

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFICIENCIA DE USO Y RESPUESTA EN RENDIMIENTO A DIFERENTES  
DOSIS DE N DEL CULTIVAR DE ARROZ PARAO SOBRE DISTINTOS  
ANTECESORES INVERNALES

por

Gustavo CASTILLO RIAÑO  
Lucía Belén SILVA RODRÍGUEZ

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

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2020

Tesis aprobada por:

Director: .....

MSc. Ing. Agr. Jesús Castillo Velázquez

.....

MSc. Ing. Agr. Ignacio Macedo Yapor

.....

PhD. Ing. Agr. Guillermo Siri- Prieto

.....

MSc. Ing. Agr. Cristina Mori

Fecha: 09 de junio de 2020

Autores: .....

Gustavo Castillo Riaño

.....

Lucía Belén Silva Rodríguez

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer a todas las personas que fueron parte de este proceso a lo largo de estos años. A nuestros padres por la oportunidad, apoyo incondicional y esfuerzo, familiares y amigos en general.

Un especial agradecimiento a todo el personal de INIA Treinta y Tres, nuestros tutores por su tiempo y dedicación, personal de campo y laboratorio por su inalcanzable colaboración en todo lo que fue la etapa de campo y práctica.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1 NUTRICIÓN DEL CULTIVO .....	3
2.1.1 <u>Nitrógeno</u> .....	3
2.2 RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA .....	4
2.2.1 <u>Fuentes y pérdidas</u> .....	4
2.2.2 <u>Respuesta al nitrógeno</u> .....	5
2.2.3 <u>Manejo de la fertilización</u> .....	6
2.3 LOS ANTECESORES Y EL ARROZ .....	7
2.4 EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO Y SUS COMPONENTES .....	10
2.5 HERRAMIENTAS DE ASISTENCIA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA.....	12
2.5.1 <u>SPAD</u> .....	12
2.5.2 <u>Greenseeker</u> .....	13
2.5.3 <u>Canopeo App</u> .....	14
2.6 HIPÓTESIS.....	15
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	16
3.1 LOCALIZACIÓN Y SUELOS .....	16
3.2 DESCRIPCIÓN Y MANEJO DEL EXPERIMENTO .....	16
3.3 DETERMINACIONES REALIZADAS.....	17
3.3.1 <u>Análisis químico del suelo</u> .....	17
3.3.2 <u>Determinaciones realizadas durante el cultivo</u> .....	17
3.3.3 <u>Determinaciones realizadas a la cosecha</u> .....	18
3.3.4 <u>Cálculos realizados a partir de las determinaciones</u> .....	18
3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	20

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	21
3.6 HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS .....	22
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	23
4.1 FACTORES CLIMÁTICOS.....	23
4.1.1 <u>Radiación y heliofanía</u> .....	23
4.1.2 <u>Temperatura media y precipitaciones</u> .....	24
4.2 RESULTADOS ANÁLISIS DE SUELO.....	25
4.3 RESPUESTAS AGRONÓMICAS DEL CULTIVO DURANTE EL CICLO..	25
4.3.1 <u>Población lograda</u> .....	25
4.3.2 <u>Acumulación de materia seca</u> .....	26
4.3.3 <u>Altura de planta</u> .....	28
4.3.4 Absorción de N por el cultivo .....	30
4.4 EVALUACIÓN DE LAS RESPUESTAS AGRONÓMICAS DEL CULTIVO DURANTE EL CICLO POR MEDIO DE HERRAMIENTAS DE ASISTENCIA REMOTA.....	32
4.4.1 <u>Greenseeker</u> .....	32
4.4.2 <u>Canopeo App</u> .....	34
4.4.3 <u>SPAD</u> .....	37
4.5 RESPUESTAS AGRONÓMICAS A FIN DE CICLO.....	37
4.5.1 <u>Rendimiento de grano</u> .....	37
4.5.2 <u>Índice de cosecha</u> .....	42
4.5.3 <u>Componentes de rendimiento</u> .....	43
4.6 EFICIENCIAS DE USO DEL NITRÓGENO Y SUS COMPONENTES .....	45
4.6.1 <u>Eficiencia fisiológica e interna</u> .....	49
4.6.2 <u>Eficiencia de recuperación aparente</u> .....	46
4.6.3 <u>Eficiencia agronómica</u> .....	45
4.6.4 <u>Productividad primaria del factor N</u> .....	48
4.7 INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	50
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	54
6. <u>RESUMEN</u> .....	55
7. <u>SUMMARY</u> .....	55

8. BIBLIOGRAFÍA ..... 56

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Análisis químico del suelo (0-15cm) para el promedio de los bloques.....	25
2. Población lograda sobre los distintos AI .....	26
3. Altura de plantas en R0 según los diferentes AI .....	29
4. Correlación entre el rendimiento en grano (RSL) y las diferentes determinaciones realizadas a R0 según Pearson y nivel de significancia.....	40
5. Índices de cosecha alcanzados en función de los AI evaluados para el promedio de las dosis de N evaluadas.....	42
6. Panojas m <sup>-2</sup> según las distintas dosis de N.....	44
7. Peso de mil granos alcanzado sobre los diferentes AI evaluados para el promedio de las dosis de N.....	44
8. Peso de mil granos alcanzado con las diferentes dosis de N evaluadas para el promedio de los AI.....	45
Figura No.	
1. Croquis de diseño espacial del experimento .....	21
2. Radiación y heliofanía de la zafra 15/16 y promedio histórico para la misma época (1973-2016).....	23
3. Temperatura media y precipitaciones promedio durante la zafra 15/16 y promedio histórico durante ciclo del cultivo.....	24
4. Acumulación de MS (kg ha <sup>-1</sup> ) en función del AI en diferentes momentos del ciclo del cultivo de arroz .....	27
5. Acumulación de MS (kg ha <sup>-1</sup> ) en función de las dosis de N agregadas a R0, R4 y cosecha.....	28
6. Altura (cm) del cultivo a R0 en función de las distintas dosis de N para el promedio de los AI evaluados.....	30

7. Absorción de N en grano (kg ha-1) para los diferentes AI evaluados para el promedio de las dosis de N .....	31
8. Absorción de N en paja, grano y total (kg ha-1) de las diferentes dosis de N evaluadas para el promedio de los AI.....	32
9. Valores de NDVI según el AI en los momentos de R0, R1 y R4 considerando el promedio de las dosis de N .....	33
10. Valores de NDVI registrados según las dosis de N evaluadas en los momentos de R0, R1 y R4, para el promedio de los AI evaluados .....	34
11. Porcentaje de cobertura de la canopia en base a Canopeo App según AI al momento de R0 .....	35
12. Porcentaje de cobertura de la canopia en base a Canopeo App según la dosis de N evaluada en el momento de R0 .....	36
13. Porcentaje de cobertura de la canopia en base a Canopeo App según la dosis de N evaluada en el momento de R4 .....	36
14. Unidades de SPAD en función de las dosis de N evaluadas al momento de R0 .....	37
15. Rendimiento SL (kg ha-1) en función de las diferentes dosis de N utilizadas, promedio nacional de la zafra 15-16 y potencial nacional para zona Este.....	38
16. Respuesta en rendimiento SL (kg ha-1) y óptimo físico de cada AI en función de las distintas dosis de N evaluadas.....	39
17. Relación entre los valores de NDVI medidos a R0, con la materia seca (MS) a R0 y el rendimiento en grano .....	41
18. Relación entre los valores de % de cobertura medidos a R0, con la materia seca (MS) a R0 y el rendimiento en grano.....	
19. Índice de cosecha (IC) alcanzados en función de las dosis de N evaluadas para el promedio de los AI .....	43
20. Porcentaje de eficiencia de recuperación aparente (ERA) alcanzada con las diferentes dosis de N evaluadas para el promedio de los AI y modelo ajustado para la respuesta observada .....	47

21. Porcentaje de eficiencia de recuperación aparente (ERA) para los distintos AI según la dosis de N (kg N ha <sup>-1</sup> ) utilizado.....	48
22. Eficiencia agronómica (kg kg <sup>-1</sup> ) en función de las distintas dosis de N evaluadas para el promedio de los AI y modelo ajustado para la respuesta observada.....	49
23. Productividad parcial del factor N (kg kg <sup>-1</sup> ) en función de las distintas dosis de N evaluadas para el promedio de los AI y modelo ajustado para la respuesta observada.....	50

## 1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay en las últimas décadas la producción de arroz ha sufrido una tendencia positiva e incremental en los rendimientos y volumen total de producción. Una importante característica de dichos sistemas de producción es el tiempo que pasan estas tierras bajo pasturas por integrar una rotación agrícola-ganadera, lo cual es determinante de la superficie cultivada anualmente.

A nivel mundial son mencionados los sistemas mixtos, cultivo - ganadería como de importante uso del suelo. Sin embargo, desde fines del siglo pasado, estos sistemas mixtos en regiones con agricultura comercial como Europa y Norteamérica se han visto en descenso (de Haan et al., citados por Bell y Moore, 2012).

Históricamente el sistema de arroz uruguayo ha alternado el uso del suelo con pasturas destinadas a la producción animal. En términos generales la secuencia predominante fue de 2 años de arroz y 4 de pasturas. Evaluada numerosas veces dicha alternativa es considerada productiva, estable y favorable ambientalmente.

Con la expansión agrícola que afectó todo el territorio nacional de la cual no fue excepción la zona arroceras; se comenzaron a incluir nuevas alternativas en la rotación como soja, en busca de soluciones al deterioro de los márgenes económico (Castillo et al., 2013). Al mismo tiempo se produjo un proceso de intensificación en los sistemas, aumentando la frecuencia del cultivo dentro de la rotación en desmedro de las pasturas. Un factor que interacciona con esta intensificación es la diversidad de antecesores invernales (AI) inmediatos sobre los que se siembra el arroz, entre los que se destacan los verdes invernales y las pasturas regeneradas. A nivel comercial el efecto AI es asociado como un factor que puede condicionar el futuro rendimiento en grano, y al N como fertilizante como factor que levantaría las limitantes de un mal AI.

La intensificación de los sistemas, al aumentar la participación del cultivo de arroz, disminuye la estabilidad estructural de los suelos a causa de un menor contenido de materia orgánica y mayor de sodio intercambiable. Por otro lado, el suministro de nitrógeno se ve influenciado por las secuencias de AI.

En Uruguay, en los últimos 13 años, el agregado de nitrógeno (N) en el cultivo de arroz se ha incrementado desde 47 kg ha<sup>-1</sup> aplicados en cobertura (V5 y R0, macollaje y primordio floral respectivamente) a 72 kg N ha<sup>-1</sup>, sin considerar la fertilización con N basal, las que se han mantenido en este período de tiempo (18-20 kg N ha<sup>-1</sup> aproximadamente).

Es entonces que frente a estos cambios en los sistemas de producción, surge la interrogante de cómo pueden estos factores estar afectando la productividad del cultivo de arroz en respuesta al agregado de N al considerar en forma conjunta la presencia de nuevos cultivos en la rotación y el uso de nuevas variedades, que son sembradas sobre diferentes AI.

En función de lo mencionado, se realizó el presente trabajo con el objetivo de cuantificar la respuesta al agregado de N y la eficiencia de uso del N (EUN) sobre distintos AI en el cultivar de arroz Parao.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 NUTRICIÓN DEL CULTIVO

Los nutrientes que normalmente se expresan como limitantes del rendimiento en el cultivo de arroz son: N, P, K y Zn (Gamarra, 1996).

Además Bray, citado por Arnall et al. (2013) mencionan en la ley del mínimo que el nutriente que limita la productividad es aquel que se encuentra en menor cantidad relativa.

Por lo que se refiere a la absorción de macronutrientes (N, P, K) por parte del cultivo se da durante todo el ciclo, no obstante, se observa una mayor tasa de extracción en los estadios de V5 y R0 (Gamarra, 1996).

Se debe agregar que los requerimientos de N aumentan al incrementarse el potencial rendimiento del cultivo (Ying et al., 1998).

Mientras tanto conocer los procesos físicos- químicos que ocurren en el suelo luego de la inundación es de suma importancia para realizar un manejo más objetivo de la fertilidad de este. Se producen reacciones físicas entre el suelo, el agua y los microorganismos que determinan los cambios químicos (Fageria et al., 2011).

También el pH del suelo es un factor a tener presente al momento de planificar el manejo nutricional del cultivo. El grado de disolución y/o de absorción que tienen los distintos nutrientes (N, P y K) está directamente influenciado por la acidez o alcalinidad del suelo en cuestión (SAG. DICTA, 2003).

#### 2.1.1 Nitrógeno

El principal nutriente para el arroz es el N, cualquier práctica de manejo que maximice la eficiencia de uso de dicho nutriente se reflejara generalmente en mayores rendimientos (Gamarra, 1996).

Así mismo, Jiang et al. (2004) determinaron que la fertilización nitrogenada es una de las prácticas más extendidas a nivel mundial para mejorar la producción de granos, y las distintas estrategias de fertilización son adoptadas para aumentar la utilización del N por parte de los cultivos.

Por otro lado, trabajos realizados por Beeche et al. (1994) demostraron que tanto la magnitud como el tiempo de suministro de N tienen efecto en el rendimiento.

La importancia de utilizar dosis óptimas radica en que; las subdosis se transmiten en una limitante para expresar el potencial rendimiento. Sin embargo, las dosis altas, pueden resultar en mayor susceptibilidad a enfermedades así como problemas de vuelco (Gamarra, 1996).

El uso de dosis excesivas es una práctica común entre productores, y las desventajas son variadas desde; disminución en la eficiencia de uso del fertilizante, alto potencial de contaminación al ambiente, atraso en la maduración y en la posterior cosecha del cultivo (Ju et al., Xu et al., Ye et al., Zhang et al., citados por Deng et al., 2014).

Wells y Jhonston (1970) afirman la importancia de utilizar dosis ajustadas a los requerimientos, así como realizar dichas aplicaciones en momentos adecuados.

## 2.2 RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

### 2.2.1 Fuentes y pérdidas

La fuente a utilizar debe ser la adecuada, de modo que asegure una rápida disponibilidad para el cultivo. Además, debe ir acompañada del método y/o momento adecuados para que no resulte en bajos rendimientos y altos costos (Gamarra, 1996).

Se debe agregar que las fuentes más apropiadas para los sistemas que en general se produce arroz son las amoniacales (Quintero et al., 2011).

Las pérdidas a las que están expuestos los fertilizantes en el medio donde son aplicados es la principal causa de que los mismos no puedan ser utilizados eficientemente como lo indican Singh et al. (1998).

De acuerdo con lo anterior Mikkelsen et al., Griggs et al., Norman et al., citados por Dillon et al. (2012) enfatizan que se deben disminuir las pérdidas para ser más eficientes en el uso de este recurso, principalmente las pérdidas por volatilización que representan del 20 al 80% del total.

Así mismo, Matson et al., Galloway, Choudhury y Kennedy, Li et al., citados Yang et al. (2012) señalan que más de la mitad de lo aplicado como fertilizante nitrogenado no es utilizado por el cultivo, lo cual no es solo un peligro ambiental sino también representa una gran pérdida económica.

### 2.2.2 Respuesta al nitrógeno

Estudios realizados por Singh et al. (1998) demostraron que el 75% de la variación en el rendimiento se explica por el N agregado, pero manteniéndose diferencias genóticas en la eficiencia de uso del N.

El efecto de la fertilización puede explicarse comprendiendo las interacciones que se dan entre; lo aplicado y lo absorbido realmente por el cultivo, y luego lo que es absorbido con el rendimiento final (Van Keulen, 1982).

Machado, citado por Gamarra (1996) se refiere a que la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada no siempre está directamente relacionada con la disponibilidad de dicho nutriente en el suelo, sino que existen otros factores que pueden influir.

Por otra parte Chebataroff (2012) describe tres factores que influyen en la respuesta al agregado de N; características del suelo, tipo de planta e incorporación de rastrojos. Agrega que la respuesta al agregado de fertilizante también es influenciada por factores climáticos y de manejo.

Se debe enfatizar, que condiciones de temperatura y radiación elevada en etapa reproductiva, acompañada de elevadas dosis de N se obtiene alta respuesta traducidas en altos rendimientos (Gamarra, 1996).

Sin embargo, una baja oferta solar durante la etapa reproductiva disminuye las posibilidades de incremento de la productividad por el agregado de N, pudiendo inclusive tornarse depresivo el efecto sobre los rendimientos, al disminuirse el índice de cosecha (Chebataroff y Deambrosi, citados por Deambrosi y Méndez, 2007).

La posibilidad de obtener incrementos en el rendimiento también se puede ver afectado si cultivares de tipo indica con baja tolerancia al frío son expuestos a bajas temperaturas durante el período reproductivo. Se incrementa de forma exponencial la esterilidad de las espiguillas, y consecuentemente se ven disminuidos los rendimientos aun cuando se hayan aplicado altas dosis de N (Deambrosi et al., citados por Deambrosi y Méndez, 2007).

Por su parte, Stansel et al., citados por Lavecchia (1991) reportan disminuciones de hasta el 30% en el rendimiento cuando se producen descensos del 30% en las horas de luz, para niveles medios de aplicación de fertilizante nitrogenados.

En cuanto a la presencia de malezas, puede verse anulada o deprimida la respuesta al agregado de N por presencia de las mismas. Según Chebataroff et al., citados por Chebataroff (2012) observaron efecto positivo en la expresión de la fertilización, cuando se realizó un control temprano de *Echinochloa* sp.

Sin embargo, sin control de las malezas se puede apreciar que la fertilización produjo un efecto negativo, disminuye el rendimiento comparado con el testigo sin fertilizar (Chebataroff, 1982).

### 2.2.3 Manejo de la fertilización

Roger y Ladha, citados por Motior et al. (2009) mencionan que la mitad del N utilizado por la planta es N derivado de la MO, por lo cual para lograr satisfacer los requerimientos del cultivo lo restante se debe cubrir con fertilizante.

Para esto al momento de decidir si fertilizar y en qué cantidad deben ser utilizados como criterios; la fertilidad residual o natural del suelo, variedad a cultivar, densidad de siembra, disponibilidad de agua, fecha de siembra entre otros factores inherentes al cultivo (SAG. DICTA, 2003).

Sin embargo, Singh et al. (1998) mencionan que no es suficiente la incorporación de fertilizante o enmiendas para solucionar los problemas de nutrientes, esta práctica debe ir acompañada de otras como es la selección genética de variedades resistente a los distintos factores bióticos y abióticos que las afectan, para obtener mejores resultados.

Por otro lado, Humphreys et al., citados por Beeche et al. (1994) hacen referencia a la necesidad de estudiar el patrón de liberación de N mineral a lo largo de la estación de crecimiento, con la finalidad de poder predecir mejor los requerimientos de fertilizantes nitrogenados.

Cabe agregar que Castillo et al. (2014) luego de 3 años de evaluación concluyeron que el PMN (potencial de mineralización de N) a V5, fue el indicador que mejor representó la respuesta en rendimiento observada frente al agregado de N. En cambio, a R0 se consideró que el indicador de mejor ajuste fue la absorción de N.

Teniendo en cuenta que el suministro exógeno de N debe hacerse contemplando que el nutriente no solo proviene del fertilizante sino también del suelo, es por ello que la temporada donde se desarrolla el cultivo es un factor determinante, ya que define la tasa de mineralización en dicha estación (Singh et al., Cui et al., citados por Deng et al., 2014).

Dividir las dosis de N aumenta la eficiencia de uso en un 60-70% ya que se ajusta las dosis a la curva de necesidades de la planta (Chebataroff, 2012). A mayor dosis total a aplicar, se recomienda que se le preste mayor atención al fraccionamiento de la misma (Gamarra, 1996).

Por esto se recomienda dividir la aplicación de N en dos o tres momentos del ciclo del cultivo; siembra, macollaje y elongación de entrenudos. Esto puede variar levemente según la capacidad de suministro del suelo en cuestión (Deambrosi y Méndez, 2007).

También se demostró que lo más recomendable para las condiciones de Uruguay es realizar aplicaciones de N a macollaje en suelo seco, e inmediatamente ingresar con el agua al cultivo (Deambrosi y Méndez 1993, 1995, Deambrosi et al. 1994).

Para lograr altos potenciales de rendimiento, se requiere un crecimiento inicial vigoroso de los cultivos, por lo cual es esencial el suministro de N durante la etapa de crecimiento temprano (Bacon et al., citados por Beeche et al., 1994). Al respecto Ishisuka y Tanaka, citados por Chebataroff (2012) mencionan que cuantitativamente la mayor parte del N se requiere en la etapa vegetativa, pudiendo en muchos casos llegar al empanojado (R2) con el 90% del N total extraído.

## 2.3 LOS ANTECESORES Y EL ARROZ

El sistema arroz-pasturas desarrollado en Uruguay, que tradicionalmente ha compartido el recurso suelo con otras actividades se considera casi exclusivo en el mundo, por generar una baja intensidad agrícola (Deambrosi, Palmer, citados por Castillo, 2018).

Sin embargo, en las últimas décadas se ha producido un aumento en la frecuencia del arroz en la rotación, llevando a presentar una serie de desventajas en el sistema. Se comenzó a observar mayor encostramiento del suelo dificultando la emergencia de plántulas, mayor presencia de malezas y enfermedades, así como un menor contenido de materia orgánica considerado este un indicador de fertilidad del suelo (Deambrosi y Méndez, 2000).

Con respecto a lo anterior, ensayos instalados por Sciarra y Uría, citados por Deambrosi y Méndez (2000), en los cuales se analizaron las propiedades físicas del suelo luego de haber instalado distintas rotaciones. Permitieron concluir que los valores de densidad aparente en el horizonte superficial son mayores en suelos con rastrojo de arroz que en los suelos con praderas en su rotación, al analizar el horizonte sub superficial esta relación se mantiene pero se puede observar que los valores con praderas son aún

menores a los de campo natural, por lo que se habla de un efecto mejorador de las mismas.

Es por esto que las pasturas dentro de la rotación cumplen un rol clave en la sostenibilidad del suelo, recuperan C orgánico, captan N atmosférico por fijación biológica (FBN), restauran las propiedades químicas, biológicas y físicas del mismo (Terra et al., 2010).

Las condiciones físicas favorables del suelo permiten una mejor instalación del cultivo, mientras que la inclusión de leguminosas en la mezcla mejora la disponibilidad de N para el arroz (Deambrosi y Méndez, 2000).

Las rotaciones agrícolas que incluyen pasturas siempre producen significativamente más que las rotaciones basadas únicamente en cultivos, pero no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento ante variaciones en el largo de la fase pastura, pudiendo ser tan corta como 2 años siempre y cuando la pastura sea altamente productiva y domine alguna leguminosa (Beeche et al., 1994).

Planificar una rotación en este tipo de sistema por las características de los suelos arrosables (pobre drenaje y alto riesgo de sequías en verano) se torna difícil, buscar otros cultivos o especies que se adapten (Gamarra, 1996).

A su vez Terra et al. (2014) mencionan que los cultivos más aptos para agregar en las secuencias sobre el tipo de suelos “arroceros” son soja y sorgo. Incluir soja en estos sistemas presenta ventajas no solo económicas (diluyendo costos y diversificando ingresos), sino que aporta alternativas para el control de malezas.

Teniendo en cuenta que la soja es muy afectada por el exceso hídrico, típico en suelos arroceros (disminuyendo el potencial rendimiento de forma variable según la etapa en la que se encuentre). Pero este problema puede ser solucionado haciendo uso de cultivares tolerantes, seleccionando fecha y densidad de siembra para contemplar este aspecto (Castillo et al., 2013).

Acerca de las especies que pueden ser utilizadas como cultivos de cobertura (CC) o AI, las leguminosas son fuente de nitrógeno para el próximo cultivo (Smith et al., Fageira et al., citados por Sánchez, 2009), mientras que las gramíneas por su parte son utilizadas para reducir la lixiviación de nitrógeno y la erosión (Meisinger et al., Fageira et al., citados por Sánchez, 2009), combinando ambas en muchos casos para aprovechar dichas ventajas.

Mientras tanto Sánchez (2009) resalta que el tiempo de barbecho debe considerar la preparación del suelo para la próxima cosecha, así como evitar el exceso de humedad o el agotamiento de la misma por estos cultivos. Cuando

se busca una rápida mineralización de los nutrientes “atrapados” en la biomasa de los CC, el mejor momento para comenzar el barbecho será en la etapa vegetativa, cuando la relación C/N es más baja.

Se debe considerar la relación C/N de los CC, ya que esto determinará el tiempo de descomposición de los residuos para que no se vea afectado el cultivo renta (Sullivan, Mengel, Cleland, citados por Sánchez, 2009).

La incorporación de los rastrojos puede traer también consecuencias desfavorables para el cultivo de arroz, ya que es necesario utilizar N del sistema por parte de los microorganismos para descomponer los residuos. Resultando así en una menor disponibilidad del nutriente para la planta (Tanaka, citado Chebataroff, 2012).

En cuanto al efecto de los CC en la disponibilidad de N Terra et al. (2010) hacen mención al efecto de incluir CC previos al cultivo de arroz, ya que pueden atrapar momentáneamente N, transformándose en potenciales “ahorros”.

Por su parte, Mallarino et al., citados por Castillo (2018) mencionan que una pastura mezcla con trébol blanco (*Trifolium repens*) tiene la capacidad de fijar entre 30- 46 kg N Mg<sup>-1</sup> MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, dependiendo de la productividad de la misma. La productividad de las pasturas en Uruguay rondan los 1700 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Hirczak y Rodríguez, citados por Castillo, 2018).

Con respecto a esto Gamarra (1996) enfatiza como el cultivo de arroz luego de un periodo de praderas se ve beneficiado no solo en términos físicos sino también económicos.

Ensayos realizados por Beeche et al. (1994) demostraron que la secuencia de cultivos tiene efecto en el suministro de N, aunque no afecta directamente el contenido de dicho nutriente durante la estación de crecimiento, si se refleja en las tasas de mineralización del sistema. Por esto la acumulación de N total a madurez está influenciada por el sistema, la aplicación de fertilizantes y la interacción de ambos (Motior et al., 2009).

Los CC no solo protegen el suelo desnudo, en sistemas de siembra directa sino que también mejora la infiltración de agua y reducen la evaporación de agua en la superficie del suelo. Así mismo, reduce el encostramiento de la superficie y el escurrimiento superficial del agua, pudiendo ser beneficiosa la retención de humedad para el cultivo de arroz (Méndez et al., Sullivan, citados por Sánchez, 2009).

Existen alguna especies utilizadas como CC que tienen efectos alelopáticos, inhiben o retardan el crecimiento por liberación de toxinas naturales o aleloquímicos (Sullivan, citado por Sánchez, 2009).

## 2.4 EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO Y SUS COMPONENTES

La eficiencia de uso de N (EUN) se define como la proporción de rendimiento en grano por unidad de N disponible en el suelo, incluido el N del suelo residual presente y el fertilizante nitrogenado (Verhulst et al., 2015).

Boaretto et al. (2007), resaltan que el concepto de EUN puede variar dependiendo de la perspectiva de producción y que existen diversas maneras de expresarla, ellas son;

- ❖ Eficiencia interna de utilización de N (EUI); kg de producción por kg de N absorbido.
- ❖ Eficiencia Fisiológica (EFIS); kg de aumento de producción por kg de aumento en la absorción de N.
- ❖ Eficiencia aparente de recuperación (ERA); kg de aumento de la absorción de N por kg de N aplicado.
- ❖ Eficiencia agronómica (EA); kg de aumento en la producción por kg de N aplicado.
- ❖ Productividad parcial del factor N (PPFN); representa los kg cosechados por los kg de N aplicados.

La eficiencia final de la fertilización está determinada por una serie de factores según concluye De Datta, citado por Lavecchia (1991). Entre ellos se describe: la fuente utilizada, dosis, momento de la aplicación, suelo, variedad, clima, fecha de siembra, manejo del agua, control de enfermedades y malezas y secuencia de cultivos.

Fageria et al., citados por Sánchez (2011) comprobaron que la eficiencia de utilización del N es afectada por la inundación.

Información nacional coincide que son diversos los factores que influyen en el porcentaje de recuperación del fertilizante (Chebataroff, 2012).

Chebataroff (2012), menciona que en los suelos livianos es fundamental el fraccionamiento del N a lo largo del ciclo del cultivo, para evitar potenciales pérdidas y lograr aumentar la eficiencia de recuperación de los fertilizantes, por tratarse de suelos con poca capacidad de retención.

La dinámica del N en los sistemas de producción de arroz es bastante compleja, lo cual se refleja en las fluctuaciones en la eficiencia de recuperación. Lavecchia et al. (1991) hacen mención que solo entre el 30 y 40% del

fertilizante incorporado es recuperado y efectivamente absorbido por la planta, las pérdidas más importantes se dan por los procesos de desnitrificación y volatilización.

Otros reportes hacen referencia a recuperaciones entorno al 50%, de igual manera dicho valor se torna perjudicial económicamente y en posibles riesgos ambientales (Scivittaro et al., 2005). Los sistemas actuales basados en arroz son muy ineficientes en insumos, resaltan Bouman et al., Heffer, citados por Ali et al. (2014).

De acuerdo con lo anterior Turner, citado por Chebataroff (2012) concluyó que la eficiencia de uso del N aplicado es variable según en la etapa en que se encuentre el cultivo.

Turner (2004), determinó que cuando el N es incorporado a la siembra se produce el menor porcentaje de recuperación 26%. El otro extremo se produce antes de inundación con suelo seco y luego de la inundación, en iniciación panicular cuando el cultivo ya cuenta con mayor superficie de raíces los valores de recuperación son de 80 y 87% respectivamente.

Las cantidades de fertilizante aplicadas también son determinantes de la eficiencia de recuperación. En las últimas décadas el uso de fertilizantes minerales se ha incrementado en las variedades de tipo indica 83,1 % y en las de tipo japónicas 120,6%. Esto se traduce en eficiencias de uso aún menor a las anteriormente nombradas, en otras palabras, menor ganancia en rendimiento de grano por kilogramo de nutriente aplicado (Wu, citado por Jiang et al., 2004).

Cada genotipo presenta diferente respuesta al agregado de N, esto se pueden apreciar en la producción de grano, absorción de N, partición del nutriente, eficiencia agronómica y recuperación aparente de cada uno (Singh et al., 1998).

Peng et al., citados por Deng et al. (2014) reportan que un bajo suministro de N en la etapa vegetativa temprana no reduce sustancialmente el rendimiento, pero si se puede observar una mejor eficiencia agronómica en el uso del nutriente.

Méndez y Deambrosi, citados por Sánchez (2011) señalan que una solución para obtener mayores valores de eficiencia es ajustar la curva de oferta a la demanda. Es de común conocimiento que la absorción de N durante el ciclo de vida del cultivo se asemeja a la curva de producción de materia seca, existiendo dos momentos donde la tasa de absorción es más elevada ellos: macollaje y formación panoja.

## 2.5 HERRAMIENTAS DE ASISTENCIA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

### 2.5.1 SPAD

El SPAD, medidor de clorofila o de Desarrollo de Análisis de Plantas-Suelo es una importante herramienta en el diagnóstico del estado nutricional de los cultivos (Yuan et al., 2016).

El medidor arroja un valor de tres dígitos basándose en la diferencia entre luz roja y luz infrarroja a través de la hoja (Uddling et al., citados por Yuan et al., 2016).

Yang et al. (2014) señalan que existen diversos factores que pueden afectar el correcto funcionamiento de dicho dispositivo; el cultivar, el año, la etapa de crecimiento, el espesor de la hoja, la posición de la hoja y el punto de medición en la hoja.

Como ya se mencionó, la precisión de la estimación final se puede ver alterada por el método empleado en la medición, Yuan et al. (2016), llevaron a cabo un ensayo en *Oriza sativa*, el cual les permitió concluir que una posición ubicada a 2/3 de la base de la hoja sería bien representativa del contenido de clorofila de toda la hoja.

La medición es recomendable realizarla en la cuarta hoja expandida (Yuan et al., 2016). Por su parte, Rodríguez et al. (1998), encontraron una alta correlación entre unidades SPAD y concentración de clorofila en la quinta hoja.

Según Yang et al. (2014), la hoja inferior presenta mayor sensibilidad al nivel de N que por lo que sería más adecuado muestrear, especialmente en el estadio R2.

Rodríguez et al. (1998), resaltan como ventajas de utilizar este medidor; el bajo consumo de tiempo que conlleva, fácil empleo y no ser un método destructivo.

Otra ventaja de esta herramienta es que, si bien existen valores de suficiencia para el cultivo de arroz en cuanto al contenido de N en el tejido, los mismos son para el estadio de R4 (floración) y en hoja bandera. Lo cual sería poco útil a nivel práctico para corregir posibles déficits señalan Pocojeskil et al. (2012), porque ya se concretó gran parte del rendimiento (número de panículas). Sin embargo, dicho dispositivo permite intervenir en fase vegetativa, logrando así una mayor repercusión en el mismo a través del manejo.

El sensor SPAD permite conocer el contenido foliar de N. Si bien el valor que arroja corresponde al contenido de clorofila, está comprobado que en

las plantas de arroz la misma esta correlacionada positivamente con el contenido de N (Turner y Jund, Peng et al., citados por Pcojeskil et al., 2012).

De acuerdo con lo anterior, Rodríguez et al. (1998) mencionan que la “unidad SPAD” es un valor proporcional al contenido de N en la planta de arroz.

Ramesh et al., citados por Ali et al. (2014) luego de una serie de ensayos agregan que valores de SPAD a los 79 días post siembra tiene una alta y positiva correlación con el rendimiento en grano.

### 2.5.2 Greenseeker

A nivel mundial el sensor Greenseeker es reconocido como una importante herramienta al momento de planificar y realizar las aplicaciones de N (Yao et al., 2013).

Según Harell et al. (2011), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) que se obtiene en base a la reflectancia de rojo e infrarrojo cercano, permite predecir el potencial rendimiento del cultivo de arroz. Lograr una aproximación al potencial rendimiento en etapas tempranas del cultivo es de fundamental importancia en la toma de decisiones resalta Ali et al. (2014).

Ensayos realizados en China 2008 y 2009 por Yao et al., demostraron que hasta un 42% de la variabilidad del potencial rendimiento podría ser calculado utilizando el indicador NDVI.

Trabajos realizados posteriormente por Ali et al. (2014), demostraron que lecturas realizadas a iniciación panicular (R0) producen los coeficientes más altos, logrando explicar hasta el 63% de la variabilidad del rendimiento.

El NDVI luego de R0 parece ser un buen indicador del rendimiento en grano (Marchesi y Castillo, 2016).

Harell et al. (2011), resaltan que mediciones de NDVI obtenidas antes de mitad de ciclo, pueden ser utilizadas en la toma de decisiones en cuanto el manejo del N en el cultivo, aumentando la eficiencia de uso de dicho nutriente. En el caso que dichas lecturas se realizan en estadios posteriores ya es de escasa aplicación el uso de esta herramienta.

Este tipo de herramientas pueden ser utilizadas para desarrollar nuevas estrategias en la gestión del N, ya que la interpretación de los valores de NDVI pueden derivar en un rápido diagnóstico del estado del cultivo, lograr una aproximación al potencial rendimiento entre otras señalan Inman et al., Lan et al., citados por Gutiérrez- Soto et al. (2011).

Greenseeker presenta como desventaja que solo utiliza dos bandas del espectro, por lo cual sería de gran utilidad evaluar otras herramientas que utilizara mayor número de ondas para determinar el potencial rendimiento sin agregado exógeno de N (Yao et al., 2013).

Para las condiciones de Uruguay Marchesi y Castillo (2016), mencionan que el índice NDVI puede presentar inconvenientes en el estadio de R0 si la canopia del cultivo no se encuentra totalmente cerrada, ya que puede haber una interferencia en el valor a causa de la longitud de onda reflejada por el agua. Por otra parte, se observaron que se puede saturar dicho índice en casos donde la biomasa, % de N en planta sean elevados.

### 2.5.3 Canopeo app

La cobertura del cultivo (CC) o proporción de suelo cubierta por follaje vista desde arriba es considerada un importante parámetro. Conocer este parámetro permite desarrollar y utilizar modelos de crecimientos de cultivos, importante herramienta en la agricultura de precisión (Walthall et al., citados por Ovaldo et al., 2008).

Según Kenney, citado por de la Casa et al. (2016) ya desde fines del siglo pasado se podía apreciar un marcado incremento en los distintas áreas agronómicas en cuanto a la utilización de imágenes digitales para la investigación y su aplicación.

Se puede determinar a partir de la CC, la tasa de intercepción de radiación solar, el tamaño del aparato transpiratorio, la productividad del agua e inclusive potencial rendimiento (de la Casa et al. 2007, 2012, de la Casa et al., citados por de la Casa et al. 2016).

Lograr una medición precisa de la cantidad y composición espacial del área foliar de los cultivos, demanda mucho tiempo dada el gran abanico de forma y tamaños que pueden tener (Ovando et al., 2008). Canopeo app es una aplicación que permitirá partir de fotos o videos tomadas con un dispositivo móvil, conocer de forma cuantificada la cobertura vegetal lograda por cualquier cultivo. Fue desarrollada por Oklahoma State University, con el objetivo de contar con una herramienta rápida, no destructiva y de fácil utilización. Permite obtener resultados in situ con mayor precisión de la que se puede lograr normalmente solo por medio visual (Urquijo, 2015).

Se basa en colorimetría, utilizando proporciones de color de rojo a verde, de azul a verde, y un exceso de índice verde para arrojar dicho resultado (Patrignani y Ochsner, 2015).

Hunt et al., citados por de la Casa et al. (2016), afirman que las diferencias existentes entre la vegetación y el suelo en cuanto a longitudes de onda de verde y rojo permiten determinar la biomasa producida, así como conocer el estado nutricional del cultivo a través de imágenes a color.

Lollato et al. (2015), hacen referencia a un trabajo en el cual se buscaba integrar dicha herramienta en la toma de decisiones de un cultivo de trigo doble propósito. Se concluyó que el número mínimo de imágenes para obtener un valor promedio certero variaba de seis a doce dependiendo de la uniformidad del campo.

González- Esquivá et al. (2015), observaron que incluyendo dichas fotos en un sistema de monitoreo permitía un continuo seguimiento del estado de los cultivos, proporcionando información valiosa como ejemplo sobre el balance hídrico para el manejo del riego.

## 2.6 HIPÓTESIS

La hipótesis planteada fue que el rendimiento en grano, la EUN y la respuesta a la fertilización N del cultivo es diferente en función del antecesor invernal sobre el cual el arroz es sembrado. En función de esto, el incremento de las dosis de N permitirá en las peores situaciones de AI aumentar los rendimientos y la respuesta a la fertilización, manteniendo la EUN.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZACIÓN Y SUELOS

El ensayo se ubicó en una chacra comercial de la 7<sup>ma</sup> sección del departamento de Treinta y Tres a 43 km aproximadamente de la capital departamental (33° 25' 37.88" S, 54° 08' 58.46" O, 18 m elevación).

Los suelos predominantes del sitio son Solod Melánico/Ócrico correspondiente a la unidad "La Charqueada" según MAP. DSF (1976).

#### 3.2 DESCRIPCIÓN Y MANEJO DEL EXPERIMENTO

El uso anterior del suelo fue un cultivo de soja durante el verano anterior luego de un retorno largo sin arroz (más de cinco años).

El experimento consistió en la evaluación del comportamiento agronómico del cultivo de arroz sembrado sobre cuatro AI en combinación con diferentes dosis de fertilización nitrogenada.

Las coberturas utilizadas como AI fueron: trébol alejandrino (*Trifolium alexandrinum*; TA), raigrás (*Lolium multiflorum*, Rg), vegetación espontánea (VE) y suelo desnudo (testigo limpio, TL) quedando definidas cuatro parcelas mayores. Cada una de estas parcelas fueron divididas adjudicándose una dosis de N distinta a cada una de esas parcelas menores (0, 50, 100 y 150 kg N ha<sup>-1</sup>) fraccionado en dos partes iguales y aplicados en dos momentos del cultivo; V5 y R0 (macollaje y primordio, respectivamente, Counce et al., 2000). La fuente utilizada fue urea verde (46-0-0).

Las coberturas invernales fueron sembradas en el mes de mayo en línea con una sembradora a chorrillo. Las densidades de siembra fueron de 18 kg ha<sup>-1</sup> y 20 kg ha<sup>-1</sup> para TA y Rg respectivamente. En el mes de setiembre (17/9), se inició el barbecho con una aplicación de 3 l ha<sup>-1</sup> glifoWeed + dicamba 0,120 l ha<sup>-1</sup>.

El día 26/10/2015 se sembró el cultivo de arroz, el cultivar utilizado fue Parao. Se sembró con una sembradora semeadora de 9 líneas a una densidad de 150 kg ha<sup>-1</sup> y una distancia entre hileras de 0,17 m. La semilla se curó previamente con bucaner + pharaon. La siembra del cultivo de arroz se hizo en siembra directa, solo se hicieron las tapas y drenajes internos del ensayo.

La fertilización basal consistió en 5,3 kg ha<sup>-1</sup> de N, 31,8 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 15,9 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, la fuente que se utilizó fue 5-30-15.

Para el control de malezas, que lo realizó el productor, se hicieron las siguientes aplicaciones; pre-siembra con 4 l ha<sup>-1</sup> de glifoweed (21/10), otra pre-emergencia de 2 l ha<sup>-1</sup> glifoWeed + 0,8 clomazone y una post emergencia con 0,1 l ha<sup>-1</sup> bispirine + 1,5 l ha<sup>-1</sup> quinclorac.

La fertilización con urea a macollaje fue el 11/12/2015 sobre suelo seco, según las diferentes dosis de N asignadas a la parcela menor. La segunda aplicación de urea q R0 se realizó el 07/01/2016 (20 días post inundación aproximadamente). Al inicio de la floración del cultivo (R4) se realizó una aplicación de fungicida superior a una dosis de 0,4 l ha<sup>-1</sup>.

### 3.3 DETERMINACIONES REALIZADAS

#### 3.3.1 Análisis químico del suelo

Previo a la instalación del experimento se realizó un análisis de suelos (0-15 cm) como forma de contar con más elementos a la hora de analizar las posibles respuestas del cultivo que se sucedieran.

Los nutrientes analizados fueron nitrógeno (N), por medio del potencial de mineralización de N, fósforo (P) y potasio (K). EN forma complementaria se analizaron cationes asociados a la dinámica del K (Ca y Mg) así como la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

#### 3.3.2 Determinaciones realizadas durante el cultivo

Un mes luego de la siembra se realizó el conteo de plantas para determinar la población (plantas m<sup>-2</sup>). Se hicieron cuatro muestreos por parcela mayor, cada uno de 2 m lineales.

La biomasa aérea acumulada (MS) se determinó en dos momentos del ciclo; R0 y R4. Se realizaron muestreos destructivos de 0,085 m<sup>2</sup> cada uno al ras del suelo en cada parcela menor, luego fueron lavadas, secadas y pesadas para determinar la MS.

Se determinó la altura promedio de las plantas en los estadios antes nombrados, para ello se midió en dos puntos representativos (vértices opuestos) de cada parcela menor.

La estimación del contenido de clorofila al estadio de R0 y R4 se hizo utilizando el sensor SPAD, se realizaron cuatro determinaciones por parcela menor. La medición se realizó en la última hoja totalmente expandida en la parte central de la lámina.

Se estimó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en R0, R1 y R4 (primordio floral, inicio encañazón y floración respectivamente), utilizándose para ello la herramienta manual Greenseeker.

### 3.3.3 Determinaciones realizadas a la cosecha

Se determinó la MS de grano y paja al momento de la cosecha, para ello fueron extraídas dos muestras de 0,3 m en cada parcela menor.

Las muestras fueron molidas y enviadas al laboratorio para analizar la concentración de N tanto en grano como en paja.

Se determinaron los componentes de rendimiento. Para esto, se trillaron manualmente 15 panojas y se determinó el número de granos por panoja. Con la muestra de granos obtenidas y utilizando una clasificadora de viento se obtuvo el número de granos llenos, medios y chuzos. Finalmente utilizando los granos llenos se determinó el peso de mil granos (PMG).

Se determinó el rendimiento seco y limpio (RSL) en kg ha<sup>-1</sup> (13,6 m<sup>2</sup> área efectivamente cosechada) y para ello fue necesario determinar la humedad del grano.

### 3.3.4 Cálculos realizados a partir de las determinaciones

Utilizando los valores de MS en cosecha se calculó el índice de cosecha (IC), siguiendo la siguiente fórmula:

$$IC = \frac{MS \text{ grano}}{MS \text{ grano} + MS \text{ paja}}$$

A partir del rendimiento en grano de la parcela y el IC se estimó la MS total a cosecha.

En base a la información obtenida en la determinación de los componentes del rendimiento, se estimó el % de esterilidad:

$$\% \text{ Est.} = \frac{(\text{granos vanos por panoja} * 100)}{\text{granos totales por panoja}}$$

Utilizando la definición Boaretto et al. (2007) se procedió a realizar los siguientes cálculos:

Eficiencia de uso interna (EUI): representa la capacidad de transformar en grano lo absorbido.

$$EUI = \frac{\text{rend.}}{\text{abs. N}}$$

Donde:

abs. N= absorción de N en el tratamiento fertilizado

Eficiencia fisiológica (EFIS): expresa cuanto del incremento en el rendimiento se explica por la capacidad de recuperación del N aplicado.

$$EFIS = \frac{\text{rend. N}_{TFert} - \text{rend. N}_{TsinFert}}{\text{abs. N}_{TFert} - \text{abs. N}_{TsinFert}}$$

Donde:

rend. N<sub>TFERT</sub>= rendimiento de grano del tratamiento fertilizado

rend. N<sub>TsinFERT</sub>= rendimiento de grano del tratamiento sin fertilizar

abs. N<sub>TFERT</sub>= absorción de N (grano + paja) en el tratamiento fertilizado

abs. N<sub>TsinFERT</sub>= absorción de N (grano + paja) en el tratamiento

Eficiencia de recuperación aparente (ERA): expresa los kg de N que recupera (absorbe) el cultivo de lo que se aplica.

$$ERA = \frac{\text{abs. N}_{TFert} - \text{abs. N}_{TsinFert}}{\text{dosis N}} * 100$$

Donde:

abs. N<sub>TFERT</sub>= absorción de N (grano + paja) en el tratamiento fertilizado

abs. N<sub>TsinFERT</sub>= absorción de N (grano + paja) en el tratamiento sin fertilizar

dosis N= dosis de N utilizada (kg N ha<sup>-1</sup>)

Para ello fue necesario utilizar la información de laboratorio %N en grano y paja, y así poder calcular la absorción de N parcial de cada fracción para posteriormente llegar a la total.

Eficiencia Agronómica (EA): expresa cuantos kg más de grano que en el testigo sin fertilizar, se obtienen por cada kg de N que se aplica.

$$EA = \frac{\text{rend.}N_{T \text{ Fert}} - \text{rend.}N_{T \text{ sinFert}}}{\text{dosis}N}$$

Donde:

rend. N<sub>TFERT</sub>= rendimiento de grano del tratamiento fertilizado

rend. N<sub>TsinFERT</sub>= rendimiento de grano del tratamiento sin fertilizar

dosis N= dosis de N utilizada (kg N ha<sup>-1</sup>)

Productividad parcial del factor N (PPFN): es el más sencillo, expresa los kg de grano por cada kg de N aplicado.

$$PPFN = \frac{\text{rend.}}{\text{dosis}N}$$

Finalmente utilizando InfoStat se determinó la correlación lineal entre las variables medidas (MS, SPAD, NVDI, % cobertura a R0 y RSL) y sus correspondientes coeficientes de Pearson.

### 3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con un arreglo de parcelas divididas con cuatro repeticiones. Los bloques fueron de 20 m de ancho por 35 m de largo, separados a 10m entre ellos.

Las parcelas mayores dentro de cada bloque correspondieron a un Al distinto (20 x 6,8 m), mientras que las parcelas menores (5 x 6,8 m) se diferenciaban entre sí por los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

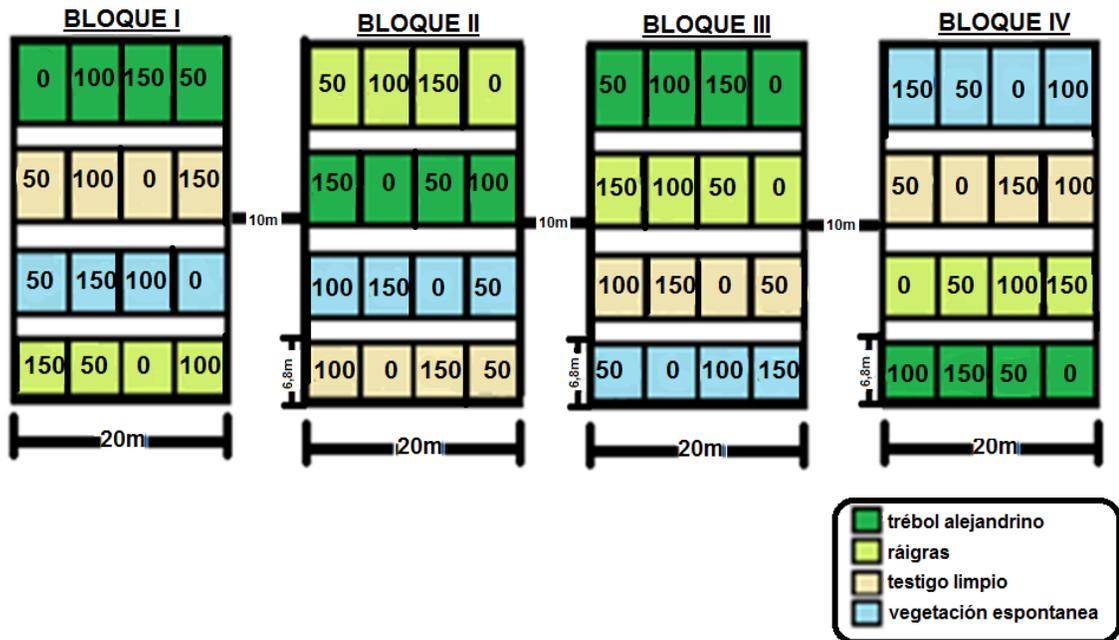


Figura No. 1. Croquis de diseño espacial del experimento

### 3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El modelo propuesto para el análisis estadístico fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_k + A_i + B_j + \delta_{ik} + (AB)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

- $Y_{ijk}$  - es el valor del i-esimo antecesor, en el k-esimo bloque y j-esima dosis
- $i$  - 1; 2; 3; 4 antecesores
- $j$  - 1; 2; 3; 4 dosis
- $k$  - 1; 2; 3; 4 bloques
- $\mu$  - media poblacional
- $B_k$  - efecto bloque
- $A_i$  - efecto antecesor
- $\beta_j$  - efecto dosis
- $\delta_{ijk}$  - error experimental entre mediciones dentro de U.E
- $(AB)_{ij}$  - efecto interacción tratamiento\*dosis
- $\epsilon_{ij}$  - error experimental entre U.E.

Se realizó análisis de varianza utilizando modelos lineales generales con InfoStat (Di Rienzo et al., 2017). Para la comparación de medias se utilizó el test de Tukey al 5%.

### 3.6 HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS

Estadísticamente las hipótesis de dicho ensayo se pueden presentar como:

- $H_0 = i_1 = i_2 = i_3 = i_4$   
 $H_a =$  Existe al menos un  $i_{(1,2,3,4)}$  diferente
- $H_0 = j_1 = j_2 = j_3 = j_4$   
 $H_a =$  Existe al menos un  $j_{(1,2,3,4)}$  diferente
- $H_0 =$  No existe interacción (AB)  $_{ij}$   
 $H_a =$  Existe interacción entre (AB)  $_{ij}$

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 FACTORES CLIMÁTICOS

Se presenta a continuación el comportamiento de las variables climáticas; radiación, heliofanía, temperatura media y precipitaciones para la zafra 2015-2016 y para el promedio histórico (1973-2016) durante los meses octubre a abril.

#### 4.1.1 Radiación y heliofanía

Como se puede observar en el siguiente gráfico la radiación en la zafra, se asemeja a lo que ha sido el promedio histórico para la zona hasta el mes de marzo. A partir de este mes, si bien el patrón de comportamiento se mantiene (comienza a descender  $\text{cal cm}^{-1}$  en esta estación) el promedio registrado es menor al histórico, debido a las precipitaciones que se producen como se verá más adelante.

La heliofanía a excepción del mes de febrero siempre se mantuvo por debajo del promedio histórico. Esta variable presentó una alta variabilidad a lo largo del ciclo, registrándose un pico en febrero con  $8,2 \text{ horas sol día}^{-1}$  y el menor valor en abril con solo  $2,7 \text{ horas sol día}^{-1}$  promedio (figura No. 2)

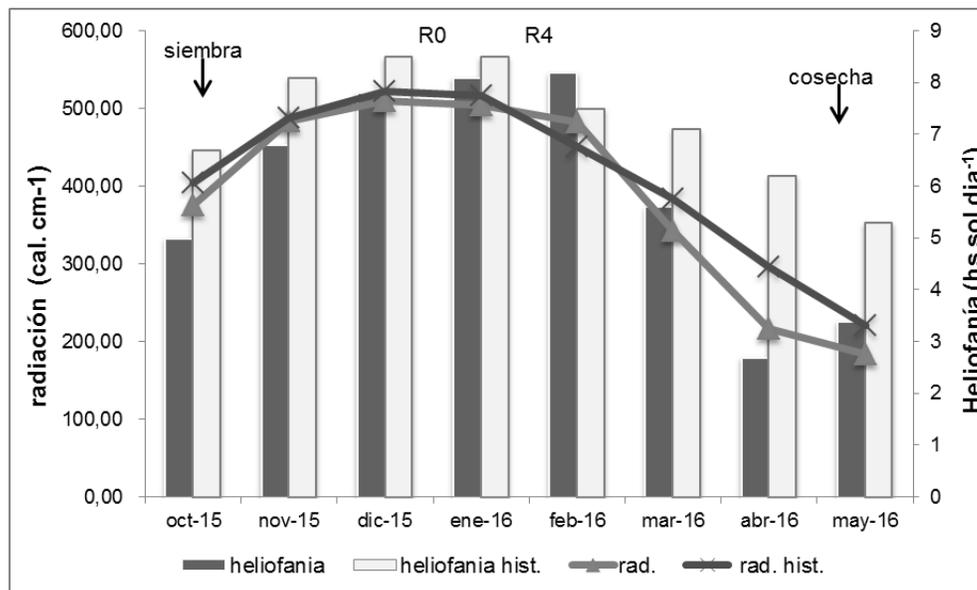


Figura No. 2. Radiación y heliofanía de la zafra 15/16 y promedio histórico para la misma época (1973-2016)

#### 4.1.2 Temperatura media y precipitaciones

Se observó que la temperatura media del año analizado acompañó el registro histórico. Sin embargo, se pudo apreciar un pico de temperatura, 10% superior en el mes de febrero.

Por otro lado, a diferencia de los cultivos de secano, las precipitaciones en el cultivo de arroz no son de gran efecto a la hora de definir los rendimientos finales.

En este año en particular, los registros se correspondieron poco con lo de la serie histórica. A principios de octubre se produjeron precipitaciones por encima del promedio lo que dificultó la siembra y establecimiento del cultivo. Luego se produce un verano seco, lo cual por tratarse de un cultivo irrigado no presenta graves problemas.

Finalmente, ocurrieron precipitaciones superiores a 400 mm en el mes de abril, lo que atrasó la cosecha y expuso el cultivo a la inundación total. De todos modos, Parao se caracteriza por ser una variedad que presenta muy buena tolerancia a retrasos en la cosecha, ya que tiene mayor resistencia a desgrane y a vuelco que las demás variedades disponibles (Molina et al., 2013). El momento óptimo de cosecha de esta variedad según bibliografía se sitúa próxima a los 60 días luego de floración (figura No. 3).

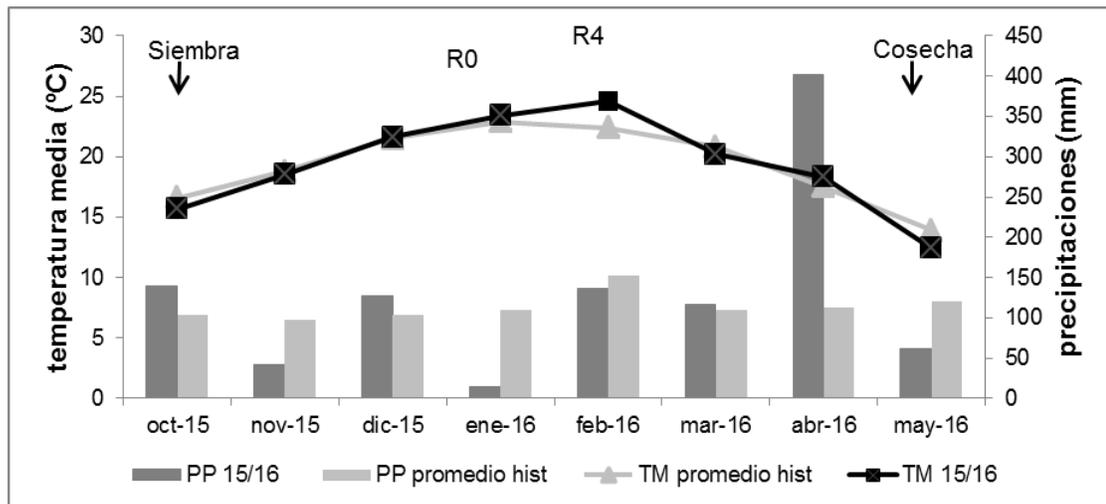


Figura No. 3. Temperatura media y precipitaciones promedio durante la zafra 15/16 y promedio histórico durante ciclo del cultivo

## 4.2 RESULTADOS ANÁLISIS DE SUELO

El análisis de suelo mostró valores representativos del tipo de suelo y la rotación en cuestión. Los valores de P encontrados estuvieron cercanos al nivel de suficiencia ( $7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y los de K estuvieron por encima ( $0,2 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$ ), tanto en valor absoluto como en la relación con el Mg y/o Ca. En tal sentido, la fertilización con P y K mencionada anteriormente corrige la leve deficiencia de P y agrega una cantidad de seguridad. Lo mismo sucedió con la fertilización con K la que si bien estuvo por encima del nivel de suficiencia se agregó una pequeña cantidad. El objetivo de esta fertilización con P y K fue asegurar que no hubiera deficiencias de estos nutrientes posibilitándose la expresión de la respuesta a N que es el objetivo de este trabajo.

En cuanto a la fertilización con N, de haberse tenido en cuenta el valor de PMN para realizar la fertilización, considerando esta variedad y el AI, hubiese sido necesario fertilizar con una dosis total de  $85 \text{ kg N ha}^{-1}$ .

Cuadro No. 1. Análisis químico del suelo (0-15cm) para el promedio de los bloques

Nutriente	Valor
Ca ( $\text{meq Ca } 100\text{g}^{-1}$ )	$7,3 \pm 0,64$
Mg ( $\text{meq Mg } 100\text{g}^{-1}$ )	$3,5 \pm 0,31$
P ác. cítrico ( $\text{mg kg P}^{-1}$ )	$5,2 \pm 0,90$
K Int. ( $\text{meq K } 100\text{g}^{-1}$ )	$0,4 \pm 0,03$
CIC ( $\text{meq } 100\text{g}^{-1}$ )	$14,8 \pm 0,81$
PMN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	$28,9 \pm 15,70$

## 4.3 RESPUESTAS AGRONÓMICAS DEL CULTIVO DURANTE EL CICLO

### 4.3.1 Población lograda

Las poblaciones logradas sobre cada una de las coberturas difirieron entre sí. Se presume que existió una emergencia despereja en el tiempo entre los AI lo que determina poblaciones de diferentes edades (cuadro No. 2).

Según Gamarra (1996) una población objetivo debe ubicarse en las 250 plantas m<sup>-2</sup>, población que en este trabajo solo se logró sobre el antecesor TL.

La temperatura media promedio en el mes de octubre (16°) fue por debajo de lo recomendable según Borghi y Ernst (2002) como rango óptimo para que no existan problemas de implantación en dicho cultivo. A su vez se presume que cada AI influyó de manera distinta en la temperatura del suelo, humedad, compactación o algún otro parámetro permitiendo explicar las poblaciones inicialmente distintas que luego tienden a igualarse con el tiempo.

Cuadro No. 2. Población lograda sobre los distintos AI

Antecesor	Plantas m <sup>-2</sup>
TL	247 a
VE	183 b
Rg	176 b
TA	140 c
p-valor	0,001

TL= testigo limpio; VE= vegetación espontánea; Rg=raigrás; TA= trébol alejandrino  
Medias poblacionales que no comparten letras en la misma columna son estadísticamente diferentes según el test de Tukey al 5%.

#### 4.3.2 Acumulación de materia seca

Según Fernández (1978), la acumulación de materia seca (MS) de un cultivo, varía en función de la variedad, factores ambientales y disponibilidad de nutrientes, pero se mantiene un cierto patrón de acumulación en casi todas las variedades dentro de una especie.

En este trabajo se observaron diferencias entre la acumulación de MS sobre los distintos AI en R0 y R4 (p= 0,0071 y 0,0054 respectivamente), no fue así a cosecha donde no existió diferencias entre las MS acumuladas. También existió un efecto de las dosis de N sobre la acumulación de MS, donde la dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> marcó la diferencia, dicho comportamiento se mantuvo a lo largo del ciclo del cultivo.

No existió interacción entre el AI y la dosis de N sobre la variable MS. Esto coincide con Terra et al. (2010), quienes encontraron igual repuesta al

agregado de N en el cultivo de arroz, sin existir diferencia por las coberturas utilizadas.

En la figura No. 4 se muestra la producción de biomasa según AI para los distintos momentos fenológicos del cultivo. Se constató una mayor producción de biomasa en TL en comparación a RG durante el ciclo del cultivo. VE y TA, dependiendo del momento, presentaron comportamientos similares a RG o TL.

Similar comportamiento fue encontrado en el trabajo de Terra et al. (2010) donde próximo a R0 el arroz sembrado en el antecesor “sin vegetación invernal” acumuló un 81% más de MS que el antecesor raigrás, no habiendo existido diferencias con lo acumulado sobre trébol rojo y malezas.

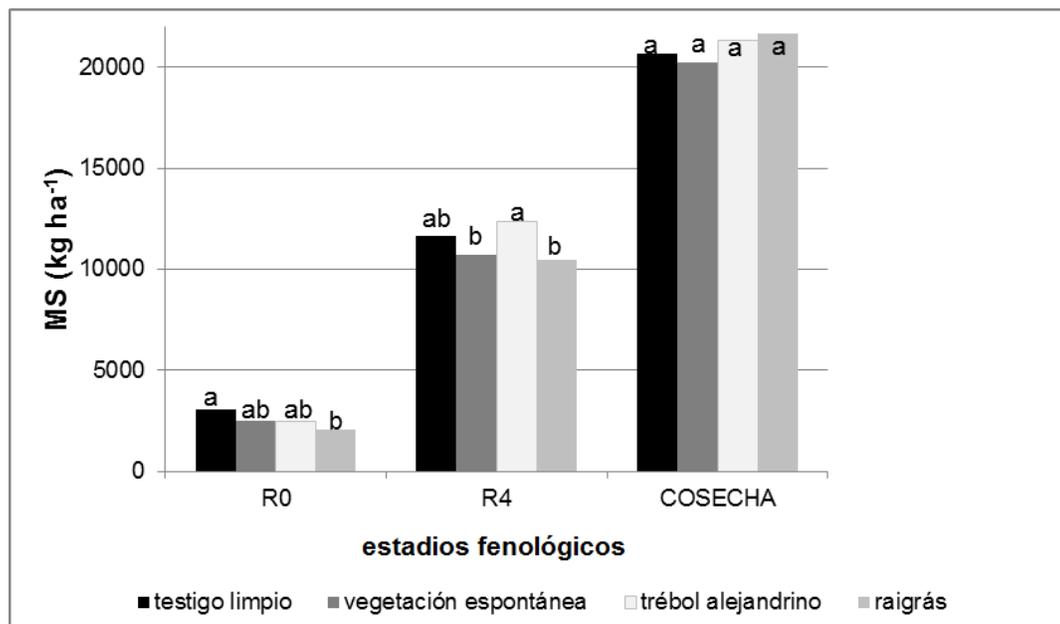


Figura No. 4. Acumulación de MS (kg ha<sup>-1</sup>) en función del AI en diferentes momentos del ciclo del cultivo de arroz

Existieron diferencias al agregado de N en producción de MS a R0, ajustándose un modelo lineal ( $p < 0,0001$ ). La separación de medias mostró que la acumulación de MS con 0 kg N ha<sup>-1</sup> o 50 kg N ha<sup>-1</sup> no se diferenció, pero con 100 kg N ha<sup>-1</sup> se lograron acumulaciones 48 y 27% superiores respectivamente. En este estadio fenológico, debido al fraccionamiento del fertilizante N (50% + 50%), solo se contó con la mitad de la dosis reportada (figura No. 5).

En floración (R4) y cosecha, la mayor acumulación de MS se dio con dosis de 100-150 kg N ha<sup>-1</sup> que no se diferenciaron entre sí, pero sí de la dosis de 0 kg N ha<sup>-1</sup>. La dosis de 50 kg N ha<sup>-1</sup> no se diferenciaron de ninguna de las anteriores.

A partir de R4 y hasta la cosecha, el aumento en MS estuvo explicado por el aumento en el peso de grano por ser este el componente de rendimiento que se está concretando en esta etapa del cultivo (etapa de maduración, Fernández, 1978). Se hace referencia que un 1/5 de la acumulación en planta ocurre a R0, la mitad al estadio de R4 y la otra mitad a la formación de grano. Si a esto se le agrega que el manejo del nitrógeno afecta el peso y tamaño del grano, se explicaría porque las mayores dosis lograron acumular más MS que el testigo al final del ciclo, mientras que la dosis de 50 kg N ha<sup>-1</sup> no se diferenció de ninguno de los dos extremos, ni del testigo (0 kg N ha<sup>-1</sup>) ni del comportamiento con 100/150 kg N ha<sup>-1</sup>, como se puede ver en la figura No. 5.

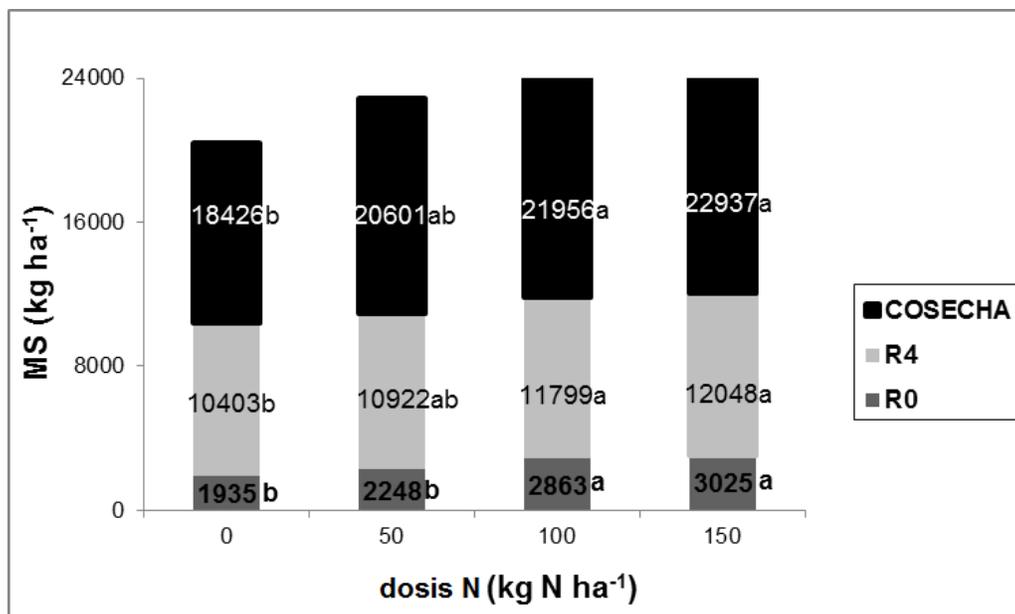


Figura No. 5. Acumulación de MS (kg ha<sup>-1</sup>) en función de las dosis de N agregadas a R0, R4 y cosecha

#### 4.3.3 Altura de planta

La altura de planta mostró diferencias a R0, tanto por el efecto de los AI (p= 0,028) así como por la dosis de N (p< 0,0001), no siendo así para la interacción entre ambas.

Desde el punto de vista de los AI, la altura en TL fue 9% mayor que sobre Rg. Las plantas sobre TA y VE no se diferenciaron de ninguno de estos. Estas diferencias se presumen puedan deberse por ser plantas de distintas edades (cuadro No. 3).

Cuadro No. 3. Altura de plantas en R0 según los diferentes AI

Antecesor	Altura (cm)
TL	52 a
TA	51 ab
VE	49 ab
Rg	48 b
p-valor	0,028

TL= testigo limpio; VE= vegetación espontánea; Rg=raigrás; TA= trébol alejandrino  
Medias poblacionales que no comparten letras en la misma columna son estadísticamente diferentes según el test de Tukey al 5%.

A R0 según las distintas dosis de N se observó que las mayores alturas corresponden a las dosis de 100 y 150 kg N ha<sup>-1</sup>, siendo 10 y 14% mayores a las dosis de 0 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Por su parte, dosis menores determinaron alturas menores reflejando la relación entre la nutrición N y su efecto en el crecimiento vegetal, en este caso la altura de las plantas.

En la determinación a R4, no se encontró efecto de los distintos AI ni de las dosis de N. Posiblemente, hacia estadios más avanzados el aporte del suelo haga desaparecer esas diferencias debido a la contribución proporcionalmente más significativa de un pool de N mayor. Esta apreciación se realiza sobre la base de la rotación donde se instaló el experimento.

Este tipo de comportamiento se repitió en distintas determinaciones, donde si hay un efecto en etapas fenológicas tempranas que luego desaparecen. Las coberturas determinaron una emergencia despareja (poblaciones distintas numéricamente, cuadro No. 2) que luego tendieron a emparejarse.

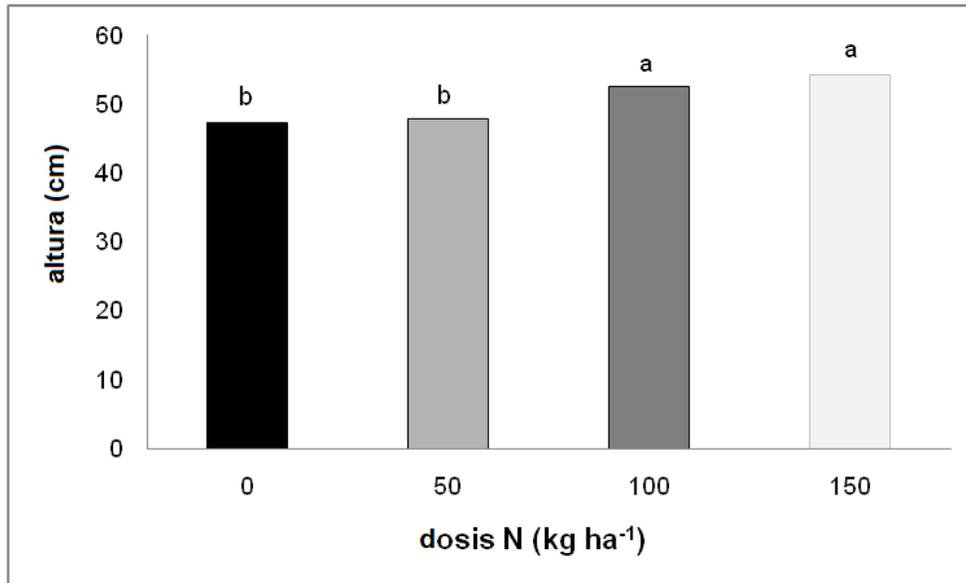


Figura No. 6. Altura (cm) del cultivo a R0 en función de las distintas dosis de N para el promedio de los AI evaluados

#### 4.3.4 Absorción de N por el cultivo

Se analizó absorción de N en grano, paja y total. La interacción de los AI y el nitrógeno no fue significativa.

Solo se encontró efecto de los AI sobre la absorción de N en grano ( $p=0,0353$ ), no existiendo efecto sobre la absorción en paja ni en la biomasa total. La absorción de N en grano sobre TL fue 13% superior a la registrada sobre VE, los restantes tratamientos no se diferenciaron de los antes mencionados ni entre ellos (figura No. 7).

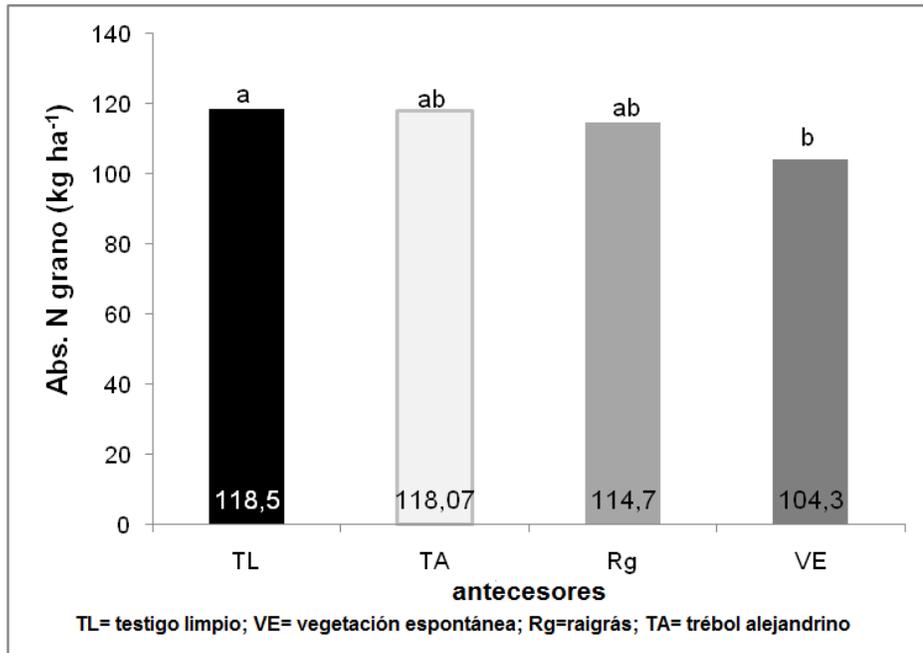


Figura No. 7. Absorción de N en grano (kg ha<sup>-1</sup>) para los diferentes AI evaluados para el promedio de las dosis de N

Las dosis evaluadas marcaron diferencias entre las absorciones en grano y en MS total ( $p < 0,0001$  y  $p = 0,0003$ ). Tanto en la absorción en grano como en la total, las diferencias se observaron entre los tratamientos que agregaron N y el testigo sin N (figura No. 8).

No existió un efecto ni de los AI ( $p = 0,5826$ ) ni la dosis de N sobre la absorción de N en paja ( $p = 0,0871$ ). Esto se podría explicar por la partición que tiene el N en las plantas, se considera que solo 1/3 del N absorbido se encuentra en la paja, parte se pierde al sistema y parte se translocan al grano.

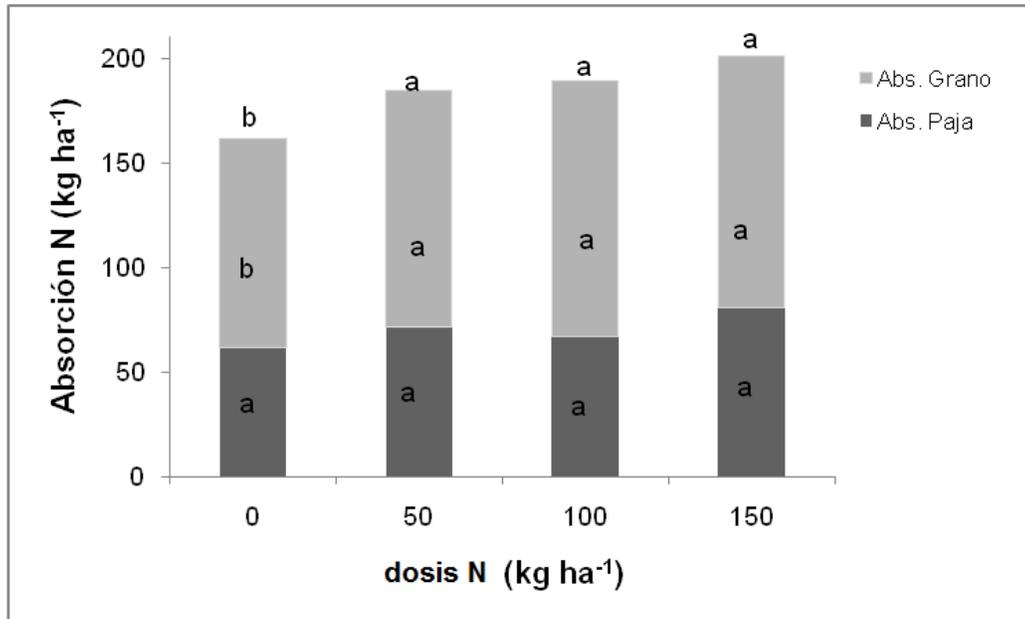


Figura No. 8. Absorción de N en paja, grano y total ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de las diferentes dosis de N evaluadas para el promedio de los AI

#### 4.4 EVALUACIÓN DE LAS RESPUESTAS AGRONÓMICAS DEL CULTIVO DURANTE EL CICLO POR MEDIO DE HERRAMIENTAS DE ASISTENCIA REMOTA

##### 4.4.1 Greenseeker

Se observó en las tres determinaciones realizadas diferencias en los valores de NDVI para los AI evaluados y dosis de N, no siendo así para la interacción de ambas.

En R0 los tratamientos de arroz sembrados sobre TL presentaron el mayor registro el cual fue 10% superior a VE, mientras que las restantes coberturas no se diferenciaron de ninguno de los dos ni entre ellos ( $p=0,0172$ ). En R1 se mantuvo dicho comportamiento, aunque con una leve disminución en los valores absolutos ( $p=0,0288$ ). Finalmente, a R4, el valor observado sobre Rg fue igual al sobre VE y distinto ambos a TL ( $p=0,0084$ ).

Las diferencias encontradas entre el valor promedio correspondiente a TL y VE en R0, que se mantuvo en R1, se pueden adjudicar a un mayor número de plantas en TL que se presume que sean de mayor edad, logrando un desarrollo superior a las emergidas sobre VE (figura No. 9).

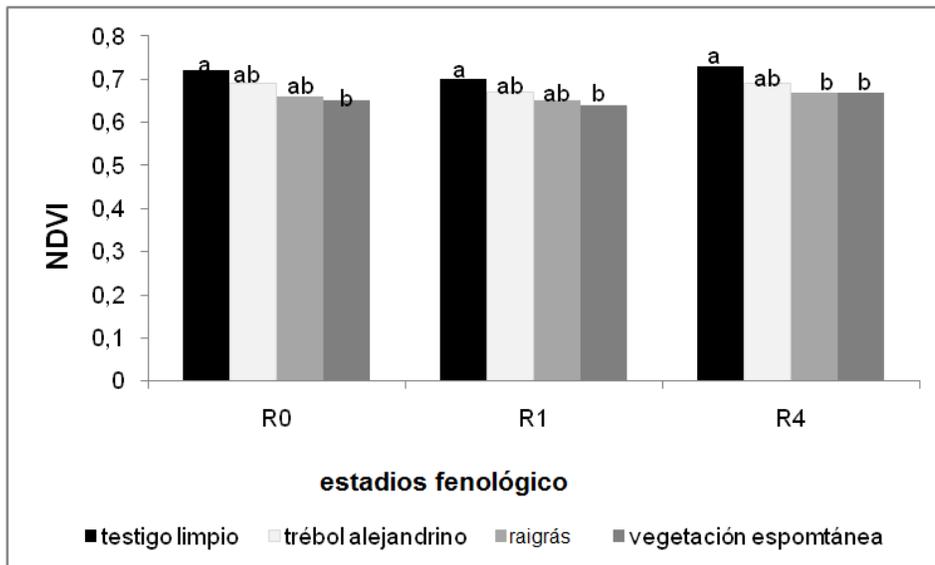


Figura No. 9. Valores de NDVI según el AI en los momentos de R0, R1 y R4 considerando el promedio de las dosis de N

Se observó que las diferencias en los valores de NDVI en función de las dosis de N en R0 presentaron una tendencia casi lineal, donde los mayores valores correspondieron a dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup> y los menores para 0 kg N ha<sup>-1</sup>. La excepción fue con 100 kg N ha<sup>-1</sup> ya que no difieren ni de los reflejados en parcelas con 150 kg N ha<sup>-1</sup> ni con 50 kg N ha<sup>-1</sup>.

En R1 se mantuvo el comportamiento descrito en la determinación anterior, pero el valor promedio correspondiente a 100 kg N ha<sup>-1</sup>, no difiere con la dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup>, pero si con 50 kg N ha<sup>-1</sup>.

A R4, el comportamiento fue similar con respecto a lo ya descrito en R0 (figura No. 10).

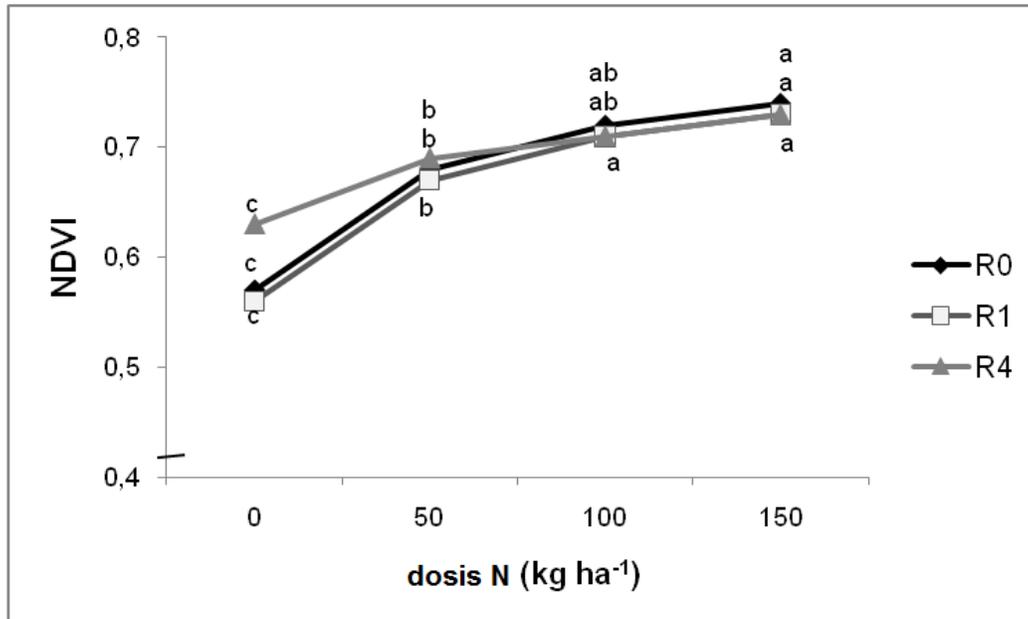


Figura No. 10. Valores de NDVI registrados según las dosis de N evaluadas en los momentos de R0, R1 y R4, para el promedio de los AI evaluados

Se encontró una correlación alta y positiva entre las mediciones de NDVI a R0, R1, R4 y el rendimiento final en grano ( $R= 0,79$ ;  $0,80$ ;  $0,80$  respectivamente) así como con la MS a R0 ( $R= 0,76$ ). En concordancia con lo mencionado en la bibliografía (Marchesi y Castillo, 2016), el índice NDVI podría ser una importante herramienta para conocer el potencial rendimiento final post R0.

#### 4.4.2 Canopeo app

Se observó efecto de las coberturas y dosis de N, no se observó efecto de la interacción entre ambas para esta variable.

Los datos obtenidos de cobertura mediante esta aplicación de teléfono celular permitieron reafirmar como las diferencias a causa de los distintos AI comienzan a desaparecer avanzado el ciclo del cultivo. En la primera determinación (R0) una vez más el antecesor TL presentó una marcada superioridad sobre TA y este sobre Rg; sin diferenciarse VE de TA ni de Rg (figura No. 11).

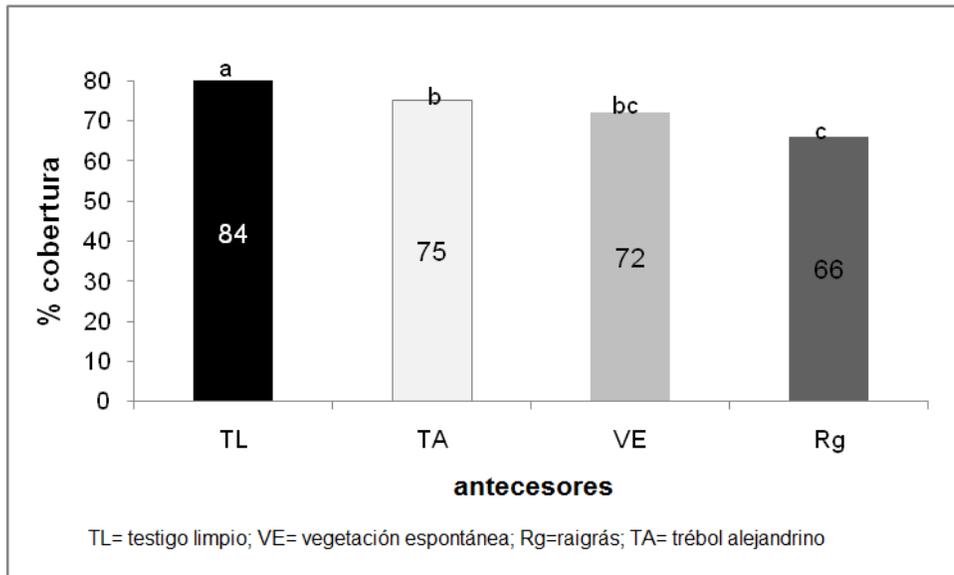


Figura No. 11. Porcentaje de cobertura de la canopia en base a Canopeo App según AI al momento de R0

En R4, las diferencias entre los AI no se detectaron ya que se alcanzó la máxima cobertura, en promedio 69,44%.

Se encontraron diferencias en función de las distintas dosis de N aplicadas, observándose como en estadios tempranos las dosis mayores (100 y 150 kg N ha<sup>-1</sup>) reflejaron mayor cobertura del cultivo sin notarse diferencias entre ellas. En un lugar intermedio, la cobertura lograda con dosis de 50 kg N ha<sup>-1</sup> y la menor con la dosis de 0 kg N ha<sup>-1</sup> (figura No. 12).

Se encontró una alta relación entre los % de cobertura obtenidos por esta aplicación a R0 y los valores de NDVI en cualquiera de los momentos determinados (R0, R1, R4) ya que el primer parámetro es considerado en forma indirecta por el índice mencionado.

Sin embargo, cuando se analizan dichos valores en estadios posteriores se comienzan a minimizar las diferencias en valores absolutos. La causa de esto es que en la primera determinación solo estaba la mitad de la dosis total a aplicar (figura No.13).

El % de cobertura se correlacionó con la acumulación de MS a R0 en forma positiva (R=0,77). Se observó un incremento en la cobertura vegetal desde la dosis 0 kg N ha<sup>-1</sup> hasta 100 kg N ha<sup>-1</sup>, mientras que la lograda con

dosis altas (150 kg N ha<sup>-1</sup>) no logró diferenciarse ni de la de 50 ni 100 kg N ha<sup>-1</sup> (figura No. 13).

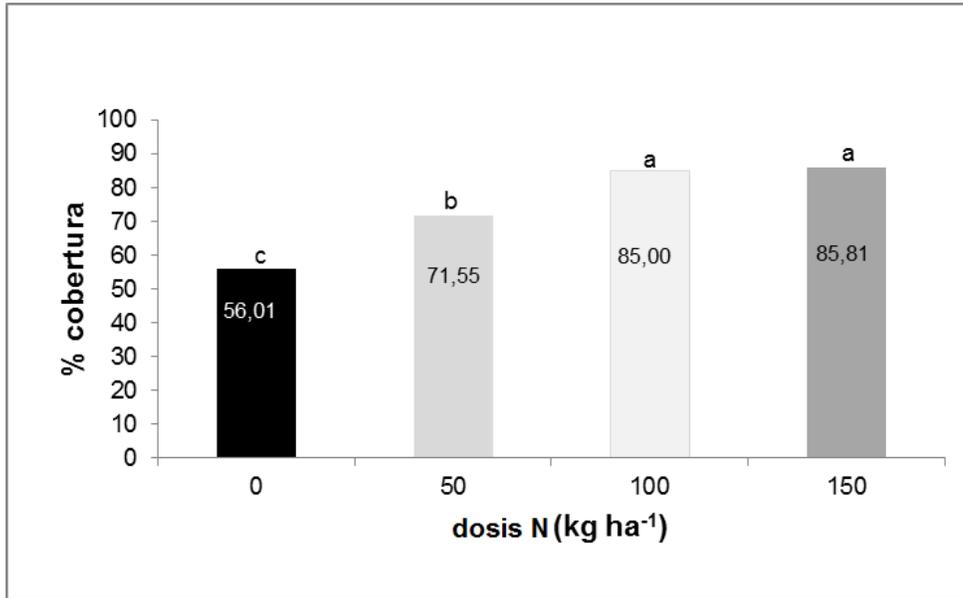


Figura No. 12. Porcentaje de cobertura de la canopia en base a Canopeo App según la dosis de N evaluada en el momento de R0

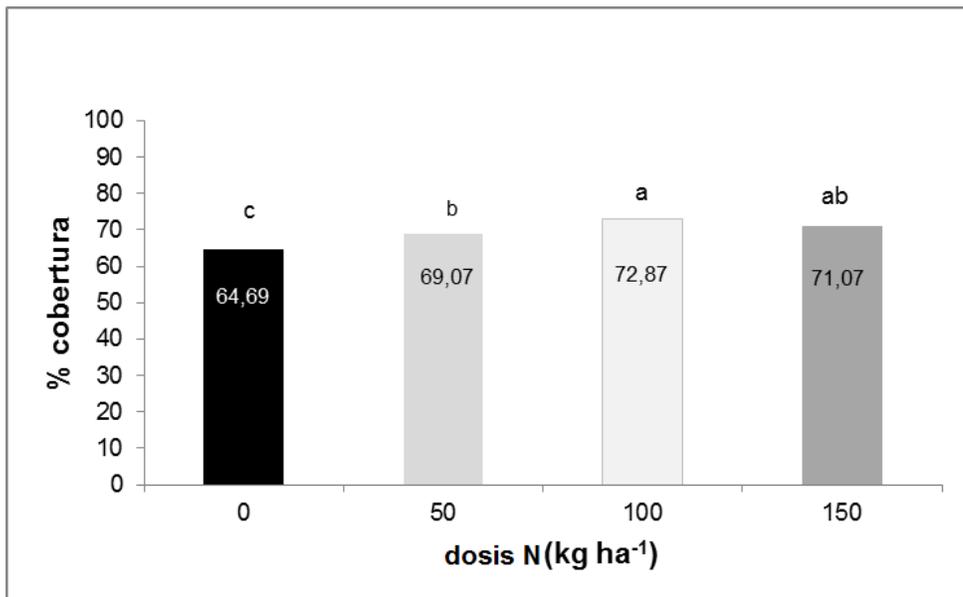


Figura No. 13. Porcentaje de cobertura de la canopia en base a Canopeo App según la dosis de N evaluada en el momento de R4

#### 4.4.3 SPAD

Solo se encontró diferencias a R0, por efecto de las distintas dosis de N. Los diferentes AI, y la interacción entre factores no resultaron significativos en esta oportunidad.

Como se puede ver en la figura No. 14 los valores de SPAD incrementan acorde aumenta la dosis de N aplicada, excepto cuando la dosis fue 100 kg N ha<sup>-1</sup>, la concentración es igual que con dosis de 50 kg N ha<sup>-1</sup> o con 150 kg N ha<sup>-1</sup>.

En este trabajo en el periodo reproductivo (R4) el valor promedio se situó en 39.27 unidades. Este valor fue inferior al reportado como crítico en esta etapa (45 unidades), pero superior al obtenido por Sánchez (2010).

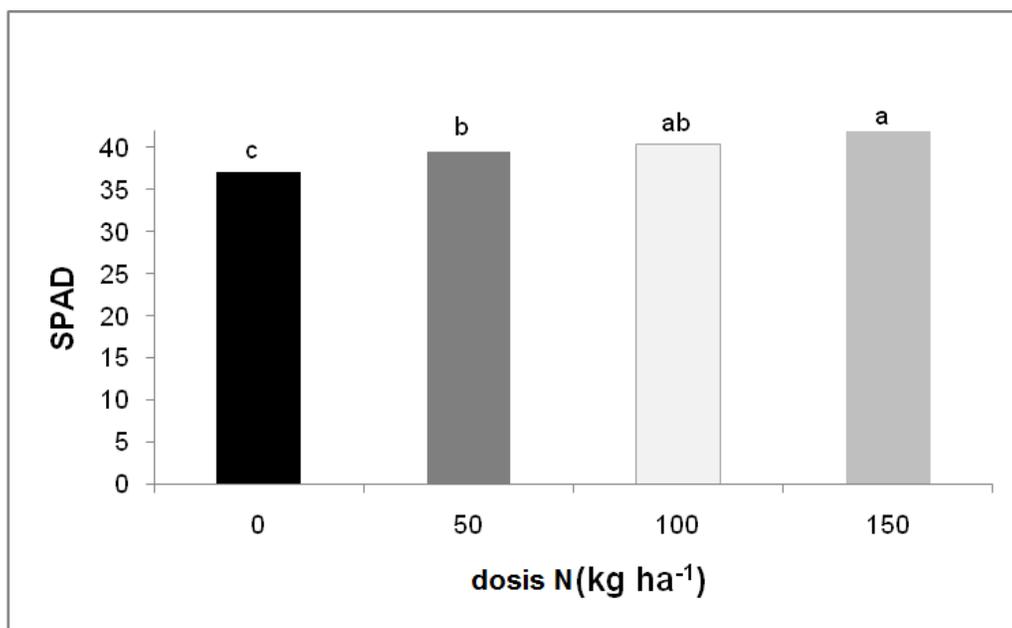


Figura No. 14. Unidades de SPAD en función de las dosis de N evaluadas al momento de R0

#### 4.5 RESPUESTAS AGRONÓMICAS A FIN DE CICLO

##### 4.5.1 Rendimiento de grano

No se observó efecto de los AI ni de la interacción de estas con las dosis de N sobre el RSL. Solo las distintas dosis de N aplicadas presentaron efecto sobre esta variable ( $p < 0,0001$ ). Las medias según las distintas dosis de

N oscilaron entre los 11245 kg ha<sup>-1</sup> sobre el tratamiento testigo (0 kg N ha<sup>-1</sup>) hasta 13363 kg ha<sup>-1</sup> con dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup>.

Con respecto a lo antes mencionado, De Battista (2006) hace referencia que el potencial rendimiento en las situaciones donde es cero el N aplicado, es dependiente de una serie de fuentes de variabilidad. Los factores: cultivar, sitio, características del suelo, historia de chacra, año pueden ser determinante en dicha variable. El contenido de materia orgánica permite anticipadamente poder clasificar el suelo en el grupo con o sin respuesta a la fertilización, el valor reportado como límite para poder discriminar de esta manera es de 4,5% M.O en las condiciones descritas por De Battista y Arias, citados por De Battista (2006). El sitio donde fue realizado este ensayo presentaba un valor de 3% M.O aproximadamente, basado en ese dato era de esperarse respuesta al agregado de N.

Como se observa en el siguiente gráfico (figura No. 15) el RSL aumenta acorde aumentan las dosis de N, de 0 kg N ha<sup>-1</sup> hasta 100 kg N ha<sup>-1</sup>. Cuando la dosis utilizada fue de 150 kg N ha<sup>-1</sup> se pudo notar como dicho rendimiento no se diferencia del obtenido en las otras dos dosis anteriores evaluadas.

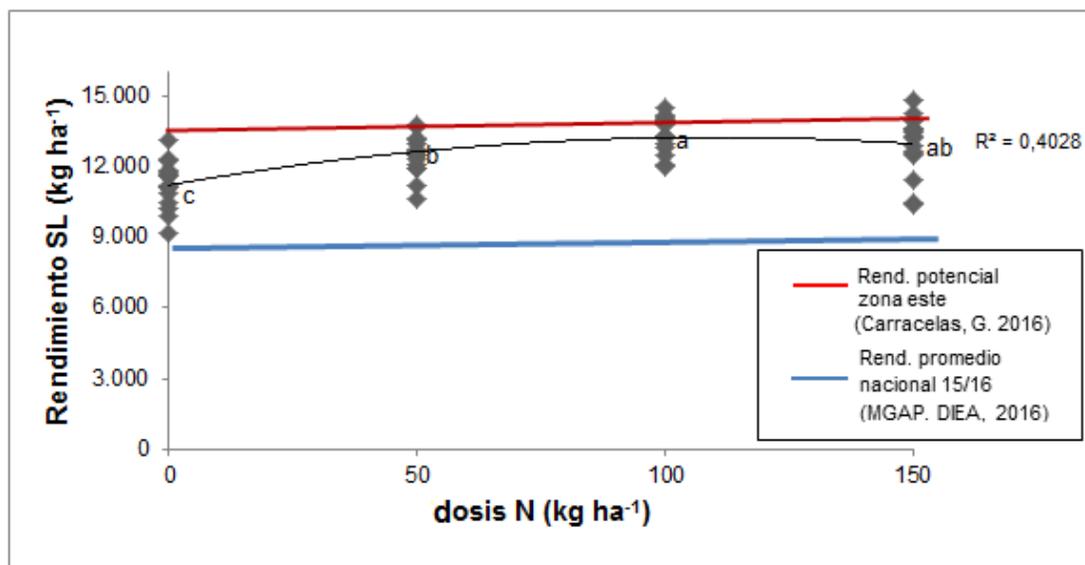


Figura No. 15. Rendimiento SL (kg ha<sup>-1</sup>) en función de las diferentes dosis de N utilizadas, promedio nacional de la zafra 15-16 y potencial nacional para zona Este

Los rendimientos obtenidos en este experimento superaron en 60% el rendimiento promedio nacional de dicha zafra (8094 kg ha<sup>-1</sup>, MGAP. DIEA,

2016), además de ser similares al promedio del ensayo a lo mencionado por Carracelas (2016) como rendimiento potencial del cultivo para la zona Este, 13-14 ton ha<sup>-1</sup> (figura No. 15). Estos rendimientos altos, muy próximos al potencial son los responsables en gran medida de las eficiencias obtenidas en este trabajo.

La variación entre el mayor RSL registrado, TL y el de menor -Rg- fue de 1144 kg lo cual no es diferente según el análisis estadístico utilizado, pero si existe una tendencia clara a tener un comportamiento diferente según el AI.

Similares resultados fueron reportados por Terra et al. (2010), quienes encontraron diferencias estadísticas en el RSL según el AI. El RSL de arroz inmediato a raigrás fue el que presento menor valor. En el otro extremo los mayores rendimientos, se alcanzaron sobre el tratamiento sin vegetación invernal y trébol rojo, asimilables en este trabajo a TL y TA (curvas superiores, figura No. 16).

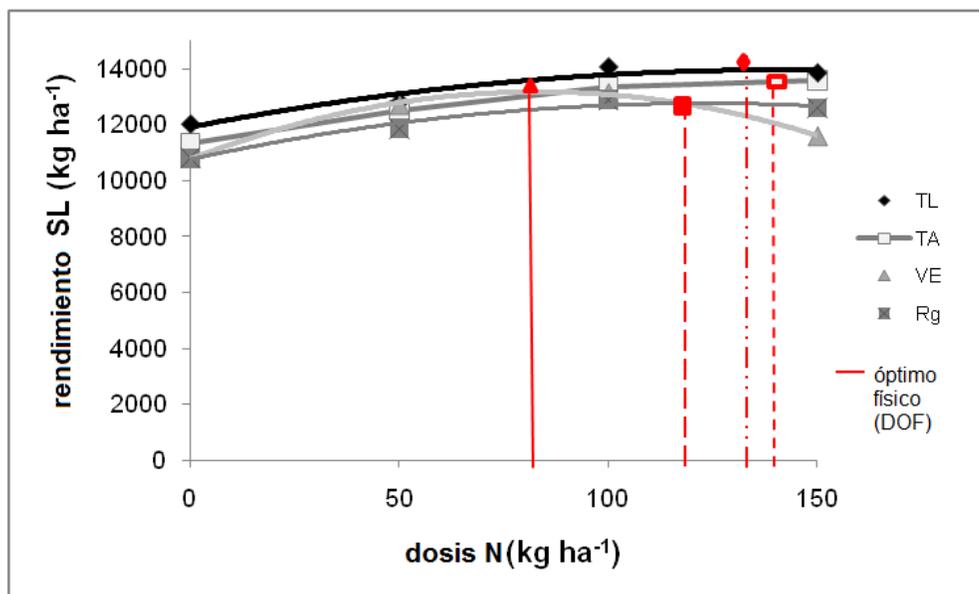


Figura No. 16. Respuesta en rendimiento SL (kg ha<sup>-1</sup>) y óptimo físico de cada AI en función de las distintas dosis de N evaluadas

Si bien no existieron diferencias estadísticas como ya se mencionó, sí existieron diferencias en los valores absolutos de los rendimientos promedios según cada AI. La superioridad de TL sobre Rg, que ya se presentaba en una serie de variables anteriormente, se vuelve a observar en el rendimiento. La posible causa de este comportamiento es que pese a la pérdida de N que se da

en el barbecho, esta es menor a lo necesario por los microorganismos para descomponer los residuos de Rg (dada su relación C/N).

En el gráfico se puede apreciar la respuesta en rendimiento sobre cada AI por medio de modelos cuadráticos, a partir de estos se calcularon la dosis óptima física (DOF) para cada AI. Estos DOF fueron diferentes en función de los AI sobre el cual se sembró el arroz y presentaron valores entre 80 y 138 kg N ha<sup>-1</sup>.

Existió una asociación entre el RSL alcanzado y la acumulación de MS a R0. Por un lado, debido a la relación agronómica entre estas 2 variables y por otro, a la asociación entre la MS a R0 y los valores de las herramientas utilizadas para predecir la respuesta vegetal presentados en el punto anterior, se explica también la relación que existió entre el RSL y los valores de las herramientas utilizadas a R0. A continuación en el cuadro No. 4 se presenta la información mencionada anteriormente.

Cuadro No. 4. Correlación entre el rendimiento en grano (RSL) y las diferentes determinaciones realizadas a R0 según Pearson y nivel de significancia

Determinación	Unidad	R Pearson	p-valor
MS a R0	kg ha <sup>-1</sup>	0,62	<0,0001
Greenseeker	NDVI	0,77	<0,0001
Canopeo	% cobertura	0,78	<0,0001
SPAD	Unidades SPAD	0,47	0,0001

A nivel de las herramientas utilizadas a R0, tanto el Greenseeker como la App Canopeo presentaron correlaciones de medias a altas con el RSL final en grano mientras que las lecturas de SPAD estuvieron poco correlacionadas con la productividad.

Tanto la relación entre la MS a R0 con el RSL, así como los valores a R0 obtenido por medio de las 2 herramientas de mayor correlación con la productividad presentaron una respuesta lineal positiva y significativa (figuras No. 17 y No. 18).

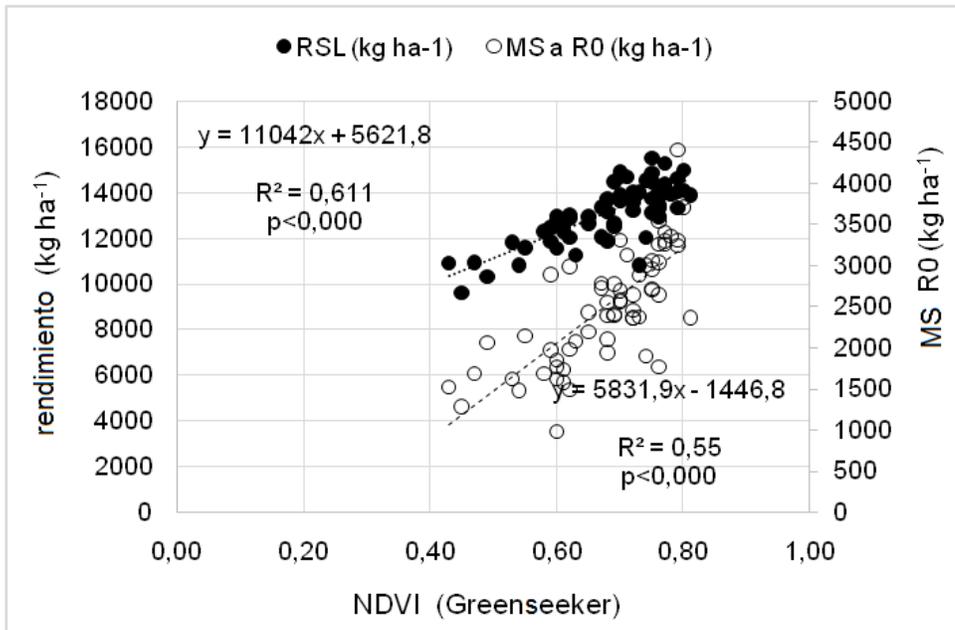


Figura No.17. Relación entre los valores de NDVI medidos a R0, con la materia seca (MS) a R0 y el rendimiento en grano

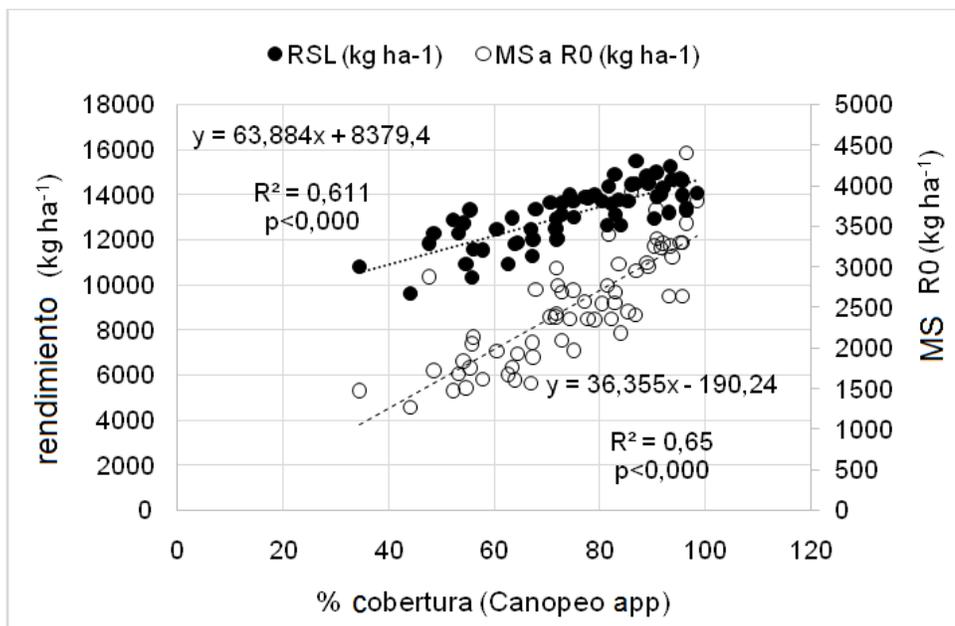


Figura No.18. Relación entre los valores de % de cobertura medidos a R0, con la materia seca (MS) a R0 y el rendimiento en grano

#### 4.5.2 Índice de cosecha

Donald y Hamblin (1976) consideran que el rendimiento biológico de un cultivo cerealero es el rendimiento total de biomasa vegetal, mientras que el índice de cosecha es la relación entre el rendimiento de grano con el rendimiento biológico. El rendimiento de grano es proporcional al índice de cosecha, la correlación entre ambos es de 1 en cambio el rendimiento biológico y el índice de cosecha no están relacionados. En este trabajo, como se vio anteriormente, existió un efecto de las dosis de N en el rendimiento en grano, no siendo así para el IC, a pesar de la relación entre los componentes grano y paja. Esto significó que aquellas situaciones que produjeron más grano también produjeron más biomasa vegetativa.

No se observaron efectos de las dosis de N, de los AI ni de la interacción entre ambos. Quizás la estabilidad en el IC sea una característica de esta variedad, la que posiblemente pudiese ser utilizada como forma de aumentar el rendimiento en grano a través de la generación de una mayor biomasa total.

Cuadro No. 5. Índices de cosecha alcanzados en función de los AI evaluados para el promedio de las dosis de N evaluadas

Antecesor	IC
TL	0,55 a
VE	0,51 a
TA	0,51 a
Rg	0,49 a
p-valor	0,3219

TL= testigo limpio; VE= vegetación espontánea; Rg= raigrás; TA= trébol alejandrino  
Medias poblacionales que no comparten letras en la misma columna son estadísticamente diferentes según la prueba de Tukey al 5%.

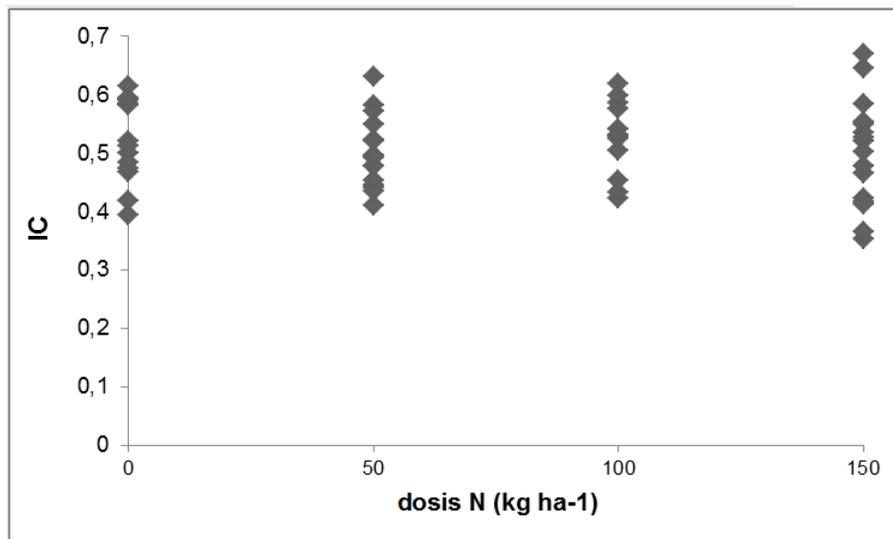


Figura No. 19. Índice de cosecha (IC) alcanzados en función de las dosis de N evaluadas para el promedio de los AI

#### 4.5.3 Componentes de rendimiento

Se analizaron los tres componentes del rendimiento finales (panojas m<sup>2</sup><sup>-1</sup>, granos por panoja, y peso mil granos), con el objetivo de conocer el peso relativo de cada uno de ellos en el resultado final, así como la influencia de los tratamientos evaluados en cada uno de ellos.

Los granos por panojas no se vieron alterados por los distintos tratamientos (AI ni dosis de N) siendo el promedio 99,7 granos panoja<sup>-1</sup>. Este valor es levemente superior al reportado en bibliografía nacional por Molina et al. (2011) como promedio para dicha variedad (92 granos panoja<sup>-1</sup>).

El número de panojas m<sup>2</sup> se vio inalterado por efecto de los distintos AI, sin embargo, si se pudo observar diferencias ante las distintas dosis de N aplicadas. Se observó un mayor número de panojas por unidad de superficie solo entre el tratamiento que recibió la mayor dosis de N en comparación al testigo, no diferenciándose las dosis intermedias ni entre ellas, ni con las dosis extremas (ver cuadro No. 6). Para esta variable y variedad son mencionados valores de referencia entorno a las 500 panojas m<sup>2</sup>, similares a los encontrados en este trabajo.

Cuadro No. 6. Panojas m<sup>-2</sup> según las distintas dosis de N

Dosis (kg N ha <sup>-1</sup> )	Panojas m <sup>-2</sup>
0	467 b
50	495 ab
100	491 ab
150	548 a
p-valor	0,0572

Medias poblacionales que no comparten letras en la misma columna son estadísticamente diferentes según el test de Tukey al 5%.

El PMG difirió en función de los AI Rg vs. TL, no encontrándose diferencias entre los otros dos AI, ni con estos.

Cuadro No. 7. Peso de mil granos alcanzado sobre los diferentes AI evaluados para el promedio de las dosis de N

Antecesor	PMG
Rg	27,98 a
TA	27,56 ab
VE	27,34 ab
TL	27,11 b
p-valor	0,037

TL= testigo limpio; VE= vegetación espontánea; Rg= raigrás; TA= trébol alejandrino  
Medias poblacionales que no comparten letras en la misma columna son estadísticamente diferentes según el test de Tukey al 5%.

En cuanto a las dosis de N, solo el testigo presentó un PMG mayor respecto al tratamiento 150 kg N ha<sup>-1</sup>.

Cuadro No. 8. Peso de mil granos alcanzado con las diferentes dosis de N evaluadas para el promedio de los AI

Dosis (kg N ha <sup>-1</sup> )	PMG
0	28,04 a
50	27,71 ab
100	27,22 bc
150	27,01 c
p-valor	0,0001

Medias poblacionales que no comparten letras en la misma columna son estadísticamente diferentes según el test de Tukey al 5%.

Estas diferencias en el PMG posiblemente se deban a un menor número de panojas m<sup>-2</sup> del testigo y, las que reciben proporcionalmente una mayor cantidad de fotosintatos en el proceso de llenado.

Al respecto Fernández (1978) reportó que solo el 20% de los carbohidratos translocables (azúcares y almidón) al grano, son sintetizados en hojas antes de la floración (R4). El restante 80% proviene de las hojas y tallos remanentes luego de esta etapa y son rápidamente traslocados al grano, lo cual estaría explicando la poca influencia de la biomasa acumulada antes de R4 en el PMG.

#### 4.6 EFICIENCIAS DE USO DEL NITRÓGENO Y SUS COMPONENTES

##### 4.6.1 Eficiencia fisiológica e interna

No se encontró efecto de los AI, dosis de N ni su interacción sobre la eficiencia interna ni fisiológica.

Las EFIS oscilaron desde 58,7 kg kg<sup>-1</sup> con dosis de 50 kg N ha<sup>-1</sup> a 102,8 kg kg<sup>-1</sup> con dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup>. A nivel internacional se menciona 46 kg kg<sup>-1</sup> (Castillo, 2018) como valor promedio, el mismo en este trabajo siempre superado se considera por ende aceptable.

Por su parte, las EUI oscilaron entre 65 y 71 kg kg<sup>-1</sup>, encontrándose entorno a lo reportado como valor de referencia a nivel internacional (55 y 65 kg kg<sup>-1</sup>, Dobermann, 2007).

#### 4.6.2 Eficiencia de recuperación aparente

Existió efecto solo de las dosis de N sobre esta variable ( $p= 0,0031$ ). El comportamiento observado indicó que a medida que se incrementaron las dosis utilizadas la ERA disminuyó.

A medida que la dosis de N aumentó la ERA disminuyó linealmente. El modelo ajustado indicó que por cada kg N adicional la ERA disminuyó un 0,27%.

La mayor ERA se observó con la dosis de 50 kg N ha<sup>-1</sup>. La mitad del fertilizante agregado fue recuperado aparentemente por la planta, valor superior al reportado como promedio internacional (36 %) por Castillo (2018).

Con dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> la ERA fue un 66% de la alcanzada con la anterior dosis, no siendo diferente estadísticamente de la dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup> (33 y 22 % de ERA respectivamente). El promedio general de N recuperado por la planta en este experimento fue de 35%, igual a los reportes internacionales (Castillo, 2018).

Este comportamiento esperable en la ERA, puede ser explicado por la muy alta absorción de N que presentó el testigo. Sobre esta base, el agregado de N logra incrementos de absorción paulatinamente menores, posiblemente debido a que se está llegando a una situación de máxima absorción total.

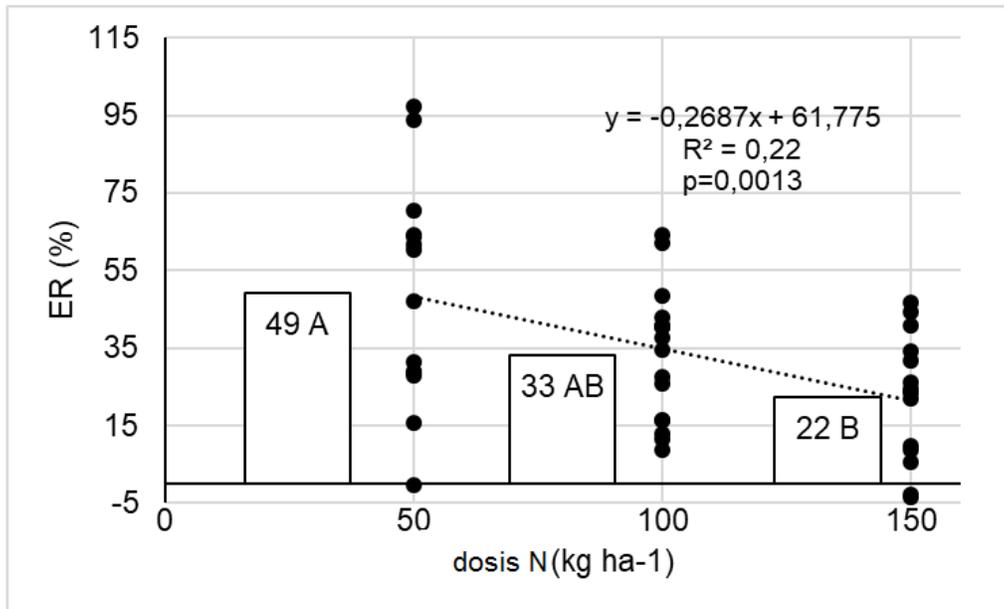


Figura No. 20. Porcentaje de eficiencia de recuperación aparente (ERA) alcanzada con las diferentes dosis de N evaluadas para el promedio de los AI y modelo ajustado para la respuesta observada

Pese a que no hubo efecto de AI sobre esta variable, es interesante observar la gran variación que se da dentro y entre los AI. Se observó una tendencia en los AI (menos Rg), a medida que aumenta la dosis de N, la ERA disminuye. Pero solo en el antecesor VE se logran diferenciar la ERA obtenidas (dosis de 50 kg N ha<sup>-1</sup> vs 150 kg N ha<sup>-1</sup>).

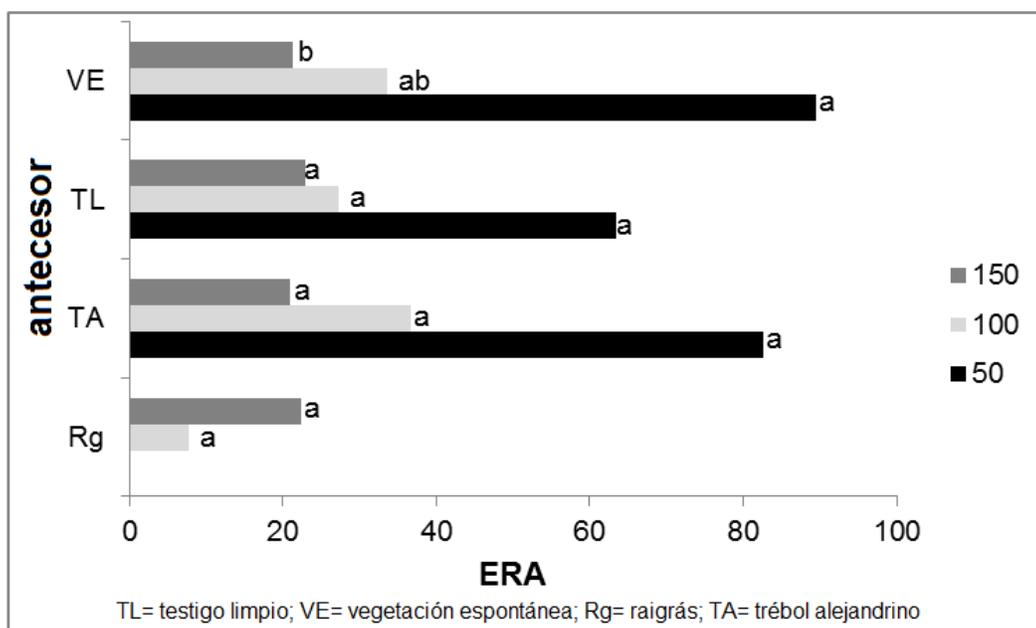


Figura No. 21. Porcentaje de eficiencia de recuperación aparente (ERA) para los distintos AI según la dosis de N ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) utilizado

#### 4.6.3 Eficiencia agronómica

Al igual que con las demás eficiencias, el aumento de la dosis de N implicó una disminución en la EA. Por cada kg de N adicional esta eficiencia disminuyó en 0,13 kg de grano.

La EA solo se vio afectada por las dosis evaluadas. No existió efecto de las coberturas, ni de la interacción de estas con las dosis.

Como se puede observar en el siguiente gráfico, el comportamiento es que a medida que aumenta la dosis utilizada la EA tiende a disminuir.

El menor valor de EA en este trabajo fue el alcanzado con la dosis de  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$ , registro similar al promedio internacional de  $15 \text{ kg kg}^{-1}$  (Castillo, 2018). Por otro lado, este valor fue próximo a lo mencionado por Castillo (2015) como promedio para la variedad Parao ( $15 \text{ kg kg}^{-1}$ ). Por lo tanto, las EA alcanzadas se podrían considerar aceptables, ya que los valores para esta eficiencia correspondientes a las dosis de 50 y  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  estuvieron por encima del valor antes mencionado.

Sin embargo, dichos valores se encuentran por debajo de los mencionados por Aguirre et al. (2019) para las diferentes rotaciones, a dosis de N similares a las de este trabajo, pero utilizando la variedad INIA Olimar.

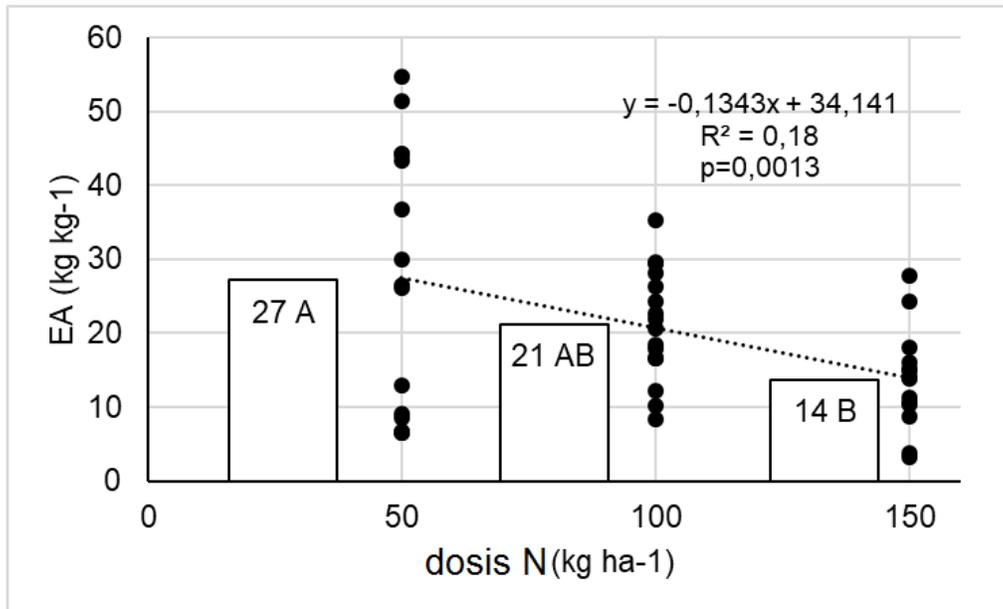


Figura No. 22. Eficiencia agronómica (kg kg<sup>-1</sup>) en función de las distintas dosis de N evaluadas para el promedio de los AI y modelo ajustado para la respuesta observada

#### 4.6.4 Productividad parcial del factor N

La PPFN presentó variaciones en función de las dosis de N, como se aprecia en la figura No. 23. A medida que se aumentaron las dosis utilizadas la PPFN disminuyó significativamente. Esto es esperable ya que se partió de rendimientos altos sin agregado de N. Por lo tanto, ese punto de partida en rendimiento mostró que la respuesta productiva por la fertilización N fue a tasa decreciente, disminuyendo la PPFN asociada a este factor. Aguirre et al. (2019) reportaron similar comportamiento en su trabajo donde ajustaron un modelo logarítmico significativo con dicho comportamiento, en el presente caso se ajusta a un modelo cuadrático ( $p < 0,0001$ ).

No obstante, aun con la dosis de N más alta la PPFN puede ser considerada alta en función de lo reportado por Castillo (2018) como promedio general de varios sistemas arroceros del mundo (51 kg kg<sup>-1</sup>). Se logró ajustar una ecuación de segundo grado que describe la respuesta negativa de la PPFN frente al agregado de dosis crecientes de N.

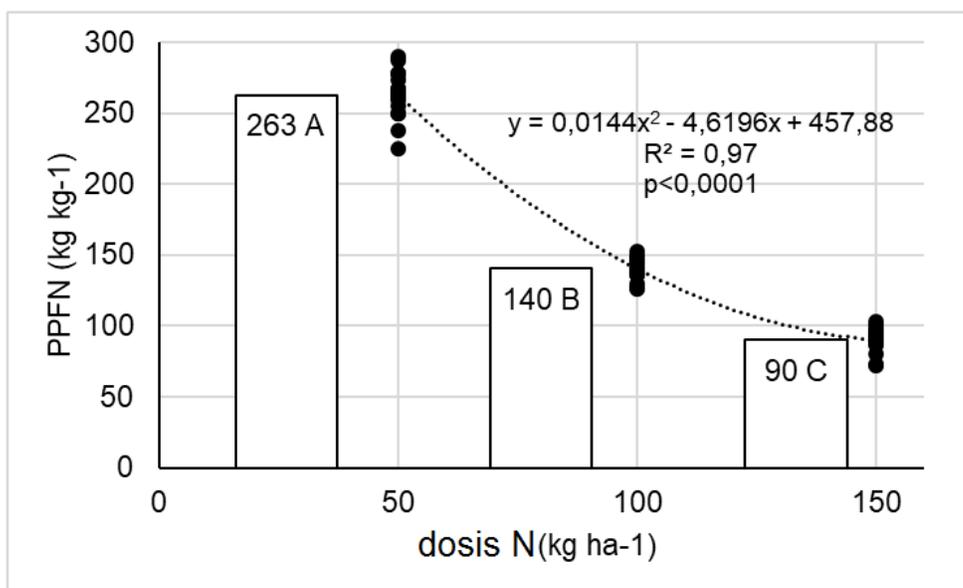


Figura No. 23. Productividad parcial del factor N ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) en función de las distintas dosis de N evaluadas para el promedio de los AI y modelo ajustado para la respuesta observada

#### 4.7 INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para las variables analizadas, tanto en la etapa durante el ciclo del cultivo, así como entorno a la cosecha, los factores AI y la dosis de N agregada explicaron las variaciones observadas. Para el factor AI, existieron diferencias en las diferentes variables de respuesta y éste. No obstante, el mismo AI mostró un comportamiento diferente para las variables analizadas a lo largo del cultivo. Esto es, el AI sobre el cual se alcanzó el máximo registro para una variable no fue el mismo que para otra variable. Sin embargo, para el factor dosis de N, existieron dosis que generaron una respuesta similar para las diferentes variables analizadas a lo largo del ciclo del cultivo. Sumado a esto, estas variaciones fueron de mayor magnitud en comparación al AI.

A nivel de acumulación de MS, entendida esta variable como de estrecha relación con el potencial de rendimiento en grano, las diferencias encontradas se mantuvieron a lo largo del ciclo del cultivo. En tal sentido, el análisis estadístico para esta variable en función del N agregado mostró que las máximas acumulaciones de MS se alcanzaron con una dosis de N similar a la que permitió alcanzar el máximo rendimiento en grano. La información mostró

que la máxima acumulación de MS en los diferentes momentos y el máximo rendimiento se obtuvieron con dosis de hasta 100 kg N ha<sup>-1</sup>.

El rendimiento en grano mostró para la dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> el máximo valor mientras que el alcanzado con la dosis de 50 kg N ha<sup>-1</sup> no fue estadísticamente diferente a la dosis mencionada. A modo de referencia, la dosis de N recomendada para esta variedad (Parao) por medio de la herramienta de asistencia a la fertilización Fertiliz-Arr de INIA (2015), hubiese sido de 85 kg N ha<sup>-1</sup> en base al P.M.N medido previo a la instalación del experimento (cuadro No. 1).

Considerando la productividad (si bien lo mismo aplica para las demás variables agronómicas del cultivo como MS, altura, absorción de N), el hecho de que no se haya encontrado interacción entre los factores AI y dosis de N, aporta elementos al análisis de una serie de inquietudes que se mantienen a la hora de manejar estas variables en condiciones reales de producción.

A nivel productivo comercial, es conocida la diferencia en el potencial de rendimiento alcanzado en función de los diferentes AI. En tal sentido, es manejado el concepto de corregir las limitaciones del AI bajo el supuesto de incremento de las dosis de N agregadas, aspecto no constatado en este trabajo. En el presente trabajo, existió una respuesta a la fertilización N asociada a cada AI evaluado (figura No. 15). Si bien existieron diferencias en rendimiento en función de los AI, el menor rendimiento medio alcanzado (12635 kg ha<sup>-1</sup>) en el peor AI (vegetación espontánea), la productividad alcanzada sobre éste fue elevada y cercana al potencial de rendimiento de la especie como se mencionó en el punto 4.5.1.

Este último aspecto, se relaciona con la EUN por medio de la producción en grano en función de la dosis de N agregada (PPFN) como de la cantidad total de N absorbido (EUI). En el caso del primer componente de la EUN (PPFN), el hecho de partir de un rendimiento medio de 11825 kg ha<sup>-1</sup> sin agregado de N y considerando lo mencionado del potencial de rendimiento de la especie, indica que es esperable que la tasa de incremento en rendimiento por agregado de N es menor que en una situación deficitaria de este nutriente. No obstante, la disminución en la PPFN por el incremento de la dosis de N agregada alcanzó a la máxima dosis de N evaluada, un valor entorno a los 100 kg grano kg N, lo que es mayor a valores de referencia internacionales los que se sitúan en los 80 kg grano por kg N agregado (Dobermann, 2007). Sin dudas el hecho de alcanzar esta productividad con un bajo agregado de N como fertilizante se debe a un alto suministro de N del suelo al cultivo. Esta particularidad es típica del sistema arrocero uruguayo en comparación a otros sistemas productores del mundo.

Lo mencionado arriba respecto al incremento de rendimiento en grano observado por incremento de las dosis de N, pero a tasas decrecientes se observó claramente en el análisis de la EA. En tal sentido, la diferencia en los kg de grano producido por encima del tratamiento sin N agregado disminuye conforme aumenta la dosis de N agregada. Como se verá con la EUI y la ERA, esto se debió más a factores genéticos, responsables de la producción de grano, ya que los otros valores de los parámetros de eficiencia fueron altos. Para el promedio de las dosis de N evaluadas la EA alcanzada fue  $20 \text{ kg kg}^{-1}$  valor cercano a lo reportado como óptimo (Dobermann, 2007).

El alto aporte de N del sistema sumado al N agregado vía fertilizante se resume en el cálculo del parámetro EUI, la que, si bien no presentó diferencias significativas en ninguno de los dos factores, alcanzó valores medios altos ( $68 \text{ kg kg}^{-1}$ ) respecto a los reportes internacionales ( $60 \text{ kg kg}^{-1}$ ). Entonces, la capacidad de un material genético de absorber contenidos elevados de N, pero relacionados a la capacidad de esta variedad de convertir los recursos en grano hizo que se alcance una EUI elevada como se mencionó. En resumen, la variedad seleccionada para este experimento, Parao, moderna y de alto potencial de rendimiento explica los resultados obtenidos

Por otro lado, y abordando aspectos del N, pero relacionados al uso del fertilizante, la ERA media del experimento fue similar a la referencia manejada internacionalmente para un amplio espectro de situaciones, sistemas productivos, y dosis de N principalmente (36%). Es posible que de haberse fraccionado las dosis de N total con mayor énfasis en la primera cobertura (suelo seco y mayor eficiencia de uso del fertilizante) se hubiese podido apreciar una ERA mayor. No obstante, a la dosis de N  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  la ERA lograda fue de 50%, valor superior al 36% mencionado.

En términos generales, para cada uno de los componentes de la EUN analizados y basados en el análisis estadístico realizado, existió una dosis que permitió alcanzar los mayores registros de estas eficiencias que se encontró entre el rango de dosis de 50 y  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  (figuras No. 20, No. 22 y No. 23).

Coincidentemente, al igual que lo mencionado para la variable rendimiento en grano, la dosis que hubiese sido recomendada según la herramienta de cálculo de fertilización Fertiliz-Arr de INIA (2015) hubiese permitido estar en el rango de dosis de N donde se alcanzaron los máximos registros de las diferentes eficiencias calculadas.

Si bien los objetivos de este trabajo no fueron validar esa tecnología, los resultados muestran que la dosis manejada por este software hubiese permitido

al menos en este experimento, alcanzar valores de rendimiento entorno al máximo, como se mencionó arriba, así como combinar con máximos valores de EUN.

Considerando lo mencionado arriba, en este trabajo si se pretendió realizar un monitoreo de las principales variables agronómicas por medio de tres herramientas, 2 sensores (SPAD y Greenseeker) y 1 aplicación de teléfono móvil (Canopeo App). Al menos en este trabajo de investigación, dos de las 3 herramientas utilizadas, a través del NDVI y el % de cobertura vegetal (Greenseeker y Canopeo App respectivamente) al momento de R0, fueron capaces de detectar un máximo para estos indicadores, seguidos por registros a dosis de N superiores que no presentaron diferencias estadísticas para los valores mostrados por esas herramientas. Los valores de SPAD fueron máximos a dosis máxima de N por lo que no fueron sensibles para detectar el máximo rendimiento en grano en etapas tempranas.

El análisis mostró una asociación media a alta del NDVI y el % de cobertura con la acumulación de MS a R0 y el rendimiento en grano lo que hace interesante seguir investigando en estas tecnologías como herramienta de diagnóstico de respuesta en rendimiento.

A nivel práctico y considerando lo temprano en el ciclo del cultivo donde se encontraron estas asociaciones (R0), sería posible conocer la existencia o no de respuesta en rendimiento en grano frente a una fertilización N, por medio de un valor crítico de referencia. Si bien sería necesario profundizar a futuro, tomando como base la información aquí generada, en este trabajo para la dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> que alcanzó las máximas acumulaciones de MS, rendimiento y valores de eficiencias, estas herramientas mostraron valores de 0,72 y 85% para Greenseeker y Canopeo app respectivamente. Por encima de esta dosis de N, los valores que indicaron estas herramientas experimentaron un plateau, el cual no presentó diferencias significativas con el registro anterior.

## 5 CONCLUSIONES

El rendimiento en grano, la respuesta a la fertilización N y la EUN del arroz no presentaron diferencias asociadas al AI, por lo que se rechaza la hipótesis planteada. Las diferencias encontradas en estas variables estuvieron asociadas a las dosis de N evaluadas, las que presentaron una respuesta en rendimiento similar en cada AI. El incremento en grano constatado por el agregado de N no fue suficiente para mantener ninguna de las EUN evaluadas.

La dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> permitió maximizar la productividad alcanzando valores de EUN similares a los reportados internacionalmente para este tipo de sistemas.

El efecto de los AI se observó hasta mediados de ciclo del cultivo en parámetros vegetativos como acumulación de MS y altura de planta. En etapas posteriores a R0 estas diferencias desaparecieron. A fin de ciclo solo la absorción de N en grano varió con el AI no relacionándose con el rendimiento alcanzado.

Existió una relación lineal y positiva entre la MS acumulada a R0 y el RSL final, la que pudo ser detectada por medio de las herramientas Greenseeker y Canopeo App. Tanto los valores de NDVI y % de cobertura a R0 se asociaron en forma directa con el RSL final por lo que podrían profundizarse estudios con el fin de incorporarlos como herramientas para el manejo del cultivo.

## 6 RESUMEN

El cultivo de arroz en Uruguay históricamente ha alternado el uso del suelo con pasturas y en los últimos años ha existido una intensificación de los sistemas, ya sea aumentando la frecuencia de arroz o por la inclusión de otros cultivos. Esto último, sumado a la diversidad de antecesores invernales (AI) sobre los que se siembra el cultivo, ha coincidido con un período donde las dosis de nitrógeno (N) se han duplicado (40 vs. 80 kg ha<sup>-1</sup>). Este incremento de dosis se justificó como la forma de concretar mayores rendimientos a través de incrementar el aporte de N al cultivo, levantando la limitante de la intensificación de los sistemas. El objetivo de este trabajo fue cuantificar la respuesta a la fertilización N y la eficiencia de uso del N (EUN) sobre distintos AI en el cultivar de arroz Parao. En la zafra 2015-2016 se instaló un experimento sobre un rastrojo de soja del verano previo. En otoño se generaron los contrastes de AI mientras que en primavera se sembró el arroz sobre los diferentes AI. Se utilizó un diseño en parcelas divididas con 4 repeticiones. Los tratamientos correspondientes a la parcela mayor fueron los 4 AI; testigo limpio (TL), vegetación espontánea (VE), *Lolium multiflorum* (Rg), *Trifolium alexandrinum* (TA) y en las parcelas menores fueron las dosis de N: 0, 50, 100 y 150 kg N ha<sup>-1</sup>. Durante el ciclo se determinaron la población lograda, la materia seca (MS) y la altura de planta. En este período también se realizaron lecturas de SPAD, NDVI, cobertura del cultivo. A cosecha se determinó rendimiento en grano (RSL) y paja, concentración de N, componentes de rendimiento, índice de cosecha y % esterilidad. Se calcularon la productividad parcial del factor N (PPFN), eficiencia fisiológica (EFIS), eficiencia de uso interna (EUI), eficiencia de recuperación aparente (ERA) y la eficiencia agronómica (EA). El efecto de los AI mostró diferencias solo en etapas tempranas del ciclo, mientras que el N presentó diferencias durante todo el ciclo en las variables analizadas, no existiendo interacción entre estos factores. El rendimiento promedio del experimento fue 12499 kg ha<sup>-1</sup>. La dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> permitió maximizar la productividad siendo 18% superior a la dosis 0N (11825 kg ha<sup>-1</sup>). Los valores de EUN fueron de 140 kg kg<sup>-1</sup>, 32% y 22 kg kg<sup>-1</sup> para la PPFN, ERA y EA respectivamente. Si bien no se detectaron diferencias (p= 0,0553) entre los AI para el rendimiento en grano, el TL logró 1144 kg ha<sup>-1</sup> más que Rg (12045 kg ha<sup>-1</sup>). La MS a R0 y el RSL final presentaron una relación lineal y positiva, con los valores de NDVI y % de cobertura medidos a mediados de ciclo (R0), los que podrían ser considerados en futuras investigaciones como herramienta de predicción de la respuesta a la fertilización N y el rendimiento final.

Palabras clave: Antecesores de arroz; Fertilización N; EUN.

## 7 SUMMARY

In Uruguay, rice usually alternates the soil use with pastures and in the last years these rotations have been intensified with the inclusion of other crops or shorter pastures. The latest, in addition to winter predecessors (WP) over which rice is seeded, has coincided with a period of increasing nitrogen (N) fertilization, which has doubled (40 vs. 80 kg ha<sup>-1</sup>). The N fertilization increasing was justified as the way to reach higher yields through a great N supply as well as correcting system intensification. The main objective of this study was to evaluate the winter cover crops and nitrogen rate effect on N use efficiency (NUE) and N response in Parao rice variety. In the 2015-2016 growing season, a field trial was installed over a soybean stubble growth the previous summer. During this autumn, the WP were installed while the rice crop was seeded in the spring over these WP. A split-plot design with 4 replications was used. Treatments evaluated in the whole plot-factor were bare soil (BS), spontaneous vegetation (SV), *Lolium multiflorum* (Rg), *Trifolium alexadrinum* (TA), while in the split-plot factor were 0, 50, 100 y 150 kg N ha<sup>-1</sup>. Throughout the crop cycle variables like plant population, dry matter (DM) and plant height were determined. In this period, SPAD, NDVI and rice % coverage measurements also were conducted. At harvest were determined grain (YDC) and plant yield, %N of grain and straw, yield components and harvest index. Furthermore, some NUE parameters were calculated like partial factor productivity of N (PFPN), physiologic efficiency (PE), internal use efficiency (IUE), apparent recovery efficiency (ARE) and agronomic efficiency (AE). The WP effect has shown differences only at early crop stages while N effects were observed along the whole crop cycle on the analyzed variables, without interaction between both factors (WP and N). Rice mean yield was 12499 kg ha<sup>-1</sup>. The dose 100 kg N ha<sup>-1</sup> reaches the maximum productivity being 18% higher than 0N treatment (11825 kg ha<sup>-1</sup>). Calculated values of the NUE were 140 kg kg<sup>-1</sup>, 32%, 22 kg kg<sup>-1</sup> for PFPN, ARE and AE respectively. Even when no differences (p=0,0553) among WP were detected for grain yield, BS reaches 1144 kg ha<sup>-1</sup> over Rg predecessor yield (12045 kg ha<sup>-1</sup>). The DM at R0 stage and the YDG showed a linear and positive relation with NDVI and % rice coverage values measured at the middle cycle (R0), aspect to be considered in future research as a prediction tool for rice N response and grain yield.

Key words: Rice antecessor; N fertilization; NUE.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- 1.ACA (Asociación Cultivadores de Arroz, UY). 2013. Guía de buenas prácticas agrícolas. Montevideo. pp. 19-20.
- 2.Aguirre, M.; López, J. F.; Castillo, J.; Macedo, I.; Terra, J. 2019. Eficiencia de uso del nitrógeno en el cultivo de arroz sobre rotaciones contrastantes. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 45-48.
- 3.Ali, A. M.; Thind, H. S.; Sharma, S.; Varinderpal-Singh, S. 2014. Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and Greenseeker optical sensor in north-western India. *Field Crops Research*. 161:11-15.
- 4.Arnall, D.; Mallarino, A.; Ruark, M.; Varvel, G.; Solie, J.; Stone, M.; Mullock, J.; Taylor, R.; Raun, W. 2013. Relationship between grain crop yield potential and nitrogen response. *Agronomy Journal*. 105:1335-1344.
- 5.Beecher, H.; Thompson, J.; Bacon, P.; Dunn, B. 1994. Soil nitrogen supply to rice: crop sequence effects. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 34:987-994.
- 6.Bell, L.; Moore, A. 2012. Integrated crop- livestock systems in Australian agriculture: trends, drivers implications. *Agricultural Systems*. 111:1-12.
- 7.Boaretto, A.; Muraoka, T.; Trevelin, P. 2007. Uso eficiente del nitrógeno de los fertilizantes convencionales. *Informações Agronômicas*. 120:13-14.
- 8.Borghi, E.; Ernst, O. 2002. Bases fisiológicas del cultivo de arroz en Uruguay. Paysandú, Facultad de Agronomía. EEMAC. 9 p.
9. Carracelas, G. 2016. Determinación del potencial y brecha de rendimiento: arroz en Uruguay. *Arroz*. no. 87:30-33.
10. Castillo, J.; Bonilla, F.; Lucas, T.; Amaral, R.; Terra, J.; Bordagorri, P. 2013a. Comportamiento agronómico de grupos de madurez

contrastantes de soja en suelos arroceros del Este. (en línea). In: Jornada Anual Arroz- Soja (2013, Treinta y Tres). Resultados experimentales 2012-2013. Montevideo, INIA. pp. 4-6 (Actividades de Difusión no. 713). Consultado 12 oct. 2019. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7995/1/Ad-713-c.9-p.4-6.pdf>

11. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2013b. La integración del cultivo de soja a la rotación arroz-pasturas en el Este. Arroz. no.7:36-39.
12. \_\_\_\_\_. 2015. En sus dosis justas: N-P-K como forma de explorar altos rendimientos en arroz. (en línea). In: Seminario de Actualización Técnica en Fertilización de Arroz (2015, Treinta y Tres, Uruguay). Puesta a punto y avances de información sobre la nutrición del cultivo de arroz. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 1-6. Consultado 28 ago. 2019. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4762/1/Articulo-JCastillo-2.pdf>
13. \_\_\_\_\_. 2018. Ciclo del nitrógeno en el cultivo de arroz en Uruguay: Estudios con técnicas isotópicas y convencionales. Tesis MSc. Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 92 p.
14. Chebataroff, N. 1982. Manejo de suelos en el cultivo de arroz y posibilidades de incorporación de nuevos cultivos en la rotación. Miscelánea CIAAB. no. 47. 11 p.
15. \_\_\_\_\_. 2012. Arroz uruguayo. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 87-117.
16. Counce, P.; Keisling, T.; Mitchell, A. 2000. A uniform objective and adaptive system for expressing rice development. Crop Science. 40:436-443.
17. Courdin, V.; Hernández, A. 2013. Dinámica del cultivo de arroz en Uruguay en el “nuevo” escenario agropecuario (2000-2010). Cangüé. no. 34:21-31.
18. Deambrosi, E.; Méndez, R. 2000. Firmes beneficios de la rotación arroz-pasturas. Arroz. 6(23):20-23.

19. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2007. Respuesta de cultivares de arroz de tipo indica a densidades de siembra y aplicaciones de N en la zona Este de Uruguay. Montevideo, INIA. pp. 9-10 (Serie Técnica no. 167).
20. \_\_\_\_\_.; Montosi, F.; Saravia, H.; Blanco, P.; Ayala, W. eds. 2009. 10 años de la Unidad de Producción Arroz- Ganadería. Montevideo, INIA. 209 p. (Serie Técnica no. 180).
21. De Battista, J. J. 2006. Fertilización del arroz con NPK en Entre Ríos. In: Benavidez, R. A. ed. El arroz; su cultivo y sustentabilidad. Entre Ríos, EDUNER. pp. 379-390.
22. De la Casa, A.; Ovando, G.; Bressanini, L.; Martínez, J. 2016. Empleo del NDVI de una cámara digital modificada para estimar la cobertura del cultivo de papa bajo distintas condiciones de fertilización nitrogenada. (en línea). Agriscientia. 33:75-88. Consultado 13 feb. 2019. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/317602208\\_Empleo\\_del\\_NDVI\\_de\\_una\\_camara\\_digital\\_modificada\\_para\\_estimar\\_la\\_cobertura\\_del\\_cultivo\\_de\\_papa\\_bajo\\_distintas\\_condiciones\\_de\\_fertilizacion\\_nitrogenada](https://www.researchgate.net/publication/317602208_Empleo_del_NDVI_de_una_camara_digital_modificada_para_estimar_la_cobertura_del_cultivo_de_papa_bajo_distintas_condiciones_de_fertilizacion_nitrogenada)
23. Deng, F.; Wang, L.; Ren, W.; Mei, X. 2014. Enhancing nitrogen utilization and soil nitrogen balance in paddy fields by optimizing nitrogen management and using polyaspartic acid urea. Field Crops Research. 169:30-38.
24. Dillon, K. A.; Walker, T. W.; Harell, D. L.; Krutz, L. J.; Varco, J. J.; Koger, C. H.; Cox, M. S.; 2012. Nitrogen Sources and Timing effects on Nitrogen Loss and Uptake in Delayed flood rice. Agronomy Journal. 104:465-472.
25. Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency-measurement and management. In: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices (1<sup>st</sup>., 2007, Brussels, Belgium). General principles, Strategy for their adaptation and voluntary initiatives vs. regulations. Paris, France, s.e. pp. 1-28.
26. Donald, C. M.; Hamblin, J. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. Advance in Agronomy. 28:361-405.

27. Fernández, F. 1978. Etapas del desarrollo de la planta de arroz para propósitos de evaluación y adiestramiento en el IRRI. *In*: Seminario Interno CIAT (16º., 1978, Colombia). Trabajos presentados. Cali, Colombia, CIAT. pp. 1-10.
28. Gamarra, G. 1996. Arroz: manual de producción. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. 440 p.
29. García, A. 2018. Selección por eficiencia de uso de nitrógeno (N) y fósforo (P). *In*: Seminario Internacional 1914-2014: un Siglo de Mejoramiento de Trigo en la Estanzuela (2014, La Estanzuela, Colonia). Trabajos presentados. Montevideo, INIA pp. 87-98 (Serie Técnica no. 241).
30. Gonzalez-Esquivá, J., Oates, M., García-Mateos, G., Moros-Valle, B., Molina-Martínez, J.; Ruiz-Canales, A. 2017. Development of a visual monitoring system for water balance estimation of horticultural crops using low cost cameras. *Computers and Electronics in Agriculture*. 141:15-26.
31. Gutiérrez- Soto, M.; Cadet-Piedra, E.; Rodríguez- Montero, W.; Araya-Alfaro, J. 2011. El Greenseeker y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. Nota técnica. *Agronomía Mesoamericana*. 22:397- 403.
32. Harell, D.; Walker, T.; Tubana, B.; Phillips, S. B. 2011. Estimating rice grain yield potential using normalized difference vegetation index. *Agronomy Journal*. 103:1-2.
33. INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY) 2005. Resumen base de datos empresas. Zafra 2004-2005. (en línea). Treinta y Tres. 12 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/ZAFRA%202004-2005.pdf>
34. \_\_\_\_\_. 2006. Resumen: base de datos empresas. Zafra 2005-2006. (en línea). Treinta y Tres. 16 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/ZAFRA%202005-2006.pdf>
35. \_\_\_\_\_. 2007. Resumen: base de datos empresas. Zafra 2006-2007. (en línea). Treinta y Tres. 17 p. Consultado 07 set. 2019.

Disponible en

<http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/ZAFRA%202006-2007.pdf>

36. \_\_\_\_\_. 2008. Resumen: base de datos empresas arroceras. Zafra 2007-2008. (en línea). Treinta y Tres. 19 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/ZAFRA%202007-2008.pdf>
37. \_\_\_\_\_. 2009. Resumen: base de datos empresas arroceras. Zafra 2008-2009. (en línea). Treinta y Tres. 21 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202008%202009.pdf>
38. \_\_\_\_\_. 2010. Resumen: base de datos empresas arroceras. Zafra 2009-2010. (en línea). Treinta y Tres. 21 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202009-2010.pdf>
39. \_\_\_\_\_. 2011. Resumen: base de datos empresas arroceras. Zafra 2010-2011. (en línea). Treinta y Tres. 22 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202010-2011.pdf>
40. \_\_\_\_\_. 2012. Resumen: base de datos empresas arroceras. Zafra 2011-2012. (en línea). Treinta y Tres. 20 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202011-2012.pdf>
41. \_\_\_\_\_. 2013. Resumen: base de datos empresas arroceras. Zafra 2012-2013. (en línea). Treinta y Tres. 22 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202012%20-2013%20.pdf>
42. \_\_\_\_\_. 2014. Resumen de la zafra 2013-2014: base de datos empresas arroceras. (en línea). Treinta y Tres. 29 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en

<http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202013%20-2014%20.pdf>

43. \_\_\_\_\_. 2015. Resumen de la zafra 2014-2015: base de datos empresas arroceras. (en línea). Treinta y Tres. 27 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202014-2015.pdf>
44. \_\_\_\_\_. 2016. Resumen de la zafra 2015-2016: base de datos empresas arroceras. (en línea). Treinta y Tres. 43 p. Consultado 07 set. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/GT%20ARROZ%20JUNIO%202016%20Resumen%20definitivo.pdf>
45. Jiang, L.; Dai, T.; Jiang, D.; Cao, W.; Gan, X.; Wei, S. 2004. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars. *Field Crops Research*. 88:239-250.
46. Lavecchia, A. 1991. Arroz: fertilización nitrogenada en la zona Norte del país. Montevideo, INIA. 20 p. (Serie Técnica no. 17).
47. Lollato, R.; Patrignani, A.; Ochsner, T. E.; Rocatelli, A.; Tomlinson, P.; Edwards, J. T. 2015. Improving grazing management using a smartphone app. (en línea). s.l., Kansas State University. s.p. Consultado 8 feb. 2019. Disponible en <https://www.bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/MF3304.pdf>
48. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. Esc. 1:1.000.000.
49. Marchesi, C.; Castillo, J. 2016. Manejo integrado de cultivos: Índice verde (NDVI), indicador del status nitrogenado del cultivo. *In*: Presentación resultados experimentales de arroz: zafra 2015-2016. Montevideo, INIA. pp. 21-24 (Actividades de Difusión no. 766).
50. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2017. Anuario estadístico agropecuario 2016. Montevideo. 81 p.

51. Molina, F.; Blanco, P.; Pérez de Vida, F. 2011. Nuevo cultivar de arroz. *Arroz*. 15 (68):28-34.
52. Motior, M.; Amano, T.; Shiraiwa, T. 2009. Nitrogen use efficiency and recovery from N fertilizer unde rice- based cropping systems. *Australian Journal of Crop Science*. 3 (6):336-351.
53. Ovando, G.; Bocco, M.; Sayago, S.; Willington, E.; Heredia, S. 2008. Modelos para estimar la fracción de la cobertura vegetal a partir de datos satelitales. In: Reunión Argentina de Agrometeorología (12<sup>a</sup>., 2008, San Salvador de Jujuy). Estimación de la radiación global instantánea con imágenes MODIS para días despejados de la región pampeana. Jujuy, Universidad Nacional de Jujuy. pp. 179-180.
54. Patrignani, A.; Ochsner, E. 2015. Canopeo: a powerful new tool measuring fractional green canopy cover. (en línea). *Agronomy Journal*. 107(6):2312-2320. Consultado 25 may. 2019. Disponible en [http://pdfs.semanticscholar.org/7e32/aeaa7f309befe41eb657caec83599b18955e.pdf?\\_ga=2.129186252.1915248394.1582293595-1260110011.1582293595](http://pdfs.semanticscholar.org/7e32/aeaa7f309befe41eb657caec83599b18955e.pdf?_ga=2.129186252.1915248394.1582293595-1260110011.1582293595)
55. Pocojeskil, E.; Souza da Silva, L.; da Cas Bundt, A.; Marchesan, E.; Rabaioli Camargo, E.; Bueno Scivittaro, W. 2012. Estimativa do teor de nitrogênio em arroz irrigado com o clorofilômetro e a cartela de cores -Nitrogen content estimative in flooded rice by using of chlorophyll meter and color chart. *Ciencia Rural*. 42:1982-1988.
56. Quintero, C. E.; Prats, F.; Zamero, M.; Arevalo, E. S.; Spinelli, N.; Boschetti, G. N. 2011. Absorción de nitrógeno y rendimiento de arroz con diferentes formas de nitrógeno aplicado previo al riego. *Ciencia del Suelo*. 29(2):1-3.
57. Rodríguez Mendoza, M.; González, G.; Aguilar, A.; Etchevers Barra, J.; Santizo, J. 1998. Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra*. 16(2):135-141.

58. SAG. DICTA (Secretaría de Agricultura y Ganadería. Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria, HN). 2003. Manual técnico para el cultivo de arroz (*Oriza sativa*). Comayagua. 59 p.
59. Sánchez, M. I. 2011. Efecto de distintas alternativas de cultivos de cobertura invernal sobre la respuesta a nitrógeno en el cultivo de arroz en siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 7-15.
60. Scivittaro, W. B.; Silva, C. A. S.; Muraoka, T.; Trivelin, P. C. O. 2005. Transformações do nitrogênio (15N) da ureia na cultura do arroz irrigado. Pelotas, Brasil, s.e. 7 p.(Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento no. 22).
61. Singh, U.; Ladha, J. K.; Castillo, E. G.; Punzalan, G.; Tirol-Padre, A.; Duqueza, M. 1998. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in médium - and long- duration rice. *Field Crops Research*. 58:35-53.
62. Terra, J.; Sánchez, A.; Méndez, R.; Deambrosi, E. 2010. Efecto de cultivos cobertura invernal sobre la repuesta a N en el cultivo de arroz en siembra directa. In: Jornada Anual de Arroz (2010, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2009-2010. Montevideo, INIA pp. 9-20 (Actividades de Difusión no. 611).
63. \_\_\_\_\_; Castillo, J.; Bonilla, F.; Amaral, R.; Lucas, T.; Macedo, I. 2014. Soja en sistemas arroceros. *Arroz*. no.78:26-29.
64. Urquijo, J. 2015. Calcula el porcentaje de cubierta vegetal con canopeo. (en línea). s.l., Greenappsandweb. s.p. Consultado 12 feb. 2019. Disponible en <https://www.greenappsandweb.com/android/calcula-el-porcentaje-de-cubierta-vegetal-con-canopeo/>
65. Van Keulen, H. 1982. Graphical analysis of anual crop response to fertiliser application. *Agricultural Systems*. 9:113-126.
66. Verhulst, N.; Francois, I.; Grahmann, K.; Cox, R.; Govaerts, B. 2015. Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación. México, CIMMYT. 3 p.
67. Wells B. R.; Johnston T. H. 1970. Differential response of rice varieties to timing of mid-season nitrogen applications. *Agronomy Journal Abstract*. 62(5):608-612.

68. Yang, H.; Yang, J.; Lv, Y.; He, J. 2014. SPAD Values and Nitrogen Nutrition Index for the Evaluation of Rice Nitrogen Status. *Plant Production Science*. 17:81-92.
69. Yang, Y.; Zhang, M.; Xiaohui Fan, Y.; Li, C.; Geng, Y.; 2012. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield. *Soil Science Society of America Journal*. 76(6):2307-2317.
70. Yao, Y.; Miao, Y.; Jiang, R.; Khosla, R.; Gnyp, M. L.; Bareth, G. 2013. Evaluating different active crop canopy sensors for estimating rice yield potencial. In: *International Conference: Agro-Geoinformatics (2<sup>nd</sup>, 2013, Beijing, China)*. Proceedings. s.l., International Center for Agro- Informatics and Sustainable Development. pp. 538-542.
71. Ying, J.; Peng, S.; Yang, G.; Zhou, N.; Visperas, R. M.; Cassman, K. G. 1998. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments: II. Nitrogen accumulation and utilization efficiency. *Field Crops Research*. 57(1):85-93.
72. Yong, S.; Chulchoi, S.; Rodrigues Silva, R.; Wonkang, J.; Heeom, J.; Changsookim. 2017. Case study: estimation of sorghum biomass using digital image analysis with canopeo. *Biomass and Bioenergy*. 105:207-210.
73. Yuan, Z.; Cao, Q.; Zhang, K.; Ata-Ui-Karim, S.; Tian, Y.; Zhu, Y.; Cao, W.; Liu, X. 2016. Optimal Leaf Positions for SPAD Meter Measurement in Rice. *Frontiers in Plant Science*. no. 7:1-10