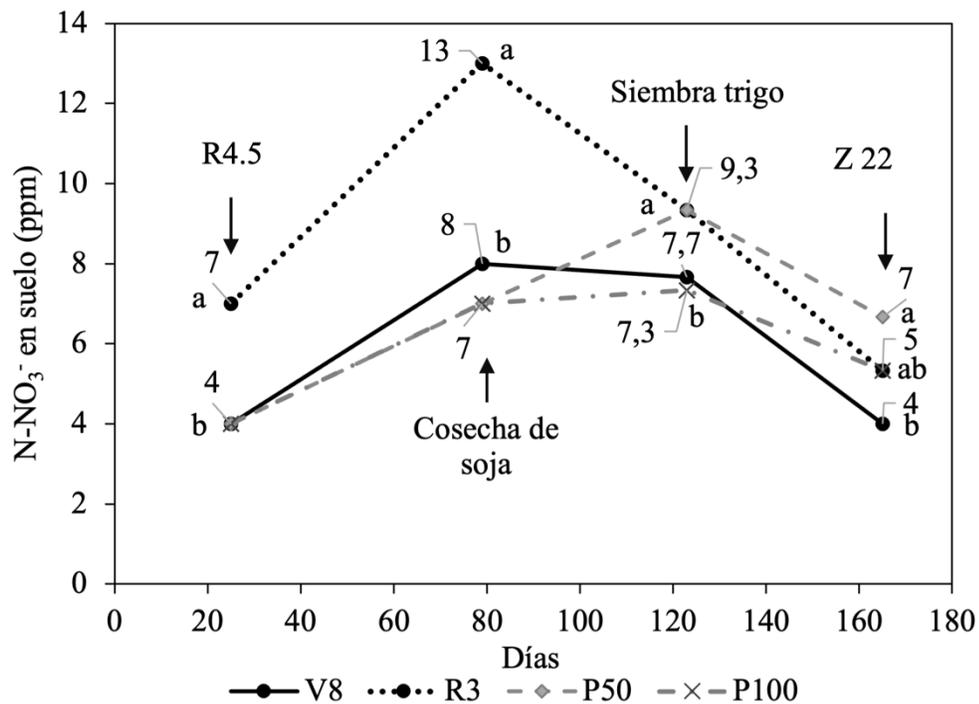


Figura 6. Evolución del nitrógeno como N-NO₃⁻ desde R3 en el cultivo de soja hasta Z 22 en el cultivo de trigo. Días: días desde el primero de febrero; V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; P50: soja raleada al 50% en R 4.5 -5; P100: soja a cosecha población 100%. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$).

Cuadro 4. P-valor, MDS y promedio de N-NO₃⁻ en suelo en los diferentes momentos de muestreo.

	R3	Cosecha soja	Siembra trigo	Z22
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,049
MDS (ppm)	1,09	1,86	1,28	2,54
Promedio (ppm)	5	8,67	8,42	5,33

Como se puede apreciar en la Figura 6 y Cuadro 3, con ningún tratamiento antecesor se logró alcanzar en suelo el nivel de nitrógeno cercano al crítico de N-NO_3^- (16-18 ppm N-NO_3^-) al momento de la siembra del cultivo de trigo (Hoffman et al., 2010).

Como se puede observar en el Cuadro 3, el antecesor soja hasta R3 y el que simulaba un bajo rendimiento (Soja a cosecha P50) tuvieron los mayores niveles de nitrógeno al momento de la siembra del trigo. En el primer caso, concuerda con lo mencionado por Salvagiotti (2009) y Hanway y Weber (1971), el cultivo de soja requiere en mayor magnitud los nutrientes en la etapa reproductiva, por ende, dicho cultivo no logró absorber gran cantidad de nitrógeno del suelo, quedando disponible para el trigo siguiente. En el tratamiento cosecha P50, este mayor valor podría estar relacionado a que al ser raleado no alcanzó un rendimiento elevado, coincidiendo con lo mencionado por diversos estudios (Salvagiotti et al., 2016a, Forjan y Manso, 2016a, Tamagno et al., 2017), donde explican que cuanto mayor es el rendimiento de un cultivo, mayor es la extracción de nitrógeno que realiza y posiblemente menor la cantidad de nitrógeno en suelo al poco tiempo de la cosecha.

Asimismo, a la siembra del trigo el tratamiento soja a cosecha P100 alcanzó un valor de nitrógeno muy similar al tratamiento de soja hasta V8, a pesar de que este último tuvo un barbecho largo sin un cultivo que consuma el N-NO_3^- . De igual modo, el antecesor de verano provocó diferencias significativas de N-NO_3^- en suelo cuando el cultivo de trigo se encontraba en el estadio Z 22 (Figura 6, Cuadro 4). Cuando el trigo alcanzó el estadio Z 22, el nivel de nitrógeno en suelo del tratamiento soja a cosecha P50 fue significativamente superior al tratamiento soja a V8. Este resultado puede ser producto del largo excesivo de barbecho del tratamiento soja hasta V8, el cuál a su vez dejó suelo descubierto, aumentando la probabilidad de pérdidas de nitrógeno en suelo (Fratti y Pereyra, 2007, Perdomo y Barbazán, 2015, Forján y Manso 2016b). Es de mencionar de que, con ningún tratamiento antecesor se alcanzó el nivel crítico de 13-14 ppm de N-NO_3^- en suelo requerido para este estadio (Hoffman et al., 2001, 2010). Es importante destacar que las diferencias observadas en el análisis de suelo en Z 22 no podrían deberse a una diferente absorción por parte del cultivo de trigo, ya que tanto la biomasa como el nitrógeno absorbido en dicho estadio no presentan diferencias significativas entre los diferentes tratamientos (Figuras 10 y 11).

4.3. COMPONENTES ECOFISIOLÓGICOS GENERALES DEL CULTIVO DE TRIGO

El rendimiento en grano promedio obtenido en el cultivo de trigo fue muy elevado y alcanzó los 6644 kg ha^{-1} (Cuadro 5 y Cuadro 10), siendo menor al producido

con el mismo cultivar por el programa de caracterización de cultivares de trigo en el mismo año (Hoffman et al., 2021), y superior al del año anterior (Hoffman et al., 2020).

Analizando la variabilidad en los rendimientos (Figura 7a), se identificó que dicha variación estaba correlacionada con el número de granos ($r^2=0,59$, p-valor = 0,0006), concordando con la bibliografía (Miralles y Slafer, 1999, Abeledo et al., 2018), aunque esta asociación no es tan estrecha si se la compara con lo obtenido por Dall' Orso et al. (2016). A su vez, se constató que el incremento en el número de granos m^{-2} (Figura 7c) no se asoció a un incremento en el número de espigas ($r^2 = 0,20$, p-valor = 0,0001), en la medida que cuando se incrementa el número de espigas m^{-2} (Figura 7d) hay una disminución en el número de granos espigas⁻¹ ($r^2 = 0,26$, p-valor < 0,0001). Esta fuerte caída en el número de granos cuando incrementa el número de espigas puede estar relacionado al severo déficit hídrico sufrido por el cultivo durante el llenado de grano (Figuras 4 y 7d), ya que un mayor número de espigas significa mayor competencia entre estas por los recursos del suelo (García Lamothe, 1998, Kibe et al., 2006). En cuanto al peso de granos (Figura 7a), se puede observar una disminución del peso cuanto mayor fue el número de granos m^{-2} ($r^2 = 0,30$, p-valor = 0,0001).

De la misma manera, es de mencionar que el número de macollos m^{-2} obtenidos en este trabajo fue muy elevado (Cuadro 5 y Cuadro 10) si se lo compara con lo obtenido por evaluación de cultivares de trigo 2019 y 2020 (Hoffman et al., 2020, 2021). El elevado número de macollos registrado (1371 macollos m^{-2}) sumado a las condiciones climáticas del año, derivó en una baja fertilidad de tallos, 36,9%, (Cuadro 5 y Cuadro 10), mientras que el programa de caracterización de cultivares de trigo logró valores de 54% y 43 % (evaluación 2019 y 2020 respectivamente) para el mismo cultivar (Hoffman et al., 2020, 2021).

Este resultado se correlaciona con lo mencionado por Miralles et al. (2014), los cuales explican que la mortandad de macollos depende de la disponibilidad de los recursos (agua y nitrógeno), fecha y densidad de siembra. Cuanto más limitados sean los recursos y disponibilidad de asimilados para el crecimiento de la espiga, mayor el porcentaje de mortandad. En conclusión, cuanto mayor el número de macollos, mayor partición de asimilados y mayor competencia entre ellos, provocando esto una mortandad superior. A pesar de la baja fertilidad de los macollos, el número de espigas obtenido (Cuadro 5 y Cuadro 10) es similar al alcanzado por Dall' Orso et al. (2016), y superior al obtenido por el programa de caracterización de cultivares de trigo en 2019 y 2020, para el mismo cultivar (Hoffman et al., 2020, 2021), por lo que se puede resaltar que el número de espigas es el esperado para este cultivar.

Asimismo, se constató que la variación en rendimiento en grano (Figura 7b) no se encuentra estrechamente relacionada a la variación en la biomasa total a cosecha ($r^2=0,11$, p-valor =0,0246). Este resultado puede ser producto del estrés hídrico sufrido por el cultivo durante el periodo crítico y llenado de los granos (Figura 1 y Figura 4), causando un efecto similar al “Haying-off” (van Herwaarden et al., 1998). En los resultados publicados por van Herwaarden et al. (1998), se constata que incrementos en biomasa pueden incrementar o penalizar el número de granos, dependiendo de las condiciones hídricas en las que se encuentra el cultivo.

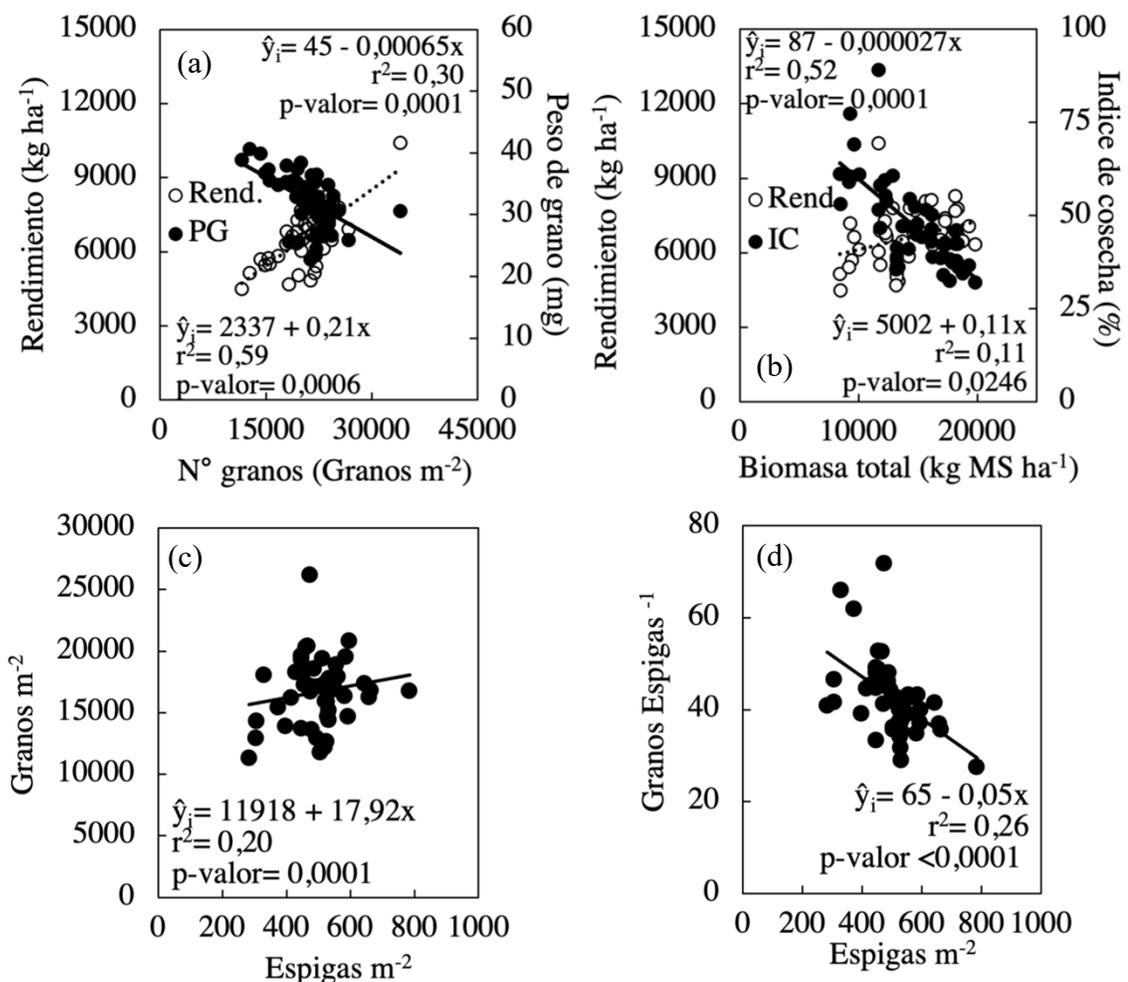


Figura 7. Rendimiento y peso de mil granos según número de granos producidos (a) Rendimiento e índice de cosecha según biomasa total producida (b). Número de granos por metro cuadrado en función al número de espigas por metro cuadrado (c). Número de granos por por metro cuadrado (d). Rend: rendimiento (kg ha⁻¹); PG: peso de grano (mg); IC: índice de cosecha.

Relacionado a esto, examinando los resultados mostrados por Cha y Durán (2002), Mazzilli (2004), Dall' Orso et al. (2016) y Fassana (2019), era de esperarse que en el periodo de crecimiento de Z 33 – Z 65 se observaran las máximas tasas de crecimiento del cultivo. A pesar de ello, se observa que las máximas tasas de crecimiento en general se alcanzan en el periodo anterior, de Z 30 a Z 33, donde se alcanzó un promedio de tasa de crecimiento de 142 kg MS ha⁻¹ día⁻¹, mientras que en el periodo de Z 33 – Z 65, logró un valor promedio de 136 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ (Figura 8). Esto es causado por el déficit hídrico al que se vio sometido el cultivo durante el PC. Estudios previos concuerdan con este resultado (van Herwaarden et al., 1998, Angus y van Herwaarden, 2001).

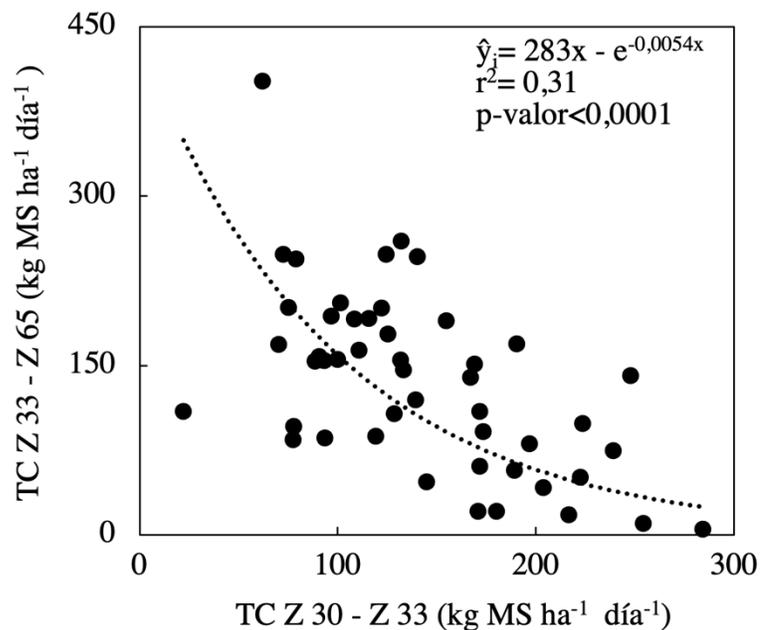


Figura 8. Tasa de crecimiento en período Z 33-Z 65 según tasa de crecimiento en Z 30- Z 33. TC: tasa de crecimiento del cultivo de trigo.

A su vez, como vemos en la figura 8, cuanto mayor fue la tasa de crecimiento en el periodo Z 30 – Z 33, menor fue la lograda en el periodo crítico (Z 33 – Z 65). Este resultado seguramente sea el producto del severo déficit hídrico sufrido por el cultivo a partir del inicio del periodo crítico, como ya fue mencionado. Cuanto mayor fue la tasa de crecimiento al inicio del encañado, mayor fue la tasa de absorción de agua del suelo en este periodo, y ello implicaría una menor reserva de agua para los estadios siguientes (van Herwaarden et al., 1998, Angus y van Herwaarden, 2001). Como consecuencia, el valor medio obtenido de biomasa al momento de la cosecha (biomasa total) fue considerablemente más bajo (Cuadro 5 y Cuadro 10) si se compara con lo obtenido en el

programa de caracterización de cultivares en el 2019 y 2020 (Hoffman et al., 2020, 2021), los cuales superan el valor obtenido por 7600 kg ha⁻¹ y 6750 kg ha⁻¹ respectivamente.

4.4. EFECTO DEL CULTIVO ANTECESOR

4.4.1. Rendimiento y componentes del rendimiento

Los rendimientos en trigo variaron según el manejo del cultivo antecesor (Figura 9). Se obtuvo el mayor rendimiento en grano cuando no hubo un cultivo de soja hasta cosecha y el suelo se mantuvo cubierto por un equivalente a un cultivo de cobertura (soja hasta R3), con un promedio de 7434 kg de grano ha⁻¹. Aunque no se logró diferenciar significativamente del tratamiento de soja hasta V8, si se diferenció significativamente de los antecesores soja a cosecha P50 y soja a cosecha P100, los cuales obtuvieron rendimientos de 6175 kg ha⁻¹ y 6283 kg ha⁻¹, respectivamente. En promedio, los antecesores que no llegaron a cosecha lograron concretar casi un 20% más de rendimiento en grano, en relación con el promedio de los dos antecesores que llegaron a cosecha (6685-7434 kg ha⁻¹ vs 6175-6283 kg ha⁻¹, respectivamente). Este resultado confirma una de las hipótesis planteadas para este trabajo, dejando en evidencia que el nivel de producción del cultivo de soja, en un escenario de verano-otoño e invierno seco, puede impactar sobre el rendimiento del cultivo de trigo siguiente, independientemente del manejo nitrogenado. Coincidiendo este resultado con diversos autores (Studdert y Echeverría, 2006, Forján y Manso, 2016b), que explican el efecto del cultivo antecesor sobre la disponibilidad de nutrientes y agua en suelo para el cultivo siguiente. Cabe mencionar que estos resultados inéditos en Uruguay se dan en un escenario de fin de otoño y ciclo de cultivos de invierno con restricciones hídricas.

En cuanto a los componentes del rendimiento, en el cuadro 5 se puede apreciar que el antecesor que provocó menor cantidad de tallos m⁻² en trigo (soja hasta V8), logró un mayor porcentaje de fertilidad de estos, con un promedio de 41,1%. Estos resultados obedecen a que cuanto mayor es el número de macollos, mayor es la competencia por recursos (agua y nitrógeno), reduciéndose la fertilidad final de tallos (Miralles et al., 2014).

No se encontraron diferencias significativas en el número de espigas m⁻² (p-valor = 0,1808), coincidiendo con lo reportado por Fratti y Pereyra (2007) para trigo con diferentes antecesores de verano, pero si en el número de granos por espiga y por lo tanto en el número de granos m⁻² (p-valor = 0,0490 y p-valor = 0,0012, respectivamente). El tratamiento de soja hasta R3 logró el mayor número de granos por espiga, diferenciándose estadísticamente de soja a cosecha P50. El número de granos m⁻² obtenido por todos los tratamientos fue elevado si se lo compara con el trabajo de Dall' Orso et al. (2016), aunque

la media obtenida fue similar a la obtenida para el mismo cultivar en caracterización de cultivares de trigo en el año 2019 y menor a la obtenida en 2020 (Hoffman et al., 2020, 2021).

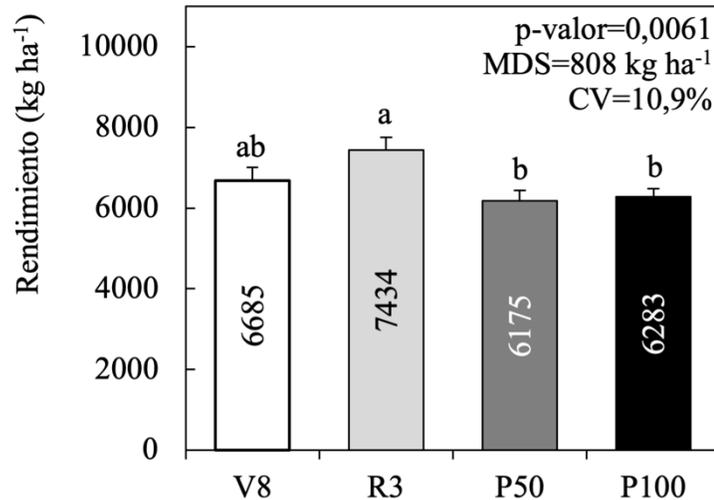


Figura 9. Rendimiento en función de los tratamientos en soja. Las barras corresponden a error estándar. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; P50: soja raleada al 50% en R4.5 5-5; P100: soja a cosecha población 100%.

Cuadro 5. Componentes del rendimiento según efecto del cultivo antecesor.

Trat.	Mac (N°)	Fert (%)	Esp (N°)	GE (N°)	GM (N°)	PG (mg)	Rend. (kg ha ⁻¹)	IC (%)	BT (kg MS ha ⁻¹)
V8	1074 b	42,1 a	452	42 ab	18599 c	37 a	6685 ab	49	13721
R3	1479 a	34,1 b	501	48 a	23504 a	32 b	7434 a	49	15060
P50	1451 a	36,4 ab	528	39 b	20580 bc	30 b	6175 b	41	15090
P100	1480 a	35,0 ab	515	42 ab	20752 c	31 b	6283 b	44	14127
<i>Media</i>	<i>1371</i>	<i>36,9</i>	<i>499</i>	<i>43</i>	<i>20859</i>	<i>32,3</i>	<i>6644</i>	<i>46</i>	<i>14500</i>
<i>p-valor</i>	<i>0,0007</i>	<i>0,0456</i>	<i>0,1808</i>	<i>0,0490</i>	<i>0,0012</i>	<i>0,0024</i>	<i>0,0061</i>	<i>0,1190</i>	<i>0,5497</i>
<i>CV</i>	<i>13,3</i>	<i>14,3</i>	<i>14,0</i>	<i>18,4</i>	<i>11,2</i>	<i>7,8</i>	<i>15,7</i>	<i>26,7</i>	<i>21,8</i>
<i>MDS</i>	<i>186</i>	<i>7,6</i>	<i>ns</i>	<i>8</i>	<i>2095</i>	<i>3</i>	<i>808</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Mac: macollos m⁻² a Z30; Fert: fertilidad de los macollos; Esp: espigas m⁻²; GE: granos espías⁻¹; GM: granos m⁻²; PG: peso de granos; RE: rendimiento; IC: índice de cosecha; BT: biomasa total; V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; P50: soja raleada al 50% en R4.5 5-5; P100: soja a cosecha población 100%.

En la biomasa total no se identificaron diferencias significativas según el antecesor. No obstante, cuando el antecesor fue soja hasta R3, se alcanzó un mayor índice de cosecha, aunque sin diferencias significativas debido al elevado coeficiente de variación (CV = 26,7 %).

El peso de grano tuvo una fuerte caída cuando aumentó del número de granos (Cuadro 5). El antecesor soja hasta V8 produjo el mayor peso de granos, diferenciándose estadísticamente de los restantes antecesores. A su vez, el número de granos de este no se diferenció significativamente de los antecesores que fueron cosechados. Este resultado puede deberse a que los últimos (cosecha P50 y cosecha P100) tuvieron 10 días más de déficit hídrico durante el PC, siendo esto causa de haber comenzado el ciclo del cultivo con una menor cantidad de agua almacenada en suelo (Figura 4). Concordando con Abeledo y Miralles (2011), los cuales mencionan que, a mayor contenido de agua en suelo a la siembra, menor será la dependencia del cultivo siguiente a las precipitaciones durante su ciclo.

4.4.2. Crecimiento del cultivo de trigo

Como se puede observar en la figura 10 el crecimiento del cultivo en respuesta a los antecesores de verano es representado por una curva sigmoidea de tipo logística, concordando con lo mencionado por Viega, citado por Mazzilli (2004) y lo registrado por diversos autores (Falotico et al., 1999, Cha y Duran, 2001, Mazzilli, 2004, Malhi et al., 2006, Dall'Orso et al., 2016).

Solo se encontraron diferencias significativas en la biomasa total producida en trigo, por el efecto antecesor, en el estadio Z 30 (Cuadro 6). Concordando con lo obtenido con Fratti y Pereryra (2007), los cuales encontraron diferencias en el crecimiento del trigo según antecesor de verano en este estadio. El antecesor soja a cosecha P100 se diferenció del antecesor soja hasta V8 (Cuadro 7), a pesar de que no se encontraron diferencias de rendimiento en trigo entre ambos antecesores (Figura 9). Este resultado difiere con lo mencionado por diversos autores, los cuales explican una estrecha relación entre la materia seca acumulada y el rendimiento en grano (Cha y Durán, 2001, Mazzilli, 2004, Dall'Orso et al., 2016, Berger et al., 2017).

Esta diferencia en biomasa en el estadio Z 30 es producto de la tasa de crecimiento por día en el período Z 22 – Z 30 (Figura 10, Anexo 1). Con el antecesor soja hasta V8 se alcanzó una TC de 43 kg MS ha⁻¹ día⁻¹, mientras que con soja a cosecha P100 se logró una TC de 71 kg MS ha⁻¹ día⁻¹, siendo un 40% superior.

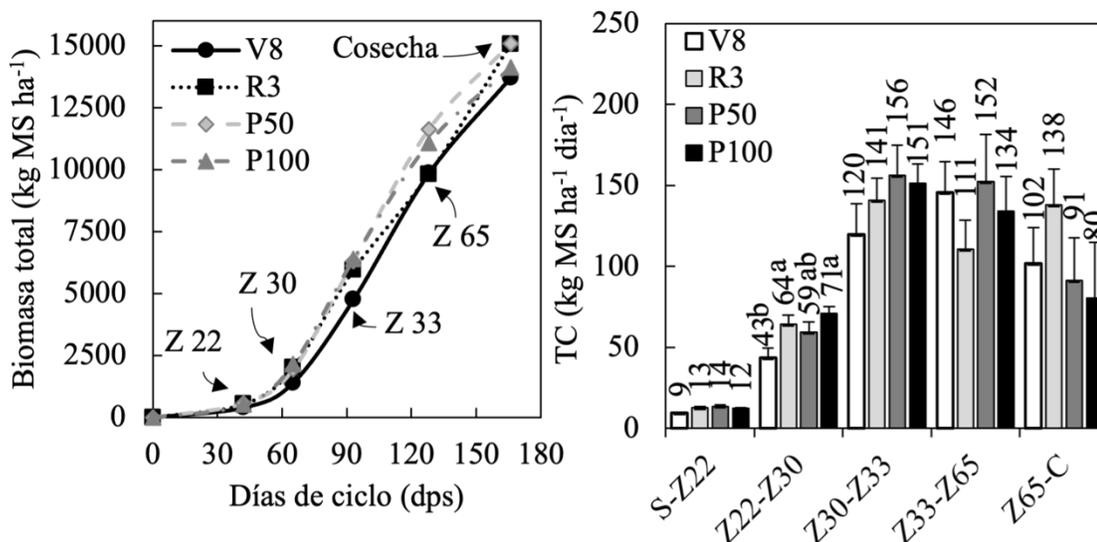


Figura 10. Biomasa total acumulada según tratamiento de soja en función del tiempo (izquierda). Tasa de crecimiento según tratamiento de soja en función del periodo de crecimiento (derecha). Las barras corresponden al error estándar. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). TC: tasa de crecimiento; S: siembra; C: cosecha; V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; Cosecha P50: soja raleada al 50% en R4.5 5-5; Cosecha P100: soja a cosecha población 100%.

Cuadro 6. Promedio, p-valor y MDS para la biomasa total acumulada y tasa de crecimiento en los diferentes periodos y estadios del cultivo.

BT		Z 22	Z 30	Z 33	Z 65	Cosecha
	Promedio (kg MS ha ⁻¹)		475	1763	5844	10591
p-valor		0,4662	0,0421	0,2145	0,3023	0,5497
MDS (kg MS ha ⁻¹)		-	703,00	-	-	-
TC		S-Z 22	Z 22-Z 30	Z 30-Z 33	Z 33-Z 65	Z 65-C
	Promedio (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	12	59	142	136	103
	p-valor	0,4662	0,0323	0,5023	0,8454	0,6747
	MDS (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	-	19,59	-	-	-

BT: biomasa total; TC: tasa de crecimiento; S: siembra; C: cosecha.

Estudios previos explican los posibles beneficios de realizar un cultivo de verano antes de un cultivo de invierno (Miller y Dexter, 1982, Badaruddin y Meyer, 1994, Studdert y Echeverría, 2006, Forján y Manso, 2016b), siendo uno de ellos la mineralización de nitrógeno proveniente del rastrojo. Sin embargo, en este trabajo no se

encontraron diferencias significativas en nitrógeno en suelo, entre los tratamientos soja hasta V8 y soja a cosecha P100, al momento de la siembra del cultivo de trigo y en Z 22. Otra posible explicación para esta diferencia en biomasa pudo deberse a que el antecesor soja a cosecha P100 cubrió el suelo durante toda la zafra de verano. Según Castiglioni et al. (2016), mantener el suelo cubierto contribuye con las propiedades físicas del suelo, aunque en este estudio no se puede afirmar esta explicación debido a que no fueron analizadas las propiedades físicas del suelo.

Los valores de biomasa obtenidos en Z 30 son relativamente altos si se los compara con lo obtenido por Fratti y Pereyra (2007) y Dall' Orso et al. (2016). Esto puede ser debido a las favorables condiciones climáticas hasta Z 30 en el año 2020, como se demostró en los capítulos de caracterización climática y efecto del cultivo antecesor hasta la siembra, teniendo disponibilidad de agua para el cultivo hasta dicho estadio.

Cuadro 7. Biomasa total acumulada en el estadio Z 30 en trigo, teniendo en cuenta los diferentes antecesores.

	V8	R3	Cosecha P 50	Cosecha P100
Biomasa a Z 30 (kg MS ha ⁻¹)	1399 b	2006 ab	1929 ab	2144 a

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; Cosecha P50: Cosecha P50; Cosecha P100: soja a cosecha.

En el período de Z 30 - Z 33, se produce la mayor tasa de crecimiento del cultivo para casi todos los antecesores menos con soja hasta V8. En discordancia con los resultados publicados por Miralles y Slafer (1999), Fassana et al. (2017) y Berger et al. (2017), los cuales indican que en el periodo de Z 33 a Z 65 se lograría la mayor tasa de crecimiento. Esta baja en la tasa de crecimiento en el periodo Z 33 a Z 65 seguramente pueda ser producto del déficit hídrico mencionado anteriormente, derivado en parte de las altas tasas de crecimiento previas, y por ende altas tasas de consumo anticipados de agua (Miralles y Slafer, 1999, Pergolini et al., 2004). En este sentido el tratamiento de menor biomasa y tasa de crecimiento hasta Z 30 (antecesor soja hasta V8), fue el único que siguió aumentando su tasa de crecimiento durante el PC.

4.4.3. Absorción de nitrógeno

El nitrógeno absorbido por el cultivo está ligado al crecimiento de este (Perdomo y Barbazán, 2015). Asimismo, Viega, citado por Mazzilli (2004) menciona que la absorción de nitrógeno es representada por una curva sigmoideal, al igual que el crecimiento del cultivo. Los resultados obtenidos en este trabajo son discordantes y muestran una caída del nitrógeno absorbido a partir de los 100 días del ciclo (Z 33), y luego un incremento de este valor al momento de la cosecha (Figura 11, Anexo 2).

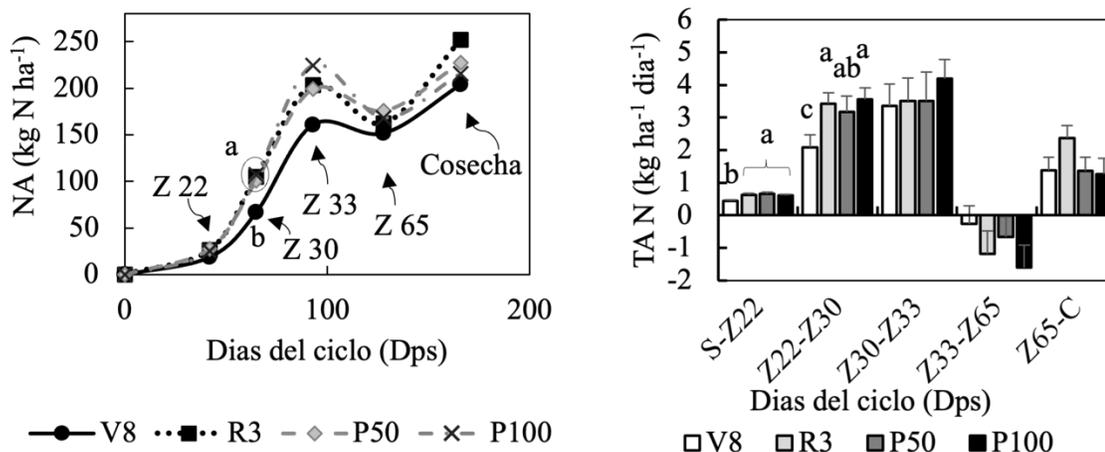


Figura 11. Nitrógeno absorbido según tratamiento en soja en función del tiempo (izquierda). Tasa de absorción de Nitrógeno según tratamiento en soja en función del tiempo (derecha). Las barras corresponden al error estándar. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). S: siembra; C: cosecha; TA: tasa de absorción; V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; P50: soja raleada al 50% en R4.5 -5; P100: soja a cosecha.

Cuadro 8. Promedio, p-valor y MDS para el nitrógeno absorbido y tasa de absorción de nitrógeno en los diferentes periodos y estadios del cultivo.

NA		Z 22	Z 30	Z 33	Z 65	Cosecha
	Promedio (kg N ha ⁻¹)	25	95	197	164	225
	p-valor	0,3960	0,0096	0,0971	0,7085	0,0615
	MDS (kg N ha ⁻¹)	-	29,36	-	-	-
TA		S-Z 22	Z22-Z30	Z 30-Z 33	Z 33-Z 65	Z 65-C
	Promedio (kg N ha ⁻¹ día ⁻¹)	0,6	3,1	3,6	-0,9	1,6
	p-valor	0,3957	0,0143	0,6324	0,6947	0,3948
	MDS (kg N ha ⁻¹ día ⁻¹)	-	1,124	-	-	-

NA: nitrógeno absorbido; TA: tasa de absorción; S: siembra; C: cosecha.

Esta caída en la absorción a partir de los 100 días es similar a lo presentado por López et al. (2002), quienes mostraron tanto pérdidas de nitrógeno como de biomasa. En cambio, en este trabajo no hubo pérdidas de biomasa por lo que esta disminución no puede verse explicada por dicha razón. Según Rroço y Mengel (2000) hay más de una causa que podría explicar este hecho, siendo estas: i) pérdida de partes de la planta, ii) pérdidas de nitrógeno hacia la atmosfera, y iii) pérdidas de nitrógeno desde las raíces. Esto coincide con lo mencionado por Hewstone (1999), quien obtuvo valores negativos para la tasa

absorción entre los estadios Z65 y cosecha, y explica que esto pudo deberse a pérdida de hojas, baja disponibilidad de nutrientes o disminución de los contenidos de nitrógeno en la biomasa aérea. Lo ocurrido en este trabajo puede deberse a causas similares a lo mencionado en dichos estudios.

En cuanto a las diferencias entre los tratamientos, solo se encontró diferencia significativa para nitrógeno absorbido en el estadio Z 30 (Figura 11 y Cuadro 8). En dicho estadio, los antecesores soja hasta R3, soja a cosecha P50 y soja a cosecha P100 lograron diferenciarse estadísticamente del antecesor soja hasta V8, siendo concordante este resultado con lo obtenido para biomasa en este estadio. De la misma manera, en Z 33, a pesar de no existir diferencias significativas ($\alpha=0,05$), se puede observar que los tres antecesores mencionados siguen con valores de nitrógeno superiores al antecesor soja hasta V8.

En cuanto a la tasa de absorción de nitrógeno, en la Figura 11 se puede observar que esta incrementa hasta Z33. Luego en el periodo siguiente (Z 33 – Z 65), donde se concentra el periodo crítico (Fischer, 1985), la tasa de absorción es negativa, y posteriormente vuelve a incrementarse levemente durante el llenado de granos. A su vez, se encontraron diferencias significativas ($\alpha=0,05$) únicamente en los periodos siembra – Z 22 y Z 22 – Z 30. En ambos periodos el antecesor soja hasta V8 se diferenció estadísticamente del resto (Figura 13), pudiendo deberse esto a la menor cantidad de nitrógeno en suelo al momento de la siembra y en Z 22 (Figura 6 y Figura 12), como será analizado posteriormente.

En cuanto a la absorción de nitrógeno al inicio de macollaje, según García Lamothe (2004) el cultivo puede llegar a absorber $1,5 - 2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$. En este estudio la absorción al inicio de macollaje fue menor, siendo un promedio de $0,58 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Esto coincide con lo mencionado por Benintende et al. (2008), quienes reportan valores de absorción de $0,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ para esta etapa. En el siguiente periodo (Z 22 – Z 33), se obtuvo un valor de $3,1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, siendo inferiores a los publicados por García Lamothe (2004) bajo laboreo en chacra nueva, que obtuvo valores que oscilaron entre 4 y $5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, y superiores a lo reportados por Cha y Duran (2001), siendo este valor $2,86 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

En el periodo Z 33 – Z 65, en donde se registra un déficit hídrico severo (Figura 4), se pierde nitrógeno y por tanto las tasas de absorción resultan negativas (Figura 11). Álvarez (2006) explica que es normal una disminución en la tasa de absorción de nitrógeno a partir de floración, debido a la muerte y envejecimiento de las hojas, y el deterioro de las raíces de la planta. Sin embargo, un valor negativo en la absorción de dicho nutriente durante el PC no es lo esperado. Según van Herwaarden et al. (1998),

manifiesta que cuando el cultivo de trigo presenta un estrés hídrico severo, disminuye notablemente su capacidad de asimilar nitrógeno.

Diversos estudios mencionan que las acuaporinas, proteínas en la membrana celular que facilitan la difusión de agua a través de las membranas, juegan un rol fundamental en la absorción, asimilación y removilización de nitrógeno (Kojima et al., 2006, Wang et al., 2016, Ding et al., 2018). Cuando el cultivo se encuentra con un exceso de nitrógeno, las acuaporinas transportan el exceso de nitrógeno hacia la vacuola, donde es almacenado y eliminado en forma de NH_3 , evitando de esa forma la toxicidad para el cultivo (Wang et al., 2016, Ding et al., 2018). Tanto la recarga de las vacuolas como la removilización del nitrógeno de la misma esta regularizado por las acuaporinas (Wang et al., 2016, Ding et al., 2018).

En base a esto, y teniendo en cuenta las condiciones de déficit hídrico en la zafra 2020, los resultados obtenidos en este trabajo en cuanto a la absorción de nitrógeno por el cultivo concuerdan con lo obtenido por Ding et al. (2018). En dicho estudio se demuestra que, en condiciones de sequía, aplicaciones elevadas de nitrógeno provocan que se disminuya la tolerancia a la sequía del cultivo debido a una menor expresión y/o actividad de las acuaporinas. Afectándose así la absorción, asimilación y removilización del nitrógeno.

4.5. RESPUESTA AL AGREGADO DE NITRÓGENO

4.5.1. Rendimiento y componentes del rendimiento

Los diferentes tratamientos de agregado de nitrógeno en trigo influyeron en el rendimiento final alcanzado (Figura 12), siendo el tratamiento con ajuste objetivo a siembra y Z 22, el que logró el mayor rendimiento (7179 kg ha^{-1}). En este tratamiento se fertilizó un total de 88 UN ha^{-1} (Cuadro 9). El tratamiento de nitrógeno recomendado hasta Z30, no se diferenció estadísticamente en rendimiento ($\alpha = 0,05$) del tratamiento de nitrógeno recomendado a siembra y Z 22 (MDS= 814), aunque se le aplicaron 30 UN ha^{-1} por encima con relación al tratamiento anterior (Cuadro 9).

García Lamothe (2004) indicó que, cuando no hay una limitante hídrica u otro factor ambiental, la producción de biomasa del cultivo y el rendimiento final están estrechamente relacionados con la disponibilidad de nitrógeno. A su vez, Hoffman et al. (2017), expresaron que el cultivo de trigo ha incrementado significativamente sus demandas de nitrógeno durante el siglo XXI, por ello era de esperarse que el tratamiento de N no limitante hubiera conseguido los mayores rendimientos. Pese a esto, dicho tratamiento obtuvo el rendimiento más bajo (6231 kg ha^{-1}), sin diferenciarse del

tratamiento que solo se fertilizó al momento de la siembra, el cual llevó aproximadamente 210 UN ha⁻¹ menos que el tratamiento sin limitantes (Cuadro 9). Pudiendo explicarse esto a la limitación impuesta por la condición hídrica en el momento de mayor crecimiento del cultivo de trigo. Estos resultados coinciden con los reportados por van Herwaarden et al. (1998), los cuales explican que, al momento de una sequía severa, los rendimientos de trigo fertilizados con elevadas dosis de nitrógeno pueden caer a rendimientos inferiores que un trigo sin ser fertilizado. Este fenómeno, conocido como “Haying-off”, tiene como causa principal la reducción en la asimilación debido al déficit de agua. Asimismo, este resultado concuerda con estudios previos, donde se deja en evidencia que la respuesta al agregado de fertilizantes nitrogenados en momentos de extremas sequías puede ser nula o incluso negativa (van Herwaarden et al., 1998, García Lamothe, 2004, Rouphael, et al. 2012).

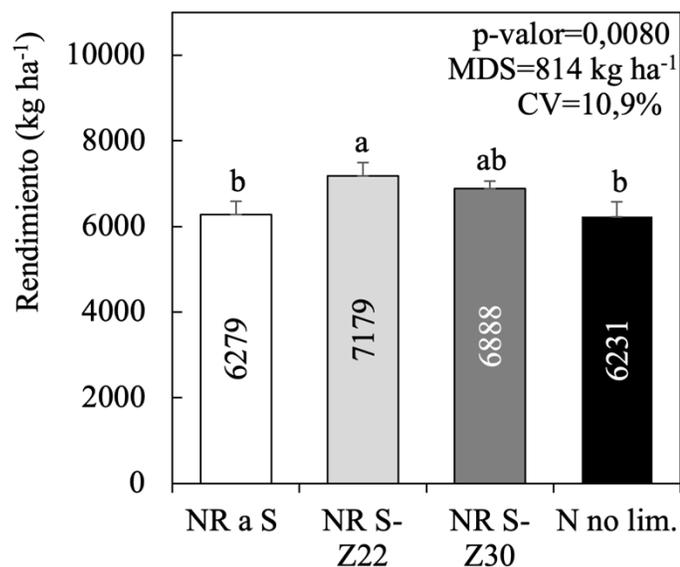


Figura 12. Rendimiento en función de los tratamientos realizados en trigo. Las barras corresponden a error estándar. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S- Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S a Z 30 nitrógeno recomendado desde siembra hasta Z 30; N no lim.: nitrógeno no limitante.

Según Lemaire y Menyard (1997), para que el cultivo se encuentre en suficiencia nitrogenada, el INN debe ser superior a 1. En este trabajo, los valores de INN en los estadios Z 30 y Z 33 se encontraron por encima de dicho valor (Cuadro 9). Estos resultados evidencian que el suelo aportó grandes cantidades de nitrógeno, ya que el tratamiento que recibió solamente 23 kg N ha⁻¹ (NR a S), alcanzó un valor de INN de 1,44 y 1,40 en Z 30

y Z 33, respectivamente. Asimismo, únicamente el tratamiento NR S – Z 22 incrementó su valor de INN en el siguiente estadio (Z 33). Este hecho podría estar reflejando que las aplicaciones de nitrógeno posteriores a Z 22 no eran necesarias, provocando que el cultivo, el cual se encontraba en una condición de estrés hídrico, removilizará el nitrógeno en exceso (Ding et al., 2018).

Cuadro 9. Dosis aplicadas en cada estadio del cultivo y índice de nutrición nitrogenada según tratamiento nitrogenado realizado en el cultivo de trigo.

Trat.	Dosis (kg N ha ⁻¹)					INN	
	Siembra	Z 22	Z 30	Z 33	Total	Z 30	Z 33
NR a S	23	0	0	0	23	1,44	1,40
NR S-Z 22	23	65	0	0	88	1,47	2,44
NR S-Z30	23	65	30	0	118	1,47	1,43
N no lim.	23	80	70	60	233	1,46	1,41

NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S- Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S-Z30.: nitrógeno recomendado hasta Z 30; N no lim.: nitrógeno no limitante; INN: Índice de nutrición nitrogenada.

En cuanto a los componentes del rendimiento (Cuadro 10), el número de macollos se diferenció según tratamiento realizado, logrando tanto el tratamiento de nitrógeno recomendado hasta Z 22, como el de N no limitante, diferenciarse significativamente del nitrógeno recomendado solo a siembra. Diversos estudios señalan que suministrar nitrógeno correctamente en macollaje favorece la sobrevivencia de estos (García Lamothe, 2004, Hoffman et al., 2010). Esto puede correlacionarse con que se hallan conservado las diferencias significativas y el mismo orden de los tratamientos en el número de espigas, a pesar de que los tratamientos con mayor número de macollos, presentaba mayor competencia por los recursos (Miralles et al., 2014).

García Lamothe (2004), Hoffman et al. (2001, 2010), para las condiciones de Uruguay evidencian la importancia de la adecuada disponibilidad de nitrógeno desde las primeras etapas del cultivo, teniendo esto una estrecha relación positiva con el rendimiento final. Se puede apreciar en el Cuadro 10 que la deficiencia temprana de nitrógeno trajo como consecuencia un menor número de granos m⁻², siendo el tratamiento NR S - Z 22 el que alcanzó un mayor número, diferenciándose estadísticamente ($\alpha = 0,05$) de los tratamientos NR solo a siembra y N no limitante (p-valor = 0,008). El tratamiento NR S – Z 30 no se diferenció estadísticamente de los restantes tratamientos, como era esperable en base al INN a Z30. En el estadio Z 30 se aplicó 30 kg de N ha⁻¹, en dicho

tratamiento, a pesar de que no se requería, a los efectos de comprobar las condiciones de no respuesta estimadas.

Cuadro 10. Componentes del rendimiento según tratamiento nitrogenado en trigo.

Trat.	Mac (N°)	Fert (%)	Esp (N°)	GE (N°)	GM (N°)	PG (mg)	Rend. (kg ha ⁻¹)	IC (%)	BT (kg MS ha ⁻¹)
NR a S	1217 b	37,8	425 b	41	17236 b	37 a	6279 b	48	13030
NR S-Z22	1487 a	37,6	542 a	43	22760 a	32 b	7179 a	47	15423
NR S-Z30	1351 ab	37,1	503 ab	44	21731 a	32 b	6888 ab	46	15079
N no lim.	1429 a	35,2	526 a	42	21708 a	29 c	6231 b	43	14467
<i>Media</i>	<i>1371</i>	<i>36,9</i>	<i>499</i>	<i>43</i>	<i>20859</i>	<i>32,3</i>	<i>6644</i>	<i>46</i>	<i>14500</i>
<i>p-valor</i>	<i>0,0082</i>	<i>0,6383</i>	<i>0,0028</i>	<i>0,7669</i>	<i>0,0012</i>	<i>0,0001</i>	<i>0,0080</i>	<i>0,7191</i>	<i>0,2216</i>
<i>CV</i>	<i>12,7</i>	<i>14,3</i>	<i>16,9</i>	<i>18,4</i>	<i>11,2</i>	<i>7,8</i>	<i>15,7</i>	<i>26,7</i>	<i>21,8</i>
<i>MDS</i>	<i>205</i>	<i>ns</i>	<i>81</i>	<i>ns</i>	<i>2628</i>	<i>3</i>	<i>814</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Mac: macollos m⁻²; Fert: fertilidad de los macollos; Esp: espigas m⁻²; GE: granos espigas⁻¹; GM: granos m⁻²; PG: peso de grano; RE: rendimiento; IC: índice de cosecha; BT: biomasa total; NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S- Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S – Z 30: nitrógeno recomendado completo; N no lim.: nitrógeno no limitante.

El tratamiento con nitrógeno solo a siembra, alcanzo el valor más bajo de número de granos, y a pesar de conseguir el PG de mayor valor (37 mg), no logró contrarrestar la caída en el número de granos.

Los tratamientos NR S - Z 22, NR S – Z 30 y N no limitante no se diferenciaron estadísticamente en el número de granos ($r^2= 0,81$, MDS= 2628), pero la excesiva aplicación de nitrógeno en el tratamiento N no limitante, sumado a la condición hídrica de la zafra provocó que dicho tratamiento logre el menor PG ($r^2 = 0,78$, MDS = 7,8). Como consecuencia del bajo PG, el tratamiento de N no limitante alcanzó un rendimiento significativamente igual al tratamiento NR a S, dejando en clara evidencia la importancia de un adecuado manejo nitrogenado en el cultivo (van Herwaarden et al., 1998, García Lamothe, 2004, Hoffman et al., 2010).

4.5.2. Crecimiento y tasa de crecimiento del cultivo

Como se puede apreciar en el cuadro 11 y figura 13 se encontraron diferencias significativas según tratamientos nitrogenados, menos al momento de la cosecha donde el coeficiente de variación fue muy elevado (CV=20,12 %, p-valor= 0,2216). A su vez, cabe mencionar, que al momento de realizar las determinaciones a Z 22, solo se obtuvo biomasa según tratamiento antecesor, no diferenciándose entre tratamientos nitrogenados (Figura 13, Anexo 3).

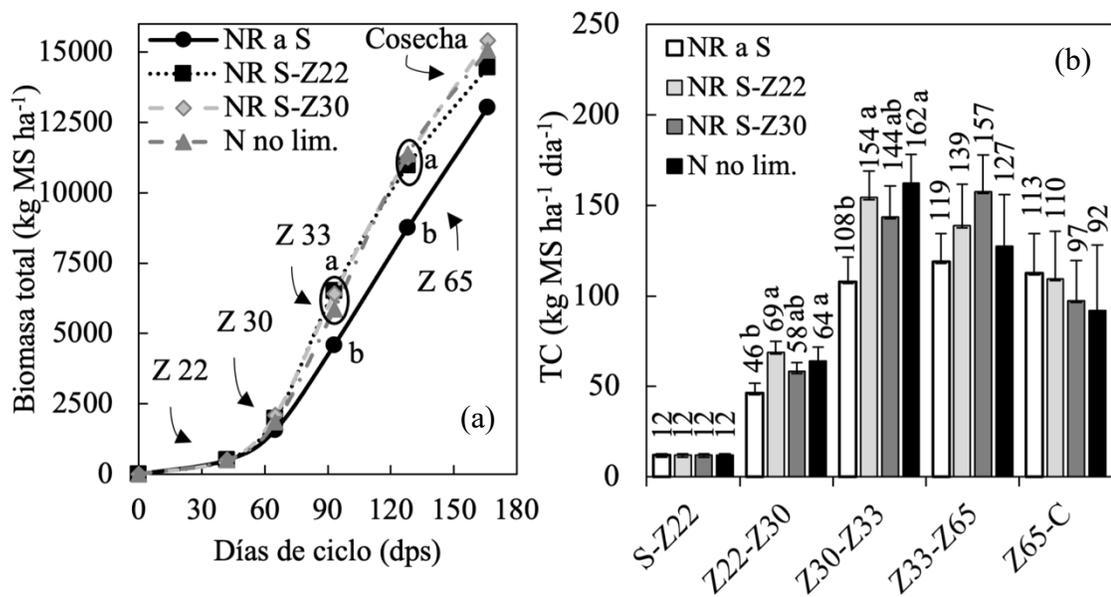


Figura 13. Biomasa total acumulada según tratamiento nitrogenado en trigo en función del tiempo (a). Tasa de crecimiento según tratamiento nitrogenado en trigo en función del periodo de crecimiento (b). Las barras corresponden al error estándar. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). TC: tasa de crecimiento; S: siembra; C: cosecha; NR a S: NR a siembra; NR S-Z22: NR de siembra y Z22; NR S-Z30: NR de siembra a Z 30; N no lim.: nitrógeno no limitante.

Cuadro 11. Promedio, p-valor y MDS para biomasa acumulada y tasa de crecimiento del cultivo en los diferentes estadios y periodos de crecimiento del cultivo según tratamientos nitrogenados.

BT	Promedio (kg MS ha ⁻¹)	Z 22	Z 30	Z 33	Z 65	Cosecha
	p-valor	NC	0,0301	0,0004	0,0057	0,2216
	MDS (kg MS ha ⁻¹)	-	463,4	1168,9	2088,1	-
TC		S-Z 22	Z 22-Z 30	Z 30-Z 33	Z 33-Z 65	Z 65-C
	Promedio (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	12	59	142	136	103
	p-valor	NC	0,0303	0,0123	0,4694	0,9373
	MDS (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	-	17,67	38,86	-	-

BT: biomasa total; TC: tasa de crecimiento; NC: no corresponde; S: siembra; C: cosecha.

En el estadio Z 30, el tratamiento NR S – Z 22 logro la mayor biomasa (Cuadro 12), aunque sin diferenciarse estadísticamente de los tratamientos NR a S – Z 30 y N no limitante, correlacionándose con las tasas de crecimiento, ya que el tratamiento de NR a

S obtuvo la menor tasa de crecimiento en el periodo Z 22 – Z 30 ($46 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$). Asimismo, este resultado se encuentra relacionado al rendimiento logrado, ya que el tratamiento NR S – Z 22 fue el que alcanzó el mayor rinde. Concordando con Berger et al. (2014), los cuales mencionan que el rendimiento en grano está afectado por la acumulación de biomasa pre-antesis.

A Z 33, los tratamientos NR a S - Z 22, NR a S – Z 30 y N no limitante se diferenciaron del tratamiento de NR a S en biomasa acumulada (Figura 13, Anexo 3). Concomitantemente con lo mencionado por diversos autores, donde explican que la falta de nitrógeno en las etapas iniciales afecta el crecimiento posterior del cultivo (Fischer et al. 1993, García Lamothe 2004, Hoffman et al. 2010). El N ajustado solo a siembra (tratamiento de NR a S), alcanzó una tasa de crecimiento de $108 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en el periodo Z 30 – Z 33, siendo altamente inferior si se lo compara con los restantes tratamientos, que lograron tasas de crecimiento entre $140 - 160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Aun así, el tratamiento de NR a S superó la tasa de crecimiento obtenida por Cha y Duran (2002), producto del avance en mejoramiento genético de los últimos años (Hoffman et al., 2015) y del elevado valor de coeficiente fototermal para el año del experimento, siendo un factor de crucial importancia en el período crítico (Miralles et al., 2014). En Z 65, la biomasa lograda por los tratamientos NR S – Z 22, NR S – Z 30 y N no limitante siguió diferenciándose significativamente del tratamiento NR a S.

Estos resultados corroboran la importancia de realizar una correcta fertilización nitrogenada (Hoffman et al., 2010) y no aplicar en exceso cuando el ambiente se encuentra bajo un déficit hídrico importante (Rouphael et al., 2012). Quedando en evidencia que las dosis aplicadas en los estadios Z 30 y Z 33 en los tratamientos NR S – Z 30 y N no limitante, no provocaron que estos tratamientos se diferenciaran en biomasa producida, de acuerdo con lo esperado en función de los valores de INN en ambos estadios (Cuadro 9).

Cuadro 12. Biomasa total acumulada en el estadio Z 30, para los diferentes tratamientos nitrogenados.

	NR a S	NR S-Z22	NR S – Z30	N no lim.
Biomasa a Z 30 (kg MS ha^{-1})	1570 b	2086 a	1843 ab	1978 ab

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

Al momento de la cosecha no se observaron diferencias significativas en el total de biomasa acumulada entre los tratamientos ($p\text{-valor} = 0,2216$, $CV = 21,8$). Esto fue producto de la drástica caída de tasa de crecimiento de los tratamientos que tuvieron las mayores tasas hasta el comienzo del estrés hídrico, y mayor cantidad de nitrógeno aplicado (Figura 4, Figura 13, Anexo 3).

4.5.3. Absorción de N durante el ciclo de cultivo

Analizando el cuadro 13 y figura 14, se puede apreciar que existieron diferencias significativas tanto en nitrógeno absorbido como en la tasa de absorción de este a partir de Z 30. Asimismo, como ya se mencionó en el capítulo previo, al momento de efectuar las mediciones en Z 22, se realizó sin diferenciarse por tratamientos nitrogenados (Anexo 4, cuadro 13).

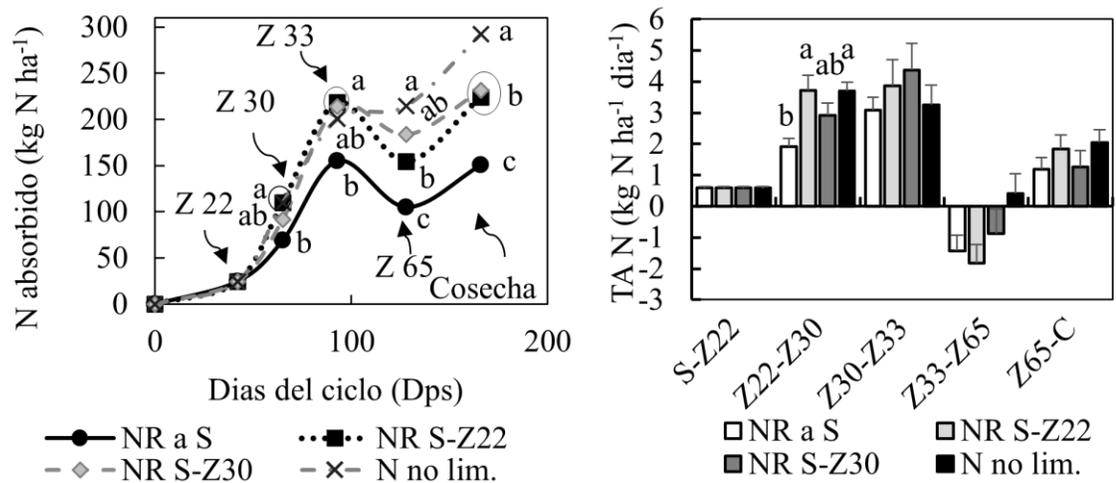


Figura 14. Nitrógeno absorbido según tratamiento nitrogenado en función del tiempo (izquierda). Tasa de absorción de Nitrógeno según tratamiento nitrogenado en trigo en función del tiempo (derecha). Las barras corresponden al error estándar. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). S: siembra; C: cosecha; TA: tasa de absorción; NR a S: NR a siembra; NR S-Z22: NR a siembra y Z 22; NR S-Z30: NR desde siembra a Z 30; N no lim: nitrógeno no limitante.

Cuadro 13. Promedio, p-valor y MDS para nitrógeno absorbido y tasa de acumulación de nitrógeno en los diferentes estadios y periodos de crecimiento del cultivo según tratamientos nitrogenados.

NA		Z 22	Z 30	Z 33	Z 65	Cosecha
	Promedio (kg N ha ⁻¹)		25	95	197	164
p-valor		NC	0,0013	0,0332	<0,0001	<0,0001
MDS (kg N ha ⁻¹)		-	28,38	74,812	44,26	30,70
TA		S-Z 22	Z 22-Z 30	Z 30-Z 33	Z 33-Z 65	Z 65-C
	Promedio (kg N ha ⁻¹ día ⁻¹)	0,6	3,1	3,6	-0,9	1,6
	p-valor	NC	0,0013	0,5139	0,3666	0,1074
	MDS (kg N ha ⁻¹ día ⁻¹)	-	1,233	-	-	-

NA: nitrógeno absorbido; TA: tasa de absorción; NC: no corresponde; S: siembra; C: cosecha.

En cuanto al nitrógeno absorbido por el cultivo de trigo, se observa un descenso de este entre Z 33 – Z 65 (Figura 14). La causa de esta disminución sería las condiciones de sequía analizada anteriormente.

Diversos autores difieren en cuanto a la cantidad de nitrógeno absorbido y la tasa de absorción del cultivo de trigo para los diferentes estadios (Hewstone, 1999, Cha y Duran, 2001, García Lamothe, 2004, Martínez et al., 2015). Según García Lamothe (2004), al inicio del macollaje el cultivo puede llegar a absorber 1,5 – 2 kg N ha⁻¹ día⁻¹, sin embargo, Hewstone (1999) reporta valores entre 0,13 y 0,31 kg N ha⁻¹ día⁻¹. En este trabajo la absorción en dicho periodo fue de 0,58 kg N ha⁻¹ día⁻¹, siendo similar al obtenido por Martínez et al. (2015). En cuanto a la tasa de absorción del periodo Z 22 – Z 30, el promedio de 3,1 kg N ha⁻¹ día⁻¹ se encontró por debajo de los 4 – 5 kg N ha⁻¹ día⁻¹ observados por García Lamothe (2004), aunque por encima de los valores reportados por Hewstone (1999) y Cha y Duran (2001). Analizando los tratamientos nitrogenados en el periodo de crecimiento Z 22 – Z30, se puede destacar que los tratamientos N a S – Z 22 y N no limitante obtuvieron una tasa de absorción de 3,7 kg N ha⁻¹ día⁻¹. No obstante, las tasa de absorción de los tratamientos NR a S y NR a S – Z 30, estuvieron un 22 % y 38 % respectivamente por debajo de los primeros.

Como puede observarse en la figura 14 y cuadro 13, se lograron diferencias significativas en el nitrógeno absorbido entre los distintos tratamientos nitrogenados a partir de Z 30. Claramente marcado por la fertilización nitrogenada, ya que el tratamiento con NR a S fue el que absorbió menor cantidad de nitrógeno durante todo el ciclo. El tratamiento fertilizado a siembra y Z 22 fue el que más nitrógeno absorbió en las etapas iniciales (hasta Z 33), sin mostrar diferencias significativas con los tratamientos NR a S – Z 30 y sin limitante. Que los tratamientos NR a S – Z 22, NR a S – Z 30 y N sin limitantes no se diferenciaron significativamente, puede deberse a que la fertilización en Z 30 no era necesaria, siendo producto de las condiciones hídricas de la zafra. Relacionado a ello, diversos estudios demuestran la estrecha relación entre el agua en suelo y la eficiencia del uso de nitrógeno por parte del cultivo, disminuyendo dicha eficiencia cuando se presenta un déficit hídrico (Nielsen y Halvorson, 1991, Tilling et al., 2007, Saint Pierre et al., 2008).

En el periodo Z 33 – Z 65, se evidencia claramente el severo déficit hídrico sufrido por el cultivo (Figura 4). Según van Herwaarden et al. (1998), este echo disminuye en gran medida la tasa de crecimiento del cultivo y su capacidad asimilar nitrógeno. En dicho periodo, las tasas de absorción son negativas, excepto para el tratamiento N no limitante (Figura 14). Como ya se mencionó en capítulos anteriores, una disminución de la tasa de absorción a partir de floración puede ser normal (Álvarez, 2006), pero no un valor de absorción negativo, como los encontrados en este trabajo. Este valor negativo

podría estar explicado debido a una removilización de nitrógeno por parte del cultivo debido a las condiciones de sequía (Ding et al., 2018).

Luego del estadio Z 33, el tratamiento N sin limitantes absorbió una mayor cantidad de nitrógeno en comparación con los restantes tratamientos (Cuadro 9). En Z 65, dicho tratamiento absorbió 215 kg N ha⁻¹, mientras que los tratamientos NR a S, NR a S – Z 22 y NR a S- Z 30 absorbieron 51%, 28 % y 14 %, respectivamente, por debajo del primero. Al momento de la cosecha, el tratamiento N no limitante absorbió 293 kg N ha⁻¹, mientras la absorción que los restantes fue un 49 %, 24 %, y 21 % inferior (tratamientos NR a S, NR S – Z 22 y NR S- Z 30, respectivamente).

Esta elevada absorción de nitrógeno por parte del tratamiento N no limitante no produjo mayores rendimientos (Figura 12), siendo el rendimiento del mismo similar estadísticamente al tratamiento NR a S. Este resultado concuerda con Hoffman et al. (2015), donde se demuestra que cuando el cultivo absorbe un valor mayor de 108 kg N ha⁻¹ el rendimiento del cultivo de trigo no incrementa, alcanzando un Plateau. Sin embargo, Dall’Orso et al. (2016) mencionan un valor de absorción de 267 kg N ha⁻¹ en Z 65 para alcanzar dicho Plateau.

A su vez, estos resultados también reflejan que el suelo donde se realizó este trabajo aportó grandes cantidades de nitrógeno, ya que el tratamiento NR a S absorbió 155 kg N ha⁻¹ en Z 33, mientras que Dall’ Orso et al. (2016) demuestran un pico máximo de absorción de 121 kg N ha⁻¹ en el estadio Z 65. Probablemente, si no hubiese ocurrido un déficit hídrico tan severo, el tratamiento NR a S hubiese alcanzado mayores niveles de absorciones (Kunrath et al., 2020).

4.6. EFECTO DE LA INTERACCIÓN DE TRATAMIENTOS EN EL CULTIVO DE TRIGO

4.6.1. Rendimiento y componentes del rendimiento

La interacción entre los cuatro antecesores de verano y los cuatro tratamientos de nitrógeno sobre el rendimiento en grano fue significativa (Figura 15). Este resultado deja en evidencia la influencia del cultivo antecesor sobre el manejo nitrogenado en el cultivo siguiente y la disponibilidad de agua para este último. Asimismo, independientemente del cultivo antecesor, la disponibilidad de agua en suelo también influye en el manejo nitrogenado en el cultivo (Kunrath et al., 2020).

Cuando el cultivo antecesor fue soja hasta V8, la tendencia observada fue hacia una mayor respuesta a la cantidad de nitrógeno agregado, aun cuando la dosis fue mayor a la recomendada. Si bien el tratamiento N no limitante no se diferencié estadísticamente

de los tratamientos NR S – Z 22 y NR S – Z30 (MDS = 2246 kg ha⁻¹), logró alcanzar 1000 kg ha⁻¹ de rinde por encima de estos, aunque con una dosis de nitrógeno agregada de un 62 % y 49 % superior, respectivamente (Cuadro 9, Figura 15).

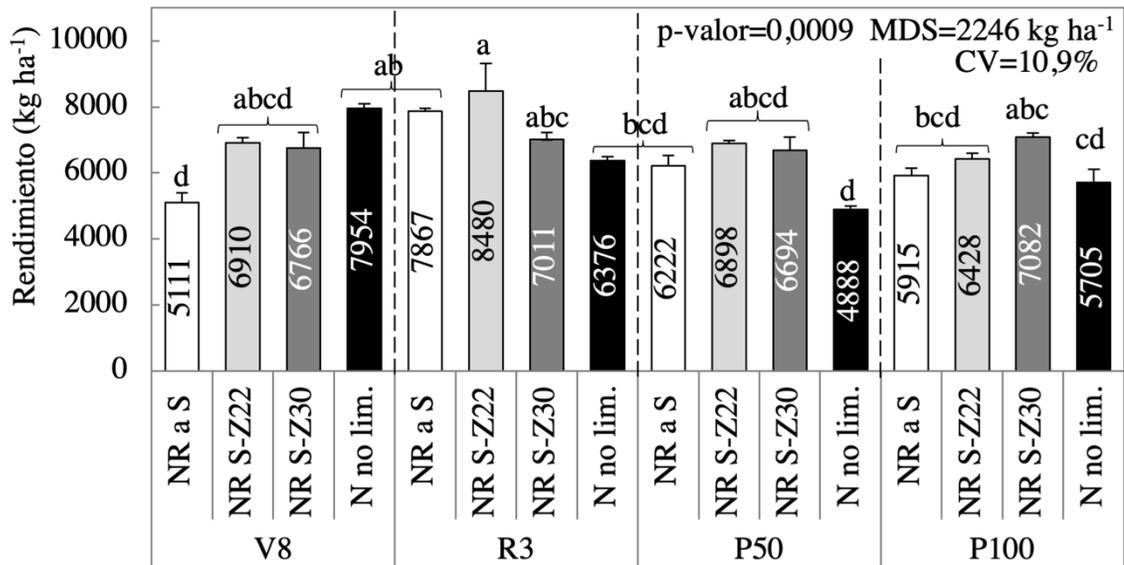


Figura 15. Rendimiento en función de los tratamientos realizados. Las barras corresponden a error estándar. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; P50: soja a cosecha con población al 50%; P100: soja a cosecha con población 100%; NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S-Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S – Z 30: nitrógeno recomendado a siembra, Z 22 y Z 30; N no limitante: nitrógeno no limitante.

En los restantes antecesores, no se observó la misma tendencia en cuanto a la respuesta al agregado de nitrógeno, penalizando el rendimiento cuando se aplicó nitrógeno en exceso (Figura 15). En la figura 15 se puede observar que, para los tres antecesores (soja hasta R3, cosecha P50 y cosecha P100) el tratamiento N no limitante, el cual llevo una dosis total de 233 kg N ha⁻¹, obtuvo rendimientos similares o inferiores al tratamiento con solamente 23 kg N ha⁻¹ agregados (NR a S). Evidenciando esto, tanto la importancia de realizar un correcto muestreo para fertilizar (Hoffman et al., 2010), y no realizar aplicaciones excesivas de nitrógeno (Verhulst et al., 2015), como la de analizar el sistema en conjunto, teniendo en cuenta el agua acumulada en suelo a la siembra del cultivo siguiente (Forján y Manso, 2016b). Esto es debido a la fuerte relación entre agua disponible en suelo y la eficiencia en el uso del fertilizante nitrogenado, siendo baja la eficiencia en momentos de baja disponibilidad hídrica (García Lamothe, 1998, Nielsen y Halvorson, 1991, Tilling et al., 2007, Saint Pierre et al., 2008, Kunrath et al., 2020).

El resultado obtenido con estos tres últimos antecesores concuerda y confirma lo mencionado por Roupael et al. (2012), en cuanto a que, bajo condiciones de sequía o cuando el cultivo se encuentra en suficiencia nutricional, seguir aplicando nutrientes no mejorara el crecimiento y rendimiento del cultivo.

El mayor rendimiento se logró cuando el cultivo antecesor finalizó en R3 (equivalente a un cultivo de cobertura de soja), con NR S - Z 22. Esto puede ser producto de que la soja no logró alcanzar su pico máximo de consumo de nitrógeno (Hanway y Weber, 1971) y parte del nitrógeno fijado y absorbido, fue utilizado por el cultivo de trigo siguiente. A su vez, como se mencionó anteriormente, generó un periodo de barbecho largo, siendo favorable para lograr una correcta descomposición de rastrojo y acumulación de agua (Ernst, 2000, Ernst y Siri-Prieto, 2008).

El mayor rendimiento obtenido producto de la interacción soja hasta R3 y el tratamiento NR S – Z 22, puede estar explicado por el mayor número de granos conseguido (Cuadro 14). Aunque, el peso de granos obtenido por esta interacción (30 mg) se encuentra por debajo del promedio total de peso de granos en este trabajo.

Es de mencionar, que no se observó diferencias significativas en el peso de grano entre las distintas interacciones, aunque se puede apreciar en el cuadro 14 que cuanto más corto fue el barbecho del cultivo (debido a antecesores que llegaron a cosecha) y cuanto más elevada fue la dosis de nitrógeno, menor fue el peso de grano obtenido. El menor peso de grano se obtuvo con la interacción soja a cosecha P50 y N no limitante, siendo este valor de 24 mg (Cuadro 14). Este resultado podría estar explicando el bajo rendimiento de esta interacción, la cual no se diferenció significativamente de la interacción soja hasta V8 y NR a S, siendo que esta última recibió 210 kg N ha⁻¹ menos. A su vez, analizando el antecesor soja hasta V8, se puede apreciar una relación inversa entre el peso de granos y número de granos (Cuadro 14). Cuanto mayor fue el nitrógeno agregado, mayor fue el número de granos, pero menor fue el peso de estos. Este incremento en el número de granos concuerda con el incremento en rendimiento para dicho antecesor (Figura 15). No obstante, en los antecesores que llegaron a cosecha, no se observó esta relación inversa debido a que ambos componentes (PG y NG) disminuyeron cuando se agregó nitrógeno en exceso. Estos resultados verifican estudios previos donde mencionan la magnitud de fertilizar correctamente los cultivos y no aplicar en exceso cuando el cultivo se encuentra en déficit hídrico o en suficiencia de nitrógeno debido a los impactos negativos que provocan en el rendimiento final (Hoffman et al., 2010, Roupael, et al. 2012).

A pesar de no observarse diferencias significativas entre las diferentes interacciones en la biomasa total acumulada (Cuadro 14), se puede apreciar una tendencia

similar a los componentes de rendimiento previamente mencionados. Cuando el antecesor fue soja hasta V8, la biomasa total acumulada incremento a medida que aumentaron las dosis aplicadas, concomitante con el rendimiento obtenido. Por otra parte, en los restantes antecesores, se puede observar nuevamente la penalización de aplicar en exceso nitrógeno cuando el cultivo no lo requería y se encontraba en situación de deficiencia hídrica (Hoffman et al., 2010, Rouphael et al., 2012). Vinculado a esto, Bauer et al. (1992), mencionan que, en cultivos de secano, la nutrición nitrogenada es dependiente, entre otras cosas de las precipitaciones, y como se mostró en el capítulo del efecto del antecesor hasta la siembra, en el periodo donde el cultivo comienza la mayor tasa de absorción de nitrógeno, comienza el déficit hídrico. Concordando este resultado con el trabajo realizado por van Herwaarden et al. (1998) donde demuestran el ya mencionado “haying-off”

Cuadro 14. Componentes del rendimiento en trigo según interacción de tratamientos realizados.

Trat. Soja	Trat. trigo	Mac (N°)	Fert (%)	Esp (N°)	GE (N°)	GM (N°)	PG (g)	Rend. (kg ha ⁻¹)	IC (%)	BT (kg MS ha ⁻¹)
V8	NR a S	821	36,6	298 b	43	12823 c	40	5111 cd	58	8772
	NR S-Z22	1173	42,5	489 ab	38	18707 bc	37	6910 abcd	52	13290
	NR S-Z30	1118	43,4	478 ab	41	19187 bc	36	6766 abcd	43	15886
	N no lim.	1183	45,9	543 a	44	23679 ab	34	7954 ab	47	16939
R3	NR a S	1349	35,2	474 ab	46	21840 ab	36	7867 ab	55	14429
	NR S-Z22	1585	33,4	528 a	55	28418 a	30	8480 a	55	15360
	NR S-Z30	1454	37,4	544 a	41	22185 ab	32	7011 abc	43	16373
	N no lim.	1528	30,3	457 ab	49	21572 ab	30	6376 bcd	45	14079
P50	NR a S	1355	34,3	465 ab	38	17600 bc	35	6222 bcd	44	14228
	NR S-Z22	1525	37,8	574 a	38	21732 ab	32	6898 abcd	39	17776
	NR S-Z30	1515	37,8	566 a	40	22511 ab	30	6694 abcd	44	15110
	N no lim.	1409	36,0	507 ab	40	20478 b	24	4888 d	37	13246
P100	NR a S	1343	34,9	463 ab	37	16682 bc	36	5915 bcd	40	14689
	NR S-Z22	1666	34,5	575 a	39	22181 ab	29	6428 bcd	42	15268
	NR S-Z30	1318	32,4	424 ab	56	23040 ab	31	7082 abc	55	12947
	N no lim.	1594	38,2	597 a	37	21105 b	27	5705 cd	42	13605
<i>Promedio</i>		<i>1371</i>	<i>36,9</i>	<i>499</i>	<i>43</i>	<i>20859</i>	<i>32,3</i>	<i>6644</i>	<i>46</i>	<i>14500</i>
<i>p-valor</i>		<i>0,7154</i>	<i>0,4522</i>	<i>0,0459</i>	<i>0,1024</i>	<i>0,0069</i>	<i>0,3419</i>	<i>0,0009</i>	<i>0,4755</i>	<i>0,2456</i>
<i>CV (%)</i>		<i>12,7</i>	<i>14,3</i>	<i>16,9</i>	<i>18,4</i>	<i>11,2</i>	<i>7,8</i>	<i>15,7</i>	<i>25,2</i>	<i>21,8</i>
<i>MDS</i>		<i>-</i>	<i>-</i>	<i>223</i>	<i>-</i>	<i>7252</i>	<i>-</i>	<i>2256</i>	<i>-</i>	<i>-</i>

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Mac: macollos m⁻²; Fert: fertilidad de los macollos; Esp: espigas m⁻²; GE: granos espigas⁻¹; GM: granos m⁻²; PG: peso de grano; Rend: rendimiento; IC: índice de cosecha; BT: biomasa

total; V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; P50: soja raleada al 50% en R4.5-5; P100: soja a cosecha población 100%; NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S-Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S-Z 30: nitrógeno recomendado completo; N no limitante: nitrógeno no limitante.

4.6.2. Crecimiento y absorción de nitrógeno.

Analizando el crecimiento y absorción de nitrógeno por parte del cultivo de trigo, únicamente se encontraron interacciones significativas a Z 33 para el crecimiento (Figura 16, Cuadro 15, Anexo 5) y en cosecha para la absorción de nitrógeno (Figura 17, Cuadro 16, Anexo 7). Es de mencionar, que no se hallaron diferencias significativas en las tasas de crecimiento y tasas de absorción del cultivo entre las diferentes combinaciones de tratamiento (Cuadro 15, Cuadro 16, Anexo 6, Anexo 8).

En Z 33, momento en el cual, según diversos autores se da el punto de inflexión en la tasa de crecimiento (Fischer, 1985, Dall' Orso et al., 2016, Fassana et al., 2017), se observó que el antecesor soja a cosecha P50 con N no limitante se diferenció significativamente en biomasa acumulada del antecesor soja hasta V8 con los manejos nitrogenados NR S – Z 30 y NR a S (Cuadro 15, Anexo 5). Esto puede ser producto de que cuando el antecesor fue soja cosecha P50, se determinó una mayor concentración de nitrógeno en suelo al momento de la siembra del cultivo de trigo (Figura 6). Este resultado es contradictorio si se analizan los rendimientos finales del cultivo, ya que las combinaciones antecesor soja a cosecha P50 con N no limitante y soja hasta V8 con NR a S no se diferenciaron en rendimiento, siendo estos los menores alcanzados en este trabajo. Según van Herwaarden et al. (1998), elevadas tasas de crecimiento en momentos tempranos, seguido por sequías extremas, impactan negativamente el rendimiento, siendo esto una posible explicación de este resultado.

Examinando el antecesor soja hasta V8, el cual siempre mostró una acumulación de biomasa menor que los restantes antecesores, se observa una respuesta positiva al agregado de nitrógeno en la biomasa acumulada en Z 33 (Figura 16, Cuadro 15, Anexo 5). Esta respuesta al agregado de nitrógeno, la cual es opuesta a los restantes antecesores, puede ser producto del largo barbecho que provocó soja hasta V8, logrando una adecuada acumulación de agua al momento de la siembra del cultivo. Según Abeledo y Miralles (2011), esta adecuada acumulación es crucial para que el cultivo sea menos dependiente de las precipitaciones posteriores en su crecimiento. A su vez, según van Herwaarden et al. (1998), las tasas de absorción de agua por parte del cultivo se encuentran asociadas a la tasa de crecimiento del cultivo. Por ende, este antecesor podría haber absorbido una menor cantidad de agua del suelo en comparación con los restantes antecesores (soja hasta

R3, cosecha P50 y cosecha P100), los cuales alcanzaron mayores tasas de crecimiento y biomasa acumulada desde etapas tempranas de crecimiento (Figura 16, Cuadro 15, Anexo 5). La mayor acumulación de agua al momento de la siembra, sumado a la menor absorción de agua en las etapas iniciales si se compara con los restantes antecesores, podría ser la explicación a la positiva respuesta al agregado de nitrógeno de soja hasta V8.

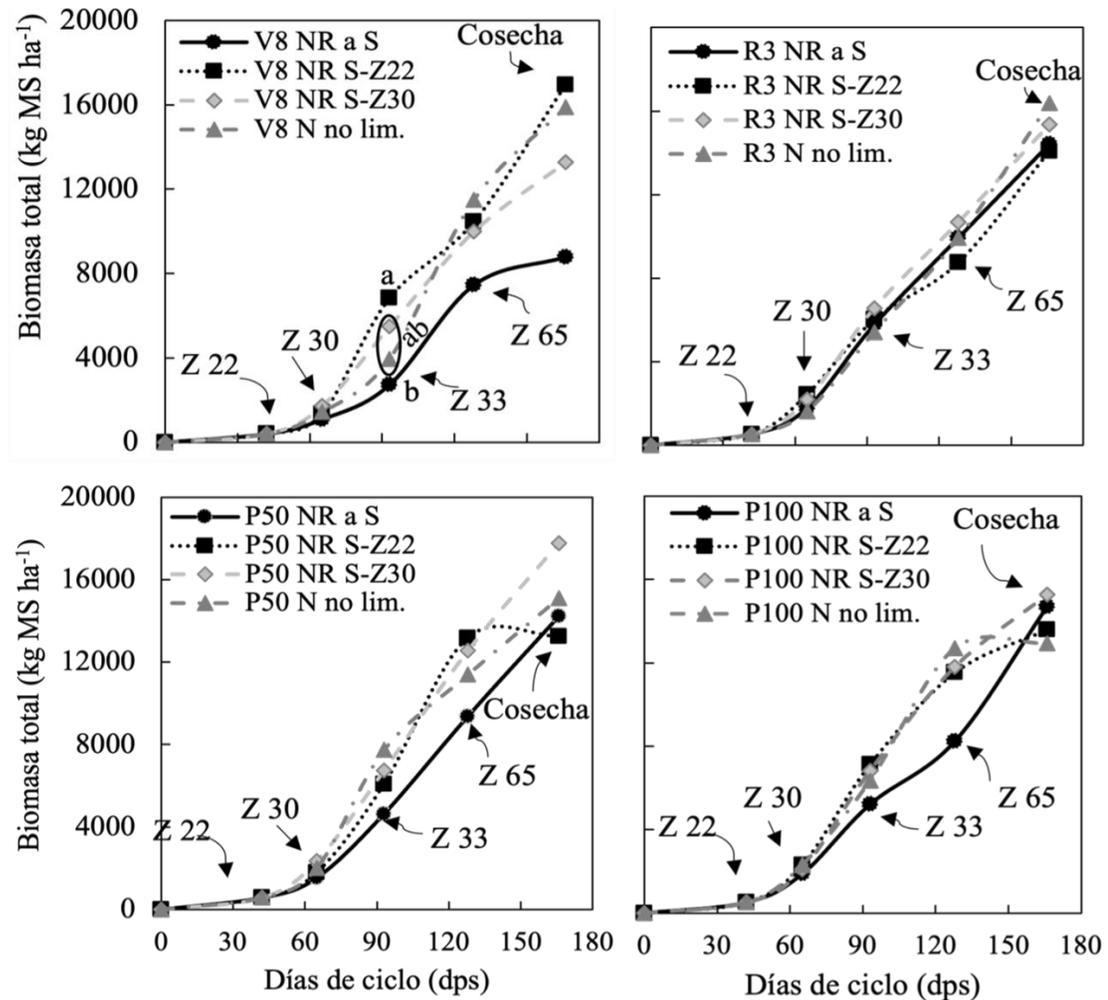


Figura 16. Biomasa total acumulada según tratamientos realizados en función del tiempo. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; P50: Soja raleada al 50% en R4.5-5; P100: soja a cosecha población 100%; NR a S: NR a siembra; NR S-Z22: NR de siembra a Z 22; NR S-Z 30: NR de siembra a Z 30; N no limitante: nitrógeno no limitante.

Cuadro 15. Promedio, p-valor y MDS para biomasa acumulada (BT) y tasa de crecimiento del cultivo (TC) en los diferentes periodos y estadios del cultivo.

BT		Z 22	Z 30	Z 33	Z 65	Cosecha
	Promedio (kg MS ha ⁻¹)		475	1763	5844	10591
p-valor		NC	0,2334	0,0202	0,1267	0,1371
MDS (kg MS ha ⁻¹)		-	-	3224,56	-	-
TC		S-Z 22	Z 22-Z 30	Z 30-Z 33	Z 33-Z 65	Z 65-C
	Promedio (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	12	59	142	136	103
p-valor		NC	0,4647	0,0575	0,2760	0,2456

NC: no corresponde; S: Siembra; C: Cosecha.

En cuanto a la acumulación de nitrógeno total por parte del cultivo al momento de la cosecha (Figura 16, Cuadro 15, Anexo 7), la interacción que presentó el mayor valor fue soja hasta V8 y N no limitante (344 kg N ha⁻¹). Asimismo, el rendimiento de dicha interacción no se diferenció significativamente de la interacción que obtuvo el mayor rinde (soja hasta R3 y NR S – Z 22). A su vez, este antecesor (soja hasta V8) acumuló la menor cantidad de nitrógeno a cosecha cuando el tratamiento nitrogenado fue NR a S (90 kg N ha⁻¹), al mismo tiempo que manifestó uno de los rendimientos más bajos. Ambos resultados coinciden con Perdomo y Barbazán (2015) y Hoffman et al. (2017), los cuales mencionan que existe una estrecha relación entre el nitrógeno absorbido y el rendimiento final del cultivo cuando no existen otras limitantes.

De igual manera, los antecesores soja hasta R3 y soja a cosecha P50 alcanzaron una absorción total de nitrógeno significativamente menor cuando el tratamiento nitrogenado fue NR a S. Se observa esta misma (Figura 16) tendencia con el antecesor soja a cosecha P100, aunque los restantes tratamientos nitrogenados no lograron diferenciarse significativamente (MDS = 84,69 kg N ha⁻¹). Para los tres antecesores mencionados (soja hasta R3, soja cosecha P50 y soja cosecha P100) ocurre lo opuesto a lo reportado por Perdomo y Barbazán (2015) y Hoffman et al. (2017), ya que los menores rendimientos se registran cuando el tratamiento nitrogenado fue N no limitante. Este hecho puede estar asociado a las altas tasas de crecimiento en etapas vegetativas de estos tres antecesores (Figura 10), sumado a que el tratamiento N no limitante también estimuló elevadas tasas de crecimiento (Figura 13), provocando mayores absorciones de agua en suelo (van Herwaarden et al., 1998). Esto conlleva a que, cuando comenzó el déficit hídrico severo, el suelo no presentara una reserva de agua para el crecimiento. Relacionado a ello, Hoffman et al. (2009) mencionan que condiciones de estrés hídrico luego del estadio Z 32 penalizan el rendimiento en grano.

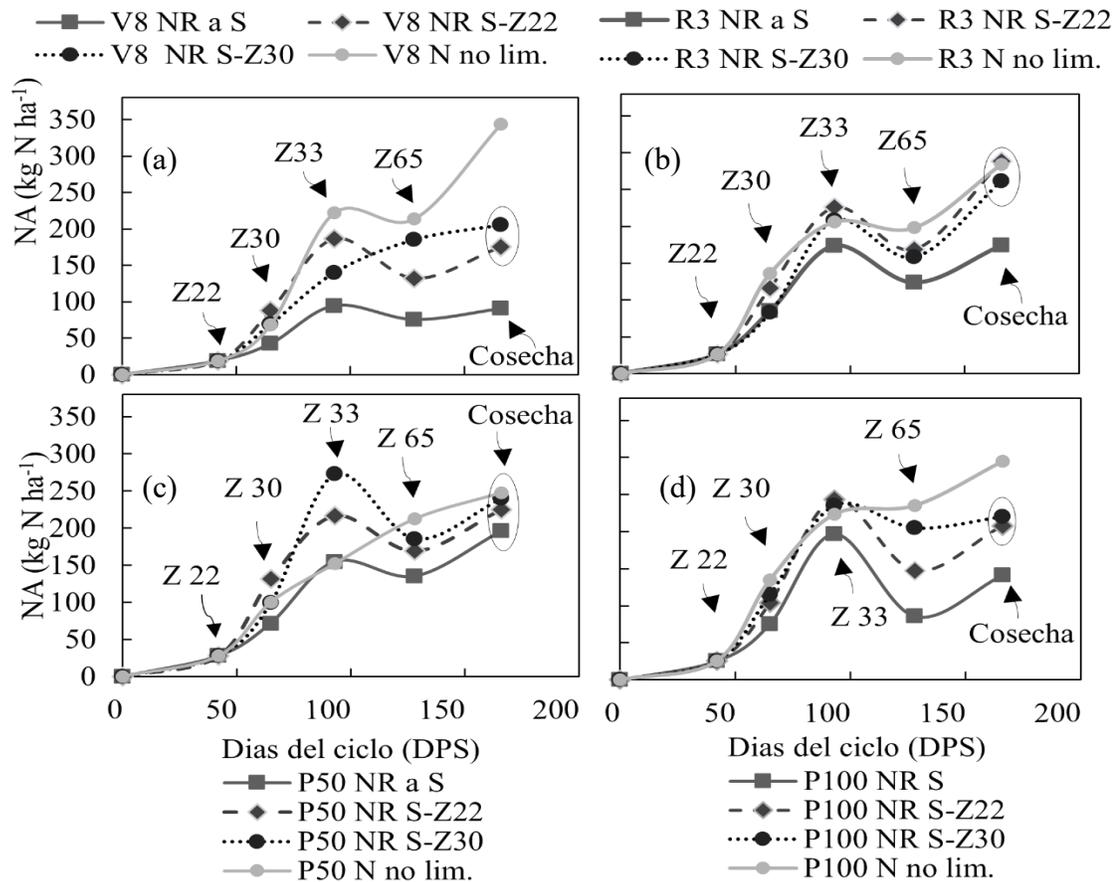


Figura 17. Nitrógeno absorbido durante el cultivo de trigo. Interacción tratamiento soja V8 y tratamientos de N (a), tratamiento soja R3 y N (b), cosecha P50 y N (c), y cosecha P100 y N (d). Círculos entre tratamientos muestran que no hay diferencias significativas entre ellos. NA: Nitrógeno absorbido; V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; P50: Cosecha P50; P100: soja a cosecha; NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S-Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S – Z 30: nitrógeno recomendado a siembra, Z 22 y Z 30; N no lim.: nitrógeno no limitante.

Cuadro 16. Promedio, p-valor y MDS para el nitrógeno absorbido y tasa de absorción de nitrógeno en los diferentes periodos y estadios del cultivo.

NA	Promedio (kg N ha ⁻¹)	Z 22	Z 30	Z 33	Z 65	Cosecha
		p-valor	NC	0,4048	0,8591	0,5637
	MDS (kg N ha ⁻¹)	-	-	-	-	84,69
TA	Promedio (kg N ha ⁻¹ día ⁻¹)	S-Z 22	Z 22-Z 30	Z 30-Z 33	Z 33-Z 65	Z 65-C
		p-valor	NC	0,4049	0,7748	0,8467

NC: no corresponde; NA: nitrógeno absorbido; TA: tasa de absorción de N; S: siembra; C: cosecha.

Como se puede observar en el Cuadro 17, la cantidad de nitrógeno agregado para cada tratamiento nitrogenado no tuvo una gran variación dependiendo del cultivo antecesor, pero si provocó una importante variación de la eficiencia agronómica. El antecesor soja hasta V8 alcanzó la mayor eficiencia agronómica en comparación con los restantes antecesores (soja hasta R3, soja a cosecha P50 y soja a cosecha P100). Para los antecesores soja hasta R3, soja a cosecha P50 y soja a cosecha P100, el tratamiento de N no limitante siempre resultó en una eficiencia negativa, significando que el rendimiento disminuyó por cada unidad de nitrógeno añadida (Hoffman et al., 2010, Roupal, et al. 2012).

Cuadro 17. Eficiencia agronómica de nitrógeno y nitrógeno agregado para las diferentes interacciones, tomando como testigo el NR a siembra para cada antecesor.

Tratamiento soja	Tratamiento N	Eficiencia agronómica	N agregado (UN ha ⁻¹)
V8	NR a S	0,0	23
	NR S-Z22	25,7	93
	NR S-Z30	16,6	123
	N no lim.	13,5	233
R3	NR a S	0,0	20
	NR S-Z22	9,0	88
	NR S-Z30	-8,7	118
	N no lim.	-7,1	230
CP50	NR a S	0,0	20
	NR S-Z22	11,6	78
	NR S-Z30	5,3	108
	N no lim.	-6,4	230
Cosecha P100	NR a S	0,0	27
	NR S-Z22	7,9	92
	NR S-Z30	12,3	122
	N no lim.	-1,0	237

V8: soja hasta V8; R3: soja hasta R3; P50: soja a cosecha P50; Cosecha P100: soja a cosecha; NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S-Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S-Z30: nitrógeno recomendado a siembra, Z 22 y Z 30; N no limitante: nitrógeno no limitante.

4.7. CALIDAD DE GRANO DEL CULTIVO DE TRIGO

La interacción entre los antecesores con los diferentes tratamientos nitrogenados afectó el contenido de proteína en grano (Figura 18, Figura 19, Anexo 9, Anexo 10). A su vez, los tratamientos nitrogenados afectaron la relación entre la proteína en grano y el

rendimiento final obtenido, alcanzando una mayor relación cuando el tratamiento fue NR a siembra (Figura 18).

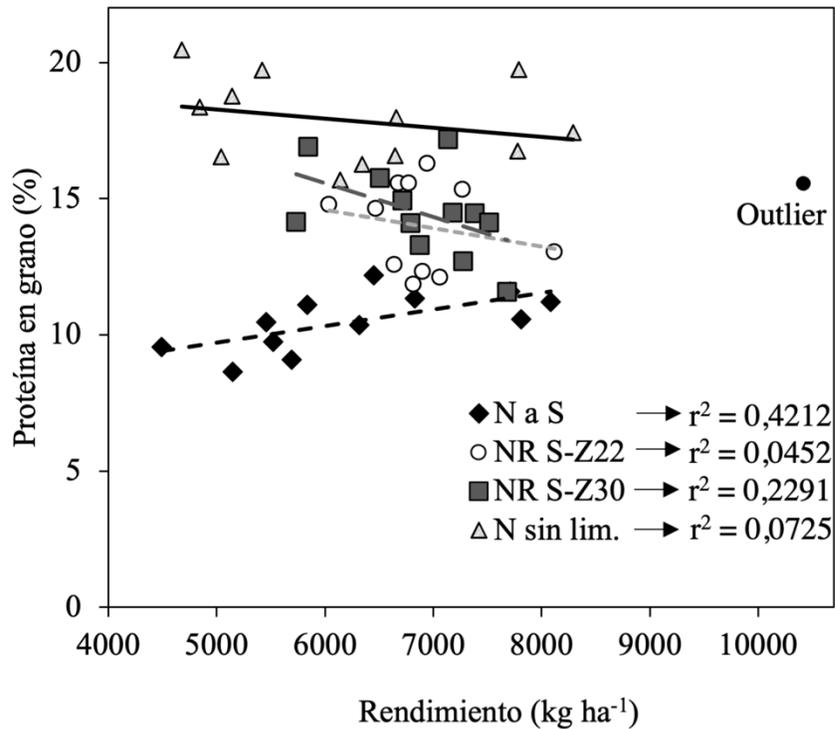


Figura 18. Relación entre rendimiento y proteína a 13 % de humedad según tratamiento nitrogenado. NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S-Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S-Z30: nitrógeno recomendado a siembra, Z 22 y Z 30; N no limitante: nitrógeno no limitante.

Como se puede apreciar en la figura 18, independientemente de los antecesores, el tratamiento NR solo a siembra alcanzó los niveles de proteínas más bajos, abarcando un rango entre 9,1 a 11,3% (Figura 19). Estos valores se encuentran por debajo del 11,5% requerido por la industria (Vázquez, 2009).

Asimismo, se puede observar una relación positiva entre el rendimiento logrado y el nivel de proteína en el tratamiento NR a siembra (Figura 18). Según Berger et al. (2015), existe una relación negativa entre el rendimiento del cultivo y la proteína en grano, siendo aparentemente contradictorio con lo obtenido en este trabajo para este tratamiento nitrogenado, aunque la relación es débil. Este resultado se encuentra relacionado al efecto del antecesor (Anexo 9), ya que influyó el nivel de nitrógeno en suelo para el cultivo de trigo. Aplicando únicamente 20 kg N ha⁻¹ a siembra, cuando el antecesor fue soja hasta

V8 el cultivo de trigo rindió 5111 kg ha⁻¹ y absorbió 90 kg N ha⁻¹, mientras que cuando el antecesor fue soja hasta R3 el cultivo alcanzó un rendimiento de 7967 kg ha⁻¹, y absorbió 174 kg N ha⁻¹ (Figura 15, Anexo 7). A su vez, estos resultados evidencian el elevado aporte de nitrógeno que realizó el suelo. Hoffman et al. (2017) reportan valores de absorción en Z 65 entre 32 a 84 kg N ha⁻¹, cuando no se aplicó fertilizante nitrogenado, mientras que en este trabajo para dicho estadio se observan valores entre 75 a 177 kg N ha⁻¹, restando los 20 kg N ha⁻¹ agregados a siembra.

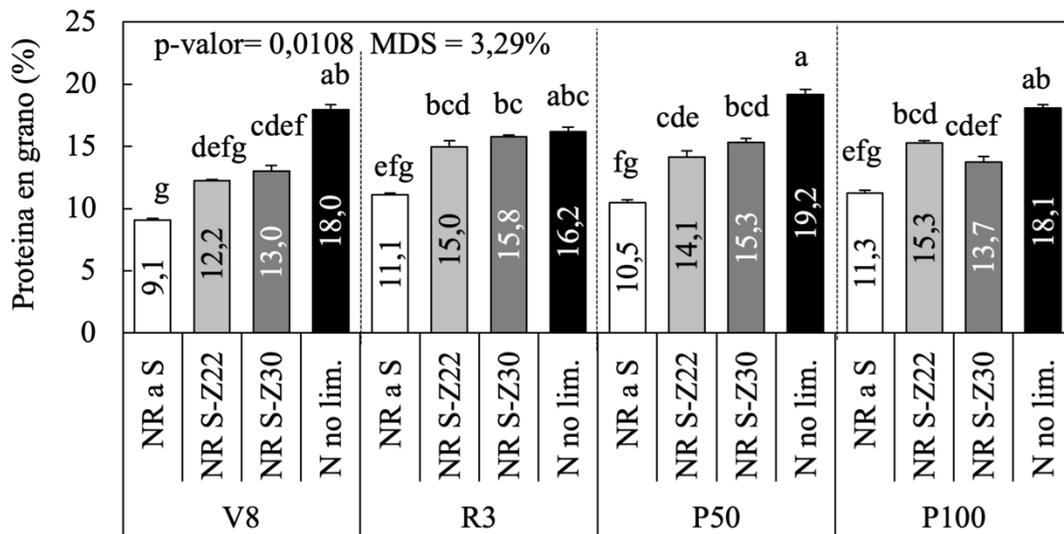


Figura 19. Proteína en grano en porcentaje para la interacción de los tratamientos de cultivo antecesor y nitrogenado. Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). Las barras corresponden al error estándar. Sj. V8: soja hasta V8; Sj. R3: soja hasta R3; Cosecha P50: soja raleada al 50% en R 4.5-5; P100: soja a cosecha; NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S-Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S – Z 30: nitrógeno recomendado completo; N no limitante: nitrógeno no limitante.

Estos resultados dejan en evidencia la importancia de realizar una correcta fertilización del cultivo de trigo (García Lamothe, 2004, Hoffman et al., 2010, Rouphael et al., 2012) ya que, sin importar el antecesor, el tratamiento NR a S-Z 22 logró el nivel requerido por la industria mencionado por Vázquez (2009) para obtener una buena calidad de grano (Figura 19, Anexo 10).

Es de mencionar que en este estudio no se observaron diferencias significativas entre las diferentes interacciones en el peso hectolítrico en grano (p -valor = 0,15), encontrándose los valores entre 74,4 y 79,8 kg hl⁻¹.

5. CONCLUSIONES

- Las escasas precipitaciones observadas durante el ciclo del crecimiento de trigo, 199 mm por debajo de lo normal, dejaron en evidencia, en primer lugar, el efecto del antecesor de verano inmediato sobre la productividad del trigo siguiente. El rendimiento en grano fue un 15 a 17% superior cuando el antecesor fue una soja que simulaba ser un cultivo cobertura en contraste con los que alcanzaron la cosecha.
- El manejo del antecesor afectó la disponibilidad de nitrógeno al momento de la siembra del cultivo de trigo. Se alcanzó el mayor valor cuando los antecesores fueron soja hasta R3 y soja a cosecha P50, obteniendo ambos un valor de 9,3 ppm de nitrógeno en suelo, mientras que soja hasta V8 y soja a cosecha P100 los valores fueron de 7,7 y 7,3 ppm de nitrógeno en suelo, respectivamente. A su vez, modificó la disponibilidad de agua en suelo al momento de la siembra del cultivo de trigo y durante todo el periodo de crecimiento del cultivo. El agua disponible fue un 37 a 21% mayor al momento de la siembra cuando los antecesores no llegaron a cosecha (soja hasta V8 y soja hasta R3, respectivamente). Como consecuencia de estos resultados, se obtuvo el mayor rendimiento en trigo cuando el antecesor fue soja hasta R3 (7434 kg ha⁻¹), siendo un 15-16% superior a cuando el antecesor llegó a cosecha (soja a cosecha P100 y soja a cosecha P50).
- En segundo lugar, el manejo nitrogenado afectó el rendimiento del cultivo de trigo. El rendimiento en grano con ajuste a siembra y Z 22 fue superior a los restantes tratamientos, diferenciándose estadísticamente de los tratamientos NR solo a siembra y N no limitante. Siendo los rendimientos en grano de estos últimos similares a pesar de que la fertilización del tratamiento N no limitante fue 210 UN ha⁻¹ superior.
- El tratamiento de N no limitante llevo a elevadas tasas de crecimiento en los momentos iniciales del cultivo, siendo estos valores 64 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ en el periodo Z 22- Z 30 y 162 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ en el periodo Z 30 – Z 33. Provocando altas tasas de absorción de nitrógeno (3,7 y 3,3 kg N ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente). Probablemente como consecuencia de mayores tasas de crecimiento en etapas previas al crítico, posteriormente el suelo se encontró con menor agua almacenada. Esto parece ser la base de la penalización en la tasa de crecimiento durante el periodo crítico del cultivo (disminuyendo un 21% la tasa de crecimiento en el periodo Z 33 – Z 65, respecto al periodo anterior), para éste tratamiento.
- En tercer lugar, el manejo nitrogenado pudo revertir el efecto del cultivo antecesor. El trigo con un antecesor soja hasta V8 incrementó un 36% su rendimiento cuando el tratamiento nitrogenado fue N no limitante (233 kg N ha⁻¹ agregados). Este aumento en el rendimiento, producto del N no limitante, provocó que la interacción soja hasta V8 con N

no limitante igualará o superará a las diferentes interacciones nitrogenadas con el antecesor que ocasionó el mayor rendimiento (soja hasta R3). Por otra parte, con los antecesores soja hasta R3, soja a cosecha P50 y soja a cosecha P100, se detectó una respuesta contraria en trigo cuando se agregaron 233 kg N ha⁻¹ (N no limitante), observándose una penalización de hasta 24% del rendimiento cuando se aplicó N no limitante.

- Este resultado evidencia que, frente a un barbecho corto previo al cultivo de trigo en años donde las condiciones climáticas no son las adecuadas desde el punto de vista de las precipitaciones, se afectaría la condición hídrica del trigo. Este factor incide sobre el manejo nitrogenado del cultivo, ya que se demostró que aplicaciones en momentos donde el cultivo no requiere nitrógeno puede disminuir el rendimiento en grano.
- La relación entre rendimiento en grano y proteína en grano varió según el tratamiento nitrogenado, siendo más estrecha dicha relación cuando el tratamiento fue NR a siembra ($r^2 = 0,4212$). Asimismo, el tratamiento NR a siembra ocasionó valores de proteína en grano por debajo del 11,5% requerido por la industria, independientemente del antecesor, obteniendo un rango de 9,1 a 11,3%. Por otra parte, el tratamiento N no limitante llevó a que el rango de proteína en grano se ubicara muy por encima, entre 16,2 a 19,2%. No obstante, con el tratamiento NR a S - Z 22 se obtuvieron valores entre 12,2 y 15,3%. Este resultado deja en evidencia que las aplicaciones de nitrógeno luego del estadio Z 22 no eran necesarias.

6. RESUMEN

A partir del año 2000 se registró un cambio en la producción agrícola nacional impulsado principalmente por el cultivo de soja, el cual provocó que se dejara de rotar con pasturas perennes, y se comenzara a implementar la siembra directa. El aumento de la secuencia soja-trigo ocasionó un incremento de las pérdidas de suelo por erosión y un empobrecimiento de la capacidad de aporte de N por parte del suelo. A su vez, el potencial de rendimiento del trigo ha aumentado en estos últimos 20 años, provocando un fuerte incremento en la necesidad de agregado de nitrógeno. El objetivo general de este trabajo es evaluar el impacto de la presencia o no, y el nivel de productividad del cultivo de soja sobre la productividad y respuesta al agregado de nitrógeno del trigo siguiente. El experimento se realizó en la Estación experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC), Facultad de Agronomía, ubicada en Paysandú. El suelo es un Brunosol Eutrico Típico perteneciente a la unidad San Manuel. Se realizaron 16 tratamientos en combinaciones del antecesor soja (soja hasta V8, soja hasta R3, soja a cosecha población 50% y soja a cosecha población 100%) y manejo nitrogenado pos-siembra del cultivo de trigo (NR a siembra, NR siembra - Z22, NR siembra - Z30 y N no limitante). Las hipótesis planteadas fueron: i) la presencia o el nivel de producción del cultivo de soja no impacta en la productividad del cultivo siguiente, y afecta la disponibilidad de nitrógeno en suelo a la siembra de trigo; ii) el manejo nitrogenado no puede revertir el efecto provocado por el cultivo antecesor. Durante el transcurso del experimento la temperatura y las precipitaciones estuvieron similar y muy por debajo de la media histórica, respectivamente. El cultivo antecesor afectó la disponibilidad de nitrógeno al momento de la siembra del trigo e impactó en el rendimiento final, siendo soja hasta R3 el que provocó mayor nitrógeno en suelo (9,3 ppm), mayor disponibilidad de agua al momento de la siembra del trigo en comparación con los antecesores cosechados (21% de incremento), y mayor rendimiento en comparación con los antecesores cosechados (7434 vs 6175-6283 kg ha⁻¹). A su vez, el manejo nitrogenado influyó en el rendimiento final del cultivo de trigo. Se alcanzó el máximo rendimiento cuando se aplicó 88 kg de N ha⁻¹ hasta Z 22 (7179 kg ha⁻¹). Por otra parte, se obtuvieron los menores rendimientos con los tratamientos NR a siembra y N no limitante, siendo similares a pesar de haber una diferencia de 210 kg N ha⁻¹ agregados. Se detectaron diferentes respuestas en rendimiento al agregado de nitrógeno según antecesor, siendo únicamente el trigo con antecesor soja hasta V8 el que incrementó el rendimiento cuando se agregaron 233 kg N ha⁻¹ (N no limitante), mientras que con los restantes antecesores se observó una penalización en el rendimiento cuando se aplicó nitrógeno luego de Z 22. Asimismo, únicamente con el tratamiento nitrógeno solo a siembra no se alcanzó el nivel de proteína en grano requerido por industria (11,5 %).

Palabras clave: trigo; nitrógeno; rendimiento; soja; antecesor; rotación; barbecho

7. SUMMARY

From the year 2000, there has been a change in the national agricultural production, mainly driven by soybean cultivation, which as a result have the decrease of perennial pastures in rotations, also farmers began to implement direct sowing. The increase in the soybean-wheat sequence caused soil losses due to erosion and impoverishment of the level of nutrients in the soil. This added to the increase in wheat yield potential in the last 20 years, caused an increase in the need to add nitrogen via fertilizers. This work aims to evaluate the impact of the soybean crop's presence and level of productivity as a predecessor crop on the following wheat's productivity and nitrogen addition response. The experiment was carried out at the Estacion experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC), Facultad de Agronomia, located in Paysandú. The soil is a Typical Eutric Brunosol belonging to the San Manuel unit. Sixteen treatments were carried out in combinations of the soybean predecessor (soybean up to V8, soybean up to R3, soybean at harvest population 50%, and soybean at harvest population 100%) and post-sowing nitrogen management of the wheat crop (RN at sowing, RN sowing - Z22, RN planting - Z30 and not limiting N). The hypotheses proposed were: i) the presence or the level of production of the soybean crop does not impact the productivity of the following crop and does not affect the availability of nitrogen in the soil when planting wheat; ii) nitrogen management cannot reverse the effect caused by the predecessor crop. During the experiment, the temperature and rainfall were similar to and well below the historical average, respectively. The predecessor crop affected the availability of nitrogen during wheat sowing. It also affected the final yield, being soybean up to R3, the one that caused the highest nitrogen in the soil (9,3 ppm), greater water availability at the time of wheat sowing wheat compared to the harvested predecessors (21% increase), and higher yield compared to the harvested predecessors (7434 vs 6175-6283 kg ha⁻¹). Moreover, nitrogen management influenced the final yield of the wheat crop. The maximum yield was reached when 88 kg de N ha⁻¹ were applied up to Z 22 (7179 kg ha⁻¹). On the other hand, the lowest yields were obtained with the RN treatments at sowing and non-limiting N, these being similar, despite having a difference in the added nitrogen of 210 kg N ha⁻¹. Different responses to the addition of nitrogen were detected depending on the predecessor, being soybean up to V8 the only one that increased yield when 233 kg N ha⁻¹ (non-limiting N) were added, while in the remaining predecessors a yield penalty was observed when nitrogen was applied after Z 22. Moreover, the only nitrogen treatment that did not reach the industry required level of grain protein (11,5 %) was recommended nitrogen at sowing.

Keywords: wheat; nitrogen; yield; soybean; forecrop; crop rotation; fallow

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Abeledo, L. G.; Miralles, D. J. 2011. ¿Qué cambios presentaron en los últimos años los sistemas de producción de trigo y cebada en Argentina? In: Valle, S.; Lizana, C.; Calderini, D. eds. Sistemas de producción de trigo y cebada: decisiones de manejo en base a conceptos ecofisiológicos para optimizar el rendimiento, la calidad y el uso de los recursos. Valdivia, Universidad de Valdivia. pp. 39 - 54.
2. _____.; Serrago, R. A.; de San Celedonio, R. P.; Lo Valvo, P. J.; Miralles, D. J. 2018. Limitantes al rendimiento en trigo y cebada. (en línea). Agronomía & Ambiente. 38(1): 71 - 84. Consultado 20 abr. 2020. Disponible en https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/97219/CONICET_Digital_Nro.8c8e329a-d160-42cc-b5c9-ecf12374c400_G.pdf?sequence=8&isAllowed=y
3. Álvarez, R.; Lemcoff, J. H.; Merzari, A. H. 1995. Balance de nitrógeno en un suelo cultivado con soja. (en línea). Ciencia del Suelo. 13(1): 38 - 40. Consultado 23 abr. 2020. Disponible en http://suelos.org.ar/publicaciones/vol_13n1/Alvarez.pdf
4. _____. 2006. Balance de nitrógeno en cultivos de trigo. (en línea). Publicación Miscelánea. 105: 23 - 35. Consultado 23 abr. 2020. Disponible en http://rafaela.inta.gov.ar/publicaciones/documentos/miscelaneas/105/trigo2006_23.pdf
5. Andriani, J. M. 2002. Estrés hídrico en soja. (en línea). Idia XXI. 2(3): 48 - 51. Consultado 14 jul. 2021. Disponible en <https://es.slideshare.net/daniotecasurco/eh-en-soja-x-andriani-inta>
6. Angus, J. F.; van Herwaarden, A. F. 2001. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat. (en línea). Agronomy Journal. 93(2): 290 - 298. Consultado 16 jun. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932290x>
7. Badaruddin, M.; Meyer, D. W. 1994. Grain legume effects on soil nitrogen, grain yield, and nitrogen nutrition of wheat. (en línea). Crop Science. 34(5): 1304 - 1309. Consultado 4 may. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400050030x>
8. Baethgen, W. 1996. El nitrógeno en los sistemas agrícolas-ganaderos. (en línea). In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchick, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 9 - 22. (Serie Técnica no. 76). Consultado 4 may. 2020. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807135249.pdf>
9. Barbazán, M.; del Pino, A.; Bordoli, J.; Califra, A.; Mazzilli, S.; Ernst, O. 2011. La problemática del K en Uruguay: situación actual y perspectivas de corto y mediano plazo. In: Simposio Nacional de Agricultura (2°. , 2011, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Hemisferio Sur. pp. 21 - 33.

10. Bauer, A.; Black, A. L.; Frank, A. B. 1992. Nitrogen fertilization in relation to spring wheat development stage. *In*: Great Plains Soil Fertility Conference (1992, Denver, Colorado). Proceedings. Kansas, Kansas State University. pp. 129 - 136.
11. Benintende, M. C.; Muller, C.; Sterren, M. A.; Benintende, S. M.; De Battista, J. J.; Saluzzio, M. F. 2008. Estimación del aporte de nitrógeno del suelo para la fertilización racional de cultivos. (en línea). *Ciencia, Docencia y Tecnología*. 19(37): 141 - 174. Consultado 6 set. 2022. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14511370007>
12. Berger, A. G.; Gaso, D.; Calistro, R.; Morales, M. X. 2014. Limitantes ambientales y potencial de rendimiento de trigo en Uruguay. *In*: Seminario Internacional 1914-2014 (2014, La Estanzuela). Un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela. Montevideo, INIA. pp. 112 - 123. (Serie Técnica no. 241).
13. _____; Morales, M. X.; Calistro, R. 2015. Trigo: rendimiento, fertilización nitrogenada y calidad. *Revista INIA*. no. 41: 27 - 30.
14. _____; Hoffman, E.; Fassana, N. 2017. Nuevas herramientas para el diagnóstico y gestión de la nutrición nitrogenada del cultivo de trigo. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (5°, 2017, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Hemisferio Sur. pp. 213 - 223.
15. Borrás, L.; Westgate, M. E.; Otegui, M. E. 2003. Control of kernel weight and kernel water relations by post-flowering source-sink ratio in maize. (en línea). *Annals of Botany*. 91(7): 857 - 867. Consultado 10 jul. 2022. Disponible en <https://academic.oup.com/aob/article/91/7/857/178116>
16. Capurro, M. C.; Beretta, A.; García, C.; Sawchick, J.; Puppo, L. 2017. Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. (en línea). *Agrociencia (Uruguay)*. 21(2): 65 - 76. Consultado 10 jul. 2022. Disponible en <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v21n2/2301-1548-agro-21-02-00065.pdf>
17. Castiglioni, M.; Navarro Padilla, R.; Eiza, M.; Romaniuk, R.; Beltran, M.; Mousegne, F. 2016. Respuesta en el corto plazo de algunas propiedades físicas a la introducción de cultivos de cobertura. (en línea). *Ciencia del Suelo*. 34(20): 263 - 278. Consultado 10 jul. 2022. Disponible en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v34n2/v34n2a09.pdf>
18. 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. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 90 p.
19. Coitiño-López, J.; Barbazán, M.; Ernst, O. 2016. Fertilización con potasio en soja: asociación de la respuesta del cultivo con características edáficas y topográficas. (en línea). *Agrociencia (Uruguay)*. 20(2): 109 - 120. Consultado 27 ago. 2022. Disponible en http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482016000200014

20. Dall' Orso, J. I.; Fernández, E. A.; Uría, P. A. 2016. Dinámica de aporte de N y S de distintas fuentes de fertilizantes disponibles actualmente en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 73 p.
21. Ding, L.; Lu, Z.; Gao, L.; Guo, S.; Shen, Q. 2018. Is nitrogen a key determinant of water transport and photosynthesis in higher plants upon drought stress? (en línea). *Frontiers in Plant Science*. 9: e1143. Consultado 20 set. 2022. Disponible en <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.01143/full>
22. Echeverri, J. 2018. Dinámica del fósforo en suelo-planta en regiones tropicales. (en línea). Tesis Mag. Ciencia, Geomorfología y Suelos. Medellín, Colombia. Universidad de Colombia. Facultad de Ciencias. 99 p. Consultado 31 ago. 2022. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69611/39456768.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
23. Echeverría, H.; Bergonzi, R.; Ferrari, J. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). (en línea). *Ciencia del Suelo*. 12(2): 56 - 62. Consultado 30 ago. 2021. Disponible en http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_12n2/echeverria.pdf
24. Ernst, O.; Siri-Prieto, G. 1995. Rastrojo en superficie: entre ventajas y problemas. (en línea). *Cangüé*. no. 4: 15 - 19. Consultado 23 ago. 2022. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/Cangue_4/15-19.pdf
25. _____.; Bentacur, O.; Nin, M.; Deluchi, I.; Hoffman, E.; Suburu, G. 1999. Rendimiento y calidad de trigo: variables de manejo que lo determinan. (en línea). *Cangüé*. no. 17: 15 - 20. Consultado dic. 2022. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/Cangue_17/15-20.pdf
26. _____. 2000. Siembra sin laboreo: manejo del período de barbecho. (en línea). *Cangüé*. no. 20: 19 - 21. Consultado 24 abr. 2020. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/Cangue_20/19-21.pdf
27. _____.; Bentancur, O.; Borges, R. 2002. Descomposición de rastrojo de cultivos en siembra sin laboreo: trigo, maíz, soja y trigo después de maíz o de soja. (en línea). *Agrociencia (Uruguay)*. 6(1): 20 - 26. Consultado 24 abr. 2020. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/agrociencia/index.php/directorio/article/view/554>
28. _____.; Siri-Prieto, G. 2008. Sistema de laboreo y rotación de cultivos en Uruguay: resumen de resultados. (en línea). *Cangüé*. no. 30: 2 - 8. Consultado dic. 2022. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/Cangue_30/2-8.pdf
29. _____.; _____. 2009. Manejo del suelo y rotación con pasturas: efecto sobre rendimiento de los cultivos, su variabilidad y el uso de insumos. In: Simposio Nacional de Agricultura (1°, 2009, Paysandú). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 125 - 140.

30. _____.; Kemanian, A. R.; Mazzilli, S. R.; Cadenazzi, M.; Dogliotti, S. 2016. Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. (en línea). *Field Crops Research*. 186: 107 - 116. Consultado 15 abr. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.11.005>
31. _____.; _____.; _____.; Siri-Prieto, G.; Dogliotti, S. 2020. The dos and don'ts of no-till continuous cropping: evidence from wheat yield and nitrogen use efficiency. (en línea). *Field Crops Research*. 257: 1 - 10. Consultado 10 dic. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107934>
32. Falotico, J. L.; Studdert, G. A.; Echeverría, H. E. 1999. Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional. (en línea). *Ciencia del Suelo*. 17(2): 9 - 20. Consultado 10 abr. 2022. Disponible en http://suelos.org.ar/publicaciones/vol_17n2/falotico_9-20.pdf
33. Fassana, C. N.; Hoffman, E. M.; Berger, A. G.; Ernst, O. R. 2017. Nutrición del cultivo de trigo: criterios para el manejo de la fertilización nitrogenada a Z 33. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (5°, 2017, Paysandú). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 91 - 99.
34. _____. 2019. Diagnóstico y predicción de respuesta nitrogenada en base al estado nutricional de trigo en Z.33. Tesis Mag. Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 70 p.
35. Ferrari, M. 2010. ¿Nuestros actuales sistemas de producción agrícola son ambientalmente sustentables? (en línea). *Informaciones Agronómicas*. no. 48: 6 - 10. Consultado 25 nov. 2020. Disponible en <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2010/10/6.pdf>
36. Fischer, R. A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. (en línea). *The Journal of Agricultural Science*. 105(2): 447 - 461. Consultado 20 abr. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1017/S0021859600056495>
37. _____.; Howe, G. N.; Ibrahim, Z. 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer: I. Grain yield and protein content. (en línea). *Field Crops Research*. 33(1-2): 37 - 56. Consultado 10 oct. 2022. Disponible en [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90093-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90093-3)
38. Fontanetto, H.; Vivas, H.; Keller, O.; Albrecht, R.; Gastaldi, L.; Castignani, H. 2005. Consideraciones sobre la fertilización nitrogenada de trigo en la región central de Santa Fe. (en línea). *Publicación Miscelánea*. 103: 14 - 26. Consultado 11 dic. 2021. Disponible en <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/consideraciones-sobre-la-fertilizacion-nitrogenada-de-trigo-en-santa-fe.pdf>
39. Forján, H.; Manso, L. 2016a. Los nutrientes. *In*: Rotaciones y secuencias de cultivos en la Región Mixta Cerealera del centro-sur bonaerense. Buenos Aires, INTA. pp. 29 - 32.

40. _____; _____. 2016b. La secuencia de cultivos. *In*: Rotaciones y secuencias de cultivos en la Región Mixta Cerealera del centro-sur bonaerense. Buenos Aires, INTA. pp. 19 - 26.
41. _____; _____. 2018. Los rastrojos de cultivos y sus efectos sobre el suelo. (en línea). *Agrobarrow*. 62: 16 - 19. Consultado 20 abr. 2020. Disponible en https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/3057/Agro_barrow_62_p.16-19.pdf?sequence=1
42. Fratti, M. A.; Pereyra, C. 2007. Efecto del antecesor, maíz, soja, girasol o barbecho estival sobre trigo en sistemas de agricultura continua sin laboreo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 71 p.
43. Frolla, F.; Zilio, J.; Krüger, H. 2017. Diagnóstico y fertilización nitrogenada de trigo en el sudoeste bonaerense: campaña 2016/17. (en línea). s.l., INTA. s.p. Consultado 10 jul. 2021. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/informe_tecnico_fert_tgo_campana_2016_-_plantilla_oficial_0.pdf
44. Gambaudo, S. P.; Vivas, H. S.; Moresco, R. F. 1987. Longitud del barbecho y la producción de trigo. (en línea). *Ciencia del Suelo*. 5(1): 43 - 49. Consultado 30 set. 2020. Disponible en http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_5n1/Gambaudi.pdf
45. García, F. O. 2011. Balances de carbono y de nutrientes: buscando el equilibrio en la agricultura del Cono Sur. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (2°. 2011, Paysandú). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 135 - 147.
46. García Lamothe, A. 1998. Fertilización con N y potencial de rendimiento en trigo. (en línea). *In*: Kohli, M. M.; Martino, D. L. eds. Explorando altos rendimientos de trigo (1997, La Estanzuela). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 207 - 246. Consultado 20 abr. 2020. Disponible en <https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/1240/68277.pdf?sequence=1>
47. _____. 2004. Manejo de la fertilización con nitrógeno en trigo y su interacción con otras prácticas agronómicas. (en línea). Montevideo, INIA. 57 p. (Serie Técnica no. 144). Consultado 15 abr. 2020. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807141622.pdf>
48. Giménez, L. 2017. Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo. (en línea). *Agrociencia* (Uruguay). 21(2): 77 - 90. Consultado 5 jul. 2021. Disponible en http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?pid=S2301-15482017000200077&script=sci_arttext
49. Hanway, J. J.; Weber, C. R. 1971. Accumulation of N, P, and K by Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) Plants. (en línea). *Agronomy Journal*. 63(3): 406 -

408. Consultado 5 may. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.2134/agronj1971.00021962006300030017x>
50. Hewstone, M. C. 1999. Producción de materia seca y absorción de macro y micronutrientes en trigo cultivado en el sur de Chile. (en línea). *Agricultura Técnica*. 59(4): 271 - 282. Consultado 5 set. 2020. Disponible en https://oes.chileanjar.cl/files/V59I4A03_es.pdf
51. Hoffman, E.; Perdomo, C.; Ernst, O. 1997. Fertilización nitrogenada en cultivos de invierno. (en línea). *Cangüé*. no. 10: 33 - 36. Consultado 24 abr. 2020. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/Cangue_10/33-36.pdf
52. _____; Perdomo, C.; Ernst, O.; Bordoli, 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)*. Trabajos presentados. s.n.t. s.p.
53. _____; Viega, L.; Cadenazzi, M.; Benitez, A.; Gestido, V.; Mesa, P.; Fernández, R.; Baeten, A.; Glison, N. 2009. Bases morfo-fisiológicas que justifican el manejo de cultivares de trigo y cebada en Uruguay. *In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1º., 2009, Paysandú)*. Trabajos presentados. Paysandú, Facultad de Agronomía. pp. 49 - 74.
54. _____; Perdomo, C.; Ernst, O.; Bordoli, M.; Pastorini, M.; Pons, C.; Borghi, E. 2010. Propuesta para manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. (en línea). *Informaciones Agronómicas*. no. 46: 13 - 18. Consultado 15 abr. 2020. Disponible en <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2010/06/13.pdf>
55. _____. 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 (2º., 2011, Paysandú)*. Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 45 - 60.
56. _____.; 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 (3º., 2013, Paysandú)*. Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 33 - 44.
57. _____.; _____.; Mazzilli, S.; Berger, A.; Ernst, O. 2015. 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 (4º., 2015, Paysandú)*. Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 131 - 140.
58. _____.; Perdomo, C.; Fassana, N.; Ernst, O.; Berger, A. 2017. Realidades y mitos en el manejo del nitrógeno en cereales de invierno en Uruguay. (en línea). *Cangüé*. no. 38: 23 - 29. Consultado 03 oct. 2020. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/cangue_38/Cangue38_NenC.pdf

59. _____.; Fassana, N.; Akerman, A.; Van der Dorpell, M. 2020. Caracterización de cultivares: evaluación 2019. (en línea). Paysandú, Facultad de Agronomía. 32 p. Consultado 3 set. 2020. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/images/Cultivos_invierno/Trigo/Informe-Caractizacin-Trigo-2019---FAgro-EEMAC-2020.pdf
60. _____.; _____.; _____.; _____. 2021. Caracterización de cultivares: evaluación 2020. (en línea). Paysandú, Facultad de Agronomía. 32 p. Consultado 10 jun. 2021. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/images/Cultivos_invierno/Trigo/Caractizacin-Trigo-2020---Informe--2021.pdf
61. Hungria, M.; Franchini, J. C.; Campo, R. J.; Crispino, C. C.; Moraes, J. Z.; Sibaldelli, R. N.; Mendes, I. C.; Arihara, J. 2006. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. (en línea). Canadian Journal of Plant Science. 86(4): 927 - 939. Consultado 20 abr. 2022. Disponible en <https://cdnsciencepub.com/doi/pdf/10.4141/P05-098>
62. Johansson, E.; Prieto-Linde, M. L.; Gissén, C. 2008. Influences of weather, cultivar and fertiliser rate on grain protein polymer accumulation in field-grown winter wheat, and relations to grain water content and falling number. (en línea). Journal of the Science of Food and Agriculture. 88(11): 2011 - 2018. Consultado 10 jul. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1002/jsfa.3312>
63. _____.; Malik, A. H.; Hussain, A.; Rasheed, F.; Newson, W. R.; Plivelic, T.; Hedenqvist, M. S.; Gällstedt, M.; Kuktaite, R. 2013. Wheat gluten polymer structures: the impact of genotype, environment, and processing on their functionality in various applications. (en línea). Cereal Chemistry. 90(4): 367 - 376. Consultado 10 jul. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1094/CCHEM-08-12-0105-FI>
64. Kibe, A. M.; Singh, S.; Kalra, N. 2006. Water–nitrogen relationships for wheat growth and productivity in late sown conditions. (en línea). Agricultural Water Management. 84(3): 221 - 228. Consultado 20 jun. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.02.010>
65. Kojima, S.; Bohner, A.; Von Wirén, N. 2006. Molecular mechanisms of urea transport in plants. (en línea). The Journal of Membrane Biology. 212(2): 83 - 91. Consultado 20 abr. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s00232-006-0868-6>
66. Kunrath, T. R.; Lemaire, G.; Texeira, E.; Brown, H. E.; Ciampitti, I. A.; Sadras, V. O. 2020. Allometric relationships between nitrogen uptake and transpiration to untangle interactions between nitrogen supply and drought in maize and sorghum. (en línea). European Journal of Agronomy. 120: 1 - 12. Consultado 20 jun. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126145>
67. Lemaire, G.; Meynard, J. M. 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In: Lemaire, G. ed. Diagnosis of the nitrogen status in crops. Heidelberg, Springer. pp. 45 - 55.

68. Loiseau, P.; Chaussod, R.; Delpy, R. 1994. Soil microbial biomass and in situ nitrogen mineralization after 20 years of different nitrogen fertilization and forage cropping systems. (en línea). *European Journal of Agronomy*. 3(4): 327 - 332. Consultado 20 may. 2020. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(14\)80162-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(14)80162-7)
69. López, F. M.; Duval, M.; Martínez, J. M.; Galantini, J. A. 2014. Efecto de la cobertura durante el barbecho de verano en el sudoeste bonaerense. *Revista Técnica de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa*. no. 122: 5 - 8.
70. López, S.; Guevara, E.; Maturano, M.; Melaj, M.; Bonetto, J. P.; Meira, S.; Martín, O.; Bárbaro, N. 2002. Absorción de nitrógeno en trigo en relación con la disponibilidad hídrica. (en línea). *Terra Latinoamericana*. 20(1): 7 - 15. Consultado 15 may. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/573/57320103.pdf>
71. McDonald, G. K. 1992. Effects of nitrogenous fertilizer on the growth, grain yield and grain protein concentration of wheat. (en línea). *Australian Journal of Agricultural Research*. 43(5): 949 - 967. Consultado 20 jun. 2022. Disponible en <https://www.publish.csiro.au/cp/ar9920949>
72. Malhi, S. S.; Johnston, A. M.; Schoenau, J. J.; Wang, Z. L.; Vera, C. L. 2006. Seasonal biomass accumulation and nutrient uptake of wheat, barley and oat on a Black Chernozem soil in Saskatchewan. (en línea). *Canadian Journal of Plant Science*. 86(4): 1005 - 1014. Consultado 11 abr. 2021. Disponible en <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.4141/P05-116>
73. 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.
74. _____. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. (en línea). Montevideo. Esc. 1:1.000.000. Color. Consultado may. 2022. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/carta-reconocimiento-suelos-del-uruguay-escala-11000000>
75. Martínez, J.; Galantini, J. A.; Landriscini, M. R. 2015. Diagnóstico de fertilidad nitrogenada en el sudoeste bonaerense mediante el uso de un clorofilómetro en trigo. (en línea). *Ciencia del Suelo*. 33(1): 31 - 43. Consultado 11 dic. 2021. Disponible en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v33n1/v33n1a04.pdf>
76. Massaro, R. 2010. Trigo: lo que hay que “descubrir” antes de sembrar. (en línea). *Para Mejorar la Producción*. no. 43: 69-72. Consultado el 10 dic. 2021. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-lo_que_hay_que_descubrir.pdf
77. 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. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 68 p.
78. Medina, M.; Pereira, I. 2018. Potencial de rendimiento de un amplio rango de grupos de madurez de soja en diferentes condiciones ambientales del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 64 p.
79. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigación Estadísticas Agropecuarias, UY). 2019. Anuario estadístico agropecuario. Montevideo. 256 p.
80. Miller, S. D.; Dexter, A. G. 1982. No till crop production in the Red River Valley. (en línea). Farm Research. 40(2): 3 - 5. Consultado 26 oct. 2020. Disponible en https://library.ndsu.edu/ir/bitstream/handle/10365/4706/farm_40_02_01.pdf?sequence=1&isAllowed=y
81. Miralles, D. J.; Slafer, G. A. 1999. Wheat development. *In*: Satorre, E. H.; Slafer, G. A. eds. Wheat: ecology and physiology of yield determination. New York, The Haworth Press. pp. 13 - 36.
82. _____. 2004. Consideraciones sobre ecofisiología y manejo de trigo. (en línea). Publicación Miscelánea. no. 101: 1 - 7. Consultado 5 jul. 2021. Disponible en http://rafaela.inta.gov.ar/info/miscelaneas/101/trigo2004_n1.pdf
83. _____.; González, F. G.; Abeledo, L. G.; Serrago, R. A.; Alzueta, I.; García, G. A.; de San Caledonio, R. P.; Lo Valvo, P. 2014. Manual de trigo y cebada para el cono Sur: procesos fisiológicos y bases de manejo. Buenos Aires, CYTED. 29 p.
84. Nielsen, D. C.; Halvorson, A. D. 1991. Nitrogen fertility influence on water stress and yield of winter wheat. (en línea). Agronomy Journal. 83(6): 1065 - 1070. Consultado 26 oct. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300060025x>
85. Oyhantçabal, G.; Narbondo, I. 2012. Valorización del balance de N y P de la soja en Uruguay. Revibec: Revista Iberoamericana de Economía Ecológica. 19: 54 - 65.
86. Perdomo, C. 1996. Consideraciones sobre criterios para el ajuste de la fertilización N en cultivos de invierno. (en línea). *In*: Morón, A.; Martino, D.; Sawchick, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 23 - 26 (Serie Técnica no. 76). Consultado 4 may. 2020. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807135249.pdf>
87. _____.; Barbazán, M. 2015. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 72 p.
88. Pérez González, O. 2015. Efectos del déficit hídrico en cinco cultivares de trigo. (en línea). Tesis Mag. Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 100 p. Consultado 18 jul. 2021.

- Disponible en
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/28191/1/P%C3%A9rezGonz%C3%A1lezOsvaldo.pdf>
89. Pergolini, C.; Castillo, C.; Espósito, G. 2004. Efecto de la fertilización sobre el consumo y la eficiencia de uso del agua del cultivo de trigo. (en línea). s.n.t. s.p. Consultado 22 may. 2022. Disponible en
<https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/efecto-de-la-fertilizacion-sobre-el-consumo-y-la-eua-en-trigo.pdf>
 90. Quiroga, A. R.; Funaro, D. O.; Fernández, R.; Noellmeyer, E. J. 2005. Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la región pampeana. (en línea). Ciencia del Suelo. 23(1): 79 - 86. Consultado 10 may. 2020. Disponible en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n1/v23n1a09.pdf>
 91. Rousphael, Y.; Cardarelli, M.; Schwarz, D.; Franken, P.; Colla, G. 2012. Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. In: Aroca, R. ed. Plant responses to drought stress. Heidelberg, Springer. pp. 171 - 195.
 92. Rroço, E.; Mengel, K. 2000. Nitrogen losses from entire plants of spring wheat (*Triticum aestivum*) from tillering to maturation. (en línea). European Journal of Agronomy. 13(2-3): 101 - 110. Consultado 10 may. 2021. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S116103010000068X>
 93. Saint Pierre, C.; Peterson, C. J.; Ross, A. S.; Ohm, J. B.; Verhoeven, M. C.; Larson, M.; Hoefler, B. 2008. Winter wheat genotypes under different levels of nitrogen and water stress: changes in grain protein composition. (en línea). Journal of Cereal Science. 47(3): 407 - 416. Consultado 20 jun. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.05.007>
 94. Salvagiotti, F.; Cassman, K. G.; Specht, J. E.; Walters, D. T.; Weiss, A.; Dobermann, A. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in Soybeans: a review. (en línea). Field Crops Research. 108(1): 1-12. Consultado 10 oct. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>
 95. _____. 2009. Manejo de soja de alta producción. Para Mejorar la Producción. no. 42: 57 - 62. Consultado 10 set. 2020. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manejo_soja_alta_produccion.pdf
 96. _____.; Capurro, J.; Enrico, J. M. 2009. El manejo de la nutrición nitrogenada en soja. (en línea). Para Mejorar la Producción. no. 42: 45 - 51. Consultado 10 set. 2020. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-nutricion_nitrogenada.pdf
 97. _____.; Enrico, J.; Bodrero, M.; Bacigaluppo, S. 2010. Producción de soja y uso eficiente de los recursos. Para Mejorar la Producción. 45: 151 - 154. Consultado 10 set. 2020. Disponible en <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-produccion-de-soja-y-uso-eficiente-de-los-recursos.pdf>

98. _____.; Collino, D. J.; Peticari, A.; Piccinetti, C.; Ovando, G.; Urquiaga, S.; Racca, R. W. 2016a. El aporte de la fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja en Argentina. (en línea). Para Mejorar la Producción. no. 54: 145 - 150. Consultado 12 set. 2022. Disponible en <https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-16.fijacion-biologica-nitrogeno-en-soja-argentina.pdf>
99. _____.; Rotundo, J. L.; Di Mauro, G.; Condori, A.; Gallo, S.; Boxler, M. 2016b. Rendimientos potenciales y brechas de rendimiento de soja en la campaña 2014-15. (en línea). Para Mejorar la Producción. no. 54: 129 - 135. Consultado 10 set. 2020. Disponible en https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/53738/CONICET_Digital_Nro.ccf975e8-e815-4a60-925c-1761e7640c7c_A.pdf?sequence=2
100. Scianca, C.; Barraco, M.; Álvarez, C. 2010. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones. (en línea). In: INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, AR). Memoria técnica 2009-2010. Buenos Aires. pp. 26 - 30. Consultado 10 jul. 2021. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-mt2010_scianca_calculo_probabilidad_ocurrencia.pdf
101. Sinclair, T. R.; Rufty, T. W. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. (en línea). Global Food Security. 1(2): 94 - 98. Consultado 01 jun. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.07.001>
102. Studdert, G. A.; Carabaca, L. S.; Echeverría, H. E. 2000. Estimación del nitrógeno mineralizado para un cultivo de trigo en distintas secuencias de cultivos. (en línea). Ciencia del Suelo. 18(1): 17 - 27. Consultado 25 nov. 2020. Disponible en http://suelos.org.ar/publicaciones/vol_18n1/studdert%2017-27.pdf
103. _____.; Echeverría, H. E. 2006. Relación entre el cultivo antecesor y la disponibilidad de nitrógeno para el trigo en la rotación. (en línea). Ciencia del Suelo. 24(1): 1 - 8. Consultado 17 abr. 2020. Disponible en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v24n1/v24n1a10.pdf>
104. Tamagno, S.; Balboa, G. R.; Assefa, Y.; Kovács, P.; Casteel, S. N.; Salvagiotti, F.; García, F. O.; Stewart, W. M.; Ciampitti, I. A. 2017. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: a synthesis-analysis. (en línea). Field Crops Research. 200: 18 - 27. Consultado 10 set. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.019>
105. Tilling, A. K.; O'Leary, G. J.; Ferwerda, J. G.; Jones, S. D.; Fitzgerald, G. J.; Rodríguez, D.; Belford, R. 2007. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. (en línea). Field Crops Research. 104(1-3): 77 - 85. Consultado 20 jun. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.023>
106. van Herwaarden, A. F.; Farquhar, G. D.; Angus, J. F.; Richards, R. A.; Howe, G. N. 1998. 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertilizer: I. biomass, grain yield, and water use. (en línea).

- Australian Journal of Agricultural Research. 49(7): 1067 - 1082. Consultado 20 dic. 2021. Disponible en <https://www.publish.csiro.au/CP/A97039>
107. Vázquez, D. 2009. Aptitud industrial de trigo. (en línea). Montevideo, INIA. 54 p. (Serie Técnica no. 177). Consultado 22 may. 2022. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/18429130709133540.pdf>
108. _____.; Berger, A.; Prieto-Linde, M. L.; Johansson, E. 2019. Can nitrogen fertilization be used to modulate yield, protein content and bread-making quality in Uruguayan wheat? (en línea). Journal of Cereal Science. 85: 153 - 161. Consultado 10 jul. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.12.001>
109. Vega, M. B. 2022. Historia de la investigación sobre respuesta al fósforo en Uruguay: construcción de niveles críticos generales y una propuesta de equivalente fertilizante. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 45 p.
110. Verhulst, N.; François, I.; Grahmann, K.; Cox, R.; Govaerts, B. 2015. Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación. (en línea). México, CIMMYT. 12 p. Consultado 25 jul. 2021. Disponible en <https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/4411/56988.pdf>
111. Wang, M.; Ding, L.; Gao, L.; Li, Y.; Shen, Q.; Guo, S. 2016. The interactions of aquaporins and mineral nutrients in higher plants. (en línea). International Journal of Molecular Sciences. 17(8): 1 - 16. Consultado 20 set. 2022. Disponible en <https://www.mdpi.com/1422-0067/17/8/1229>
112. Zapata, F.; Danso, S. K. A.; Hardarson, G.; Fried, M. 1987. Time course of nitrogen fixation in field-grown soybean using nitrogen-15 methodology. (en línea). Agronomy Journal. 79(1): 172 - 176. Consultado 7 may. 2021. Disponible en <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1987.00021962007900010035x>
113. Zörb, C.; Ludewig, U.; Hawkesford, M. J. 2018. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. (en línea). Trends in Plant Science. 23(11): 1029 - 1037. Consultado 15 may. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.08.012>

9. ANEXOS

Anexo 1. Biomasa acumulada en cada estadio y tasa de crecimiento por periodo en el cultivo de trigo según diferentes tratamientos realizados en el cultivo antecesor.

Tratamiento	Biomasa acumulada (kg MS ha ⁻¹)				
	Z22	Z30	Z33	Z65	Cosecha
Hasta V8	399	1398 b	4750	9849	13721
Hasta R3	532	2006 ab	5946	9816	15060
Cosecha P50	567	1929 ab	6299	11625	15090
Cosecha P100	512	2144 a	6382	11074	14127
Tratamiento	Tasa de crecimiento (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)				
	S-Z22	Z22-Z30	Z30-Z33	Z33-Z65	Z65-Cosecha
Hasta V8	9	43 b	120	146	102
Hasta R3	13	64 a	141	111	138
Cosecha P50	14	59 ab	156	152	91
Cosecha P100	12	71 a	151	134	80

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

Anexo 2. Nitrógeno absorbido en cada estadio y tasa de absorción por periodo en el cultivo de trigo según diferentes tratamientos realizados en el cultivo antecesor.

Tratamiento	Nitrógeno absorbido (kg N ha ⁻¹)				
	Z22	Z30	Z33	Z65	Cosecha
Hasta V8	19	67 b	161	152	204
Hasta R3	26	105 a	204	162	252
Cosecha P50	28	101 a	199	176	227
Cosecha P100	25	107 a	225	168	216
Tratamiento	Tasa de absorción (kg N ha ⁻¹ día ⁻¹)				
	S-Z22	Z22-Z30	Z30-Z33	Z33-Z65	Z65-Cosecha
Hasta V8	0,4 b	2,1 c	3,4	-0,3	1,4
Hasta R3	0,6 a	3,4 a	3,5	-1,2	2,4
Cosecha P50	0,7 a	3,2 ab	3,5	-0,7	1,4
Cosecha P100	0,6 a	3,6 a	4,2	-1,6	1,3

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

Anexo 3. Biomasa acumulada en cada estadio y tasa de crecimiento por periodo en el cultivo de trigo según tratamientos nitrogenados.

Tratamiento	Biomasa acumulada (kg MS ha ⁻¹)				
	Z22	Z30	Z33	Z65	Cosecha
NR a S	502	1570 b	4587b	8747 b	13030
NR S - Z22	502	2086a	6519 a	10978 a	14467
NR S – Z 30	502	1843 ab	6406 a	11261 a	15423
N no limitante	502	1978 ab	5866a	11378 a	15079
Tratamiento	Tasa de crecimiento (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)				
	S-Z22	Z22-Z30	Z30-Z33	Z33-Z65	Z65-Cosecha
NR a S	12	46 b	108 b	119	113
NR S - Z22	12	69 a	154 a	139	110
NR S – Z 30	12	58 ab	144 ab	157	97
N no limitante	12	64a	162 a	127	92

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

Anexo 4. Nitrógeno absorbido en cada estadio y tasa de absorción por periodo en el cultivo de trigo según tratamientos nitrogenados.

Tratamiento	Nitrógeno absorbido (kg N ha ⁻¹)				
	Z22	Z30	Z33	Z65	Cosecha
NR a S	25	69 b	155 b	105 c	150 c
NR S - Z22	25	110 a	218a	154 b	224 b
NR S – Z 30	25	92 ab	214 a	184 ab	232 b
N no limitante	25	110 a	201ab	215 a	293 a
Tratamiento	Tasa de absorción (kg N ha ⁻¹ día ⁻¹)				
	S-Z22	Z22-Z30	Z30-Z33	Z33-Z65	Z65-Cosecha
NR a S	0,6	1,9 b	3,1	-1,4	1,2
NR S – Z 22	0,6	3,7 a	3,9	-1,8	1,8
NR S – Z 30	0,6	2,9 ab	4,4	-0,9	1,3
N no limitante	0,6	3,7 a	3,3	0,4	2,0

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

Anexo 5. Biomasa acumulada en cada estadio en el cultivo de trigo según tratamientos interacción de tratamientos en el cultivo antecesor y nitrogenados.

Tratamiento	Tratamiento	Biomasa acumulada (kg MS ha ⁻¹)				
		Z22	Z30	Z33	Z65	Cosecha
Hasta V8	NR a S	399	1083	2724 c	7448	8772
Hasta V8	NR S – Z 22	399	1369	6839 ab	10453	16939
Hasta V8	NR S – Z 30	399	1715	5484 abc	10000	13289
Hasta V8	N no limitante	399	1423	3956 bc	11497	15886
Hasta R3	NR a S	532	1780	5772 abc	9932	14430
Hasta R3	NR S – Z 22	532	2432	6027 ab	8740	14079
Hasta R3	NR S – Z 30	532	2185	6568 ab	10675	15360
Hasta R3	N no limitante	532	1626	5418 abc	9919	16373
Cosecha P50	NR a S	567	1541	4636 abc	9370	14228
Cosecha P50	NR S – Z 22	567	1806	6082 ab	13180	13246
Cosecha P50	NR S – Z 30	567	2360	6744 ab	12563	17776
Cosecha P50	N no limitante	567	2008	7734 a	11387	15110
Cosecha P100	NR a S	512	1873	5216 abc	8240	14689
Cosecha P100	NR S – Z 22	512	2305	7128 ab	11538	13605
Cosecha P100	NR S – Z 30	512	2083	6827 ab	11808	15268
Cosecha P100	N no limitante	512	2314	6356 ab	12709	12947

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

Anexo 6. Tasa de crecimiento por periodo en el cultivo de trigo según tratamientos interacción de tratamientos en el cultivo antecesor y nitrogenados.

Tratamiento	Tratamiento	Tasa de crecimiento (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)				
		S-Z22	Z22-Z30	Z30-Z33	Z33-Z65	Z65-Cosecha
Hasta V8	NR a S	9	30	59	135	35
Hasta V8	NR a S – Z 22	9	57	135	129	87
Hasta V8	NR S – Z 30	9	45	90	215	116
Hasta V8	N no limitante	9	42	195	103	171
Hasta R3	NR a S	13	54	143	119	118
Hasta R3	NR a S – Z 22	13	72	157	117	123
Hasta R3	NR S – Z 30	13	48	135	129	170
Hasta R3	N no limitante	13	83	128	78	141
Cosecha P50	NR a S	14	42	111	135	128
Cosecha P50	NR a S – Z 22	14	78	157	166	137
Cosecha P50	NR S – Z 30	14	63	205	104	98
Cosecha P50	N no limitante	14	54	153	203	2
Cosecha P100	NR a S	12	59	119	86	170
Cosecha P100	NR a S – Z 22	12	68	169	142	91
Cosecha P100	NR S – Z 30	12	78	144	182	6
Cosecha P100	N no limitante	12	78	172	126	54

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

Anexo 7. Nitrógeno absorbido en cada estadio y tasa de absorción por periodo en el cultivo de trigo según tratamientos interacción de tratamientos en el cultivo antecesor y nitrogenados.

Tratamiento	Tratamiento	Nitrógeno absorbido (kg N ha ⁻¹)				
		Z22	Z30	Z33	Z65	Cosecha
Hasta V8	NR a S	19	42	95	75	90 g
Hasta V8	NR S – Z 22	19	88	187	132	175 def
Hasta V8	NR S – Z 30	19	69	140	185	206 cdef
Hasta V8	N no limitante	19	68	222	214	344 a
Hasta R3	NR a S	26	85	174	124	174 defg
Hasta R3	NR S – Z 22	26	116	226	169	288 abc
Hasta R3	NR S – Z 30	26	83	208	158	262 abc
Hasta R3	N no limitante	26	136	206	198	284 abc
Cosecha P50	NR a S	28	72	155	135	196 fg
Cosecha P50	NR S – Z 22	28	131	217	169	225 bcde
Cosecha P50	NR S – Z 30	28	100	273	186	240 bcd
Cosecha P50	N no limitante	28	100	152	212	248 bcd
Cosecha P100	NR a S	25	75	197	86	141 efg
Cosecha P100	NR S – Z 22	25	104	243	147	208 cdef
Cosecha P100	NR S – Z 30	25	115	235	205	220 bcdef
Cosecha P100	N no limitante	25	135	223	235	295 ab

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

Anexo 8. Tasa de absorción por periodo en el cultivo de trigo según tratamientos interacción de tratamientos en el cultivo antecesor y nitrogenados.

Tratamiento	Tratamiento	Tasa de absorción (kg N ha ⁻¹ día ⁻¹)				
		S-Z22	Z22-Z30	Z30-Z33	Z33-Z65	Z65-Cosecha
Hasta V8	NR a S	0,4	1,0	1,9	-0,5	0,4
Hasta V8	NR S – Z 22	0,4	3,0	3,5	-1,6	1,1
Hasta V8	NR S – Z 30	0,4	2,2	2,5	1,3	0,5
Hasta V8	N no limitante	0,4	2,1	5,5	-0,2	3,4
Hasta R3	NR a S	0,6	2,6	3,2	-1,4	1,3
Hasta R3	NR S – Z 22	0,6	3,9	3,9	-1,6	3,1
Hasta R3	NR S – Z 30	0,6	2,5	4,5	-1,4	2,7
Hasta R3	N no limitante	0,6	4,8	2,5	-0,2	2,3
Cosecha P50	NR a S	0,7	1,9	3,0	-0,6	1,6
Cosecha P50	NR S – Z 22	0,7	4,5	3,0	-1,4	1,5
Cosecha P50	NR S – Z 30	0,7	3,1	6,2	-2,5	1,4
Cosecha P50	N no limitante	0,7	3,2	1,9	1,7	0,9
Cosecha P100	NR a S	0,6	2,2	4,3	-3,2	1,5
Cosecha P100	NR S – Z 22	0,6	3,4	5,0	-2,7	1,6
Cosecha P100	NR S – Z 30	0,6	3,9	4,3	-0,9	0,4
Cosecha P100	N no limitante	0,6	4,7	3,2	0,3	1,6

Anexo 9. Proteína en grano según tratamiento de soja.

Tratamiento en soja	Proteína en grano (%)
Hasta V8	13,1 b
Hasta R3	14,5 ab
Cosecha P50	14,8 a
Cosecha P100	14,6 ab
Promedio	14,2
P-valor	0,0401
CV	7,43
MDS	1,67928

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

Anexo 10. Proteína en grano según tratamiento nitrogenado.

Tratamiento	Proteína en grano (%)
NR a S	10,5 c
NR a S – Z 22	14,2 b
NR S – Z 30	14,5 b
N no limitante	17,9 a
Promedio	14,2
P-valor	<0,0001
CV	7,43
MDS	1,19174

Medias con letras distintas son significativamente distintas según Tukey ($\alpha=0,05$). ; NR a S: nitrógeno recomendado a siembra; NR S-Z22: nitrógeno recomendado a siembra y Z22; NR S-Z30: nitrógeno recomendado a siembra, Z 22 y Z 30; N no limitante: nitrógeno no limitante.