

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE ARROZ BAJO  
SISTEMAS DE ROTACIONES CONTRASTANTES**

**por**

**Manuel AGUIRRE MIGUEZ  
José Francisco LÓPEZ GARCÍA**

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

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2020**

Tesis aprobada por:

Director:

---

Ing. Agr. PhD. José Terra

---

Ing. Agr. MSc. Ignacio Macedo

---

Ing. Agr. MSc. Jesús Castillo

---

Ing. Agr. PhD. Guillermo Siri

Fecha:

27 de noviembre de 2020

Autores:

---

Manuel Aguirre Miguez

---

José Francisco López García

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a todos aquellos que de una forma colaboraron en la concreción de este trabajo de tesis.

Especialmente a:

Familiares y amigos, por su apoyo constante, por la confianza, la comprensión, la contención y los consejos durante la carrera. Gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

Al Ing. Agr. José Terra, director del Programa Nacional de Investigación de Arroz, director de la tesis, por su apoyo y colaboración a lo largo de todo el período de elaboración del trabajo. Gracias por la confianza ofrecida desde que llegamos al INIA Treinta y Tres.

Al Ing. Agr. Jorge Hernández, profesor de la cátedra de edafología de la Facultad de Agronomía, por su atención, por la dedicación, la generosidad y la colaboración a lo largo del trabajo de tesis.

A los Ings. Agrs. Ignacio Macedo, Jesús Castillo, Guillermo Fabini, investigadores de INIA Treinta y Tres, por sus ideas, su atención y contestación de las consultas que les fueron realizadas.

A todo el personal de INIA Treinta y Tres que colaboró de una u otra forma con la realización de este trabajo, especialmente a Irma Furtado, Alexander Bordagorry, Matías Oxley, Adán Rodríguez y Mauricio Acosta.

A la profesora Daniela Sorribas por su colaboración y aporte al trabajo.

Al personal de biblioteca de Facultad de Agronomía, Universidad de la República, especialmente a Sully Toledo y Patricia Choca.

A todos, muchas gracias.

## 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> .....	2
2.1. FASES DE DESARROLLO DEL CULTIVO DE ARROZ.....	2
2.1.1. <u>Fase vegetativa</u> .....	2
2.1.2. <u>Fase reproductiva</u> .....	2
2.1.3. <u>Acumulación de materia seca</u> .....	3
2.1.4. <u>Construcción del rendimiento en grano del cultivo de arroz</u> .....	3
2.2. CARACTERÍSTICAS DESTACADAS DEL CULTIVAR INIA OLIMAR.....	4
2.2.1. <u>Origen</u> .....	4
2.2.2. <u>Características agronómicas</u> .....	4
2.2.3. <u>Rendimiento</u> .....	4
2.2.4. <u>Aspectos de manejo</u> .....	4
2.3. ASPECTOS DESTACADOS DEL SISTEMA ARROCERO URUGUAYO.....	5
2.4. ROTACIONES ARROCERAS.....	8
2.4.1. <u>Arroz continuo</u> .....	9
2.4.2. <u>Rotaciones</u> .....	10
2.4.2.1. Rotación con cultivos anuales.....	11
2.4.2.2. Rotación con soja.....	11
2.4.2.3. Rotación arroz-pastura.....	14
2.5. NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE ARROZ.....	16
2.5.1. <u>Requerimientos de nitrógeno</u> .....	16
2.5.2. <u>Fuentes de nitrógeno disponibles para las plantas de arroz</u> .....	17
2.5.3. <u>Absorción de nitrógeno</u> .....	17
2.5.4. <u>Efecto del nitrógeno sobre los componentes de rendimiento y       materia seca</u> .....	19
2.5.5. <u>Dinámica de suelos inundados</u> .....	20
2.5.5.1. Cambios físico-químicos.....	21
2.5.5.2. Cambios químicos.....	21
2.5.6. <u>Dinámica del nitrógeno en suelos inundados</u> .....	22
2.5.6.1. Mineralización-inmovilización.....	22
2.5.6.2. Nitrificación-desnitrificación.....	23

2.5.6.3. Volatilización.....	24
2.5.6.4. Lixiviación.....	24
2.6. FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN EL CULTIVO DE ARROZ...	24
2.6.1. <u>Fertilizantes nitrogenados</u> .....	26
2.6.2. <u>Momento de aplicación del nitrógeno</u> .....	26
2.6.3. <u>Factores que afectan la respuesta a nitrógeno</u> .....	27
2.7. EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO.....	28
2.7.1. <u>Índices de eficiencia de uso de nitrógeno</u> .....	29
2.8. EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE ARROZ.....	31
2.9. HIPÓTESIS GENERAL.....	36
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	37
3.1. LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO, PERÍODO EXPERIMENTAL Y TIPOS DE SUELO DOMINANTES.....	37
3.2. TRATAMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	37
3.3. MANEJO DEL CULTIVO.....	39
3.3.1. <u>Manejo a la siembra</u> .....	39
3.3.2. <u>Manejo post siembra</u> .....	40
3.4. DETERMINACIONES.....	41
3.4.1. <u>En el cultivo</u> .....	41
3.4.2. <u>Laboratorio</u> .....	42
3.5. CÁLCULOS.....	43
3.5.1. <u>Dosis óptima física y dosis optima económica</u> .....	43
3.5.2. <u>Fórmulas de cálculo para eficiencia de uso de nitrógeno</u> .....	43
3.6. MODELO ESTADÍSTICO.....	44
3.6.1. <u>Modelo estadístico general</u> .....	44
3.6.2. <u>Hipótesis</u> .....	44
3.6.3. <u>Modelo estadístico para inicio de macollaje</u> .....	44
3.6.4. <u>Hipótesis</u> .....	45
3.6.5. <u>Análisis estadístico</u> .....	45
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	46
4.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS ZAFRA 2018/2019.....	46
4.1.1. <u>Temperatura</u> .....	46
4.1.2. <u>Heliofanía</u> .....	47
4.1.3. <u>Precipitaciones</u> .....	48
4.2. INSTALACIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL.....	48
4.3. PRODUCCIÓN DE BIOMASA.....	49
4.3.1. <u>Materia seca a inicio de macollaje (V4)</u> .....	49
4.3.2. <u>Materia seca a pleno macollaje</u> .....	50
4.3.3. <u>Materia seca a primordio (R0)</u> .....	50
4.3.4. <u>Materia seca a floración (R4)</u> .....	51

4.3.5. <u>Materia seca a mitad de llenado de grano (R7)</u> .....	52
4.3.6. <u>Materia seca a cosecha (R9)</u> .....	53
4.4. <u>CONTENIDO DE NITRÓGENO EN PLANTA</u> .....	54
4.4.1. <u>Nitrógeno en planta a inicio de macollaje (V4)</u> .....	54
4.4.2. <u>Nitrógeno en planta a pleno macollaje</u> .....	55
4.4.3. <u>Nitrógeno en planta a primordio (R0)</u> .....	56
4.4.4. <u>Nitrógeno en planta a floración (R4)</u> .....	56
4.4.5. <u>Nitrógeno en planta a mitad de llenado de grano (R7)</u> .....	57
4.4.6. <u>Nitrógeno en paja a cosecha</u> .....	58
4.4.7. <u>Nitrógeno en grano a cosecha (R9)</u> .....	59
4.5. <u>CURVAS DE DILUCIÓN DE NITRÓGENO</u> .....	60
4.6. <u>ABSORCIÓN DE NITRÓGENO</u> .....	62
4.6.1. <u>Nitrógeno absorbido en paja al momento de la cosecha</u> .....	62
4.6.2. <u>Nitrógeno absorbido en grano</u> .....	63
4.6.3. <u>Nitrógeno total absorbido</u> .....	63
4.7. <u>RENDIMIENTO EN GRANO</u> .....	64
4.7.1. <u>Componentes de rendimiento</u> .....	67
4.7.2. <u>Índice de cosecha</u> .....	69
4.7.3. <u>Rendimiento y absorción total de nitrógeno</u> .....	70
4.8. <u>EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO</u> .....	71
4.8.1. <u>Eficiencia agronómica</u> .....	71
4.8.2. <u>Eficiencia de utilización interna</u> .....	72
4.8.3. <u>Eficiencia fisiológica</u> .....	73
4.8.4. <u>Eficiencia de recuperación aparente</u> .....	74
4.8.5. <u>Factor parcial de productividad</u> .....	76
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	78
6. <u>RESUMEN</u> .....	80
7. <u>SUMMARY</u> .....	81
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	82
9. <u>ANEXOS</u> .....	94

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Componentes de la EUN en el cultivo de arroz para distintos países y/o regiones.....	32
2. Eficiencias de uso del nitrógeno bajo diferentes dosis de N.....	35
3. Rotaciones de largo plazo seleccionadas donde se instaló el ensayo de respuesta a N en arroz.....	37
4. Análisis de suelo (0-20 cm).....	39
5. Fertilización a la siembra ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).....	39
6. Dosis de N como $\text{ha}^{-1}$ a macollaje y primordio.....	40
7. Conteo de plantas en la etapa de implantación.....	49
8. Efecto de la rotación (R) sobre la biomasa acumulada 15 días luego de la emergencia.....	49
9. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a pleno macollaje (37 DDE).....	50
10. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a primordio ( $R_0$ ).....	51
11. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a floración.....	52
12. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a inicio de llenado de grano.....	52
13. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a cosecha.....	53
14. Efecto de la rotación (R) sobre el contenido de nitrógeno en planta para el cultivo de arroz 15 días luego de la emergencia.....	55
15. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en planta a pleno macollaje.....	55
16. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en planta a primordio.....	56
17. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en planta a floración.....	57
18. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en planta a inicio de llenado de grano.....	58
19. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en paja a cosecha.....	59
20. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en grano.....	60
21. Efecto de la rotación (R) y de la fertilización nitrogenada (D) en la absorción de N por la paja de arroz al momento de la cosecha.....	62
22. Efecto de la rotación (R) y de la fertilización nitrogenada (D) en la absorción	

de N por el grano al momento de la cosecha.....	63
23. Efecto de la rotación (R) y de la fertilización nitrogenada (D) en la absorción total de N al momento de la cosecha.....	64
24. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre el rendimiento en grano seco y limpio del cultivo de arroz.....	65
25. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre el número de panojas/m <sup>2</sup> en el cultivo de arroz.....	68
26. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre el peso de 1000 granos en el cultivo de arroz.....	69

#### Figura No.

1. Diferenciación de un suelo anegado, donde se ilustran las diferentes capas de este.....	20
2. Esquema del ciclo de mineralización-inmovilización de N de un resto vegetal.....	23
3. Diagrama de 3 cuadrantes en el cual se muestran las relaciones entre: I) dosis de N agregada y rendimiento, II) absorción total de N y rendimiento, y III) dosis de N agregada y N absorbido por el cultivo.....	30
4. Plano de parcelas grandes con sus respectivas rotaciones.....	38
5. Esquema simplificado de manejo del cultivo, a partir de la siembra hasta la cosecha.....	41
6. Temperatura máxima, media y mínima en décadas para la zafra 2018/2019 en comparación con la serie histórica 1971/2017, Treinta y Tres.....	46
7. Heliofanía acumulada por décadas en horas luz.....	47
8. Precipitaciones acumuladas en décadas de la zafra 2018/2019 y precipitaciones promedio acumuladas de la serie histórica 1971-2017.....	48
9. Comparación de curvas de dilución de N entre las rotaciones y dosis de nitrógeno.....	61
10. Efecto de la dosis de N sobre el rendimiento de arroz (seco y limpio) en la zafra 2018-19 en tres rotaciones estables.....	65
11. Productividad media de las rotaciones expresada en %.....	66
12. Rendimiento de arroz de diferentes rotaciones y dosis de N expresada en % del máximo rendimiento por rotación.....	67
13. Efecto de la dosis de N sobre el índice de cosecha del cultivo de arroz.....	69
14. Relación entre la cantidad de N absorbido y el rendimiento final en grano del cultivo de arroz.....	70
15. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre la eficiencia agronómica de uso de N en el cultivo de arroz.....	71
16. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre la eficiencia de utilización interna de N en el cultivo de arroz.....	72
17. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre la eficiencia fisiológica	

de uso de N en el cultivo de arroz.....	74
18. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre la eficiencia de recuperación aparente de N en el cultivo de arroz.....	75
19. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre el factor parcial de productividad de N en el cultivo de arroz.....	76

## 1 INTRODUCCIÓN

El arroz es el segundo alimento de mayor importancia para más de la mitad de la población del mundo. Uruguay se ubica históricamente entre los diez primeros exportadores mundiales, y se caracteriza a nivel internacional por su alta productividad, la calidad del producto y la sostenibilidad del proceso productivo. El cultivo de arroz en el Uruguay constituye uno de los rubros de producción de mayor importancia para el país, dado que más del 90% del grano producido se exporta a diferentes mercados.

La productividad del arroz en el país creció a tasas de  $104 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  desde la década del 70 para situarse hoy entre las mayores globalmente ( $8.200 \text{ kg ha}^{-1}$ ). El nitrógeno (N) es el principal nutriente limitante de la productividad y clave para explorar los rendimientos alcanzables a nivel comercial en Uruguay de aproximadamente  $11.200 \text{ kg ha}^{-1}$  (Carracelas et al., 2016).

El nitrógeno proveniente del suelo es la principal fuente de N para el cultivo, pero para alcanzar altos rendimientos debe ser complementado por N de los fertilizantes y/o la fijación biológica (FBN) de leguminosas u otras fuentes. No obstante, el N como fertilizante es un insumo que afecta los costos y que usado en exceso puede tener externalidades ambientales negativas. Por otra parte, a nivel productivo el arroz rota con pasturas muy diversas y eventualmente con otros cultivos, que afectan la dinámica y la capacidad de aporte de N del suelo. Si bien existen indicadores objetivos de suelo y planta para guiar la toma de decisiones de fertilización nitrogenada del cultivo (Castillo et al., 2014), también es importante conocer bajo qué sistemas de producción el suelo realiza un mayor aporte de N de manera de disminuir los costos productivos y mejorar la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) de este (Castillo, 2018).

Es escasa la información local sobre la dinámica del N en sistemas arroceros de intensificación variable y su interacción con la fertilización nitrogenada. Es por esta razón que el objetivo general del trabajo se plantea evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento en grano y la eficiencia de utilización de nitrógeno del cultivo de arroz en rotaciones de intensidad de uso del suelo contrastantes.

Mientras que los objetivos específicos son:

- ❖ Cuantificar la respuesta agronómica del cultivo de arroz al agregado de nitrógeno sobre distintas rotaciones.
- ❖ Evaluar el efecto de la secuencia y la rotación sobre la eficiencia de uso del nitrógeno.
- ❖ Analizar la acumulación y la dilución de nitrógeno en el ciclo del cultivo de arroz.

## **2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 FASES DE DESARROLLO DEL CULTIVO DE ARROZ**

El crecimiento de la planta de arroz es un proceso fisiológico continuo que comprende un ciclo completo desde la germinación hasta la maduración del grano. La duración de este ciclo varía según el material genético y la influencia del ambiente, y oscila entre los 100 a 210 días (Fernández et al., 1985).

Según Chebataroff (2012), el desarrollo de la planta de arroz se divide en dos fases, la fase vegetativa que se extiende desde la germinación hasta la iniciación floral ( $R_0$ ), y la fase reproductiva desde la iniciación floral hasta la maduración, donde en esta última se incluyen las etapas de llenado de grano y madurez fisiológica.

#### **2.1.1 Fase vegetativa**

Esta fase abarca desde la germinación de la semilla hasta el comienzo de la diferenciación del primordio floral. El período de siembra-emergencia dura entre 5 a 30 días dependiendo de las condiciones ambientales como temperatura y humedad (Olmos, 2007). En esta fase se encuentra comprendido el período de macollaje donde se determina el número de macollos por unidad de área, equivalente al número potencial de panojas. También, se determina el estado de las hojas que “funcionarán” durante la fase reproductiva (Casterá, 1999).

Chebataroff (2012), comenta que el macollaje depende del tipo de planta y la densidad, y se da hasta unos 45 a 50 días luego de la germinación. Este define el número máximo de tallos, que luego de un proceso de pérdida se alcanzará el número efectivo sobre el cual se va a desarrollar la panoja.

#### **2.1.2 Fase reproductiva**

Según Chebataroff (2012), la fase reproductiva comienza con el desarrollo de la panoja (iniciación floral), unos 22 días antes de empezar la floración, y va hasta la madurez. La panoja pasa de 0.5 mm a 20 cm a inicio de la floración, la cual comienza con la salida de las panojas de la vaina y se define cuando el 50% de las mismas están completamente fuera, el cual tiene una duración de 12 a 15 días.

La antesis ocurre durante la mañana y mediodía favorecido por las condiciones de mayor temperatura, donde la fertilización de las flores se completa dentro de las 6 horas. Dentro de una misma panoja las espiguillas superiores son las primeras en florecer, y se necesitan de 7 a 10 días para que todas las espiguillas completen la antesis (Olmos, 2006).

Durante la formación de los granos de polen ocurre el período crítico de sensibilidad a las bajas temperaturas, registrándose éste 8 a 10 días antes de la floración. Temperaturas mínimas por debajo o iguales a los 12°C pueden provocar esterilidad por bajas temperaturas (Olmos, 2006).

De acuerdo con Chebataroff (2012), dentro de la fase reproductiva se encuentra el período de maduración, el cual va desde 50% de floración hasta la madurez fisiológica, con una duración de 30 a 40 días según la variedad y el ambiente. El mismo autor afirma que este período se puede dividir en dos etapas las cuales se mencionan a continuación:

- ❖ Etapa de llenado (de fin de floración a grano masa).
- ❖ Etapa de maduración (de grano masa a madurez fisiológica).

Una buena nutrición en las diferentes etapas del cultivo es clave para producir grandes cantidades de carbohidratos durante la fase reproductiva y de maduración, lo que influye en el aumento del número de granos llenos por panoja (Perdomo et al., 1985). La radiación durante el llenado de grano es de suma importancia, ya que cerca del 60% de los carbohidratos trasladados de las hojas al grano se fotosintetizan durante esta etapa (Olmos, 2006).

### **2.1.3 Acumulación de materia seca**

La cantidad de materia seca producida depende de la variedad, la disponibilidad de nutrientes, como también de los factores ambientales, mientras que el patrón de acumulación es similar en casi todas las variedades. La producción de materia seca en la planta de arroz puede dividirse en dos etapas: la etapa anterior a la floración, donde las sustancias producidas se almacenan en tallos, hojas y raíces; y una segunda etapa, luego de la floración, donde el contenido de materia seca producido tiene una estrecha correlación con el rendimiento en grano (Perdomo et al., 1985).

El contenido de N en la hoja está estrechamente relacionado con la tasa de fotosíntesis de esta, y por lo tanto con la producción de biomasa aérea (Dobermann y Fairhurst, 2000).

### **2.1.4 Construcción del rendimiento en grano del cultivo de arroz**

El rendimiento en grano está determinado por el número de panojas por unidad de área y por el número de espiguillas por panoja. A su vez, el número de panojas por unidad de área está determinado por el número de macollos efectivos formados en la etapa de macollaje, mientras que el número de espiguillas por panoja depende de las condiciones de desarrollo en las que se forman las panojas (Perdomo et al., 1985).

El número de panojas por unidad de área, el número de espiguillas llenas por panoja y el peso del grano, están directamente relacionados con la cantidad de nutrientes absorbidos por las plantas en las diferentes etapas de desarrollo (Perdomo et al., 1985).

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DESTACADAS DEL CULTIVAR INIA OLIMAR**

INIA Olimar es una variedad tropical que se ha destacado a nivel experimental por su elevado potencial de rendimiento, estabilidad, precocidad y muy baja incidencia de granos yesados (Blanco et al., 2004).

### **2.2.1 Origen**

Proviene del cruzamiento de una línea introducida en viveros internacionales (CIAT) y una línea hermana de INIA Cuaró, realizado en INIA Treinta y Tres en 1991 (Blanco et al., 2004).

### **2.2.2 Características agronómicas**

Según Blanco et al. (2004), esta variedad posee un tipo de planta similar a El Paso 144, con una altura levemente inferior y hojas pilosas erectas. Ha mostrado un buen vigor inicial, lo que permite un buen establecimiento del cultivo tanto en siembras convencionales como en siembra directa, característica similar a El Paso 144. Presenta abundante macollaje y un tamaño moderado de panoja (553 panojas m<sup>-2</sup>, con 82 granos totales), características muy similares a El Paso 144. INIA Olimar presenta un ciclo intermedio entre INIA Tacuarí y El Paso 144 con 98 días desde siembra a floración. Esta característica le ha permitido alcanzar rendimientos superiores a los de El Paso 144 en ensayos de siembra tardía en Treinta y Tres, al posibilitar el escape de noches con temperaturas muy bajas, las cuales ocurren con mayor frecuencia al final de la zafra y afectan la fase reproductiva de materiales de tipo tropical.

### **2.2.3 Rendimiento**

En varios ensayos realizados con INIA Olimar determinaron que esta variedad presentó un rendimiento promedio de 8.853 kg ha<sup>-1</sup>, mientras que INIA Tacuarí y El Paso 144 rindieron 8.056 y 7.881 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente (Blanco et al., 2004). Se destaca la estabilidad de rendimiento de esta variedad.

### **2.2.4 Aspectos de manejo**

Según Blanco et al. (2004), INIA Olimar no responde a incrementos en la densidad de siembra a partir de 100 kg ha<sup>-1</sup>, al igual que El Paso 144. Posee un ciclo vegetativo más corto que El Paso 144 entrando en la fase de diferenciación del primordio floral con una acumulación térmica menor, aspecto a tener en cuenta para la

aplicación de urea a tiempo. La acumulación térmica de INIA Olimar de emergencia a primordio es de 650 grados días, mientras que la de El Paso 144 e INIA Tacuarí es de 739 y 683, respectivamente.

### **2.3 ASPECTOS DESTACADOS DEL SISTEMA ARROCERO URUGUAYO**

El sistema arrocero uruguayo posee una excelente reputación a nivel internacional como país exportador de arroz, esto ha sido logrado fundamentalmente en base a la calidad del producto, procesos y el estricto cumplimiento de los compromisos asumidos (Courdin y Hernández, 2013). Este sistema es muy particular, mientras que las grandes regiones arroceras en el mundo son de monocultivo, en Uruguay son en rotación con pasturas y otros cultivos, componentes clave de la alta productividad y de la baja huella ambiental del arroz (Zorrilla, 2017).

Según Uruguay XXI (2013), la producción arrocera en Uruguay se basa en la rotación con praderas, riego por inundación y alterna el uso con la producción ganadera. También afirman que el 60% del cultivo se realiza sobre retornos de pradera o campos regenerados de distinta edad mientras que el restante 40% es sobre rastrojos de arroz del año anterior. Una proporción mínima se hace sobre campo natural y sobre soja.

Según MGAP. DIEA (2019a), en la zafra 2018-2019 el 61% de la superficie sembrada fue arroz de primer año, siendo esta sobre pradera, cultivo de secano u otros, y el 39% fue arroz sobre arroz, ya sea arroz de segundo, tercer o más años.

La producción de arroz en Uruguay se caracteriza por ser de baja intensidad relativa a otras zonas del mundo ya que se basa en la rotación del cultivo con pasturas para uso ganadero (INIA, 2006); aunque hay variaciones importantes dentro del país.

Las principales regiones productivas del cultivo están ubicadas en el norte (Artigas y Salto), centro (Tacuarembó, Rivera y parte de Cerro Largo) y este (cuenca de la laguna Merín). La zona este es la que posee mayor cantidad de hectáreas utilizadas para este cultivo.

La superficie sembrada en la zafra 2018/2019 fue de 145 mil hectáreas, con un rendimiento promedio de 8.276 kg ha<sup>-1</sup> (MGAP. DIEA, 2019a). La producción de arroz posee rendimientos elevados a nivel internacional por la excelente combinación de suelos, agua, clima, genética adaptada, manejo y alta adopción tecnológica, producto de esto es que en el año 2012 Uruguay fue el octavo exportador de arroz a nivel mundial (Uruguay XXI, 2013).

Según Zorrilla (2017), con el apoyo del proyecto “Global Yield Gap Analysis” (GYGA) de la Universidad de Nebraska, el potencial ambiental promedio para Uruguay

es de  $14 \text{ Mg ha}^{-1}$ , confirmando que aún existe un espacio para explorar mejoras de los rendimientos, a pesar de los muy altos que tiene el país.

Los rendimientos actuales representan el 57% del rendimiento potencial, lo que indica que hay espacio con mejoras genéticas y de manejo para seguir mejorando los rendimientos actuales, reduciendo así las brechas de rendimiento en Uruguay (Carracelas et al., 2017).

Según Stirling (2014), el arroz uruguayo se destaca en el mundo por su calidad, por su sistema productivo y por la cadena agroindustrial.

El sector arrocero se destaca por un comportamiento integrado de la cadena vertical de producción, no existente en el mundo un sistema como éste, y el cual abarca aproximadamente el 90% del sector (Uruguay XXI, 2013).

Otra característica es la de poseer un producto que se vuelca casi exclusivamente al mercado internacional (Courdin, 2014), donde Uruguay es el único país que se enfrenta al desafío de tener que exportar el 95% del arroz que se produce ya que solamente un 5% se consume internamente, de manera que la expansión del cultivo está muy ligada al precio internacional.

Castillo (2018), destaca los siguientes aspectos del sistema arrocero uruguayo: alta productividad superando los  $8.000 \text{ kg ha}^{-1}$ , el bajo agregado de nitrógeno ( $70\text{-}80 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) y la rotación con pasturas sembradas o regeneradas que se utilizan para pastoreo del ganado.

La fertilización se realiza de acuerdo con el tipo de suelo, sistema de rotación, preparación del suelo, método y época de siembra, condiciones climáticas, pero en general se aplican entre  $40\text{-}70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  y  $70 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Deambrosi, 2003).

Castillo et al. (2013), plantearon ciertos argumentos para el sistema arrocero uruguayo, por un lado, los altos costos y precios deprimidos del arroz, y por el otro, la oportunidad de mejorar, diversificar ingresos, intensificar el uso del suelo y reducir costos. Estos autores afirman que la llegada de la soja a la rotación arroz-pastura ha generado la necesidad de ajustar la nutrición del cultivo en ambientes que alternan situaciones de anegamiento y secano. Además, el cultivo necesita microelementos esenciales para la actividad enzimática, así como para la fijación biológica de N, la cual puede cubrir aproximadamente el 40-60% del requerimiento de nitrógeno del cultivo.

Gran parte del éxito o dificultades de la integración de la soja en las rotaciones arroceras va a estar dado por aquellos que logren diseñar sus sistemas productivos y manejarlo correctamente considerando las particularidades de los suelos (Castillo et al., 2013).

Según Courdin (2014), la diversificación productiva será una opción tangible para los productores, dado los altos costos productivos, pero sin embargo esto no parece ser algo novedoso para el sector dado a su larga trayectoria de integración con la ganadería.

Hay dos tipos básicos de productores arroceros, los arroceros puros y los arroceros ganaderos, con características diferentes, por ejemplo, relacionado con la tenencia de la tierra, donde los arroceros puros son básicamente arrendatarios y los arroceros ganaderos mayoritariamente son dueños de la tierra (Tommasino y Hernández, 2003).

El arroz es una actividad que compite “positivamente” con la ganadería, ya que durante algún tiempo le brinda un mayor ingreso por arrendamiento de la tierra comparado con el ingreso que se generaría por la producción ganadera exclusiva. Si bien el cultivo no tiene un comportamiento expansivo en su superficie, constituye un sector de captación y aplicación de otros recursos productivos como son: mano de obra, tecnología del cultivo e inversión en instalaciones (Courdin y Hernández, 2013).

El cultivo de arroz tiene dos características que lo diferencian del resto de los cereales. Por un lado, el alto nivel de inversión que requiere por hectárea en lo referido a los costos directos, y por el otro, las tecnologías asociadas que tiene implícito el disponer de cierta escala de producción y un nivel empresarial para el adecuado desarrollo de la actividad (Tommasino y Hernández, 2003).

Las condiciones en que se desarrolla el cultivo determinan que las explotaciones arroceras se caractericen por (Tommasino y Hernández, 2003):

- ❖ El cultivo es su principal o única actividad agrícola.
- ❖ El arroz constituye uno de sus principales ingresos.
- ❖ Cuando combinan otras actividades agropecuarias, la gran mayoría de los productores lo hacen con la ganadería.

En los últimos años, la diversificación permitió a las empresas ser más competitivas y resilientes en el corto y mediano plazo ante los márgenes reducidos del cultivo de arroz, como es el caso de las empresas arroz-pastura (Rovira et al., 2019).

El sector arrocero uruguayo atraviesa en los últimos años por una situación compleja con altos costos y precios internacionales deprimidos, pero la oferta de nuevas variedades, más productivas y resistentes a enfermedades, rotaciones que permitan la alta productividad de todos los componentes y con bajo impacto ambiental, serán herramientas fundamentales para el desarrollo del sector en el largo plazo (Zorrilla, 2017).

## 2.4 ROTACIONES ARROCERAS

En los suelos arroceros típicos de la zona este, las praderas y los cultivos anuales surgen como una alternativa para generar mayores beneficios y seguir mejorando las condiciones de siembra del cultivo de arroz. Según Gamarra (1996), los mismos se deben considerar como cultivos secundarios y complementarios del arroz, que permiten acortar la frecuencia de éste en la rotación mediante un buen control de malezas y mejorar las condiciones de nivelación, drenaje y estructura del suelo.

La falta de tecnología adecuada, la emigración permanente del productor arrocero y los rastrojos trae como consecuencia campos de muy baja producción forrajera. La condición de arrendatario de la mayor parte de los productores es una de las razones que no permite la inversión en tecnología, sobre todo en el mejoramiento de las condiciones de nivelación y drenaje de la chacra, y la posibilidad de realizar rotaciones que mejoren el suelo y permitan retornar al arroz más rápidamente (Gamarra, 1996).

Según Topolanski (1975), el arroz, al igual que la mayoría de los cultivos, responde favorablemente a la rotación con otros cultivos, pero éstos deberán ser cultivos adecuados, capaces de brindar beneficios. Este autor también afirma que hay mejor respuesta a las fertilizaciones a través de las rotaciones que a las aplicaciones directas.

Johnston y Miller (1973), afirman que los cultivos se rotan porque bajo cultivo continuo el suelo generalmente se agota en fertilidad y en materia orgánica, resultando en el deterioro de la condición física. Además, aumentan los problemas de malezas y enfermedades que disminuyen el rendimiento y calidad del arroz.

Goulart et al. (2020), sostienen que el monocultivo de arroz degrada la estructura del suelo, y la rotación con cultivos de secano como por ejemplo la soja es una alternativa que contribuye a mejorar la calidad del suelo, el comportamiento de los cultivos y aumentar el beneficio para los productores.

La rotación de cultivos es una práctica que permite mayor rentabilidad económica y sostenibilidad del sistema. La rotación de cultivos en las áreas de arroz tiene como objetivo mejorar la calidad del suelo y optimizar el uso del suelo, concluyendo que aumenta la “calidad ambiental” debido a las mejoras en la protección del suelo y en la calidad física, química y biológica del suelo (Goulart et al., 2020).

Según Voorde et al., citados por Lu et al. (2018), la rotación de cultivos puede promover el rendimiento al mejorar la calidad del suelo, manteniendo la diversidad y actividad de la comunidad microbiana del suelo. La duración del tiempo de rotación del cultivo juega un papel importante en el aumento del rendimiento de arroz. El aumento en el rendimiento del arroz en rotación de cultivos se ha atribuido a aumento en la calidad del suelo, la cual depende de lo físico, propiedades químicas, biológicas y bioquímicas

del suelo. También, afirman que una rotación a largo plazo podría mejorar significativamente la calidad del suelo y el rendimiento de arroz en comparación con una rotación a corto plazo (Lu et al., 2018).

El diseño de las rotaciones y las estrategias para su manejo, son muy importante para aumentar la productividad, reducir costos, minimizar riesgos y conservar los recursos naturales. La posibilidad de aumentar la frecuencia de arroz en la rotación, la inclusión de otros cultivos y/o pasturas que permitan optimizar costos, tiempos de barbecho y mantener la sostenibilidad de los sistemas, son grandes oportunidades y desafíos. Los procesos de intensificación son sostenibles en la medida que mantengan o incrementen la productividad, conserven los recursos naturales y mejoren la eficiencia del uso de insumos (Macedo et al., 2017).

Al momento de encarar la producción de arroz, la rotación con otros cultivos anuales o praderas perennes es una alternativa que debe ser analizada cuidadosamente.

#### **2.4.1 Arroz continuo**

Existen una serie de limitantes a la productividad al sembrar arroz durante más de dos zafras en el mismo sitio (Gamarra, 1996):

- ❖ pérdida de nutrientes y de materia orgánica del suelo,
- ❖ deterioro de las condiciones físicas del suelo,
- ❖ infestación creciente de malezas,
- ❖ y mayor incidencia de enfermedades y plagas.

Con el cultivo continuo de arroz el suelo generalmente pierde fertilidad y materia orgánica, con el resultante deterioro de las condiciones físicas, además el suelo se ve infectado progresivamente de malezas y enfermedades que disminuyen el rendimiento y la calidad del arroz (Litzenberger, 1974).

Según Topolanski (1975), para el arroz, como para cualquier otro cultivo, la productividad y la calidad disminuyen en forma permanente con el mismo cultivo en el mismo terreno. Es decir que, si se desea mantener una buena productividad, se debe optar por rotar cultivos para sostener la fertilidad y el aporte de nutrientes del suelo. El arroz necesita de ciertos elementos nutritivos que va extrayendo del suelo, pero a través de la continuidad del cultivo, muchos elementos van disminuyendo o se vuelven menos asimilables, lo que se refleja en el rendimiento.

Según Johnston y Miller (1973), durante un período de cultivo continuo de 7 años, los rendimientos de arroz disminuyen  $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

Reynolds (1954), asegura que los altos rendimientos del arroz no se han mantenido cultivando arroz en la misma chacra todos los años.

Beecher et al. (1994a), observaron que la capacidad de suministro de N del suelo cae notablemente con un número creciente de cultivos de arroz sucesivos.

En un experimento de campo, el arroz continuo produjo 12 a 23% menos grano que el arroz después de la soja, probablemente debido a una deficiencia de nitrógeno a fines de la temporada (Olk et al., 2005).

También se ha encontrado que suelos cultivados con arroz en forma continua tienen mayores niveles de compuestos fenólicos que otros sistemas, siendo enriquecidos en un 46% en ácido ferúlico y ácido p-hidroxicinámico y en un 16 a 25% para los siringilfenoles. La acumulación de compuestos fenólicos en el suelo bajo condiciones de anaerobiosis es acompañada por: lenta mineralización de nitrógeno orgánico al final del ciclo e inmovilización del nitrógeno de la urea, una aparente deficiencia de nitrógeno al final del ciclo del cultivo y una brecha en rendimiento de arroz (Olk et al., 2005).

Anders et al. (2005), en un estudio de rotaciones de cultivos realizados en Arkansas, obtienen valores de rendimiento en grano de 8.010 kg ha<sup>-1</sup> en el primer año de cultivo, el que disminuye a 6.650 kg ha<sup>-1</sup> en el tercer año de arroz.

Luego de varios años de agricultura continua, según Deambrosi y Méndez (2000), hay una pérdida de estructura del suelo y puede provocar también una disminución en el contenido de materia orgánica, por ende, una pérdida de la fertilidad del suelo.

Goulart et al. (2020), sostienen que el monocultivo de arroz causa problemas como la resistencia a las malezas, compactación del suelo (aumenta la densidad aparente), reducción de la porosidad total y la agregación del suelo.

#### **2.4.2 Rotaciones**

En la década del 70 se comenzó y profundizó en la posibilidad de rotación de arroz con pasturas artificiales y cultivos anuales, con los siguientes objetivos (Gamarra, 1996):

- ❖ Aumentar la frecuencia del arroz en la rotación.
- ❖ Disminuir los problemas del cultivo continuo utilizando nuevas tecnologías de manejo mejoradas.
- ❖ Reemplazar el barbecho poco productivo por opciones más productivas, como pasturas mejoradas, maíz, sorgo y soja, que se benefician por la infraestructura del arroz.

Méndez (1993), también menciona que las rotaciones en el área de producción arroceras comenzaron a instalarse en Uruguay en el año 1974. Los objetivos perseguidos por este sistema fueron: usar más intensivamente los recursos naturales, aumentando la frecuencia de siembra del arroz; incrementar los rendimientos de los rubros involucrados en cantidad y calidad; como también analizar y cuantificar el comportamiento de los rubros combinados.

#### **2.4.2.1 Rotación con cultivos anuales**

Gamarra (1996) sostiene que los suelos típicos de la zona arroceras del este no son los más aptos para otros cultivos, pero resume una serie de ventajas y desventajas para el cultivo de arroz.

Ventajas:

- ❖ Control de malezas problema, especialmente arroz rojo.
- ❖ Mejora de la nivelación y drenaje.
- ❖ Ayuda a recuperar las condiciones físicas del suelo.
- ❖ Aprovechamiento de la mayor fertilidad del suelo.

Desventajas:

- ❖ Competencia con el arroz por maquinaria, mano de obra y agua de riego en momentos claves.
- ❖ Algunas enfermedades pueden ser comunes a ambos cultivos como es el caso de *Rhizoctonia* en soja.

Las leguminosas anuales, cultivadas en rotación con cultivos de cereales, contribuyen a la acumulación total de nitrógeno en el suelo y mejoran el rendimiento de los cereales. En cuanto al resultado productivo del cultivo de arroz en rotación, los arrozales tuvieron rendimientos de 0,6-1,1 Mg ha<sup>-1</sup> más altos en rotaciones con cultivos de leguminosas que en rotación con cereales (Ahmad et al., 2001).

Según Terra et al. (2014a), la inclusión de leguminosas anuales podría contribuir al aporte de nitrógeno para el cultivo de arroz, disminuyendo así las necesidades de fertilización nitrogenada, lo cual impacta en los costos de producción.

#### **2.4.2.2 Rotación con soja**

Según Evers y Craigmiles, citados por Priore y Lima (1980), la soja se ajusta idealmente en rotaciones con el arroz. La maquinaria del arroz es fácilmente adaptable para la producción de soja. Las secuencias en la preparación del suelo, siembra y cosecha son compatibles con las del arroz, y ambos cultivos requieren suelos nivelados

que puedan ser fácilmente drenados. Por otra parte, el fósforo residual y el potasio aplicados al arroz, son beneficiosos para la soja, así como el nitrógeno fijado por los nódulos de la soja estimula el siguiente cultivo de arroz.

Chebataroff (1982), afirma que con soja habría un efecto del nitrógeno acumulado por la nodulación y un mejoramiento de las condiciones físicas del suelo capaces de influir incrementando los rendimientos del cultivo posterior. Este autor constató en una serie de experimentos que, aunque podría haber un efecto por la fijación biológica de nitrógeno por parte de la soja, hubo respuesta al agregado de este nutriente.

Gamarra (1996), analizando los resultados del experimento de Chebataroff (1982), menciona que, en cuanto a la posibilidad de que la soja deje un residuo de N aprovechable por el arroz, no han encontrado que esto ocurra, y se produce una alta respuesta a N en el arroz siguiente.

Por otra parte, Anders et al. (2004a) mencionan que la rotación de arroz-soja afecta significativamente la absorción del nitrógeno del fertilizante por parte de la planta de arroz, siendo para dicha rotación, mayor la captación de fertilizante que para la secuencia arroz-arroz.

Olk et al. (2005), mencionan que la captación de nitrógeno por el cultivo de arroz en rotación con soja es mayor que la del cultivo de arroz seguido de otro arroz. También a partir de otro experimento mencionan que los resultados del bajo rendimiento del arroz continuo se deben principalmente a la baja captación de N por parte del arroz continuo comparando con el arroz luego de una soja. Estos autores también encuentran que la absorción del fertilizante nitrogenado marcado con  $N^{15}$ , ocurrió mayoritariamente durante los estadios tempranos del crecimiento del cultivo y fue mayor en la rotación soja-arroz que en la secuencia arroz-arroz, siendo la diferencia de  $7 \text{ kg N ha}^{-1}$  en primordio y de  $14 \text{ kg N ha}^{-1}$  a cosecha.

Anders et al. (2005), encuentran que la absorción de N fue de  $107\text{-}114 \text{ kg ha}^{-1}$  en el cultivo continuo de arroz, mientras que en la rotación con soja la absorción por parte del arroz fue de  $145\text{-}149 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Anders et al. (2004b) encuentran también menor absorción total del nutriente con el cultivo continuo de arroz que con la rotación soja-arroz.

Según Terra et al. (2014b), por las características de los suelos y la topografía de la zona, como, pobre drenaje, baja fertilidad y limitantes de exploración radicular efectiva, el rhizobio asociado al cultivo de soja tiene una menor capacidad de fijar N, y obtener una correcta nodulación es un factor indispensable para obtener buenos rendimientos ya que según información disponible entre el 40 y el 50% del total de N es aportado por la fijación biológica del nitrógeno.

La introducción de la soja en la rotación puede ser un paso importante para intensificar el cultivo de arroz y diversificar la producción (Chebataroff, 1982). Este autor sostiene también que los herbicidas en soja favorecen la eliminación de malezas perennes y la infestación de arroz rojo.

Realizando una rotación arroz-soja existe una mayor intensidad del cultivo, con lo que hay un aumento de la producción y una mayor racionalización en el uso de la tierra. También tiene algunas ventajas desde el punto de vista de la estructura del suelo, del drenaje y del control de malezas, enfermedades y plagas (Oliveira et al., 1977).

Las ventajas derivadas del cultivo de soja en la rotación para el arroz implican el control de malezas y arroz rojo para mantener en un nivel capaz de ser eliminado con un herbicida en arroz (Priore y Lima, 1980).

Johnston y Miller (1973), muestran que el arroz en rotación con soja dio un promedio de 2.670 kg ha<sup>-1</sup> mientras que 1.390 kg ha<sup>-1</sup> fue lo que se obtuvo con arroz continuo. Si bien no es totalmente extrapolable a las condiciones nacionales, estos autores demostraron que la rotación de cultivos es esencial para continuar con los altos rendimientos del arroz.

Algunos productores de arroz garantizan que después de ejecutar el sistema con soja, los resultados son importantes en el retorno al arroz, aumentando la productividad en un 22% y disminuyendo los costos entre 8 y 15% (IRGA, 2019).

La inclusión de cultivos alternativos como el de soja en la rotación mejora la productividad del siguiente cultivo de arroz (Macedo et al., 2016a).

Según Mascarenhas et al. (1998), la producción del arroz fue mayor luego de una soja en comparación con el tratamiento arroz continuo, sosteniendo estos autores que la rotación tuvo un efecto benéfico.

Johnston y Miller (1973), obtienen como resultado de una serie de experimentos que el arroz rotado con soja produjo 1.120 kg ha<sup>-1</sup> más que cuando el arroz se cultivó continuamente. Estos autores también sostienen que, si se incorpora la materia verde del cultivo de soja y luego se siembra arroz, el incremento de rendimientos es más grande que si se aplicara fertilizante.

Como se puede observar, varios autores coinciden en la obtención de mayores rendimientos en grano de arroz cuando éste cultivo sucede al de soja.

La integración de la soja en la rotación permitiría mejorar y diversificar ingresos, intensificar el uso del suelo y agregar alternativas de control de malezas (Terra et al., 2014b).

### 2.4.2.3 Rotación arroz-pastura

La inclusión de una pradera en las rotaciones es recomendada para combatir enfermedades, plagas y malezas, los cuales reducen los rendimientos en forma considerable (Olaizola, 1968).

Según Bonilla et al. (1979), las metas de los sistemas de producción arroz-pastura son: aumentar la frecuencia y rendimiento del cultivo de arroz, mejorar la eficiencia de producción física y económica del establecimiento, y un mayor aprovechamiento en producción del período entre cultivos.

Las pasturas brindan algunos servicios a la rotación, tales como incorporar materia orgánica al suelo, interrumpir el ciclo de malezas, plagas y enfermedades, introducir nitrógeno por fijación biológica cuando se utilizan leguminosas, entre otros (Ayala et al., 2017).

Según Olaizola (1968), los antecedentes demuestran una clara eficacia de la rotación de praderas con leguminosas, dependiendo de la variedad el potencial nitrificador de la leguminosa, pero también depende del ciclo vegetativo de la misma. Esto significa que las perennes y de mayor ciclo aportan más nitrógeno.

Beecher et al. (1994b), sugieren que la fase de pasturas en la rotación con arroz puede ser tan corta como de dos años si estas son altamente productivas y si los tréboles son dominantes en éstas. Beecher et al. (1994a), arriban a una similar conclusión, expresando que en sistemas arroz-pastura no habría ventajas para el rendimiento en grano del arroz de fases de pasturas de leguminosas mayores a dos años si estas fueron bien instaladas y mantenidas.

Méndez (1993), de acuerdo con una serie de experimentos de rotaciones arroz-pastura (dos años de arroz seguido de cuatro años de pastura implantada o regenerada) realizados en la región este del Uruguay, pudo efectuar las siguientes conclusiones:

- ❖ Se detectó un aumento en rendimiento del arroz con pradera previa con respecto a sin pradera previa, llegando a ser de un 16%, siendo más favorable para el primer año de arroz (20%) que para el segundo (9%), considerándose el efecto positivo de la pradera como principal causa de este incremento.
- ❖ Se destaca una mayor estabilidad en los rendimientos de los cultivos de primer año que en los de segundo año.

Gamarra (1996) afirma que la nivelación y el drenaje de los suelos son imprescindibles para la producción de arroz, ya que permitirán la cosecha en seco, y por

ende facilitará la implantación y persistencia de las praderas. Este autor también resume una serie de ventajas y desventajas para el arroz en la rotación arroz-pastura.

#### Ventajas:

- ❖ Se aumenta la frecuencia de siembra de arroz.
- ❖ Se mejoran las condiciones físicas del suelo.
- ❖ Si la pradera está bien drenada, puede ayudar a disminuir las malezas.

#### Desventajas:

- ❖ Si se pastorea con animales adultos el primer año, hay mucho pisoteo.
- ❖ Se ha constatado un aumento de la incidencia de gramilla (*Cynodon*).
- ❖ Si la implantación de la pradera no es buena, puede aparecer capín e inclusive arroz rojo.

Según Deambrosi y Méndez (2000), con una buena utilización de las prácticas de nivelación y drenaje se maximizan las posibilidades de obtener las mayores productividades, tanto en la fase agrícola como en la pecuaria.

Además del beneficio directo que se obtiene en forma de productos pecuarios, las praderas y los cultivos forrajeros de leguminosas restablecen la fertilidad del suelo y mejoran sustancialmente la estructura del mismo (Olaizola, 1968).

Según Deambrosi y Méndez (2000), cuando se siembra pradera luego del cultivo de arroz, hay un deterioro de las propiedades físicas del suelo. Por otro lado, estos autores también sostienen que, se logran mayores potenciales de rendimiento con aplicaciones de menor cantidad de nutrientes. Cuando se siembra sobre pradera no solo se obtienen mayores rendimientos, sino que además se llega a la obtención de la máxima productividad con la aplicación de menor cantidad de nitrógeno.

Una pradera compuesta por gramíneas y leguminosas influye en la estructura del suelo, y con la presencia de leguminosas se mejora la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo de arroz (Deambrosi y Méndez, 2000).

Beecher et al. (1994a), encontraron que las secuencias de cultivos que involucraban pasturas tenían valores más altos de N en el suelo que las secuencias con cultivos continuos. También, afirman que las secuencias de cultivos con pasturas rindieron significativamente más que las secuencias basadas en cultivos, y mencionan que el máximo rendimiento en grano fue conseguido por los tratamientos de cultivo-pasturas fertilizadas, que rindió significativamente más que el tratamiento de arroz continuo con fertilización. Aunque las pasturas fueron capaces de incrementar el suministro de N del suelo, fue requerida una cantidad adicional de fertilizante

nitrogenado para maximizar los rendimientos. Estos autores afirman que, aparte de poseer una pastura altamente productiva, dominante en leguminosas, para producir arroz de alto rendimiento de 12-14 Mg ha<sup>-1</sup>, se requiere fertilizante suplementario de N.

Según Beecher et al. (1994b), la fertilización nitrogenada y el uso de leguminosas forrajeras incrementan el tamaño del pool de nitrógeno mineralizable, por lo tanto, proveen más nitrógeno para la utilización por el cultivo de arroz. Además, afirman que los cultivos de arroz continuo podrían alcanzar altos rendimientos similares a los del arroz en rotación con pasturas, con una adecuada y alta aplicación de fertilizante nitrogenado. Beecher et al. (1994a), afirman que, aunque el nitrógeno suministrado por la fase pastura pueda ser sustituido por la fertilización con N en la secuencia de arroz continuo, rotaciones de cultivos que involucran pasturas juegan un papel valioso y potencial oferta para mejorar sustancialmente la productividad y rentabilidad del sistema, además de que el arroz continuo fomenta el desarrollo de malezas.

En Uruguay, García et al. (1994), determinaron que teniendo en cuenta el total de forraje producido en el año, puede considerarse que, por cada tonelada de materia seca producida por una leguminosa, se fijan alrededor de 30 kg N ha<sup>-1</sup>.

Beecher et al. (1994b), también reportan que la rotación afecta la mineralización neta, obteniendo en la secuencia de arroz continuo un constante decrecimiento con el paso de la estación del cultivo, mientras los tratamientos con pasturas tienen incrementos en la mineralización durante la mitad de la estación y declinan al final.

En términos físico-económicos, el cultivo de arroz se ve beneficiado luego de un período con praderas, donde el arroz de primer año es superior y más estable tanto física como económicamente que el arroz de segundo año (Méndez, 1993).

No solo basta con sembrar arroz con praderas, sino que éstas tienen que ser manejadas correctamente para que persistan y sostengan altos niveles de productividad hasta que sean suprimidas para volver al arroz.

## **2.5 NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE ARROZ**

### **2.5.1 Requerimientos de nitrógeno**

Si bien el cultivo de arroz requiere N a lo largo de todo el ciclo, la mayor demanda por este nutriente se da en las etapas iniciales. El suministro durante la maduración es necesario ya que con éste se logra retrasar la senescencia de las hojas durante el llenado de grano y a su vez aumenta el contenido de proteína del grano

(Dobermann y Fairhurst, 2000). Dos Santos et al. (2017), comentan que este retraso en la senescencia se traduce en una mayor productividad en granos.

Benintende et al. (2011), reportan que el valor promedio de N absorbido durante todo el ciclo del cultivo, para tres cultivares diferentes, es de 119,8 kg N ha<sup>-1</sup>, similar a lo reportado por Angus et al. (1994), con valores de absorción de 111-115 kg N ha<sup>-1</sup> medidos a madurez fisiológica.

Para alcanzar los rendimientos promedio a nivel comercial en Uruguay Deambrosi et al., citados por Castillo et al. (2011) reportan que el cultivo de arroz absorbe aproximadamente 170 kg N ha<sup>-1</sup>.

Es relevante señalar que para los rendimientos medios de la zafra 2018/19 de 8,2 Mg ha<sup>-1</sup> se agregaron 70 kg N ha<sup>-1</sup>, lo que se traduce en 117 kg de grano cosechado/kg de N agregado (MGAP. DIEA, 2019b), similar a valores reportados por Castillo (2018), de 100 kg de grano cosechado/kg de N agregado.

### **2.5.2 Fuentes de nitrógeno disponibles para las plantas de arroz**

Tal como mencionan Perdomo et al. (1999), en la naturaleza existen dos fuentes principales de reserva de N para las plantas. La mayor es la atmósfera, donde un 78% del aire es nitrógeno en forma molecular (N<sub>2</sub>) y en forma de gas, luego le sigue el nitrógeno presente en la materia orgánica del suelo (MOS). Del total de N presente en el suelo, aproximadamente el 98% se encuentra formando compuestos orgánicos, y dependiendo del contenido de materia orgánica que contenga el suelo en los primeros 20 cm, se puede encontrar entre 1.000 a 10.000 kg N ha<sup>-1</sup>. Este nitrógeno orgánico como tal, no está disponible para las plantas, ya que para ser absorbido tiene que pasar a formas inorgánicas, y estas formas representan el 2% aproximadamente del N total del suelo, encontrándose bajo formas de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>). Estas formas son extremadamente variables en el suelo pudiendo encontrarse desde gramos hasta 100 kg ha<sup>-1</sup>, y debido a que el N inorgánico es la forma absorbida por las plantas, pasa a ser muy importante en la nutrición vegetal.

Por otra parte, Castillo (2018) encontró, que el mayor aporte de N al cultivo en los sistemas de producción de Uruguay proviene del suelo, por lo que sería necesario desarrollar o ajustar índices que permitan predecir la respuesta del cultivo a la fertilización de N en función de una oferta de nitrógeno del suelo dada.

### **2.5.3 Absorción de nitrógeno**

Según De Datta (1981), el suministro de N al cultivo de arroz proviene mayoritariamente del amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) acumulado y nitratos presentes cuando el suelo se encuentra inundado, así como también del nitrógeno mineralizado de la MOS, residuos

de plantas cuando el suelo es inundado, nitrógeno fijado por algas y bacterias heterotróficas, y nitrógeno incorporado por fertilizantes. Según el mismo autor, el arroz fertilizado con N obtiene el 50-80% de sus requerimientos del N proveniente del suelo, y este valor tiende a ser mayor cuando el arroz no es fertilizado.

Fageria et al. (2003a), comentan que las plantas absorben N de la solución del suelo como  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NH}_4^+$ , sin embargo, la forma de absorción está determinada por su abundancia y accesibilidad. En los suelos bien drenados la forma de  $\text{NO}_3^-$  es la dominante, mientras que en suelos húmedos y fríos domina la forma  $\text{NH}_4^+$ .

Como se mencionó anteriormente, el contenido de nitrógeno en suelos inundados se caracteriza por la acumulación de amonio, mientras que el nitrato bajo estas condiciones desaparece rápidamente por desnitrificación, lixiviación y absorción por las plantas (De Datta, 1981).

Los nitratos agregados como fertilizantes o los que se generan en las zonas aeróbicas cercanas a las raíces tienen un alto potencial de perderse, por esta razón se asume generalmente que el arroz absorbe poco nitrógeno como nitrato (Quintero et al., 2011).

Según Duan et al. (2007), muchas investigaciones se han basado solamente en la nutrición por amonio, pero agregan que en los últimos años los investigadores han prestado más atención en la absorción de nitrógeno como  $\text{NO}_3^-$ . Comentando resultados de estudios realizados con el isótopo  $\text{N}^{15}$ , los cuales fueron descritos por Kirk (2001), el cual sostiene que el arroz es excepcionalmente eficiente en absorber  $\text{NO}_3^-$ , y no descarta la posibilidad de que en las condiciones en las cuales se desarrolla el cultivo la planta de arroz pueda absorber cantidades significativas de  $\text{N-NO}_3^-$  formado en la rizosfera, gracias al intercambio gaseoso que se genera en las raíces.

Lo comentado anteriormente toma importancia, ya que si el  $\text{NO}_3^-$  no es absorbido por la planta se pierde, y también porque el crecimiento y rendimiento de las plantas mejoran sustancialmente cuando absorben nitrógeno como una mezcla de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , en comparación a la absorción solamente de  $\text{N-NH}_4^+$  (Duan et al., 2007).

Trabajos realizados por Holzschuh et al. (2009), muestran las ventajas de utilizar fertilizantes mezcla con 75%  $\text{NH}_4^+$  y 25%  $\text{NO}_3^-$ , donde se destaca una mayor acumulación de biomasa aérea, así como también una mayor producción de raíces. Otra de las ventajas descritas por estos autores, es que a medida que se aumenta la proporción de  $\text{NO}_3^-$ , disminuye la toxicidad por parte del  $\text{NH}_4^+$ , indicando que el  $\text{NO}_3^-$  es una importante fuente para el cultivo de arroz.

#### **2.5.4 Efecto del nitrógeno sobre los componentes de rendimiento y materia seca**

Los nutrientes esenciales cumplen diferentes funciones en la planta y su requerimiento varía según el estado fenológico en el cual se encuentra. El N es el cuarto elemento más importante para la planta de arroz, lo superan el hidrógeno (H), el carbono (C) y el oxígeno (O). El nitrógeno es un elemento muy dinámico y móvil por lo que su manejo agronómico se torna complicado (Mejía de Tafur y Menjívar, 2010).

El nitrógeno participa en la estructura de las proteínas de la planta, como también es regulador del crecimiento y promueve la reproducción celular, por ende, influye en el macollaje de la planta, en el aumento del tamaño de las hojas, en el incremento en el número y tamaño de granos por panoja, en la rapidez de llenado de grano y en el incremento del contenido proteico de los mismos (Mejía de Tafur y Menjívar 2010, Chebataroff 2012).

Según Dos Santos et al. (2017), el nitrógeno es responsable del incremento en el área foliar de la planta, provocando un aumento en la eficiencia de intercepción de la radiación solar y la tasa fotosintética, lo que trae como consecuencia mayores rendimientos en grano.

Dobermann y Fairhurst (2000), afirman que el N influye en todos los parámetros que determinan el rendimiento en el cultivo de arroz.

Para lograr crecimiento y rendimientos óptimos, el arroz requiere que haya suficiente N disponible en el momento de mayor crecimiento, que se da en estado de macollaje (Fageria et al., 2003a).

En general el número de tallos/m<sup>2</sup> se ve incrementado por el aumento en la densidad de siembra, como también por el suministro de nitrógeno a comienzos del macollaje, aunque ello no siempre se traduce en la obtención de un mayor número de panojas/m<sup>2</sup> al momento de la cosecha, pues muchos de ellos se tornan improductivos (Deambrosi y Méndez, 2007).

Trabajos realizados por Deambrosi et al. (2004), con la variedad INIA Olimar, donde se evaluaron diferentes dosis de N (0, 40, 80, 120 kg ha<sup>-1</sup>) y diferentes densidades de siembra, se encontraron diferencias significativas en rendimiento debido a aplicaciones de N, reportando hasta 2.000 kg ha<sup>-1</sup> de rendimiento en grano más que los tratamientos sin agregado de N.

### 2.5.5 Dinámica de suelos inundados

En Uruguay el cultivo de arroz se desarrolla bajo suelos inundados en la mayor parte de su ciclo, característica que diferencia a este cultivo de los demás. Bajo estas condiciones se producen cambios en sus propiedades, debido a las reacciones físicas entre el agua y el suelo, entrando en funcionamiento procesos químicos y biológicos, pudiendo diferenciarse dos capas claramente, una capa superficial oxidada o aeróbica donde está presente el oxígeno, y otra reducida o anaeróbica sin presencia de oxígeno, tal como se representa en la Figura 1 (Patrick y Mahapatra, 1968).

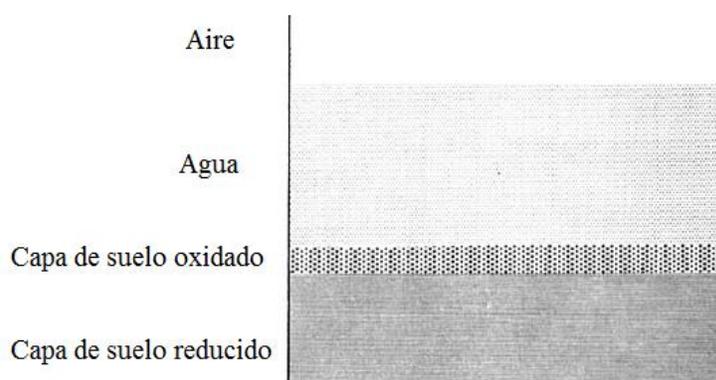


Figura 1. Diferenciación de un suelo anegado, donde se ilustran las diferentes capas de éste

Fuente: Patrick y Mahapatra (1968).

Patrick y Mahapatra (1968), De Datta (1981), coinciden en que el cambio más importante en estos suelos es el que ocurre a nivel de la rizosfera, la cual pasa de un ambiente aeróbico a anaeróbico o casi anaeróbico.

Perdomo et al. (1985), agregan algunas ventajas de estas condiciones anaeróbicas provocadas por la lámina de agua presente en el suelo, destacando entre estas un buen suministro de agua, un efectivo control de malezas, como también la mejora de algunas características químicas del suelo.

La inundación del suelo pone en marcha una serie de procesos físico-químicos, químicos y microbiológicos, que afectan la absorción de los nutrientes por parte de las plantas de arroz, así como también la disponibilidad y las pérdidas de estos nutrientes (Perdomo et al., 1985). Estos procesos anteriormente mencionados serán descriptos a continuación.

### 2.5.5.1 Cambios físico-químicos

Según Perdomo et al. (1985), bajo suelos inundados ocurren cambios tanto en el contenido de oxígeno (disminuyendo casi a cero en menos de un día), como también en la flora microbiana que habita en el suelo, pasando de microorganismos aerobios a anaerobios, los cuales necesitan oxidar la materia orgánica utilizando compuestos del suelo tales como, nitratos, óxidos de manganeso y óxidos férricos, entre otros, para poder realizar la respiración.

Como resultado de este proceso, ocurren cambios en el suelo, los cuales se describen brevemente a continuación (Perdomo et al., 1985).

- ❖ Cambios en el pH. El pH en suelos inundados tiende a la neutralidad, sin importar el que tenía previo a la inundación. Esta neutralidad se logra aproximadamente 3 semanas luego que el suelo es inundado, y se mantiene mientras dure la inundación.
- ❖ Disminución del potencial redox. El potencial redox desciende bruscamente luego de la inundación del suelo, donde en pocos días se alcanza un mínimo. Luego aumenta bruscamente alcanzando un máximo, el cual desciende asintóticamente con el tiempo. Los factores que influyen en la disminución del potencial redox son:
  - pH inicial del suelo.
  - Contenido de materia orgánica.
  - Temperatura.
  - Cantidad de aceptores de electrones que contenga el suelo.
  - Propiedades físicas del suelo.
  - Si el suelo es cultivado por primera vez o no.
- ❖ Aumento de la conductividad eléctrica. Es una propiedad que permite medir el contenido de sales del suelo. En suelos inundados el contenido de sales aumenta en las primeras semanas, para luego disminuir hasta lograr un equilibrio.

### 2.5.5.2 Cambios químicos

Transformaciones del nitrógeno: el N presente en el aire y agua de suelos inundados puede ser fijado por algas y bacterias transformándolas en nitrógeno orgánico. Este nitrógeno y el proveniente de residuos de plantas y animales, pueden sufrir un proceso de mineralización y transformarse en  $\text{NH}_4^+$ , el cual es absorbido por la planta de arroz. También pueden ocurrir procesos de desnitrificación y pasar a formas como  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2$  los cuales escapan a la atmósfera (Perdomo et al., 1985).

## **2.5.6 Dinámica del nitrógeno en suelos inundados**

### **2.5.6.1 Mineralización-inmovilización**

Los procesos de mineralización-inmovilización ocurren simultáneamente en el suelo, mientras que la mineralización repone el suministro de nitrógeno disponible en el suelo, la inmovilización lo agota total o temporalmente (De Datta, 1981).

Según Baethgen (1996), la mineralización es el proceso mediante el cual los microorganismos del suelo utilizan la materia orgánica para obtener energía, y como consecuencia de este proceso las formas orgánicas de N son convertidas en formas inorgánicas (nitratos y amonio) siendo éstas disponibles para las plantas.

Algunos autores utilizan el término mineralización del N solamente para referirse a la transformación del N-orgánico a las formas inorgánicas de amonio y nitrato (Jansson y Persson, 1982).

Este proceso en suelos inundados llega hasta las formas de  $\text{NH}_4^+$ , debido a la ausencia de oxígeno necesario para la conversión microbiana de amonio a nitrato (Patrick y Mahapatra, 1968). Bajo estas condiciones el  $\text{NH}_4^+$  formado es estable y tiende a acumularse en las arcillas y coloides del suelo (Chebataroff, 2012).

Según Baethgen (1996), la tasa de mineralización depende de las distintas fracciones de la MOS activa, pasiva y lenta. La capacidad del suelo de suministrar N a partir de la mineralización de la MOS depende de: el tipo de suelo (contenido de materia orgánica original, textura, estructura y aireación), temperatura (a mayor temperatura mayor actividad biológica en suelo y por ende mayor mineralización), y a la disponibilidad de agua del suelo (en condiciones de sequía la actividad de los microorganismos baja y con ella la mineralización).

Simultáneamente con el proceso de mineralización ocurre el proceso inverso de inmovilización, donde los microorganismos presentes en el suelo utilizan formas inorgánicas de N para su nutrición y las convierten en formas orgánicas (Baethgen, 1996).

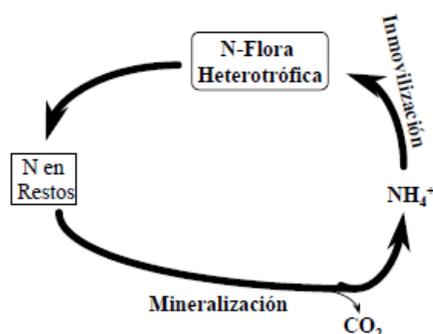


Figura 2. Esquema del ciclo de mineralización-inmovilización de N de un resto vegetal

Fuente: Perdomo et al. (1999).

De Datta (1981), menciona algunos factores que afectan la inmovilización:

- ❖ El régimen hídrico.
- ❖ La temperatura del suelo.
- ❖ El tipo y cantidad de materia orgánica.
- ❖ El tipo de N aplicado.
- ❖ La tasa de nitrificación.

### 2.5.6.2 Nitrificación-desnitrificación

Según Perdomo et al. (1999), la nitrificación se define como el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$ , el cual es realizado por microorganismos autótrofos especializados (principalmente Nitrobacterias). Dicho proceso ocurre en dos etapas. En la primera se da el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$ , en el cual intervienen bacterias del género Nitrosomonas, y en la segunda etapa se produce el pasaje de  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$  por bacterias del género Nitrobacter. Los factores que afectan la nitrificación según el mismo autor son: presencia de oxígeno, temperatura, pH y la concentración de  $\text{NH}_4^+$ .

En cambio, según Baethgen (1996), la desnitrificación es un proceso llevado a cabo por microorganismos que tienen la capacidad de utilizar nitratos en lugar de utilizar oxígeno para su respiración. Los productos de este tipo de respiración son óxidos de N como ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_x$ ) y N molecular ( $\text{N}_2$ ).

Según De y Sarkar (1936), el nitrato se pierde rápidamente en condiciones de acumulación de agua, reportando pérdidas de N aplicado como fertilizante del orden de 30-40% luego de 7 a 12 días.

### 2.5.6.3 Volatilización

Perdomo et al. (1999), comentan que la volatilización junto con la desnitrificación son los procesos mediante el cual el nitrógeno vuelve a la atmósfera, pero a diferencia de la desnitrificación, la volatilización es la pérdida de N bajo la forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Estos autores comentan que la tasa de volatilización está directamente relacionada con la concentración de amoníaco, la cual está determinada por el pH de la solución y la concentración de  $\text{NH}_4^+$ , indicando que siempre que existan altas concentraciones de amoníaco aumentan las pérdidas por volatilización.

Según De Datta (1981), los principales factores que afectan el proceso de volatilización son humedad del suelo, pH, capacidad de intercambio catiónico, textura y temperatura. Así como también factores agronómicos tales como:

- ❖ Momento de aplicación de fertilizantes.
- ❖ Condiciones atmosféricas.
- ❖ Método de aplicación de fertilizantes.
- ❖ Fuente de fertilizantes.
- ❖ Profundidad de aplicación de los fertilizantes.

De Datta (1981), reporta pérdidas por este proceso entre 8% y 60% del N aplicado.

### 2.5.6.4 Lixiviación

El  $\text{NO}_3^-$  debido a su carga negativa no es retenido por los coloides del suelo, por lo tanto, el agua que se mueve a través del perfil puede llevar consigo el  $\text{NO}_3^-$  hacia los horizontes inferiores, proceso que se conoce como lixiviación o lavado. Este proceso es descrito asumiendo que el agua que entra al suelo desplaza al agua que estaba en éste y al soluto  $\text{NO}_3^-$  disuelto en ella. Los factores que afectan el proceso son los siguientes: tipo de suelo, humedad de suelo, presencia de rastrojo en superficie, cultivo en crecimiento activo y tipo de laboreo (Perdomo et al., 1999).

## 2.6 FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN EL CULTIVO DE ARROZ

El nitrógeno es el nutriente que más limita los rendimientos de los cultivos en el mundo, como también el nutriente que generalmente presenta las respuestas más importantes en aumentos de rendimientos (Baethgen, 1996).

Para alcanzar altos rendimientos de manera sostenible y a su vez sustentable con el ambiente, es necesario conocer además de la fisiología de la planta de arroz, los requerimientos nutricionales de ésta, así como las condiciones del clima y suelo donde se establecerá el cultivo.

Entre las características diferenciales de los sistemas de producción de arroz en Uruguay con respecto a otros países, Castillo et al. (2014) destacan aspectos agronómicos, tales como, la siembra en seco, rotación con otros cultivos, incorporación de pasturas con leguminosas, y también la alta variabilidad en los tipos de suelos y microcuencas climáticas. Esta diversidad de situaciones sugiere que los requerimientos de N no serían igual para todas las situaciones, y por lo que contar con parámetros que ayuden a evaluar esas situaciones sería una herramienta de utilidad para guiar la toma de decisiones de fertilización del cultivo.

Según Baethgen (1996), el factor que más afecta en la decisión de una dosis de fertilizante a aplicar es el económico, en particular en lo que se refiere al costo del fertilizante. Existen dos tipos de decisiones equivocadas: aplicar más N del necesario, o aplicar menos N del que el cultivo requiere.

Por otra parte, el suelo es un sistema dinámico desde el punto de vista de la fertilidad y la productividad, que casi nunca contiene la cantidad óptima y el equilibrio adecuado de todos los nutrientes requeridos por las plantas. Es por esta razón, que para obtener plantas vigorosas y sanas como también altos rendimientos, realizar un correcto manejo de la fertilización que asegure la nutrición equilibrada y adecuada de las plantas de arroz, sería uno de los requisitos más importantes a la hora del manejo del cultivo (Mejía de Tafur y Menjívar, 2010).

Cuando se agrega un elemento al suelo, ocurren reacciones de adsorción, de intercambio, de fijación, de precipitación o de inmovilización que pueden impedir que la planta tome el elemento. También puede ocurrir lo contrario, es decir, que el elemento reaccione con otras sustancias y de esta manera sea absorbido fácilmente por la planta (Mejía de Tafur y Menjívar, 2010).

Por esta razón, el objetivo de la fertilización debe ser proveer suficiente cantidad de nutrientes, en una forma que se conserven en el sistema suelo-planta para que sean usados eficientemente por las plantas (Gamarra, 1996). Este mismo autor menciona algunos requisitos para un uso eficiente de fertilizantes:

- ❖ Un buen manejo del agua en relación con la fertilización.
- ❖ Selección de la fuente correcta.
- ❖ Momento y método adecuados, para un crecimiento óptimo del cultivo.
- ❖ Una cantidad adecuada, para optimizar el rendimiento y el retorno económico.

### **2.6.1 Fertilizantes nitrogenados**

Los fertilizantes nitrogenados de uso convencional en la agricultura son principalmente la urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio, DAP y MAP, destacándose la urea cuyo consumo supera a todos los demás (Boaretto et al., 2007).

La fuente más utilizada para la fertilización nitrogenada en cobertura que se realizan en el cultivo de arroz es la urea debido a su bajo costo por unidad de nutriente (Méndez et al., 2011).

Quintero et al. (2011), aseguran que en varios trabajos se muestra la conveniencia de utilizar esta fuente dado a que tiene el N en forma amídica y no se vería afectado significativamente por la desnitrificación en el ambiente al cual se somete el cultivo de arroz en Uruguay. Los mismos autores comentan que algo similar ocurre con fuentes amoniacaes como por ejemplo el sulfato de amonio.

Sin embargo, la urea es una fuente que ante determinadas condiciones puede sufrir pérdidas por volatilización. Méndez et al. (2011), comentan que estas pérdidas pueden ser disminuidas con el uso del inhibidor de la ureasa (enzima que degrada la urea) NBPT (n-butil-triamidatofosforica), inhibidor presente en la urea verde.

Quintero et al. (2011), mencionan que otra estrategia para disminuir las pérdidas por volatilización, es fertilizar el cultivo previo a la inundación. Estos mismos autores remarcan que las investigaciones realizadas en Estados Unidos muestran que la fertilización previa a la inundación es la más efectiva, si se realiza en suelo seco y se inunda antes de 5 días.

Gamarra (1996), afirma que el uso de fuentes de nitrógeno que no son estables en el suelo resulta ineficiente y reduce la rentabilidad, y asegura que usar la fuente adecuada pero no en el momento adecuado de desarrollo del cultivo resulta en bajos rendimientos y altos costos.

Es por esta razón que algunos autores como Fageria et al. (2003a), no recomiendan la aplicación de fuentes nítricas ya que están sujetas a pérdidas por desnitrificación.

### **2.6.2 Momento de aplicación del nitrógeno**

La aplicación del N debe ser fraccionada en 2 o 3 etapas para lograr una mejor eficiencia y que el nitrógeno no falte en los momentos más críticos del ciclo del cultivo (Gamarra, 1996).

Deambrosi y Méndez (2007), comentan que, según la capacidad de suministro de nitrógeno del suelo, es recomendable dividir la aplicación de nitrógeno en siembra, macollaje y elongación de entrenudos.

Según Evatt y Hodges, citados por Gamarra (1996), el fraccionamiento de la dosis de N se hace necesario porque:

- ❖ Es difícil determinar la dosis necesaria antes de la zafra.
- ❖ Las dosis altas aplicadas sin fraccionar pueden incrementar el vuelco y provocar una mayor infestación de malezas.
- ❖ Esta práctica reduce las pérdidas de N, sobre todo en suelos más livianos.

Esta información coincide con la obtenida por Chebataroff (2012), el cual reporta que la dosis dividida de N en distintos momentos puede aumentar la eficiencia de uso del N hasta un 60-70%. Además, esta división podría reducir la incidencia de enfermedades por un abastecimiento equilibrado del nutriente, como también se reduce la altura de planta y se mejora la arquitectura previniendo el vuelco.

### **2.6.3 Factores que afectan la respuesta a nitrógeno**

Cassman et al. (1998), destacan que casi todo el arroz bajo suelo inundado tiene respuesta significativa al agregado de nitrógeno si se maneja de manera adecuada el agua, las malezas y las enfermedades.

Las condiciones climáticas (radiación solar y temperatura) condicionan las respuestas a la aplicación de nitrógeno. Baja oferta solar durante la etapa reproductiva disminuye las posibilidades de incrementar la respuesta al agregado de N, e incluso puede generar efectos negativos sobre el rendimiento, incrementándose la altura de planta y disminuyendo el índice de cosecha (Deambrosi y Méndez, 2007).

Sobre el período crítico del cultivo (20 días pre y post floración), deben existir condiciones de alta luminosidad y poca o nula frecuencia de ocurrencia de temperaturas inferiores a los 15°C durante más de tres días consecutivos (Deambrosi y Méndez, 2007).

Deambrosi y Méndez (2007), consideran que, dada una determinada capacidad de suministro de N por parte del suelo, eligiendo la variedad a sembrar apropiada, la época de siembra considerada óptima y utilizando las prácticas de manejo recomendadas para el cultivo, la respuesta positiva a la fertilización con N estará condicionada por las condiciones climáticas existentes (radiación solar y temperaturas mínimas), principalmente durante la fase reproductiva del cultivo.

Trabajos realizados por Castillo et al. (2011), muestran que la respuesta al agregado de N en Uruguay bajo dos ambientes contrastantes que generan potenciales de rendimiento altos y medios, es relativamente baja, mostrando resultados del testigo sin fertilizar entre 85 y 90% en comparación a los tratamientos con fertilización nitrogenada. Estos datos coinciden con estudios realizados por Deambrosi y Méndez (2007), en los cuales se obtuvieron respuestas bajas, ya que el testigo sin fertilizar obtuvo rendimientos en torno a 80-90% en relación con el tratamiento a dosis óptima, para diferentes ambientes y años.

En cuanto a las características del suelo, Chebataroff (2012), comenta que la textura, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y N total, son indicadores importantes para comprender el potencial de suministro de N por parte del suelo, reportando valores críticos para materia orgánica en el orden del 3% para encontrar respuesta al agregado de N, donde por encima de este valor la respuesta es baja, no existe o en algunos casos es negativa.

## **2.7 EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO**

Boaretto et al. (2007), comentan que el arroz, trigo y maíz, consumen actualmente el 60% del nitrógeno (N) total empleado como fertilizante a nivel mundial y representan un tercio del total consumido. También, se estima que para el año 2050 la población mundial alcanzará los 9.300 millones de habitantes por lo que será necesario aumentar entre un 50 y 70% la producción de estos cereales. De no existir un incremento en la eficiencia en el uso de los fertilizantes debería entonces haber un incremento de igual magnitud en la cantidad de fertilizante nitrogenado usado.

Según De Datta (1981), la eficiencia de uso del fertilizante es la producción de cualquier cultivo por unidad de nutriente aplicado bajo un conjunto específico de suelo y condiciones climáticas.

La eficiencia de uso del N se mide como la ganancia en producción de grano por unidad de nutriente aplicado, y debe buscarse en los cultivares de alta productividad a través del uso de las buenas prácticas de manejo (Boaretto et al., 2007). Las prácticas de manejo que mejoran la eficiencia de uso de los nutrientes según Fageria et al. (2003a), son las siguientes:

- ❖ Manejo del pH del suelo.
- ❖ Uso de fuentes nitrogenadas adecuadas.
- ❖ Método de aplicación correcto.
- ❖ Momento adecuado de aplicación.
- ❖ Manejo del agua.
- ❖ Manejo de plagas.
- ❖ Uso de cultivares de alto rendimiento adaptados a un entorno dado.

### 2.7.1 Índices de eficiencia de uso de nitrógeno

La eficiencia de uso de N puede expresarse a través de distintos índices. A continuación, se presentan los descriptos por Fixen et al. (2015).

Eficiencia agronómica (EA): se define como unidades de aumento en rendimiento por unidades de nutriente aplicado. Este índice se relaciona directamente con el retorno económico.

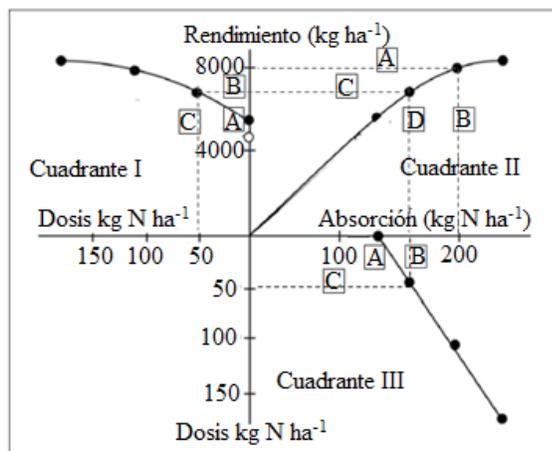
Eficiencia interna de uso del nitrógeno (EUI): se define como el rendimiento alcanzado en función del nitrógeno total absorbido, y este es dependiente del genotipo, ambiente y manejo. Cuanto más alto se torna este indicador la deficiencia de N se acentúa.

Eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno (EFIS): se define como el cociente entre dos incrementos, el de rendimiento y el de absorción de N.

Eficiencia de recuperación aparente (ERA): se define como el cociente entre la diferencia en absorción total de N entre parcelas fertilizadas y parcelas sin fertilizar, y la dosis de N agregada.

Factor de productividad parcial del nitrógeno agregado (FPP): es un índice de fácil cálculo e interpretación, y se calcula como unidades de rendimiento del cultivo por unidad de nutriente aplicado ( $\text{kg kg}^{-1}$ ). Este índice se torna útil cuando se comparan regiones y países que comparten el mismo sistema productivo y un mismo cultivo.

En la Figura 3 se presentan ejemplos de los índices de eficiencia de uso de N gráficamente en base al diagrama de 3 cuadrantes propuesto por Van Keulen, citado por Castillo (2018), donde el FPP es el cociente entre los valores que componen cada punto de la serie, rendimiento (letra B) sobre dosis de N (letra A). EUI se lo observa en el cuadrante II y corresponde al cociente entre el rendimiento (letra A) y la absorción de N (letra B). La EFIS se la puede visualizar en la misma curva del cuadrante II, pero por medio de la diferencia entre dos puntos cualesquiera de la serie. En este cuadrante, es el cociente entre la diferencia en rendimiento (A-C) y la de absorción de N (B-D). ERA se lo visualiza en el cuadrante III y corresponde a la diferencia de absorción de N entre los puntos de la serie con agregado de N y sin agregado (B-A), respecto a la dosis de N agregada (C). Por último, la EA se la puede observar en el cuadrante I como el cociente entre la diferencia en rendimiento (B-A) y la dosis de N que generó ese incremento en rendimiento (C).



Nota. Los índices de eficiencia de uso del N comprendidos en cada cuadrante son: I) FPP y EA, II) EFIS y EUI y III) ERA.

Figura 3. Diagrama de 3 cuadrantes en el cual se muestran las relaciones entre: I) dosis de N agregada y rendimiento, II) absorción total de N y rendimiento, y III) dosis de N agregada y N absorbido por el cultivo

Fuente: adaptado de van Keulen por Castillo (2018).

Las formas de cálculo de los diferentes índices de eficiencia de uso de N son descriptas por Dobermann (2007), de la siguiente manera:

1.  $EA = (Y - Y_0) / N$
2.  $EUI = Y / U$
3.  $EFIS = (Y - Y_0) / (U - U_0)$
4.  $ERA = (U - U_0) / N$
5.  $FPP = Y / N$

Donde “N” son los kg N ha⁻¹ aplicado; “Y” es el rendimiento en grano kg ha⁻¹ con fertilización nitrogenada; “Y₀” rendimiento en grano kg ha⁻¹ sin agregado de fertilizante; “U” absorción total de N en parcelas fertilizadas medida cuando el cultivo alcanza la madurez; “U₀” absorción total de N en parcelas sin fertilizar medido cuando el cultivo alcanza la madurez.

## 2.8 EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE ARROZ

La eficiencia de uso del N es un indicador muy importante para la evaluación de sistemas de producción, el cual puede verse muy afectado por el manejo de la fertilización nitrogenada. El objetivo es aumentar el rendimiento de los sistemas con el uso del nutriente y minimizar las pérdidas de éste al ambiente. También pueden existir situaciones donde la EUN sea relativamente baja sin ser dañino para el medio ambiente, así como sistemas con una eficiencia muy alta pueden no ser sustentables (Fixen et al., 2015).

Aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes es un gran desafío para la agricultura mundial (Dobermann, 2007). De no lograrse, mantener esta situación en el tiempo, va a cambiar la relación costo-beneficio, y también los costos sociales y ambientales de la contaminación por N (Keeler et al., 2016).

Durante cinco décadas, el rendimiento mundial de arroz ha aumentado gradualmente debido a un aumento de la fertilización nitrogenada (Ju et al., citados por Hou et al., 2019), sin embargo, la EUN expresada como eficiencia de recuperación de N es relativamente baja. Aplicaciones excesivas de nitrógeno, con baja ERA, podría llevar a pérdidas de N a través de escorrentía, lixiviación, desnitrificación y volatilización (Hou et al., 2019).

Según Fageria y Baligar (2001), la agricultura moderna requiere eficiencia y prácticas ambientalmente racionales. El nitrógeno es un factor clave para lograr rendimientos óptimos, pero es uno de los insumos más caros y si no se usa correctamente puede causar contaminación, principalmente de las aguas. Estos autores sostienen que la eficiencia de uso del nitrógeno en estos sistemas, donde el suelo está inundado, es relativamente baja, debido a las pérdidas de N por lixiviación, volatilización y desnitrificación, pero depende del año, del nivel de rendimiento, de la dosis y del momento de aplicación del N, entre otros.

Nguyen et al. (2018), también expresan que la eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados en el arroz es bajo debido a la volatilización del amoníaco, desnitrificación, lixiviación, fijación de amonio, inmovilización y escorrentía, lo que da mayor importancia a los problemas económicos y ecológicos de la fertilización con N.

Casi todas las regiones productoras de arroz han reportado algún tipo de parámetro de la eficiencia de uso del nitrógeno.

Según Dobermann (2007), existen diferencias significativas entre las regiones del mundo con respecto a la eficiencia de uso del N, ya sea por potencial de rendimiento alcanzable; calidad del suelo; cantidad, momento y forma de aplicación de N; y otras operaciones de manejo del cultivo.

Según Conant et al., citados por Castillo (2018), los países caracterizados por un sistema de alta producción por medio de altas cantidades de nitrógeno agregadas fueron los más contaminantes pero los de mayor eficiencia de uso, debido a una mayor eficiencia de recuperación (ERA).

En el Cuadro 1 se muestra información compilada por Castillo (2018), de diferentes países y/o zonas del mundo, con las diferentes eficiencias, obtenidas en muchos años y sitios.

Cuadro 1. Componentes de la EUN en el cultivo de arroz para distintos países y/o regiones

País/Región	Dosis N kg ha <sup>-1</sup>	ERA --- % ---	EFIS -----	EA kg kg <sup>-1</sup> -----	FPP
Filipinas	101	---	---	9	57
India	135	---	---	17	53
Vietnam	106	---	---	11	52
Bangladesh	72	---	---	---	62
Asia *	115	46	53	22	62
Asia **	117	31	39	12	49
África **	106	36	47	17	46
África ****	124	24	---	---	---
Australia	175	32	---	---	---
Eurasia	115	41	---	---	---
América del Norte	39	---	---	---	---
América del Sur	120	39	---	---	---
Asia del Sur	213	39	---	---	---
China	190	38	---	12	25
Promedio	124	36	46	15	51

\* Estaciones experimentales, \*\* campos agricultores, \*\*\* campos demostrativos

Fuente: adaptado de Castillo (2018).

Para situaciones de manejo ajustadas, se reportan los siguientes valores de referencia (Dobermann y Fairhurst, 2000).

- ❖ EA: entre 0 a 35 kg kg<sup>-1</sup>, con un manejo adecuado de nutrientes debe estar en el rango de 20-25.
- ❖ EUI: entre 50-60 kg kg<sup>-1</sup>.

- ❖ EFIS:  $50 \text{ kg kg}^{-1}$ , valores por debajo de este sugieren condiciones de crecimiento subóptimas, que pueden incluir deficiencias de nutrientes, incidencia de plagas y enfermedades, entre otras.
- ❖ ERA: entre 0 a 90%, con un manejo adecuado de nutrientes se pueden lograr eficiencias de recuperación del 50-70%.
- ❖ FPP: entre 15 a  $100 \text{ kg kg}^{-1}$ , con manejo adecuado de nutrientes debe ser mayor a 50.

En un experimento realizado en Uruguay en las zafras 2008-09 y 2009-10, en 6 localidades, sobre cultivos comerciales, con dos tratamientos de N ( $T_0= 0 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $T_{68}= 68 \text{ kg ha}^{-1}$  aplicados fraccionados entre siembra, macollaje y primordio floral) se obtuvieron los siguientes resultados de los índices de eficiencia de uso del N (Castillo, 2018):

- ❖ La eficiencia agronómica (EA) mostró valores promedios para el primer año de  $17 \text{ kg kg}^{-1}$  y para el segundo año de  $18 \text{ kg kg}^{-1}$  (valores promedios para distintas localidades). El rango de EA para todas las localidades, en los dos años, fue entre 10 y  $32 \text{ kg kg}^{-1}$  (promedio general:  $17,5 \text{ kg kg}^{-1}$ ).
- ❖ La eficiencia de uso interno del N (EUI) mostró valores promedios para el primer año de  $55 \text{ kg kg}^{-1}$  y para el segundo año de  $64 \text{ kg kg}^{-1}$  (valores promedios para distintas localidades). El rango de EUI para todas las localidades, en los dos años, y con distintos tratamientos de N, fue entre 37 y  $78 \text{ kg kg}^{-1}$  (promedio general:  $56 \text{ kg kg}^{-1}$ ).
- ❖ La eficiencia fisiológica de uso del N (EFIS) mostró valores promedios para el primer año de  $50 \text{ kg kg}^{-1}$  y para el segundo de  $32 \text{ kg kg}^{-1}$  (valores promedios para distintas localidades). El rango de EFIS para todas las localidades, en los dos años, fue entre 22 y  $91 \text{ kg kg}^{-1}$  (promedio general:  $41 \text{ kg kg}^{-1}$ ).
- ❖ La eficiencia de recuperación aparente (ERA) mostró valores promedios para el primer año de 32% y para el segundo año de 58% (valores promedios para distintas localidades). El rango de ERA para todas las localidades, en los dos años, fue entre 10 y 88% (promedio general: 40%).
- ❖ El factor de productividad parcial del N agregado (FPP) mostró valores promedios para el primer año de  $159 \text{ kg kg}^{-1}$  y para el segundo año de  $133 \text{ kg kg}^{-1}$  (valores promedios para distintas localidades). El rango de FPP para todas las localidades, en los dos años, fue entre 111 y  $184 \text{ kg kg}^{-1}$  (promedio general:  $150 \text{ kg kg}^{-1}$ ).

Los resultados obtenidos por Castillo (2018) coinciden con lo reportado por Fageria y Baligar (2001). Estos autores obtienen valores para eficiencia agronómica de

23 kg kg<sup>-1</sup>, eficiencia fisiológica de 63 kg kg<sup>-1</sup>, eficiencia de recuperación aparente de 39%, y eficiencia de uso interno de N de 58 kg kg<sup>-1</sup>.

Pittelkow et al. (2016), encontraron que entre 1993 y 2013 el sector arrocero uruguayo mostró valores altos de FPP (entre 90-160 kg kg<sup>-1</sup>). Altos rendimientos combinados con relativos bajos niveles de aplicación de N determinan que estos valores de eficiencia se encuentren por encima de los comúnmente encontrados en zonas arroceras (Ladha et al., citados por Pittelkow et al., 2016). Castillo (2018) afirma que, durante estos años, las cantidades de N extraídas en grano superaron al agregado como fertilizante, y se encontró que esa diferencia está dada por la contribución de N del suelo al cultivo, entonces es clave cuantificar los índices de eficiencia de uso de este cultivo para poder diferenciar este producto comercialmente, ya que se exporta más del 90 %.

Según Castillo (2018), cuando se utiliza el FPP para evaluar la eficiencia de uso del N en un sistema, es necesario considerar aspectos agronómicos complementarios, ya que este índice tenderá a variar significativamente en función de la dosis agregada, por tratarse de un cociente entre la productividad y el N agregado. Este autor sostiene que un alto valor de FPP con un bajo agregado de N, es un claro indicador de insostenibilidad, debido a un balance negativo de nitrógeno en el tiempo. Por ende, estas situaciones que indican eficiencias demasiado altas podrían estar asociadas a altos riesgos de “minería” de N. También afirma que, para sistemas productivos donde el arroz rota con pasturas u otros cultivos, encontrar este indicador con valores tan altos (entorno a los 100-140 kg kg<sup>-1</sup>), están explicados en parte por el aporte significativo del N nativo del suelo, el que permitió alcanzar una alta productividad aún sin agregado de N, por ende se puede afirmar que la muy alta eficiencia de uso del N, cuantificada por FPP, se explica por aspectos propios del sistema de producción (alto aporte de N nativo del suelo) y en segundo lugar por aspectos relacionados al manejo de la fertilización donde 2/3 de las aplicaciones se realiza en suelo seco con posterior inundación.

La recuperación de N en las plantas suele ser inferior al 50 % en todo el mundo (Fageria y Baligar, 2005), lo cual coincide con lo reportado por Castillo (2018). Según sostienen Fageria y Baligar (2005), la baja recuperación de N en el cultivo se asocia con las pérdidas por volatilización, lixiviación, escorrentía superficial, desnitrificación y cubierta vegetal. La baja recuperación de N no solo es responsable del mayor costo de producción del cultivo, sino también de la contaminación ambiental. Por esta razón, mejorar la eficiencia de uso del nitrógeno es deseable para aumentar los rendimientos, reducir los costos de producción y mantener la “calidad” ambiental. Estos autores afirman que un sistema arroz-pradera ofrece una de las mejores oportunidades para mejorar la EUN.

Según Subedi et al. (2018), la sincronización entre la demanda del cultivo y el suministro de nitrógeno es el aspecto más importante para aumentar la eficiencia de uso del N, obtener altos rendimientos y reducir las pérdidas de nitrógeno. Según estos

autores la razón principal de la baja eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados en el arroz es el fraccionamiento ineficiente de las aplicaciones de N, que además incluyen un exceso de nitrógeno siendo este mayor a lo requerido.

Todas las eficiencias de uso del nitrógeno disminuyen significativamente con el aumento de la dosis de N (Fageria y Baligar, 2001), como se puede observar en el Cuadro 2. Cabe destacar que el mayor rendimiento y la mayor absorción de N se obtuvieron con la dosis máxima (210 kg ha<sup>-1</sup>).

Cuadro 2. Eficiencias de uso del nitrógeno bajo diferentes dosis de N

Dosis N kg ha <sup>-1</sup>	EA	EFIS	EUI	ERA
	-----kg kg <sup>-1</sup> -----			%
30	35	72	76	49
60	32	73	83	50
90	22	75	67	37
120	22	66	50	38
150	18	57	50	34
180	16	51	42	33
210	13	46	36	32

Fuente: adaptado de Fageria y Baligar (2001).

Según Hou et al. (2019), la absorción de nitrógeno y la eficiencia de uso se correlaciona positivamente con la dosis de N. También, afirman que la ERA disminuye con la dosis creciente de nitrógeno, información que coincide con autores antes mencionados.

Subedi et al. (2018), sostienen que la absorción de nitrógeno y la EUN son más altas cuando se aplica N en función de la necesidad del cultivo. El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados puede provocar muchos efectos adversos, como disminuir la eficiencia del uso de fertilizantes por las plantas, desperdiciar recursos, aumentar los costos agrícolas y contaminar el medio ambiente (Nguyen et al., 2018).

Según afirman Xiong et al. (2018), la eficiencia de uso del nitrógeno depende de la dosis de N, de la fuente nitrogenada usada y de la fertilidad del suelo, combinado con una gestión adecuada del agua.

En Uruguay falta información sobre la eficiencia de uso del nitrógeno y el aporte relativo de los fertilizantes y otras fuentes al cultivo en distintos sistemas de rotaciones. Este trabajo se va a enfocar en conocer y entender estos índices para contribuir al diseño de los sistemas de producción y la optimización de la fertilización nitrogenada sobre los mismos.

Un desafío importante en la producción de arroz a nivel nacional es hacer frente al aumento de rendimiento y a la eficiencia de uso de los fertilizantes, sin comprometer la calidad del grano y la “calidad” ambiental. La optimización del manejo del sistema para mejorar el rendimiento y la eficiencia en el uso de nutrientes es de gran importancia para desarrollar la producción de arroz.

Conocer más sobre la EUN podría ser muy útil para ahorrar costos agrícolas y cuidar el medio ambiente.

## **2.9 HIPÓTESIS GENERAL**

La rotación y la secuencia en la que se integra el arroz en esta afecta el aporte de N del suelo y, por tanto, la respuesta del cultivo al agregado de nitrógeno como fertilizante.

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO, PERÍODO EXPERIMENTAL Y TIPOS DE SUELO DOMINANTES

En la zafra 2018-2019 se realizó un experimento parcelario de respuesta al agregado de nitrógeno en el cultivo de arroz sobre una plataforma de rotaciones de largo plazo instalada en 2012 en la Unidad Experimental Paso de la Laguna, INIA Treinta y Tres. La misma está ubicada a 28 km de la ciudad de Treinta y Tres, dirección este, a una altitud de 22m sobre el nivel del mar, siendo sus coordenadas geográficas: 33°16'22"S, 54°10'22"W.

La plataforma experimental compara 6 rotaciones arroceras en todas sus fases simultáneamente y repetidas tres veces espacialmente. El suelo dominante en el sitio experimental fue descrito como un Brunosol subéutrico lúvico con fase hidromórfica, perteneciente a la Unidad “La Charqueada” (MAP, 1976).

#### 3.2 TRATAMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Para evaluar la respuesta productiva y la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) del N agregado se seleccionaron cultivos de arroz en tres de las seis rotaciones establecidas en 2012 (Cuadro 3): 1) arroz continuo (AzC, 7<sup>mo</sup>. arroz consecutivo) con trébol alejandrino como cobertura invernal; 2) rotación arroz-pasturas largas (Az-PL) evaluando los dos cultivos de arroz de la secuencia, el primero (Az1) luego de una pradera de 3,5 años de festuca, trébol blanco y *Lotus corniculatus*, y el segundo (Az2) sobre una cobertura invernal de raigrás anual luego de Az1; y 3) rotación arroz-soja (Az-Sj) sobre una cobertura invernal de trébol alejandrino luego de la soja.

Cuadro 3. Rotaciones de largo plazo seleccionadas donde se instaló el ensayo de respuesta a N en arroz

Rotación	Año 1		Año 2		Año 3		Año 4		Año 5	
	Pri.-Ver.	Oto.-Inv.	Pri.-Ver.	Oto.-Inv.	Pri.-Ver.	Oto.-Inv.	Pri.-Ver.	Oto.-Inv.	Pri.-Ver.	Oto.-Inv.
AzC	Arroz	Tr. Alej.								
Az-PL	Arroz 1	Raigrás	Arroz 2	Pastura larga: (festuca, trebol blanco, <i>Lotus corniculatus</i> )						
Az-Sj	Arroz	Raigrás	Soja	Tr. Alej.						

Referencias: Tr. Alej. = trébol alejandrino; Pri.-Ver. = primavera-verano; Oto.-Inv. = otoño-invierno.

En 1/3 de cada parcela de arroz de las rotaciones elegidas (parcela grande), se instalaron subparcelas de 3x10m (parcela chica) con cinco dosis de nitrógeno: a) 0 kg N ha<sup>-1</sup> (N<sub>0</sub>), b) 25 kg N ha<sup>-1</sup> (N<sub>25</sub>), c) 50 kg N ha<sup>-1</sup> (N<sub>50</sub>), d) 100 kg N ha<sup>-1</sup> (N<sub>100</sub>), e) 150 kg N ha<sup>-1</sup> (N<sub>150</sub>), fraccionadas 70% a macollaje (V<sub>4</sub>) y 30% a primordio floral (R<sub>0</sub>). En la Figura 4 se indica el plano de la plataforma experimental de largo plazo con las parcelas seleccionadas para los ensayos de respuesta.



60 parcelas 18x60

ROTACIONES 2018-2019

ESCALA 1:2500



Aclaraciones: en rojo se resaltan las rotaciones en estudio, AzC = arroz continuo; Az1-PL = primer arroz-pastura larga; Az2-PL = segundo arroz-pastura larga; Az-Sj = arroz-soja.

Figura 4. Plano de parcelas grandes con sus respectivas rotaciones

El diseño experimental fue de bloques completos al azar (3 repeticiones) y arreglo de parcelas divididas. Las parcelas mayores correspondieron a la rotación y las menores a la dosis de N. Para el contenido de N en planta y materia seca a inicio de macollaje se utilizó un diseño en bloques completo al azar (3 repeticiones), ya que no se encontraba la variable dosis de N en ese momento.

### 3.3 MANEJO DEL CULTIVO

#### 3.3.1 Manejo a la siembra

El arroz fue sembrado sin laboreo el 9 de noviembre con el cultivar INIA Olimar luego de 45 a 60 días de barbecho químico según la rotación. El mismo se realizó con la mezcla de 4,5 lt ha<sup>-1</sup> glifoweed + 0,240 lt ha<sup>-1</sup> dicamba + 0,75 lt ha<sup>-1</sup> 2,4-D amina + 0,5 lt ha<sup>-1</sup> caddy + 5 gr ha<sup>-1</sup> agrimet. El 22 de octubre se realizó una aplicación con herbicidas pre-emergentes (3 lt ha<sup>-1</sup> glifoweed + 0,8 lt ha<sup>-1</sup> cibelcol + 0,5 lt ha<sup>-1</sup> caddy) para todas las rotaciones. La densidad de siembra del arroz fue de 160 kg de semilla ha<sup>-1</sup> para todas las rotaciones, curadas con dupla (imidacloprid + tebuconazol) + draza. La fertilización fosfatada y potásica a la siembra se ajustó por niveles críticos de suelo mediante el programa “FertilizArr” la cual se presenta en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Análisis de suelo (0-20 cm)

Rotación	P. Cítrico (ug P/g)	K (meq/100)	Mg (meq/100)	PMN (mg/kg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )
AzC	5	0,14	2,4	12
Az1-PL	7	0,24	2,2	12
Az2-PL	6	0,13	2,3	10
Az-Sj	10	0,25	2,5	13

Cuadro 5. Fertilización a la siembra (kg ha<sup>-1</sup>)

Rotación	0-46/46-0	0-0-60	9-25/25-25+3S
AzC	110	160	54,4
Az1-PL			54,4
Az2-PL	22	138	54,4
Az-Sj	64	89	54,4

### 3.3.2 Manejo post siembra

La fecha de emergencia fue:

- ❖ 19 de noviembre para Az1-PL y Az-Sj.
- ❖ 22 de noviembre para AzC y Az2-PL.

El 3 de diciembre se realizó una aplicación de herbicida post emergente compuesto por la mezcla de 1 lt ha<sup>-1</sup> loyant + 1,5 lt ha<sup>-1</sup> cyncha para las rotaciones Az2-PL y Az-Sj, mientras que para AzC y Az1-PL la aplicación se realizó el 5 de diciembre y se utilizó la mezcla de 1,4 lt ha<sup>-1</sup> rebelex + 0,5 lt ha<sup>-1</sup> uptake.

El nitrógeno se aplicó al voleo en forma de urea fraccionado en dos momentos. El primero el 6 de diciembre al inicio del macollaje (V<sub>4</sub>) con urea verde en seco, previo a la inundación donde se agregó el 70% de la dosis. La segunda aplicación se realizó con el 30% restante de la dosis a inicio de primordio floral (R<sub>0</sub>) el 8 de enero con urea común y el cultivo ya inundado. Se hicieron dos aplicaciones de fungicidas para el control de enfermedades.

Cuadro 6. Dosis de N ha<sup>-1</sup> como urea a macollaje y primordio

Tratamiento kg N ha <sup>-1</sup>	Macollaje kg urea ha <sup>-1</sup>	Primordio kg urea ha <sup>-1</sup>	Total kg urea ha <sup>-1</sup>
0	0	0	0
25	38	16	54
50	76	33	109
100	152	65	217
150	228	98	326

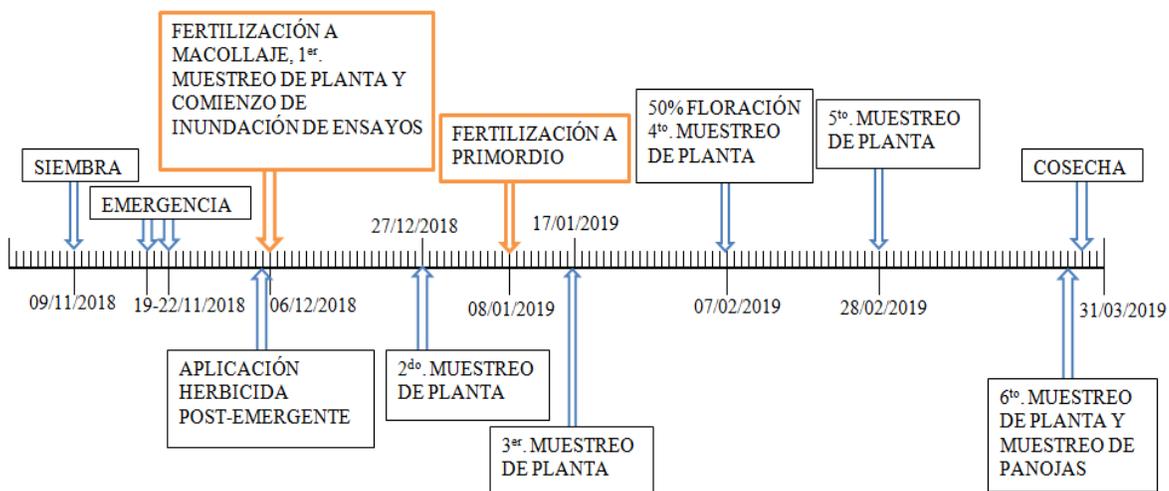


Figura 5. Esquema simplificado de manejo del cultivo desde la siembra hasta la cosecha

### 3.4 DETERMINACIONES

#### 3.4.1 En el cultivo

- ❖ **Conteo de plantas:** a los 27 días post-siembra se realizó un conteo de plantas por cada subparcela (parcela chica) de cada rotación. En cada subparcela se realizaron 2 muestreos de 2 metros lineales cada uno.
- ❖ **Muestreo de plantas:** las determinaciones durante el ciclo del cultivo incluyeron la biomasa aérea y su contenido de N cada 21 días a partir de inicio de macollaje. Todos los muestreos fueron realizados en todas las subparcelas de todas las rotaciones y sus repeticiones, excepto en el primer muestreo el cual se realizó solamente en las rotaciones (parcelas grandes) y sus repeticiones en el espacio. En total se realizaron 6 muestreos de plantas. En el primer muestreo se realizaron 4 cortes por rotación (parcela grande), donde se cortaron las plantas correspondientes a 50cm de la línea de siembra y al ras del suelo. Debido a que el muestreo se realizó antes de fertilizar a macollaje no fue necesario el muestreo de las subparcelas (parcela chica). En los siguientes muestreos (cada 21 días) se obtuvieron 2 muestras por subparcelas (parcela chica), cada muestra corresponde a 50cm lineales al ras del suelo y obtenidas siempre en la 4<sup>ta</sup> línea desde el borde, en cada extremo opuesto de la subparcela, manteniendo la misma línea en los muestreos posteriores. El día 26 de marzo, en precosecha también se realizó un muestreo solamente de panoja (para componentes de rendimiento), donde se obtienen dos muestras por subparcela (parcela chica) correspondiente a 30cm lineales cada una.
- ❖ **Cosecha:** se realizó mediante cosechadora experimental FOTON con un ancho de corte de 2 metros. Se trilló un área de 20m<sup>2</sup> por cada subparcela de N (parcela

chica), para luego tomar su peso y una submuestra de granos, la cual va al laboratorio para ser analizada.

### 3.4.2 Laboratorio

- ❖ Planta: luego de los muestreos de planta, las 60 muestras se llevaron a laboratorio para su limpieza y se determinó su peso fresco, para luego llevarla a una estufa a 60°C durante 48 horas y determinar su peso seco. Luego se procede a molerlas mediante un molino, con un pasaje por malla de 1mm y posteriormente enviar dichas muestras a analizar al laboratorio de INIA La Estanzuela con el fin de obtener el % de N en planta.
- ❖ Panojas: con las 60 muestras obtenidas en precosecha (2x30cm) se procedió a secarlas en una estufa a 60°C durante 48 horas, para luego realizar el conteo de panojas por cada subparcela. A continuación, se procede a desgranar, donde se separan los granos de la paja y se obtiene el peso de granos de cada muestra, luego se determinó el peso de mil granos. A partir de estos resultados se calculó los granos por panoja.
- ❖ Granos: luego de la cosecha se le toma el % de humedad de cada muestra mediante el instrumento marca DICKEY-john modelo GAC 2100, para luego mediante una máquina de secado que utiliza corrientes de aire caliente, bajar el % de humedad hasta un valor objetivo de 13%. Se creyó más conveniente utilizar estas muestras para determinar el % N en grano, por ende, luego del proceso antes mencionado se procedió a molerlas mediante un molino con pasaje por malla de 1mm y se enviaron dichas muestras al laboratorio de INIA La Estanzuela, donde se determinó el % N en grano.
- ❖ Rendimiento: se obtuvo un peso de cosecha en 20m<sup>2</sup> de cada subparcela (parcela chica) en el campo, y luego con este dato se pasó a kg ha<sup>-1</sup>. Luego de determinar el % de humedad de la muestra, se calcula la merma de humedad y con este dato se recalcula el rendimiento en grano en kg ha<sup>-1</sup> a 13% humedad de cada subparcela para cada una de las rotaciones del experimento.
- ❖ Índice de cosecha: de la última muestra de 2x50 cm obtenida precosecha y luego de haber pasado por estufa y pesada (submuestra), se procedió a desgranar cada submuestra, donde se separa la paja del grano, y se pesan ambos componentes. La paja se muele para ser enviada al laboratorio para determinar el % de N en paja y el grano se descarta ya que para determinar % de N en grano se usó la muestra a cosecha por ser más representativa como ya se mencionó anteriormente. Luego se procede a calcular el índice de cosecha, ya que se tiene el peso de la submuestra en MS y los pesos de cada componente por separado (grano y paja) de esa submuestra, calculándose el índice de cosecha (% paja y % grano) para cada subparcela. Por último, para disminuir el error de la submuestra, se hizo un promedio solo por dosis de N, calculándose para cada dosis un índice de cosecha indistintamente de la rotación.

- ❖ Análisis de nitrógeno en planta: el método de análisis utilizado por INIA La Estanzuela para determinar concentración de N en planta y grano se basa en la combustión a 900°C y posterior detección de N<sub>2</sub> por conductividad térmica.

### 3.5 CÁLCULOS

#### 3.5.1 Dosis óptima física y dosis óptima económica

El cálculo de la dosis óptima física para rendimiento y relación entre rendimiento-absorción total de N, se realizó de la siguiente manera: a cada ecuación obtenida luego de ajustar un modelo para cada rotación dentro de la variable estudiada, se le realizó la derivada primera y a esta se la igualó a cero, para luego despejar “x” y de esta manera obtener la dosis óptima física.

Para la dosis óptima económica, en vez de igualar a cero la ecuación, se la iguala a la relación de precios (precio insumo/precio producto), para luego despejar “x” obteniendo la dosis óptima económica. Se utilizó una relación insumo/producto de 5,4 (0,98 U\$\$/unidad de N; 0,18 U\$\$/kg de arroz).

En el caso de la EUN, para cada índice luego de ajustado el modelo a cada rotación, sobre la ecuación resultante de cada una de estas se sustituye la “x” por el valor de la dosis óptima física y por la dosis óptima económica correspondiente.

#### 3.5.2 Fórmulas de cálculo para EUN

Para el cálculo de los diferentes índices de eficiencia de uso de N, se utilizaron las fórmulas descriptas por Dobermann (2007):

1.  $EA = (Y - Y_0) / N$
2.  $EUI = Y / U$
3.  $EFIS = (Y - Y_0) / (U - U_0)$
4.  $ERA = (U - U_0) / N$
5.  $FPP = Y / N$

Donde “N” son los kg N ha<sup>-1</sup> aplicado; “Y” es el rendimiento en grano kg ha<sup>-1</sup> con fertilización nitrogenada; “Y<sub>0</sub>” rendimiento en grano kg ha<sup>-1</sup> sin agregado de fertilizante; “U” absorción total de N en parcelas fertilizadas medida cuando el cultivo alcanza la madurez; “U<sub>0</sub>” absorción total de N en parcelas sin fertilizar medido cuando el cultivo alcanza la madurez.

### 3.6 MODELO ESTADISTICO

#### 3.6.1 Modelo estadístico general

El análisis de datos se realizó según el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_k + R_i + \delta_{ik} + N_j + (RN)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$i=1,2,3,4$  (rotación) (a)

$j=1,2,3,4,5$  (dosis de N) (b)

$k=1,2,3$  (bloque) (r)

Donde:

- ❖  $Y_{ijk}$  = variable aleatoria observable (variable de respuesta).
- ❖  $\mu$  = parámetro, media general.
- ❖  $R_i$  = efecto del  $i$ -ésimo rotación.
- ❖  $N_j$  = efecto del  $j$ -ésimo nivel de aplicación de nitrógeno.
- ❖  $\beta_k$  = efecto del  $k$ -ésimo bloque.
- ❖  $(RN)_{ij}$  = efecto de la interacción entre el  $i$ -ésimo rotación y el  $j$ -ésimo nivel de aplicación de nitrógeno (efecto de interacción).
- ❖  $\delta_{ik}$  v.a iid  $\mathcal{N}(0; \sigma_{\varepsilon_a}^2)$  condiciones de parcela grande.
- ❖  $\varepsilon_{ijk}$  v.a iid  $\mathcal{N}(0; \sigma_{\varepsilon_b}^2)$  condiciones de parcela chica.

#### 3.6.2 Hipótesis

$H_0: R_1=R_2=R_3=R_4$

$H_a$ : existe al menos un  $R_i$  diferente

$H_0: N_1=N_2=N_3=N_4=N_5$

$H_a$ : existe al menos un  $N_j$  diferente

$H_0$ : no existe interacción  $(RN)_{ij}$

$H_a$ : existe efecto de la interacción  $(RN)_{ij}$

#### 3.6.3 Modelo estadístico para inicio de macollaje

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

$i=1,2,3,4$  (rotación)

$j=1,2,3$  (bloque)

Donde:

- ❖  $Y_{ij}$ = variable aleatoria observable (variable de respuesta).
- ❖  $\mu$ = parámetro, media general.
- ❖  $R_i$ = efecto del i-ésimo rotación.
- ❖  $\beta_j$ = efecto del j-ésimo bloque.
- ❖  $\varepsilon_{ij}$ = v.a no observable.

#### 3.6.4 Hipótesis

- ❖  $H_0: R_1=R_2=R_3=R_4$
- ❖  $H_a$ : existe al menos un  $R_i$  diferente

#### 3.6.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico se hizo con modelos mixtos donde la rotación, la dosis de N y sus interacciones fueron considerados efectos fijos, y los bloques y su interacción con la rotación como efectos aleatorios. Para determinar la significancia de los efectos fijos se utilizó un test F con un  $P=0,05$ .

Todos los resultados fueron analizados mediante el paquete estadístico Infostat (Di Renzo et al., 2008).

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

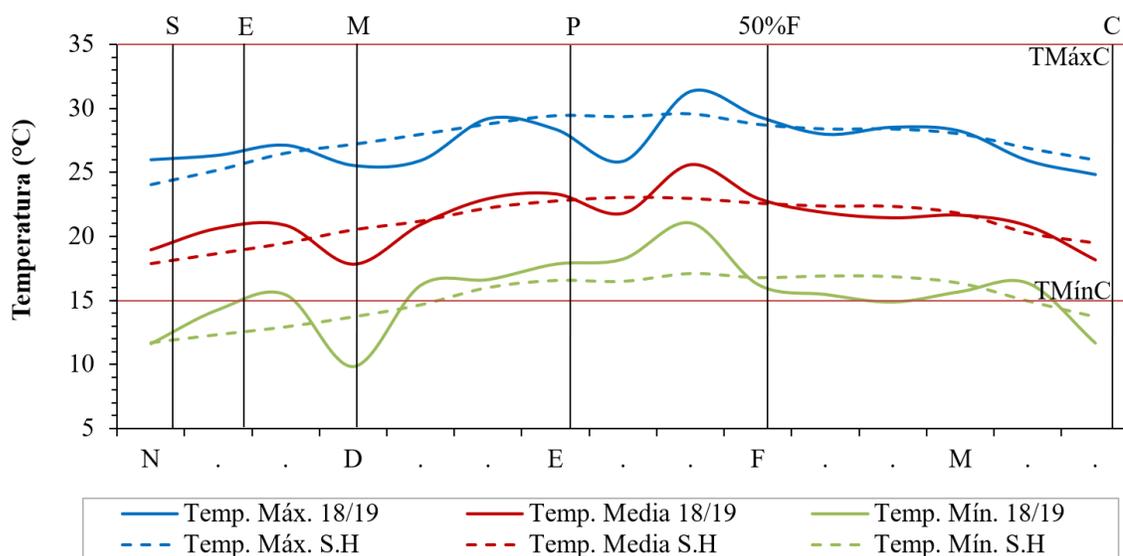
### 4.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS ZAFRA 2018/2019

La presentación de las variables climáticas buscó caracterizar las condiciones ambientales en las cuales se desarrolló el experimento en la zafra 2018/2019. Las temperaturas máximas medias y mínimas junto con la heliofanía son las principales variables responsables en la determinación de los potenciales de rendimiento en grano.

La producción de arroz irrigado en regiones de clima templado está condicionada por la ocurrencia de bajas temperaturas durante la etapa reproductiva del cultivo que afecta su fertilidad, como también a la variación en la luminosidad a lo largo del ciclo que condicionan la respuesta de las plantas a la aplicación de nitrógeno (Méndez y Deambrosi, 2009).

#### 4.1.1 Temperatura

En la zafra 2018-2019 no se registraron temperaturas máximas restrictivas para un buen desarrollo del cultivo (Figura 6). Lo mismo sucedió con las temperaturas mínimas, ya que no se registraron temperaturas menores a los 15°C durante la etapa de prefloración y floración, por lo que la polinización en la etapa reproductiva no se vio afectada.



Nota: TMáxC= temperatura máxima crítica; TMínC= temperatura mínima crítica; S= siembra; E= emergencia; M= macollaje; P= primordio floral; 50%F= 50% floración; C= cosecha.

Figura 6. Temperatura máxima, media y mínima en décadas para la zafra 2018/2019 en comparación con la serie histórica (S.H.) 1971/2017, Dpto. de Treinta y Tres

Yoshida (1981) comenta que la temperatura óptima para todo el ciclo del cultivo es de 25 a 30°C. Cuando la temperatura está por debajo de cierto nivel, el crecimiento o el desarrollo pueden detenerse. Temperaturas por debajo de los 12°C por más de 5 días pueden inducir al 100% de esterilidad. Esto generalmente se asocia a las temperaturas nocturnas. Por otra parte, cuando la temperatura supera los 35°C, se pueden producir afectaciones dependiendo de la etapa de desarrollo en la que se encuentre el cultivo. Entre éstas se destaca una posible esterilidad inducida por las altas temperaturas, afectando la definición del rendimiento.

#### 4.1.2 Heliofanía

La radiación solar fue muy variable con respecto a la media de la serie histórica a lo largo del ciclo del cultivo (Figura 7). La heliofanía durante la etapa vegetativa estuvo 15% por debajo respecto a la serie histórica. Esta deficiencia de luz fue aún más evidente y severa entre el primordio y la floración donde la heliofanía fue la más baja de la serie histórica de 46 años, registrando valores de horas luz de aproximadamente 19% inferior a esta, afectando claramente el potencial de producción del cultivo. Mientras tanto, durante el periodo crítico (PC) y el llenado de grano la disponibilidad lumínica fue mayoritariamente superior a la media de la serie histórica.

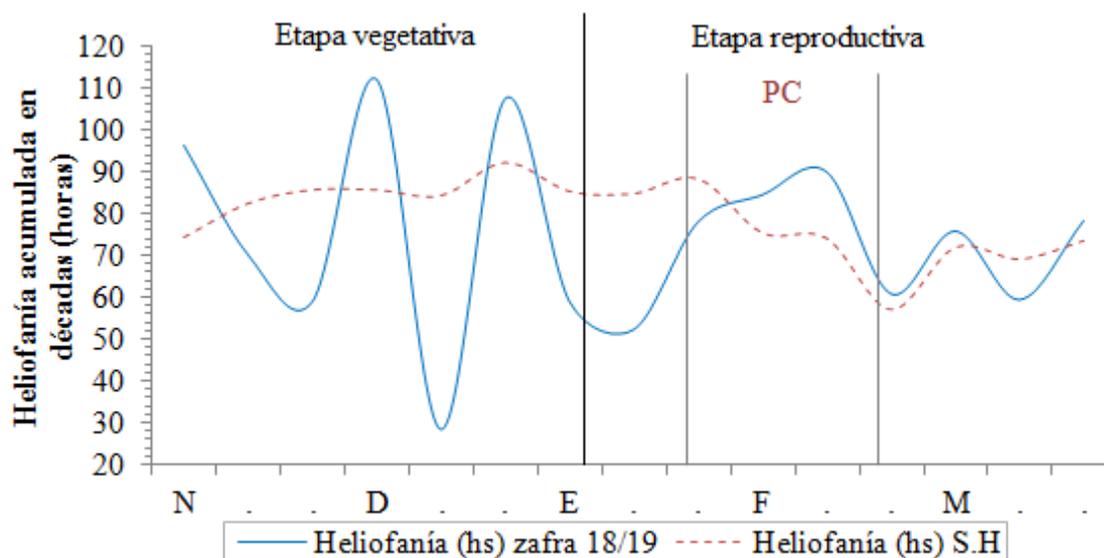


Figura 7. Heliofanía acumulada por décadas en horas luz. Datos para la zafra 2018/2019 y para la Serie Histórica (S.H)

La radiación solar condiciona la respuesta a la aplicación de N. Por lo tanto, una baja oferta de radiación durante la etapa reproductiva disminuye las posibilidades de incrementar la respuesta al agregado de este nutriente. Los efectos que esto trae como consecuencia son: una mayor altura de la planta y un menor índice de cosecha, afectando

así el rendimiento. Es así que, durante el período crítico de 20 días pre y post floración, deben darse condiciones de alta luminosidad (Deambrosi y Méndez, 2007).

Según Yoshida (1981), los requisitos de radiación solar difieren según la etapa en la cual se encuentre el cultivo. Una baja radiación solar en la fase vegetativa tiene un efecto negativo pequeño sobre el rendimiento, mientras que una baja radiación solar en la etapa reproductiva puede afectar considerablemente el número de espiguillas/m<sup>2</sup>. Esto puede provocar grandes efectos negativos sobre el rendimiento en grano.

#### 4.1.3 Precipitaciones

Esta variable se presenta con el fin de visualizar el aporte de agua adicional al cultivo por parte de las precipitaciones, así como también como para explicar la baja radiación solar registrada en las primeras décadas del mes de enero.

Las precipitaciones mensuales acumuladas estuvieron por debajo de los registros históricos (Figura 8). Sin embargo, en enero las precipitaciones superaron ampliamente a las registradas en la serie histórica de 46 años, siendo aproximadamente 50% superiores a esta.

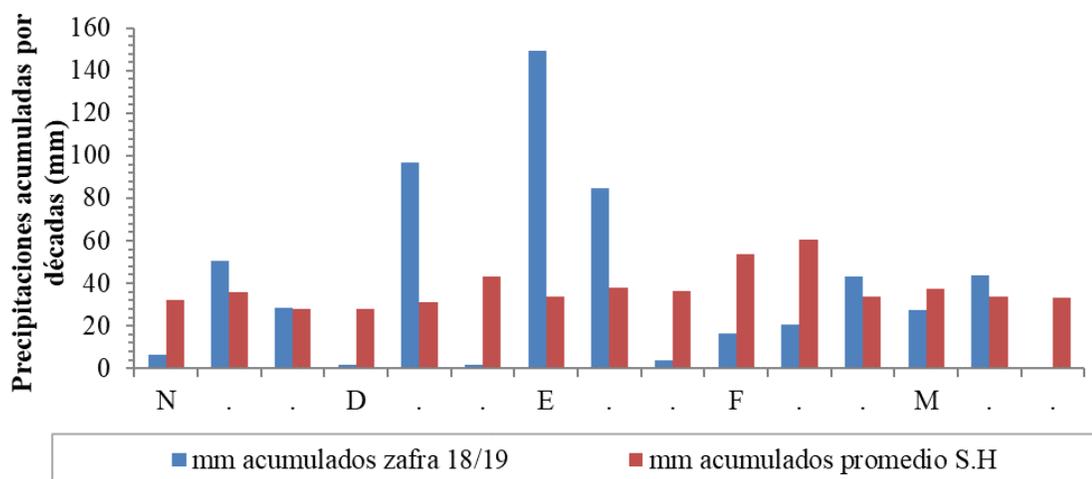


Figura 8. Precipitaciones acumuladas en décadas de la zafra 2018/2019 y precipitaciones promedio acumuladas de la serie histórica (S.H.) 1971-2017

## 4.2 INSTALACIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL

La emergencia del cultivo de arroz fue rápida, aproximadamente 10 y 13 días luego de la siembra como resultado de la buena temperatura y humedad del suelo. El arroz de las rotaciones Az1-PL y Az-Sj emergió el 19/11/2018, mientras que el de AzC

y Az2-PL lo hizo tres días después. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en las plantas obtenidas entre las diferentes rotaciones y las subparcelas destinadas a dosis de nitrógeno (295 plantas m<sup>-2</sup>, Cuadro 7), la cual es considerada muy buena, incluso algo por encima del rango ideal de 200-260 plantas m<sup>-2</sup> en la cual no se observan limitaciones al rendimiento (Quintero, 2009).

Cuadro 7. Cuento de plantas en la etapa de implantación

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----Plantas m <sup>-2</sup> -----				
0	223	293	396	322	308a
25	222	357	286	309	294a
50	301	335	304	243	296a
100	266	283	339	271	290a
150	270	302	331	237	285a
Media	256A	314A	331A	276A	295

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

### 4.3 PRODUCCIÓN DE BIOMASA

#### 4.3.1 Materia seca a inicio de macollaje (V<sub>4</sub>)

Se constataron diferencias significativas en el crecimiento inicial desde emergencia a inicio de macollaje entre el arroz de las diferentes rotaciones (Cuadro 8).

Cuadro 8. Efecto de la rotación (R) sobre la biomasa acumulada del cultivo 15 días luego de la emergencia

Rotación	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj
	-----kg MS ha <sup>-1</sup> -----			
Biomasa producida	150AB	247A	87B	232A
Error estándar (R)	31,9			

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

La biomasa acumulada al inicio de macollaje en el arroz sembrado sobre pastura o soja fue 175% mayor al arroz sobre raigrás de Az-PL. Sin embargo, no se observó diferencias entre la biomasa de éstas y la biomasa de AzC. La calidad de la cama de siembra generada por los antecesores inmediatos y las velocidades de emergencia ya comentadas entre rotaciones podrían estar explicando las diferencias iniciales de biomasa acumulada. Estos resultados coinciden con Terra et al. (2010), que

mostraron una menor acumulación de MS (94 kg MS ha<sup>-1</sup>) a V<sub>4</sub> en arroz en siembra directa sobre raigrás en relación con otros antecesores invernales. Del mismo modo, Méndez et al. (2001), reportaron el efecto negativo de la cobertura de raigrás sobre el cultivo de arroz en las primeras etapas.

#### 4.3.2 Materia seca a pleno macollaje

Hubo efecto tanto de la rotación como de la fertilización nitrogenada en la biomasa acumulada a pleno macollaje, pero no así de la interacción entre ambos (Cuadro 9). La biomasa acumulada en el arroz sobre soja o pradera fue 45% y 62% mayor a la biomasa del arroz continuo y al segundo arroz sobre raigrás de la rotación con pasturas, respectivamente.

Cuadro 9. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a pleno macollaje (37 DDE)

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg MS ha <sup>-1</sup> -----				
0	945	1.351	722	1.571	1.147d
25	1.008	1.608	941	1.700	1.314c
50	1.267	1.625	1.214	1.786	1.473b
100	1.637	2.165	1.420	2.300	1.880a
150	1.286	1.735	1.208	1.963	1.548b
Media	1.229BC	1.697AB	1.101C	1.864A	1.473
Error estándar (R)	139,9				
Error estándar (D)	49,11				
Error estándar (RxD)	98,22				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

La biomasa aérea producida aumentó al incrementar la dosis de nitrógeno sobre el cultivo hasta la dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup>, pero no logró reducir la brecha de biomasa entre las rotaciones sin nitrógeno. La producción promedio de biomasa aérea a la dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> fue 64% superior que la del tratamiento sin nitrógeno.

#### 4.3.3 Materia seca a primordio (R<sub>0</sub>)

La biomasa del cultivo de arroz a primordio fue afectada por la rotación y la dosis de nitrógeno, pero no así por su interacción (Cuadro 10). La mayor acumulación de materia seca se observó en el arroz de Az-Sj, mientras que la menor acumulación se observó en el segundo arroz de Az-PL.

Se observaron efectos significativos del agregado de nitrógeno sobre la biomasa acumulada hasta la dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup>, siendo esta en promedio 100% superior a la del tratamiento testigo (3.162 kg ha<sup>-1</sup>). La menor respuesta al agregado de nitrógeno se encontró en Az1-PL (81%) y la mayor en Az2-PL (122%), sugiriendo algún problema asociado al antecesor más allá de diferencias en la capacidad de aporte de N del suelo en ambas fases de la misma rotación. La cobertura invernal previa al arroz determina el potencial de aporte de N al sistema, donde los rastrojos de gramíneas con alta relación C/N presentan una alta capacidad de inmovilizar N.

Cuadro 10. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a primordio (R<sub>0</sub>)

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg MS ha <sup>-1</sup> -----				
0	3.005	3.586	2.132	3.926	3.162d
25	3.357	3.846	2.474	4.862	3.635d
50	3.882	4.865	3.372	5.272	4.348c
100	4.374	5.486	4.233	6.224	5.079b
150	5.978	6.507	4.751	8.169	6.351a
Media	4.119BC	4.858AB	3.393C	5.691A	4.515
Error estándar (R)	265,61				
Error estándar (D)	178,30				
Error estándar (RxD)	356,61				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

#### 4.3.4 Materia seca a floración (R<sub>4</sub>)

Se observaron diferencias significativas en la producción de biomasa de arroz a floración entre las rotaciones y las dosis de N, pero no en su interacción (Cuadro 11). Al igual que en las etapas más tempranas del ciclo, la mayor biomasa de arroz se observó en Az-Sj y Az1-PL. Sin embargo, la biomasa de AzC fue mayor a Az2-PL. La biomasa acumulada de Az2-PL a floración fue 30 y 20% inferior a la de Az-Sj y AzC, respectivamente.

La biomasa aérea a floración se incrementó con la dosis de nitrógeno hasta el tratamiento de 150 kg N ha<sup>-1</sup>. El arroz donde se observó la mayor respuesta fue Az2-PL, con un incremento de 93% respecto al testigo sin fertilización.

Cuadro 11. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a floración

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg MS ha <sup>-1</sup> -----				
0	6.413	7.735	4.779	7.767	6.674e
25	8.526	9.209	6.062	8.776	8.143d
50	8.918	9.685	6.762	9.732	8.774c
100	9.266	10.355	7.784	11.479	9.721b
150	9.808	11.038	9.208	11.824	10.469a
Media	8.586A	9.604A	6.919B	9.915A	8.756
Error estándar (R)	439,29				
Error estándar (D)	202,32				
Error estándar (RxD)	404,65				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

#### 4.3.5 Materia seca a mitad de llenado de grano (R<sub>7</sub>)

No se detectaron diferencias significativas entre rotaciones en la biomasa acumulada del cultivo de arroz a mitad de llenado de grano. Sin embargo, las respuestas al agregado de N fueron significativas hasta las máximas dosis utilizadas en todas las rotaciones (Cuadro 12).

Cuadro 12. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a mitad de llenado de grano

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg MS ha <sup>-1</sup> -----				
0	12.179	12.852	11.645	13.858	12.633e
25	13.250	14.807	12.789	14.844	13.922d
50	14.574	16.593	13.695	15.841	15.176c
100	17.057	17.553	15.456	16.483	16.637b
150	18.443	18.661	16.289	17.848	17.810a
Media	15.100A	16.093A	13.975A	15.775A	15.236
Error estándar (R)	625,46				
Error estándar (D)	395,63				
Error estándar (RxD)	791,27				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Hubo una muy buena acumulación de biomasa entre las rotaciones producto de las condiciones climáticas que se dieron luego de la floración, donde la temperatura se mantuvo en rangos óptimos y se dieron condiciones de alta luminosidad.

La biomasa de arroz a mitad de llenado de grano en la dosis de máxima respuesta fue 41% mayor que la del testigo sin nitrógeno.

#### 4.3.6 Materia seca a cosecha (R<sub>9</sub>)

Se observaron efectos significativos de la rotación y de la dosis de nitrógeno y sus interacciones en la biomasa de arroz acumulada a cosecha (Cuadro 13).

La mayor biomasa se observó en Az1-PL, Az-Sj y AzC (16.834 kg MS ha<sup>-1</sup>) que fue 7% mayor a la de Az2-PL. La mayor acumulación de biomasa aérea en promedio se observó a la dosis máxima de fertilización, la que resultó 50% superior a la de los testigos sin nitrógeno.

Cuadro 13. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a cosecha

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg MS ha <sup>-1</sup> -----				
0	13.369ABe	13.284Bd	12.209Ce	14.261Ac	13.281e
25	15.038Ad	15.147Ac	13.357Bd	15.520Ab	14.766d
50	16.307ABc	17.101Ab	14.872Cc	16.026Bb	16.077c
100	19.090Ab	19.362Aa	17.895Bb	18.790ABa	18.784b
150	20.126Aa	20.287Aa	19.999Aa	18.809Ba	19.806a
Media	16.786A	17.036A	15.667B	16.681A	16.543
Error estándar (R)	279,05				
Error estándar (D)	167,73				
Error estándar (RxD)	335,46				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Hasta inicio del llenado de grano, no se observó diferencias significativas en la interacción entre las rotaciones y las dosis de N, pero existió una cierta tendencia en la respuesta al agregado de nitrógeno sobre las diferentes rotaciones. Sin embargo, a

cosecha esta diferencia se acentúa y la interacción entre ambos factores resultó estadísticamente significativa (Cuadro 13).

El cultivo en Az2-PL tuvo entre 10-13% menor biomasa aérea a dosis bajas (0, 25, 50 kg N ha<sup>-1</sup>) que las demás rotaciones que no se diferenciaron entre sí. Sin embargo, a la máxima dosis de N igualó la producción de las otras situaciones. La mayor respuesta al agregado de nitrógeno se encontró en Az2-PL (64%), mientras que la menor respuesta se dio en Az-Sj (32%).

El cultivo de cobertura pudo influir en estos resultados. El arroz sembrado sobre la cobertura de trébol alejandrino, con baja relación carbono nitrógeno, mostró un mejor desarrollo en todo el ciclo del cultivo, mientras que el cultivo sembrado sobre raigrás presentó menor desarrollo y las diferencias solo se compensaron con altas dosis de nitrógeno (150 kg N ha<sup>-1</sup>). Los resultados sobre raigrás concuerdan con lo encontrado por Sánchez (2011), la cual afirma que esto podría relacionarse con la tasa de mineralización del rastrojo y la liberación de nitrógeno, donde la liberación lenta del nitrógeno de sus tejidos no logra compensar la limitante, afectando la producción de MS y por ende el rendimiento.

El mayor efecto observado a lo largo del ciclo fue la acumulación de biomasa ante el agregado de N, donde las aplicaciones de nitrógeno tuvieron impactos muy significativos en la producción de biomasa aérea. Esto coincide con lo reportado por Deambrosi et al. (2005a), Deambrosi y Méndez (2007), Méndez y Deambrosi (2009).

#### **4.4 CONTENIDO DE NITRÓGENO EN PLANTA**

##### **4.4.1 Nitrógeno en planta a inicio de macollaje (V<sub>4</sub>)**

Se observaron diferencias significativas en el contenido de nitrógeno en planta para las diferentes rotaciones (Cuadro 14). Los cultivos en Az1-PL y Az-Sj tuvieron 15 y 30% más N que AzC y Az2-PL respectivamente. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Sánchez (2011) en el mismo sitio, reportando valores de 29,8 y de 32 g N/kg MS para coberturas invernales previas al arroz de gramíneas y de leguminosas respectivamente.

La cobertura invernal previa al arroz determina el potencial de aporte de N al sistema, donde se destacan los ambientes que contienen leguminosas (Az1-PL, Az-Sj y AzC). Según Mallarino et al., citados por Castillo (2018), las leguminosas como trébol blanco, pueden fijar entre 30 y 46 kg N Mg<sup>-1</sup> MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> al suelo. Por otra parte, en suelos con rastrojos de gramíneas con alta relación C/N, es de esperar un menor contenido de N en planta. Esto ocurre ya que el N disponible es inmovilizado por los microorganismos del suelo para poder degradar estos restos y es de esperar en estos ambientes altas respuestas al agregado de N.

Cuadro 14. Efecto de la rotación (R) sobre el contenido de nitrógeno en planta del cultivo de arroz 15 días luego de la emergencia

Rotación	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj
	-----g N/kg MS-----			
Concentración de N	35,5B	40,4A	29,3C	43,6A
Error estándar (R)	1,01			

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

#### 4.4.2 Nitrógeno en planta a pleno macollaje

No se encontraron efectos de las rotaciones sobre el contenido de N en el cultivo a pleno macollaje. Sin embargo, se observaron efectos significativos del agregado de nitrógeno hasta la dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup> que generó contenidos de N en planta 49% superior al observado en el arroz sin agregado de N (Cuadro 15).

Cuadro 15. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en planta a pleno macollaje

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----g N/kg MS-----				
0	23,7	21,2	23,8	24,4	23,3e
25	26,3	23,6	25,2	26,9	25,5d
50	28,6	26,5	27,3	29,4	28,0c
100	31,4	29,1	33,3	32,5	31,6b
150	33,2	32,6	35,3	37,7	34,7a
Media	28,6A	26,6A	29,0A	30,2A	28,7
Error estándar (R)	1,41				
Error estándar (D)	0,43				
Error estándar (RxD)	0,87				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

El nitrógeno es fundamental para la nutrición de las plantas en etapas tempranas. Según Dobermann y Fairhurst (2005), los mayores requerimientos de N se dan entre inicio y mediado de macollaje, donde las plantas se encuentran en activo crecimiento. La concentración de este nutriente en planta está estrechamente relacionada con la tasa fotosintética, por lo que es de esperar que a dosis incrementales de N el contenido de N en planta sea mayor. Mejía de Tafur y Menjivar (2010), comentan que

en general los niveles considerados suficientes de N en tejido foliar para esta etapa es entre 25 y 35 g N/kg MS, los cuales se observan a partir de la dosis de 25 N ha<sup>-1</sup>.

#### 4.4.3 Nitrógeno en planta a primordio (R<sub>0</sub>)

Se observaron diferencias significativas en el contenido de nitrógeno en planta al estado de primordio para los diferentes tratamientos de N, pero no entre las rotaciones ni su interacción con nitrógeno (Cuadro 16).

Cuadro 16. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en planta a primordio

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----g N/kg MS-----				
0	17,2	10,8	13,9	12,5	13,6e
25	17,9	11,1	15,2	14,4	14,6d
50	18,7	12,7	15,9	16,5	16,0c
100	20,4	15,6	19,6	18,8	18,6b
150	22,6	18,3	22,0	23,6	21,6a
Media	19,4A	13,7A	17,3A	17,2A	16,9
Error estándar (R)	1,58				
Error estándar (D)	0,35				
Error estándar (RxD)	0,69				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

El menor contenido de nitrógeno en planta para todas las rotaciones se observó en el tratamiento N<sub>0</sub>. El contenido de N en planta en la dosis de máxima respuesta (N<sub>150</sub>) fue 59% mayor al obtenido en el tratamiento sin nitrógeno.

El contenido de N observado en la mayoría de las situaciones superó el valor de N óptimo en planta a primordio de 12,8 g N/kg MS reportado por Fageria (2003b) para alcanzar rendimiento máximo.

#### 4.4.4 Nitrógeno en planta a floración (R<sub>4</sub>)

Se observaron diferencias significativas en el contenido de nitrógeno en planta a floración para los diferentes tratamientos de N, pero no entre las rotaciones ni su interacción con nitrógeno (Cuadro 17). El mayor contenido de N en planta en promedio

se observó a la dosis máxima de fertilización, la que resultó 40% superior a la de los testigos sin nitrógeno.

Cuadro 17. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en planta a floración

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----g N/kg MS-----				
0	9,7	8,6	9,4	9,3	9,3d
25	9,9	9,7	10,2	9,5	9,8cd
50	10,8	10,1	10,5	10,5	10,5c
100	11,5	11,1	11,7	12,5	11,7b
150	13,1	13,1	12,0	13,8	13,0a
Media	11,0A	10,5A	10,7A	11,1A	10,9
Error estándar (R)	0,63				
Error estándar (D)	0,27				
Error estándar (RxD)	0,53				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Resultados similares se obtuvieron en un estudio de respuesta al agregado de N y su fraccionamiento para la variedad INIA Olimar realizado por Deambrosi et al. (2005b), donde el resultado promedio de todos los tratamientos fue de 10,10 g N/kg MS. Por otra parte, Fageria (2003b) reporta valores de contenido de N de 11 g N/kg MS como valor óptimo a floración para alcanzar el rendimiento máximo.

#### 4.4.5 Nitrógeno en planta a mitad de llenado de grano (R<sub>7</sub>)

Se observaron diferencias significativas en el contenido de nitrógeno en planta a mitad de llenado de grano entre las dosis de nitrógeno, pero no entre las rotaciones, ni en la interacción rotación por dosis de N (Cuadro 18).

El menor contenido de nitrógeno en planta se observó en el tratamiento N<sub>0</sub> para todas las rotaciones. Se observó respuesta al agregado de N hasta la dosis máxima (N<sub>150</sub>), siendo 40% superior al tratamiento sin fertilizar.

Luego de la etapa de floración, el nitrógeno absorbido por el cultivo se transloca rápidamente hacia la panícula, contribuyendo con el proceso de formación y llenado de grano (Hernández, 2016), explicando esto el mayor contenido de nitrógeno en planta a dosis crecientes de N.

Cuadro 18. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en planta a mitad de llenado de grano

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----g N/kg MS-----				
0	8,3	7,7	8,1	8,0	8,0e
25	8,8	8,4	8,7	8,7	8,7d
50	9,2	9,4	9,4	9,4	9,3c
100	9,7	10,6	9,8	10,6	10,2b
150	10,1	12,5	10,5	11,6	11,2a
Media	9,2A	9,7A	9,3A	9,7A	9,5
Error estándar (R)	0,61				
Error estándar (D)	0,19				
Error estándar (RxD)	0,38				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

#### 4.4.6 Nitrógeno en paja a cosecha

El contenido de nitrógeno en la paja del cultivo de arroz a la cosecha fue afectado tanto por la rotación como por la dosis de N aplicada (Cuadro 19). La mayor concentración de N fue observada en Az1-PL que fue 22% superior al promedio de las demás rotaciones.

El menor contenido de N en paja se observó en el tratamiento N<sub>0</sub> en todas las rotaciones. Hubo respuesta al agregado de N hasta la dosis máxima, siendo 42% superior al testigo sin agregado de nitrógeno.

Estos resultados divergen con Silveira y Taran (2009), los cuales obtuvieron valores de 8,4 g N/kg MS en promedio para los tratamientos fertilizados. Los resultados obtenidos muestran que a partir de la dosis de 50 kg de N ha<sup>-1</sup> el contenido de nitrógeno en paja para todas las rotaciones coincide con información internacional obtenida por Dobermann y Fairhurst (2005), los cuales reportan valores de 5,1-7,6 g N/kg MS para arroz de alto rendimiento.

Por otra parte, el cultivo de arroz que tuvo una leguminosa como cobertura invernal no se diferenció en contenido de N en paja frente al que tuvo raigrás. Los resultados encontrados coinciden con los obtenidos por Sánchez (2011), que no encontró diferencias en el contenido de N en paja de arroz entre antecesor raigrás o leguminosas.

Cuadro 19. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en paja a cosecha

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----g N/kg MS-----				
0	4,2	5,2	4,2	4,5	4,5d
25	4,7	5,6	4,7	4,9	5,0c
50	4,9	6,5	5,0	5,5	5,5b
100	5,4	6,7	5,1	6,0	5,8b
150	6,0	7,5	5,5	6,6	6,4a
Media	5,0B	6,3A	4,9B	5,5AB	5,4
Error estándar (R)	0,28				
Error estándar (D)	0,11				
Error estándar (RxD)	0,22				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

#### 4.4.7 Nitrógeno en grano a cosecha (R<sub>9</sub>)

No hubo efecto significativo de la rotación sobre el contenido de nitrógeno en el grano de arroz, pero sí del tratamiento de N, donde el contenido de nitrógeno se incrementó con la dosis de N aplicada independientemente del antecesor (Cuadro 20).

El contenido de nitrógeno en el grano en la dosis de máxima respuesta fue 28% mayor que la del testigo sin nitrógeno.

Los resultados obtenidos coinciden con la información internacional de rangos encontrados en el contenido de nitrógeno en grano para Asia, reportados por Dobermann y Fairhurst (2005) de 9,3-12 g N/kg MS. Mae (1997), reporta que con rangos de 10-15 g N/kg MS en grano se estaría en un nivel óptimo. El contenido medio de N en grano de todos los tratamientos fue 10,5 g N/kg MS, siendo 23% inferior a resultados obtenidos por Sánchez (2011), la cual obtiene valores promedio de 13,6 g N/kg MS para la variedad INIA Olimar bajo distintas dosis de nitrógeno.

En la etapa reproductiva el contenido de nitrógeno en órganos vegetativos y en la hoja bandera son translocados hacia el grano (Wilson et al., Norman et al., Bufogle et al., Mae, citados por Méndez y Deambrosi, 2009), lo que coincide con los resultados obtenidos en este trabajo.

Cuadro 20. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre el contenido de N en grano

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----g N/kg MS-----				
0	8,7	9,7	9,8	9,6	9,4d
25	9,3	10,4	10,1	9,9	9,9cd
50	9,7	10,7	10,3	10,2	10,2c
100	10,6	11,7	11,0	10,8	11,0b
150	11,5	13,2	11,9	11,5	12,0a
Media	10,0A	11,1A	10,6A	10,4A	10,5
Error estándar (R)	0,55				
Error estándar (D)	0,21				
Error estándar (RxD)	0,43				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

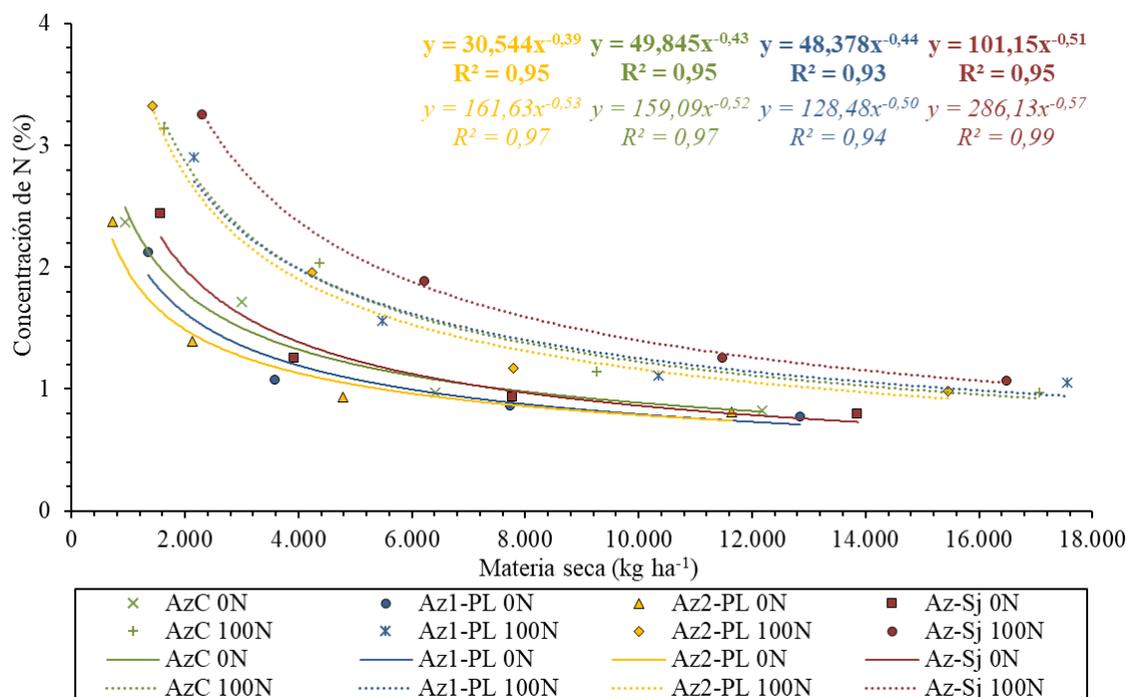
Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

#### 4.5 CURVAS DE DILUCIÓN DE NITRÓGENO

La Figura 9 muestra las curvas de dilución de N del cultivo de arroz sobre las distintas rotaciones y comparando dos dosis contrastantes de nitrógeno (0 y 100 kg N ha<sup>-1</sup>). La curva de dilución de 0 kg N ha<sup>-1</sup> se utilizó para observar el efecto rotación sin suministro de N y poder estimar la capacidad de aporte de N del suelo. Por otro lado, se utilizó la curva de dilución de 100 kg N ha<sup>-1</sup> ya que en general los rendimientos con esta dosis superaron el 95% del rendimiento relativo, y siendo estas curvas muy similares a la que alcanzaron los mejores rendimientos. Es importante tener en cuenta que no son curvas críticas de dilución.

Como se puede observar, la acumulación de biomasa respondió a la rotación y a la dosis de nitrógeno, y la concentración de nitrógeno en plantas solo a la dosis de N. En todas las etapas del cultivo la dosis N<sub>100</sub> produjo más biomasa y registró valores de concentración de N mayores que el testigo sin N, donde se puede apreciar que las curvas se desplazan hacia arriba y hacia la derecha. Esto coincide con Sharma (2006) que reporta que, al aumentar el nivel de nitrógeno estos valores se incrementan. Cuando no se aplica nitrógeno (N<sub>0</sub>), el cultivo de arroz solo dispone del N que le aporta el suelo, identificando un comportamiento diferencial entre rotaciones, y demostrando claramente la poca capacidad que tiene el suelo de liberar el nitrógeno en las primeras etapas en Az2-PL, atribuyendo este efecto a la cobertura de raigrás que hubo previo al arroz. En cambio, cuando se aplican 100 kg N ha<sup>-1</sup> no se vio diferencia en las curvas de dilución

entre Az2-PL, AzC y Az1-PL, ya que las deficiencias de N fueron cubiertas, pero sin igualar a Az-Sj, reflejando un claro efecto rotación.



Nota: cada color corresponde a determinada rotación; las ecuaciones en **negrita** corresponden a 0 kg N ha<sup>-1</sup> y en *cursiva* a las dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup>.

Figura 9. Curvas de dilución de N del cultivo de arroz sobre distintas rotaciones y dosis de nitrógeno

La utilización del modelo de curvas de dilución de N es una herramienta para el manejo más eficiente del nitrógeno, ya que determina la concentración de N en planta a partir de la cual no se genera un aumento en la producción de materia seca (Justes et al., 1994). Las curvas de dilución se desplazan hacia arriba y hacia la derecha cuanto más N dispone la planta hasta un punto que solo se desplazan hacia arriba, lo que quiere decir que solo se incrementa su contenido de N, pero no se refleja en un aumento de MS.

La información sobre el patrón de acumulación de materia seca, la concentración y la absorción de nitrógeno en plantas de arroz es de enorme importancia para la formulación de un programa de fertilización nitrogenada compatible con los requerimientos del cultivo en diferentes etapas de crecimiento (Sharma, 2006).

Según Fabini et al. (2018), el uso de indicadores objetivos para las recomendaciones de fertilización contribuye a optimizar la nutrición del cultivo, sincronizando el suministro con la demanda.

## 4.6 ABSORCIÓN DE NITRÓGENO

### 4.6.1 Nitrógeno absorbido en paja al momento de cosecha

Se observaron efectos significativos tanto de la rotación como de la dosis de nitrógeno sobre la cantidad de nitrógeno absorbido en la paja de arroz a cosecha, mientras que la interacción entre factores no resultó significativa (Cuadro 21).

Cuadro 21. Efecto de la rotación (R) y de la fertilización nitrogenada (D) en la absorción de N por la paja de arroz al momento de la cosecha

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg N ha <sup>-1</sup> -----				
0	26	33	25	31	29e
25	34	41	30	37	35d
50	40	55	37	44	44c
100	54	68	48	60	57b
150	65	81	59	67	68a
Media	44B	56A	40B	48AB	47
Error estándar (R)	2,76				
Error estándar (D)	1,08				
Error estándar (RxD)	2,16				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

La mayor absorción media de N fue observada en Az1-PL (56 kg N ha<sup>-1</sup>) que fue 40% superior a lo absorbido por Az2-PL. La absorción de nitrógeno en paja aumentó al incrementar los niveles de nitrógeno, dato que coincide con lo reportado por Sharma (2006). Esta respuesta se observó hasta la dosis mayor que fue 135% superior respecto a la absorción de nitrógeno del testigo sin agregado de N.

La remoción promedio de nitrógeno por la paja fue de 5 kg de N por tonelada de grano, con una variación entre 3 y 8 kg de N por tt<sup>-1</sup> de grano. Dobermann y Fairhurst (2005), reportan un rango típico de 6-8 kg de N absorbido en la paja por tt<sup>-1</sup> de grano producido. El arroz de Az1-PL fue el que registró los valores más altos de absorción de N en comparación con las demás rotaciones, independientemente de la dosis. Los valores más bajos fueron registrados en Az2-PL de la misma rotación que tuvo raigrás como antecesor invernal.

#### 4.6.2 Nitrógeno absorbido en grano

La absorción de nitrógeno por el grano solo resultó afectada por la dosis de N, mientras que el efecto rotación y la interacción entre factores no resultó significativa (Cuadro 22).

Cuadro 22. Efecto de la rotación (R) y de la fertilización nitrogenada (D) en la absorción de N por el grano al momento de la cosecha

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg N ha <sup>-1</sup> -----				
0	61	67	63	72	66e
25	73	82	71	79	76d
50	80	93	78	83	84c
100	96	108	94	96	98b
150	107	123	111	100	110a
Media	83A	95A	83A	86A	87
Error estándar (R)	4,52				
Error estándar (D)	2,21				
Error estándar (RxD)	4,43				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Existió una tendencia clara en la respuesta a la fertilización, donde el N absorbido en grano aumentó al incrementar la dosis de N hasta la dosis máxima, siendo 67% superior al testigo sin agregado de nitrógeno.

La remoción promedio de nitrógeno por el grano fue de 9 kg de N por tonelada de grano, con una variación entre 8 y 11 kg de N por  $tt^{-1}$  de grano. Dobermann y Fairhurst (2005), reportan un rango típico de 9-12 kg de N absorbido en grano por  $tt^{-1}$  de grano producido.

#### 4.6.3 Nitrógeno total absorbido

Se observó efecto significativo de la fertilización nitrogenada sobre la absorción total de N del cultivo de arroz al momento de la cosecha, pero no existieron efectos de la rotación ni de la interacción entre ambos (Cuadro 23).

La mayor absorción de N se observó en Az1-PL, mientras que la menor fue en Az2-PL, siendo esta 18% inferior. Según Liu et al. (2017) las diferencias en absorción de N se deben al cultivo antecesor al arroz, y afirman que la alta relación C/N de los rastrojos promueve la propagación masiva de microorganismos, los cuales compiten con

el arroz por el N, lo que conduce a una disminución en la cantidad de nitrógeno absorbido por las plantas.

La absorción total de N en planta a la cosecha se incrementó con la dosis de nitrógeno hasta 150 kg N ha<sup>-1</sup>. La absorción en N<sub>150</sub> fue 90% superior a N<sub>0</sub>. La menor respuesta en absorción de N a cosecha al agregado de nitrógeno se encontró en Az-Sj (62%) y la mayor en Az1-PL (105%). La absorción en N<sub>0</sub> marca la capacidad de aporte real del suelo, diferenciándose claramente dos grupos, por un lado, Az-Sj y Az1-PL con buena capacidad de aporte, y por el otro AzC y Az2-PL con menor capacidad de aporte.

Cuadro 23. Efecto de la rotación (R) y de la fertilización nitrogenada (D) en la absorción total de N al momento de la cosecha

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg N ha <sup>-1</sup> -----				
0	87	100	87	103	94e
25	107	123	101	116	112d
50	120	147	115	127	127c
100	150	176	142	155	156b
150	172	205	170	167	179a
Media	127A	150A	123A	134A	134
Error estándar (R)	5,98				
Error estándar (D)	2,62				
Error estándar (RxD)	5,24				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

La remoción promedio de nitrógeno por el cultivo fue de 14 kg de N por tonelada de grano, con una variación entre 11 y 19 kg de N por tt<sup>-1</sup> de grano. Dobermann y Fairhurst (2005), reportan un rango típico de 15-20 kg de N absorbido por tt<sup>-1</sup> de grano producido. Al igual que en paja, Az1-PL registró los valores más altos en comparación con las otras situaciones, independientemente de la dosis.

#### 4.7 RENDIMIENTO EN GRANO

Existió un efecto significativo de la rotación y de la dosis de nitrógeno y sus interacciones sobre el rendimiento de grano del cultivo de arroz (Cuadro 24).

Cuadro 24. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre el rendimiento en grano seco y limpio del cultivo de arroz

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	kg ha <sup>-1</sup>				
0	8.057ABc	8.006Bd	7.358Ce	8.595Ac	8.004e
25	8.971Ab	9.036Ac	7.968Bd	9.259Ab	8.808d
50	9.490ABb	9.952Ab	8.655Cc	9.326Bb	9.356c
100	10.412Aa	10.560Aa	9.760Bb	10.248ABa	10.245b
150	10.696Aa	10.782Aa	10.629Aa	9.996Ba	10.526a
Media	9.525A	9.667A	8.874B	9.485A	9.388
Error estándar (R)	156,85				
Error estándar (D)	95,66				
Error estándar (RxD)	191,32				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

El mayor rendimiento promedio se observó a la dosis máxima de nitrógeno, que fue 32% superior a la de los tratamientos sin N (8004 kg ha<sup>-1</sup>) y representó una eficiencia de conversión de nitrógeno en grano de 17:1 kg kg<sup>-1</sup>.

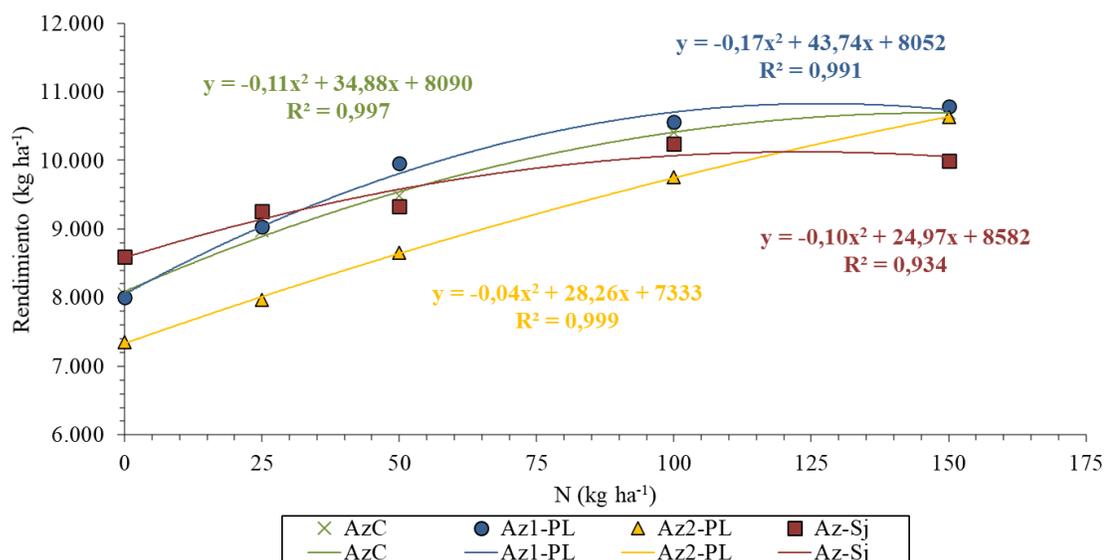


Figura 10. Efecto de la dosis de N sobre el rendimiento de arroz (seco y limpio) en la zafra 2018-19 en tres rotaciones estables

La respuesta al agregado de N tuvo interacción con la rotación (Figura 10) y ajustó un modelo cuadrático que fue significativo hasta la dosis máxima usada en todas las rotaciones, excepto en Az-Sj. El mayor rendimiento sin nitrógeno fue observado en Az-Sj ( $8595 \text{ kg ha}^{-1}$ ) mientras que en Az2-PL fue 14% menor. Sin embargo, Az2-PL tuvo la mayor respuesta a N, alcanzando la productividad de las demás rotaciones en la dosis máxima. Estos resultados obtenidos de respuesta al agregado de N en arroz coinciden con lo reportado por Deambrosi y Méndez (2000, 2007), Sánchez (2011).

El rendimiento promedio de grano (seco y limpio) fue  $9388 \text{ kg ha}^{-1}$  con un coeficiente de variación de 12%. La productividad media de Az2-PL fue 7% inferior al de las otras rotaciones (Figura 11), las cuales no se diferenciaron entre sí ( $9559 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Los resultados obtenidos por rotación coinciden con los reportados por Macedo et al. (2015, 2016b).

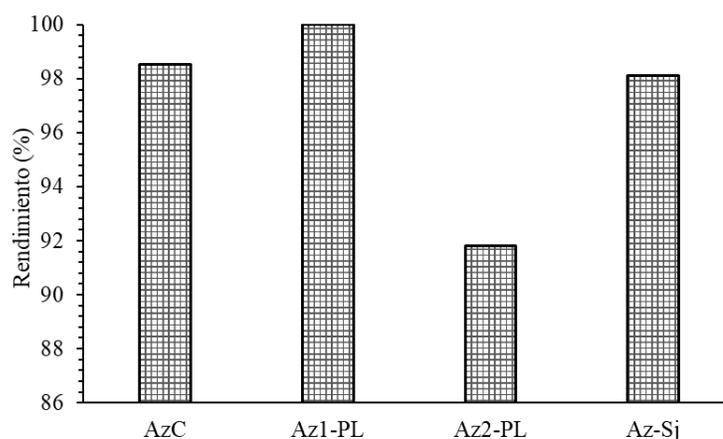


Figura 11. Productividad media de las rotaciones expresada en porcentaje

El mayor rendimiento de  $N_0$  relativo al máximo rendimiento (RRM) de la dosis física óptima de N en el rango estudiado fue obtenido en Az-Sj (84%) y el menor en Az2-PL (69%), demostrando la alta capacidad de aporte de N del suelo (Figura 12). Esto coincide con lo reportado por Méndez y Deambrosi (2009), quienes afirman que el suelo constituye una fuente importante de suministro de N para el cultivo de arroz.

A pesar de la alta intensidad de uso de AzC, la leguminosa de cobertura y la estrategia histórica de fertilización por balances, determinaron un buen rendimiento desde la dosis de  $0 \text{ kg N ha}^{-1}$ , y una menor respuesta al agregado de N que la otra situación sobre rastrojo en Az2-PL. Las leguminosas anuales pueden contribuir al aporte de N para el arroz y reducir las necesidades de fertilización nitrogenada (Macedo et al., 2015).

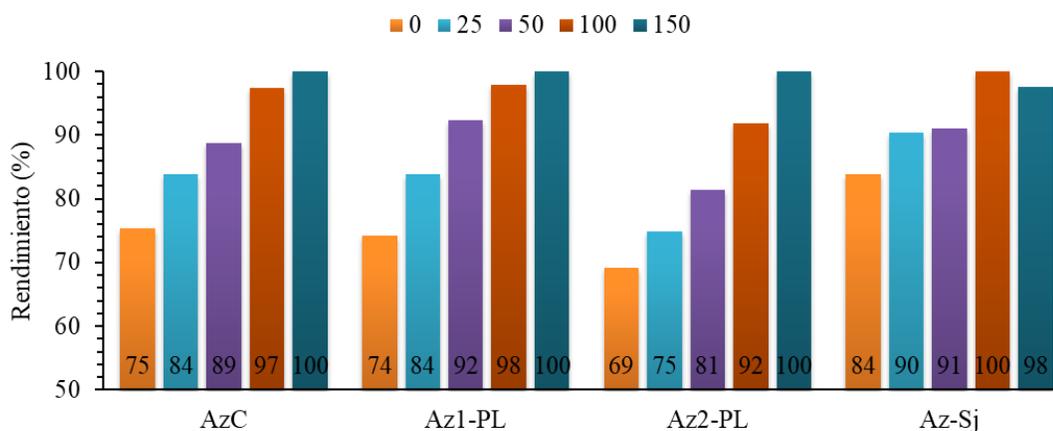


Figura 12. Rendimiento de arroz de diferentes rotaciones y dosis de N expresada en % del máximo rendimiento por rotación

Las dosis óptimas físicas en el rango estudiado (+10%) fueron 158, 129, 150 y 125 kg ha<sup>-1</sup> N para AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj, respectivamente. Así, las dosis óptimas económicas considerando una relación insumo/producto de 5,4 (0,98 U\$S/unidad de N; 0,18 U\$S/kg de arroz) fueron 134, 112, 150 y 98 kg ha<sup>-1</sup> N en AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj, respectivamente.

Los resultados obtenidos coinciden con Deambrosi y Méndez (2007), los cuales afirman que la dosis de nitrógeno requerida para lograr el rendimiento óptimo en arroz en general es influenciada de manera importante por el uso anterior del suelo.

Para que se manifiesten efectos positivos del agregado de N en el rendimiento, es necesario disponer de condiciones climáticas adecuadas, especialmente durante la fase reproductiva del arroz, entre las que se destacan alta luminosidad y poca o nula frecuencia de tres o más días consecutivos con temperaturas mínimas inferiores a 15°C (Deambrosi y Méndez, 2007).

#### 4.7.1 Componentes de rendimiento

El número de panojas por superficie mostró un efecto significativo de la rotación y de la fertilización nitrogenada pero no a la interacción entre ambos factores (Cuadro 25). La mayor cantidad de panojas por metro cuadrado se encontró en Az-Sj, mientras que el mínimo fue sobre los rastrojos de AzC y Az2-PL. Esto coincide con lo reportado por Terra et al. (2010) que encontraron que, el arroz instalado sobre raigrás tiene una tendencia a mostrar un menor número de panojas frente a otras alternativas de cobertura invernales luego de laboreo de verano. Hubo una respuesta creciente en el número de panojas por metro cuadrado al agregado de N al cultivo de arroz hasta dosis máxima. Esto coincide con lo reportado por Sánchez (2011). En promedio el número de

panojas/m<sup>2</sup> estuvo cercano al reportado por Blanco et al. (2004) como el óptimo para alcanzar los potenciales del cultivar INIA Olimar (553 panojas/m<sup>2</sup>). Se establece un rango de 450-600 panojas/m<sup>2</sup>, suficientes para alcanzar altos rendimientos (Quintero, 2009).

Cuadro 25. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre el número de panojas/m<sup>2</sup> en el cultivo de arroz

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	Panojas m <sup>-2</sup>				
0	346	389	353	493	395d
25	379	572	395	588	484c
50	444	595	438	605	520c
100	520	634	493	634	570b
150	588	663	529	719	625a
Media	456C	571B	442C	608A	519
Error estándar (R)	9,76				
Error estándar (D)	15,25				
Error estándar (RxD)	30,51				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

No se observaron efectos de la rotación ni de la fertilización nitrogenada en el número de granos por panoja, ni tampoco para la interacción entre ambos (datos no mostrados). Resultados similares fueron reportados por Rodríguez (2002), Deambrosi y Méndez (2007), Sánchez (2011). En promedio el número de granos por panoja (88 granos/panoja) estuvo por encima del reportado por Blanco et al. (2004) de 82 granos/panoja. La mayor cantidad de granos por panoja fueron obtenidos en AzC (97 granos/panoja) y la menor en Az1-PL (75 granos/panoja).

El peso de mil granos fue afectado por la rotación y la dosis de nitrógeno, pero no por su interacción (Cuadro 26). El mayor peso de granos fue observado en Az-PL y el menor en AzC que por su parte tuvo el mayor número de granos/panojas. El peso de 1000 granos disminuyó al incrementar la dosis de nitrógeno sobre el cultivo, lo que coincide con reportado por Deambrosi y Méndez (2007). El peso de mil granos en promedio fue inferior al peso promedio de esta variedad (26,8 g) según Blanco et al. (2004).

Cuadro 26. Efecto de la rotación (R) y la dosis de N (D) sobre el peso de 1000 granos en el cultivo de arroz

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	PMG (g)				
0	24,8	26,3	25,5	25,2	25,4a
25	23,6	25,8	25,1	24,2	24,7b
50	22,6	25,3	24,7	24,0	24,1c
100	21,7	24,2	24,1	23,1	23,3d
150	20,8	23,7	23,2	21,7	22,4e
Media	22,7B	25,1A	24,5A	23,7AB	24,0
Error estándar (R)	0,48				
Error estándar (D)	0,15				
Error estándar (RxD)	0,30				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con  $p=0,05$ .

#### 4.7.2 Índice de cosecha

No se detectaron diferencias significativas en el índice de cosecha entre rotaciones, aunque sí entre las dosis de N (Figura 13).

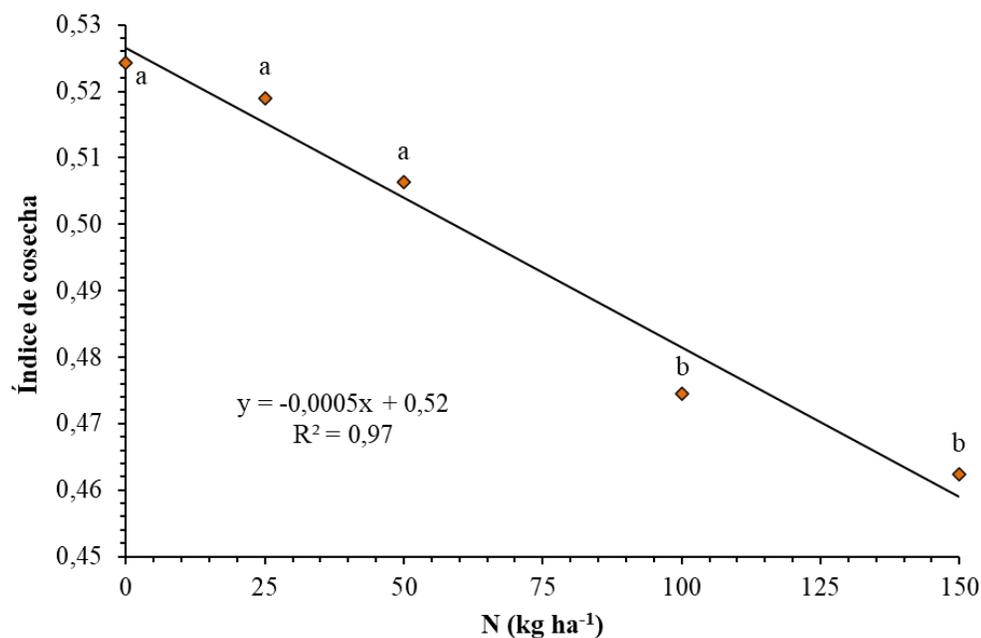


Figura 13. Efecto de la dosis de N sobre el índice de cosecha del cultivo de arroz

El mayor índice de cosecha se obtuvo en los tratamientos N<sub>0</sub>, N<sub>25</sub> y N<sub>50</sub>, los cuales no presentan diferencias entre sí, con un valor medio de partición de materia seca de 0,52 que fue 10% superior al promedio de los tratamientos N<sub>100</sub> y N<sub>150</sub>.

El índice de cosecha promedio de todos los tratamientos fue de 50%, lo cual coincide con Sánchez (2011) que reporta valores de 48%. Los resultados obtenidos muestran una clara tendencia de aumentar la participación de estructuras vegetativas con relación a las reproductivas, incentivadas por un mayor aporte de N (Figura 13). En el mismo sentido con lo reportado por Yoshida (1972), el índice de cosecha tiende a ser más bajo cuando se estimula la producción de biomasa, por lo que aumentos en la dosis de N, se traducen en incrementos en la producción de biomasa, disminuyendo el índice de cosecha. El valor máximo de índice de cosecha obtenido se encuentra muy por debajo del valor teórico reportado como máximo por Roberts y Col (1993) de 0,6 a 0,65.

#### 4.7.3 Rendimiento y absorción total de N

La absorción de N se correlacionó positivamente con el rendimiento en grano de arroz (Figura 14), lo que concuerda con lo encontrado por Quintero (2009), Deambrosi et al. (2011), Liu et al. (2017). El rendimiento por lo tanto es una variable dependiente de la disponibilidad de nitrógeno en las etapas claves del desarrollo de las plantas.

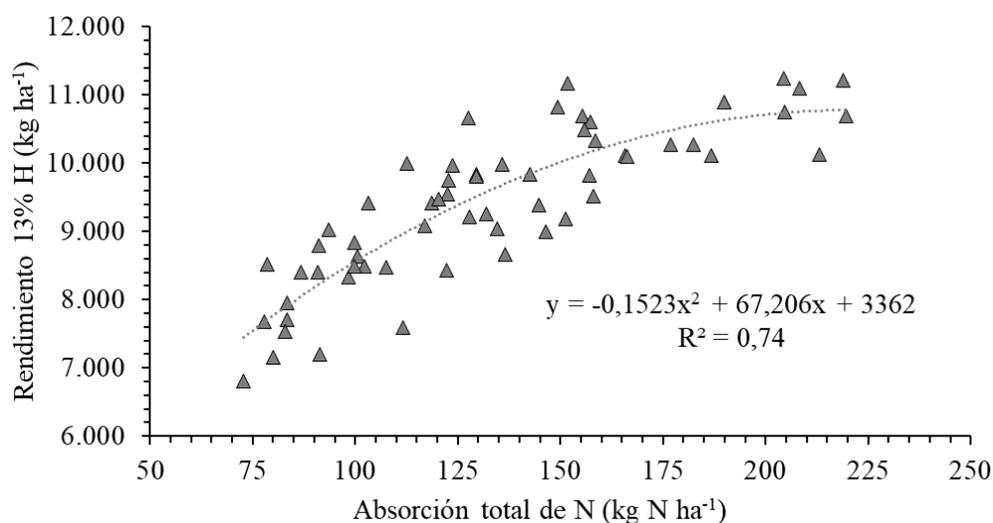


Figura 14. Relación entre la cantidad de N absorbido y el rendimiento final en grano del cultivo de arroz (n=60 pares de datos)

La utilización de nitrógeno es un insumo fundamental para aumentar la producción de arroz, pero hay un efecto significativo de la rotación y especialmente del

antecesor, por ende, el manejo de N debe enfocarse en sincronizar adecuadamente la oferta con la demanda de N durante el ciclo del cultivo.

## 4.8 EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO

### 4.8.1 Eficiencia agronómica

Se observaron efectos significativos de la dosis de N sobre la eficiencia agronómica de uso del nitrógeno (EAN). No se encontraron diferencias significativas entre las rotaciones y tampoco en la interacción entre las rotaciones y el agregado de N, sin embargo, se puede observar una cierta tendencia que sugiere interacción entre estas.

Incrementos en la dosis de N redujeron la EAN en AzC, Az1-PL y Az-Sj las cuales ajustaron un modelo cuadrático, mientras que en Az2-PL la EAN se mantuvo estable (Figura 15). La menor EAN se obtuvo en Az-Sj (17 kg kg<sup>-1</sup>). Por otra parte, a dosis bajas de N, Az1-PL presentó la mayor EAN (41 kg kg<sup>-1</sup>), en tanto que a dosis altas el mayor valor se obtuvo en Az2-PL (22 kg kg<sup>-1</sup>) (Anexo 21).

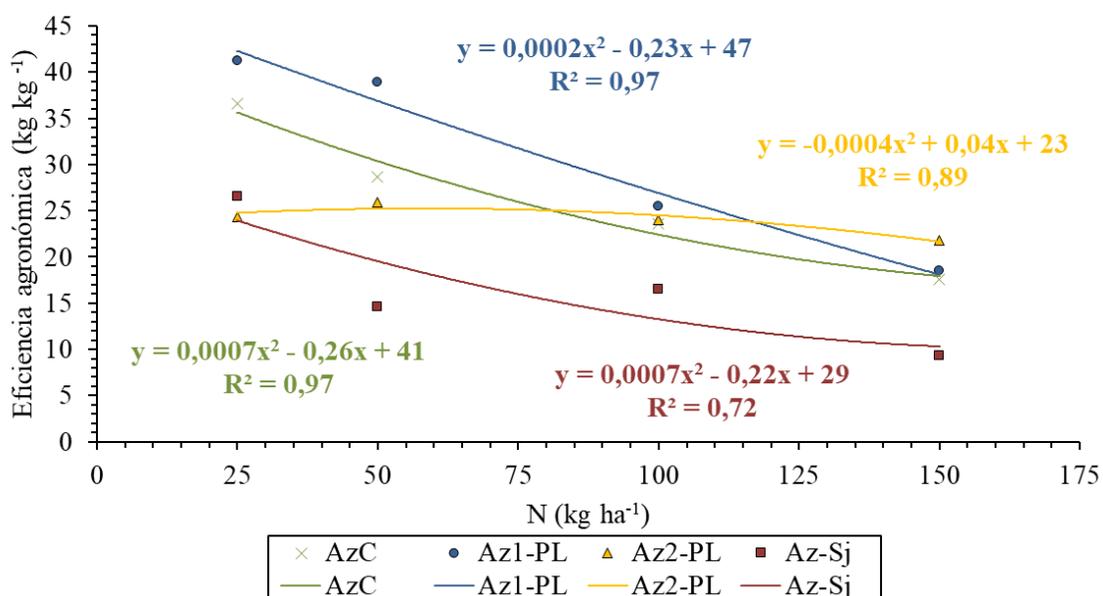


Figura 15. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre la eficiencia agronómica de uso de N en el cultivo de arroz

La EAN en la máxima respuesta física fue 17, 21, 20 y 12 kg kg<sup>-1</sup> en AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj, respectivamente. Estos valores estuvieron por encima del valor de 15 kg kg<sup>-1</sup> reportado habitualmente a nivel internacional en los sistemas productivos (Castillo, 2018), y por debajo del valor mínimo considerado óptimo en cereales (25 kg

kg<sup>-1</sup>). Mientras que a la dosis económicamente óptima los valores fueron 19, 24, 20 y 14 kg kg<sup>-1</sup> en AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj, respectivamente.

A dosis progresivas de N la respuesta en rendimiento del cultivo es menor por lo que la EAN disminuye. Se destaca Az2-PL donde la EAN se mantiene casi constante a todas las dosis de N, produciendo en promedio 24 kg de grano por kg de N agregado, el cual es un valor deseado. Esta respuesta se puede atribuir a que parte del nitrógeno se encuentra inmovilizado por el rastrojo de la cobertura invernal antecesor al arroz (raigrás), lo que permite obtener una mayor respuesta al agregado de N, y altos rendimientos, pero a base de nitrógeno, lo que puede generar una situación no muy atractiva económicamente.

#### 4.8.2 Eficiencia de utilización interna

La relación entre la absorción de nitrógeno y el rendimiento en grano alcanzado es la eficiencia de utilización interna del nitrógeno (EUI). Esta presentó diferencias significativas entre dosis de nitrógeno, manifestándose una respuesta decreciente a incrementos en la dosis de N ajustando una función cuadrática (Figura 16). No se encontraron diferencias significativas entre las rotaciones y tampoco en la interacción entre las rotaciones y el agregado de N.

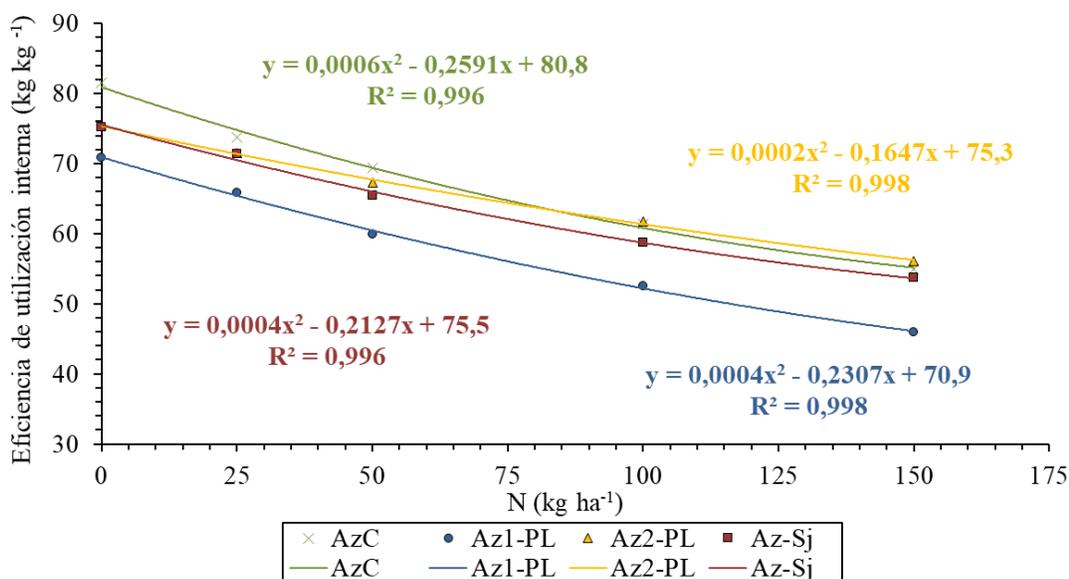


Figura 16. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre la eficiencia de utilización interna de N en el cultivo de arroz

El arroz en N<sub>0</sub> tuvo la mayor eficiencia de utilización interna de N, mientras que la menor correspondió a la dosis máxima de nitrógeno (N<sub>150</sub>) que fue 30% inferior al tratamiento N<sub>0</sub> (Anexo 22). En promedio los tratamientos con N produjeron 62 kg grano

kg<sup>-1</sup> N absorbido, 18% menos respecto al tratamiento sin fertilizar (N<sub>0</sub>). La eficiencia de utilización interna en la máxima dosis física obtuvo valores de 55, 48, 55, 55 kg kg<sup>-1</sup> para AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj, respectivamente; mientras que en la económicamente óptima correspondieron valores de 57, 50, 55, 58 kg kg<sup>-1</sup> en AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj, respectivamente.

Según Dobermann y Fairhurst (2005), para situaciones de nutrición balanceada y óptimas condiciones de crecimiento, la eficiencia interna óptima de N es de 68 kg de grano por cada kg de N absorbido por la planta. Por otra parte, Castillo (2018), reporta resultados entre 55-64 kg kg<sup>-1</sup> para diferentes dosis de N y años, los cuales se asemejan al resultado medio obtenido para los diferentes tratamientos en este trabajo. Es probable que las condiciones climáticas del año que no permitieron una buena expresión del potencial del rendimiento hayan determinado eficiencias de uso del N algo por debajo de las reportadas por ambos autores.

La relación entre la absorción total de N y el rendimiento en grano respondió a una función de tipo cuadrática (Figura 14). El modelo ajustado mostró un máximo físico en el rendimiento de 220 kg N absorbidos ha<sup>-1</sup>, donde absorciones por encima de este no se traducen en más rendimiento, por lo tanto, la EUIN decrece. Este comportamiento se asocia a situaciones de consumo de lujo por parte del cultivo, donde a dosis altas de N hay un incremento menor de rendimiento en grano por unidad de nutriente aplicado.

#### **4.8.3 Eficiencia fisiológica**

Se encontraron diferencias significativas de eficiencia fisiológica de nitrógeno (EFISN) entre los diferentes tratamientos de N. Sin embargo, no se encontraron efectos de la rotación ni de la interacción de estas con la dosis de N (Anexo 23).

La mayor eficiencia fisiológica de N se obtuvo en los tratamientos N<sub>25</sub>, N<sub>50</sub>, N<sub>100</sub>, con un valor medio para este parámetro de 33 kg kg<sup>-1</sup>. Se observó una tendencia a reducirse la EFISN con el aumento de la dosis de N aplicada al cultivo (Figura 17). En promedio, la EFISN en N<sub>150</sub> fue 31% menor a la de N<sub>25</sub> (39 kg kg<sup>-1</sup>). Mientras que para las rotaciones Az1-PL y AzC la respuesta observada se ajustó a un modelo de tipo lineal decreciente, para la rotación Az-Sj el modelo fue cuadrático, aunque con un valor menor de R<sup>2</sup>. El Az2-PL mostró un comportamiento diferente, con un valor más elevado de EFISN a la dosis de 50 kg de N ha<sup>-1</sup> y posterior disminución a mayores dosis. La eficiencia fisiológica promedio en la máxima dosis física fue 27, 26, 35, 21 kg kg<sup>-1</sup> en AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj respectivamente; y en la económicamente óptima valores de 29, 28, 35, 23 kg kg<sup>-1</sup> para AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj respectivamente.

Estudios realizados por Castillo (2018) durante dos zafras (2008-09 y 2009-10) reportaron valores de EFISN de 50 y 32 kg kg<sup>-1</sup> respectivamente, por lo que es de esperar que este parámetro sea dependiente de las condiciones climáticas en las cuales se

desarrolla el cultivo. Los valores medios obtenidos en la zafra 2009-10 por Castillo (2018), coinciden con los obtenidos en la zafra 2018-2019 (año de baja radiación). Estos valores fueron menores a los reportados por Spiertz (2009), el cual comenta valores entre 50 y 80 kg kg<sup>-1</sup>.

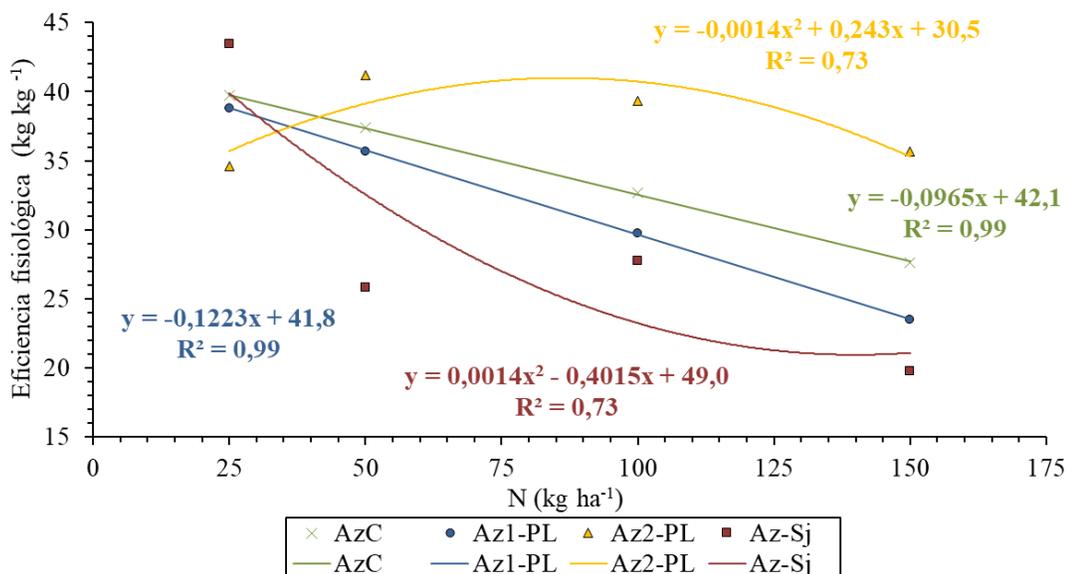


Figura 17. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre la eficiencia fisiológica de uso de N en el cultivo de arroz

La EFISN es el índice que cuantifica la habilidad del cultivo de transformar el N agregado como fertilizante en producto (grano). Los resultados mostraron que los valores bajos de EFISN obtenidos, probablemente se deban a la alta EUIN en el tratamiento N<sub>0</sub> (76 kg kg<sup>-1</sup>), lo que provocó que incrementos en la dosis de N no logren la misma respuesta en producción de grano.

#### 4.8.4 Eficiencia de recuperación aparente

No se encontraron diferencias significativas en la eficiencia de recuperación aparente de nitrógeno (ERAN) entre las distintas rotaciones y dosis estudiadas, así como tampoco en la interacción entre ambas (Anexo 24).

En términos absolutos la rotación que presenta una tendencia hacia una mayor recuperación del N agregado es Az1-PL, particularmente para el tratamiento N<sub>50</sub>. Az1-PL tuvo los mayores rendimientos, probablemente asociados a mejores condiciones de suelo para el crecimiento del cultivo. Si bien el cultivo antecesor fue una pradera mixta de gramíneas con leguminosas de 3,5 años (la cual dejaría N residual), los elevados potenciales de rendimiento requirieron del aporte externo de N, lo cual determinó un alta ERAN. Mientras que la menor recuperación se obtiene en Az-Sj lo cual indicaría que el

aporte de N por parte del suelo fue importante, considerando que los cultivos antecesores fueron leguminosas (soja y trébol alejandrino). Para todas las rotaciones y diferentes tratamientos el valor promedio supera ampliamente al valor reportado por Cassman et al., citados por Fabini et al. (2018), los cuales afirman que el cultivo de arroz inundado, a nivel global presenta pérdidas importantes de nitrógeno, con una recuperación de 35% del N aplicado. En Uruguay estudios realizados por Castillo et al. (2015), reportan datos promedio de recuperación del N aplicado entre 42 y 54% dependiendo del año. Esto es posible gracias a los aspectos de manejo que se destacan en el sistema de producción de arroz en la región, tales como rotación con pasturas de leguminosas que permiten aumentar la productividad y mantener el suelo obteniendo altos rendimientos con bajo agregado de N (Pittelkow et al., 2016).

Cuando se estudian las tendencias de las diferentes rotaciones se puede observar que Az1-PL, Az-Sj y AzC tienden a menores ERAN con el aumento de la dosis de N. Mientras que en Az2-PL se ajusta a un modelo lineal, donde la ERAN se mantiene relativamente constante a todas las dosis de N (Figura 18). La eficiencia de recuperación de nitrógeno para la máxima dosis física presentó valores de 58, 73, 55, 48% en AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj respectivamente; y en la económicamente óptima valores de 58, 77, 55, 50% para AzC, Az1-PL, Az2-PL y Az-Sj respectivamente.

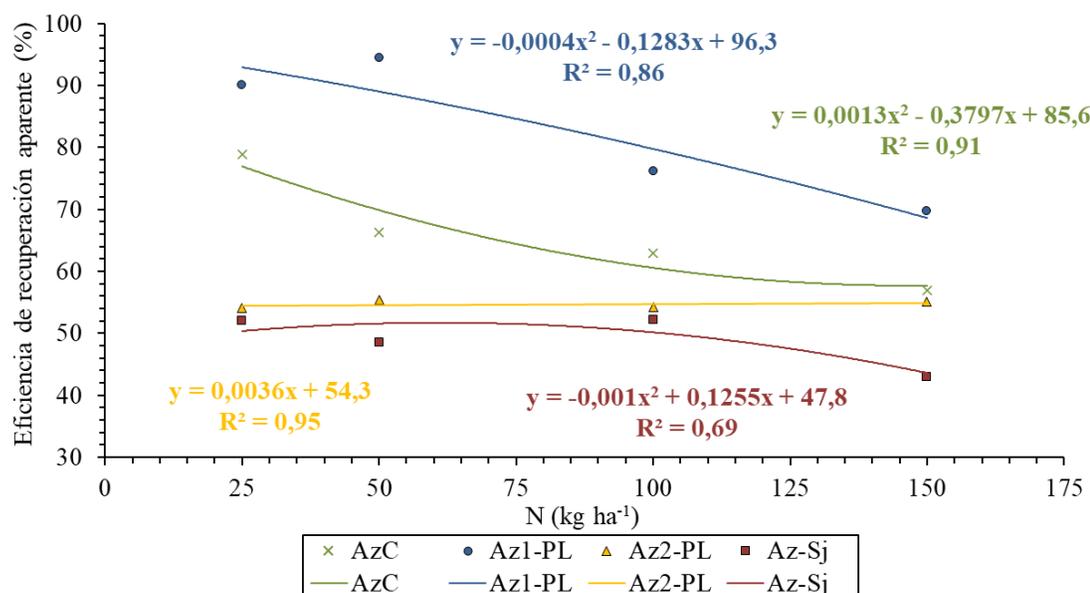


Figura 18. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre la eficiencia de recuperación aparente de N en el cultivo de arroz

#### 4.8.5 Factor parcial de productividad

Se observaron efectos significativos de la rotación sobre el factor parcial de productividad de nitrógeno (FPPN), siendo Az2-PL diferente a AzC, Az1-PL y Az-Sj las cuales no se diferencian entre sí (Anexo 25). El FPPN de Az2-PL fue 10% inferior a la media de las otras situaciones. Por otro lado, el aumento de la dosis de N redujo el FPPN en todas las rotaciones, respondiendo a una función logarítmica (Figura 19). En N<sub>25</sub> el FPPN de Az2-PL fue 12% menor que el promedio de las otras rotaciones (364 kg kg<sup>-1</sup>), mientras que a dosis de N<sub>150</sub> no se encontraron diferencias significativas de FPPN entre rotaciones (70 kg kg<sup>-1</sup>).

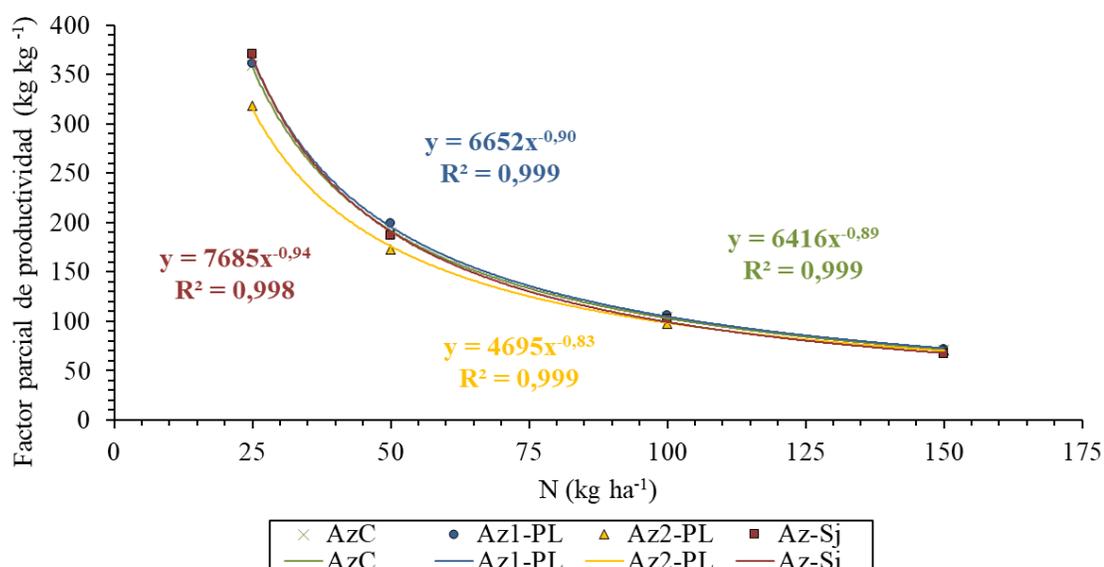


Figura 19. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre el factor parcial de productividad de N en el cultivo de arroz

El FPPN observado en las rotaciones en la dosis óptima física y económica de N fue mayor a los valores habituales de los sistemas productivos globales (51 kg kg<sup>-1</sup>), y estuvo en general por encima del valor de 80 kg kg<sup>-1</sup> recomendado como valor óptimo de FPPN (Castillo, 2018), excepto para Az2-PL. Correspondiendo a 71, 84, 73, 82 kg kg<sup>-1</sup> en la dosis física para AzC, Az1-PL, Az2-PL, Az-Sj respectivamente; mientras que en la dosis económica óptima los valores obtenidos fueron 82, 95, 73, 103 kg kg<sup>-1</sup> para AzC, Az1-PL, Az2-PL, Az-Sj respectivamente.

Los valores de FPPN en general fueron altos para todas las rotaciones en comparación con los reportados a nivel internacional. Esto se debe a un ambiente de producción muy bueno donde se rota con pasturas que contienen leguminosas, con un buen manejo de la fertilización en base a análisis de suelo, obteniéndose altos rendimientos con un relativamente bajo agregado de N. En el caso particular de Az2-PL,

el suelo presenta una menor capacidad de aporte con respecto a las demás rotaciones, y esto puede deberse a los rastrojos de arroz y raigrás previos, con alta relación carbono/nitrógeno y alta capacidad de inmovilizar N. La respuesta en Az2-PL puede estar explicada por un efecto priming generado en los residuos que permite complementar las dosis de N agregadas y concretar buenos rendimientos al final del ciclo, con valores de eficiencia similares a AzC, Az1-PL, Az-Sj.

## 5 CONCLUSIONES

El manejo de la fertilización nitrogenada debe considerar los sistemas de rotaciones donde se produce arroz, ya que existió un efecto diferencial (según rotación) sobre el rendimiento del cultivo de arroz y la EUN de este.

La producción de biomasa aérea se vio afectada tanto por el efecto de la rotación como por la dosis de N aplicada, pero el contenido de N en planta se vio afectado en mayor medida por las dosis de N aplicadas y en menor medida por la rotación. El índice de cosecha solo fue afectado por la dosis de nitrógeno, disminuyendo a dosis crecientes de N por un incentivo a la producción de MS vegetativa con relación a la producción de grano.

La absorción de N total presenta correlación positiva con el rendimiento en grano. Los componentes de rendimiento se vieron afectados tanto por la rotación como por las dosis de N aplicadas a excepción del número de granos/panoja.

No solo la rotación, sino que las fases dentro de esta, como los cultivos de cobertura durante el invierno previo al cultivo de arroz afectan significativamente el desempeño de éste, donde sus efectos se manifiestan desde la siembra hasta la cosecha del mismo, ya sea producción de biomasa, absorción de nitrógeno y rendimiento en grano.

El cultivo de arroz sembrado sobre la cobertura de raigrás fue el que presentó la mayor respuesta al agregado de N, donde se constata un menor aporte relativo de N del suelo, el cual puede deberse a que el rastrojo de éste presenta una alta relación C/N y capacidad de inmovilizar N, más aún en siembra directa; necesitando aplicar altas dosis de N para levantar las limitantes y así poder alcanzar rendimientos óptimos.

El cultivo de arroz sembrado sobre rastrojo de trébol alejandrino, aun en situaciones de alta intensidad de uso, es una alternativa interesante. Esta cobertura invernal sugiere una buena capacidad de aporte de N del suelo y menor inmovilización neta de los residuos con baja relación C/N. Estos resultados llevan a recomendar el uso de esta alternativa en los sistemas de producción con el objetivo de lograr los mejores resultados, no solo en términos de rendimiento sino también en cuanto al ahorro de nitrógeno agregado.

El arroz capitalizó el ambiente favorable luego de las pasturas, lo que reafirma la importancia de estas, donde los suelos tienen una alta capacidad de aporte de N, buena respuesta a nitrógeno y rendimientos óptimos a menores dosis, con destacable EUN.

La información sugiere que, bajo condiciones climáticas de baja radiación como las prevalentes en 2018-2019, son esperables respuestas significativas al agregado

de N sobre el rendimiento del cultivo de arroz en diversas rotaciones. Sin embargo, la magnitud de las respuestas y la EUN es afectada tanto por la rotación como por los antecesores inmediatos, lo que debería ser considerado en el ajuste de la dosis de N aplicada.

Ante los resultados encontrados resulta necesario profundizar en prácticas de manejo que capitalicen mejor el nitrógeno del suelo y permitan un uso más eficiente del mismo por parte del cultivo. La inclusión de especies de leguminosas anuales con buena capacidad productiva y de fijación biológica de N, así como el manejo del barbecho serían alternativas para la mejora en las eficiencias de uso del nitrógeno del cultivo sobre rastrojos de arroz.

## 6 RESUMEN

Es escasa la información de la eficiencia del uso de nitrógeno en el cultivo de arroz en rotaciones de intensidad variable. Rotaciones que permitan capitalizar el nitrógeno del suelo y hacer un uso más eficiente del nitrógeno del fertilizante es clave para la sostenibilidad del cultivo. Para alcanzar altos rendimientos de manera sostenible, es necesario conocer además de la fisiología de la planta de arroz, los requerimientos nutricionales de esta y sus momentos de mayor demanda, así como las condiciones del clima y suelo donde se establecerá el cultivo. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre rendimiento de grano y la eficiencia de uso de nitrógeno en el cultivo de arroz en rotaciones contrastantes. Se evaluaron 5 dosis de N 0, 25, 50, 100, 150 kg N ha<sup>-1</sup> fraccionadas 70% a macollaje y 30% a primordio, sobre 3 rotaciones: arroz continuo (AzC, 7<sup>mo</sup>. arroz consecutivo) con trébol alejandrino como cobertura invernal; 2) arroz-pasturas largas (Az-PL) evaluando los dos cultivos de arroz de la secuencia, el primero (Az1) luego de una pradera de 3,5 años de festuca, trébol blanco y *Lotus corniculatus*, y el segundo (Az2) sobre una cobertura invernal de raigrás anual luego de Az1; y 3) arroz-soja (Az-Sj) sobre una cobertura invernal de trébol alejandrino luego de un cultivo de soja. La producción de biomasa se vio afectada por la rotación y la dosis de nitrógeno, mientras que el contenido de N en planta fue afectado en mayor medida por la dosis de N aplicada. La absorción total de N aumentó al incrementar los niveles de N, donde la remoción promedio por la paja de arroz fue de 5 kg de N por tonelada de grano, mientras que en grano fue de 9 kg de N por tonelada de grano. La menor respuesta en absorción al agregado de N se observó en Az-Sj y la mayor en Az1-PL. El rendimiento promedio de grano (seco y limpio) fue 9388 kg ha<sup>-1</sup>. El mayor rendimiento promedio se observó a la dosis máxima de nitrógeno, y representó una eficiencia de conversión de nitrógeno en grano de 17:1 kg kg<sup>-1</sup>. La productividad media de Az2-PL fue 7% inferior al de las otras rotaciones que no se diferenciaron entre sí (9559 kg ha<sup>-1</sup>). El mayor rendimiento de N<sub>0</sub> relativo al máximo rendimiento de la dosis física óptima de N se obtuvo en Az-Sj (84%), y el menor en Az2-PL (69%). El número de panojas/m<sup>2</sup> se vio afectado por el agregado de N, sin embargo, no se observaron efectos de la rotación ni de la fertilización nitrogenada sobre el número de granos/panoja. El peso de 1000 granos disminuyó en todos los casos con incrementos en la dosis de N, registrándose el menor valor en AzC. El índice de cosecha fue afectado por la dosis de nitrógeno, disminuyendo a dosis crecientes de N. La EUN evaluada por cinco índices se redujo en la medida que se incrementaron las dosis de N aplicadas. Sin embargo, la magnitud de las respuestas y la EUN es afectada tanto por la rotación como por los antecesores inmediatos, con valores medios de 25, 178, 65, 33 kg kg<sup>-1</sup> para EAN, FPPN, EUIN, EFISN respectivamente, mientras que la ERAN promedio fue de 63%. Ante los resultados encontrados resulta necesario profundizar en prácticas de manejo que capitalicen mejor el nitrógeno del suelo y permitan un uso más eficiente del mismo por parte del cultivo.

Palabras clave: Productividad; Fertilización nitrogenada; Rotaciones arroz-leguminosas.

## 7 SUMMARY

Information on the efficiency of nitrogen use in rice cultivation in rotations of variable intensity is scarce. Rotations that allow capitalizing on soil nitrogen and make more efficient use of nitrogen from the fertilizer are key to crop sustainability. In order to achieve high yields in a sustainable way, it is necessary to know not only the physiology of the rice plant, but also its nutritional requirements and its moments of highest demand, as well as the climate and soil conditions where the crop will be established. The objective of the work was to evaluate the effect of nitrogen fertilization on grain yield and the efficiency of nitrogen use in rice cultivation in contrasting rotations. 5 doses of N 0, 25, 50, 100, 150 kg N ha<sup>-1</sup> were evaluated fractionated 70% to tilling and 30% to primordium, over 3 rotations: 1) continuous rice (AzC, 7<sup>th</sup>. consecutive rice) with alexandrian clover as winter cover; 2) rice-long pasture (Az-PL) evaluating the two rice crops of the sequence, the first one (Az1) after a 3.5 year-old meadow of fescue, white clover and *Lotus corniculatus*, and the second one (Az2) on an annual ryegrass winter cover after Az1; and 3) rice-soybean (Az-Sj) on a winter cover of alexandrian clover after a soybean crop. The biomass production was affected by the rotation and the dosage of nitrogen, while plant N content was affected mainly by the applied N dose. Total N uptake increased when N levels were augmented, the average removal by rice straw was 5 kg of N per ton of grain, while by the grain it was 9 kg of N per ton of grain. The lowest response to the absorption of added N was observed in Az-Sj and the highest in Az1-PL. Average grain yield (dry and clean) was 9388 kg ha<sup>-1</sup>. The highest average yield was observed at the maximum nitrogen dose and represented a nitrogen-to-grain conversion efficiency of 17:1 kg kg<sup>-1</sup>. The average yield of Az2-PL was 7% lower than that of the other rotations that did not differ from each other (9559 kg ha<sup>-1</sup>). The highest N<sub>0</sub> yield relative to the maximum yield of the optimum physical N dose was obtained in Az-Sj (84%), and the lowest in Az2-PL (69%). The number of panicle/m<sup>2</sup> was affected by the addition of N, however, no effects of rotation or nitrogen fertilization on the number of grains/panicles were observed. The weight of 1000 grains decreased in all cases with increases in N dosage, registering the lowest value in AzC. The average harvest was affected by the dose of nitrogen, decreasing with increasing doses of N. The EUN evaluated by five indexes was reduced as the applied N doses were increased, however, the magnitude of the responses and the EUN is affected by both rotation and immediate ancestors, with average values of 25, 178, 65, 33 kg kg<sup>-1</sup> for EAN, FPPN, EUIN, EFISN respectively, while the average ERAN was 63%. Given the results found, it is necessary to deepen management practices that better capitalize on soil nitrogen and allow a more efficient use of it by the crop.

Keywords: Productivity; Nitrogen fertilization; Rice-Leguminous rotations.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

1. Ahmad, T.; Hafeez, F. Y.; Mahmood, T.; Malik, K. A. 2001. Residual effect of nitrogen fixed by mungbean (*Vigna radiata*) and blackgram (*Vigna mungo*) on subsequent rice and wheat crops. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 41(2):245-248.
2. Anders, M. M.; Olk, D. C.; Holzhauer, J. 2004a. Effect of rotation, tillage, and fertility on rice yield and nutrient cycling. In: ASA/CSSA/SSSA Annual Meeting (2004, Madison). Abstracts. Madison, WI, American Society of Agronomy. 1 disco compacto.
3. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Harper, T.; Daniel, T.; Holzhauer, J. 2004b. The effect of rotation, tillage, and fertility on rice grain yields and nutrient flows. North Carolina Agricultural Research Service. Technical Bulletin no. 321. 1 disco compacto.
4. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Grantham, J.; Holzhauer, J. 2005. Effects of rotation, tillage, fertility, and variety on rice grain yield and nutrient uptake. In: Rice Technical Working Group Meeting (31<sup>st</sup>., 2005, Little Rock). Proceedings. Little Rock, University of Arkansas. pp. 159-160.
5. Angus, J. F.; Ohnishi, M.; Horie, T.; Williams, R. L. 1994. Un estudio preliminar para predecir la mineralización neta de nitrógeno en un suelo de arroz inundado mediante incubación anaerobia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 34 (7):995-999.
6. Ayala, W.; Serrón, N.; Macedo, I.; Terra, J. 2017. ¿Cuánto producen las pasturas en diferentes secuencias de arroz? In: Zorrilla, G.; Martínez, S.; Terra, J. A. Saravia, H. eds. Arroz 2017. Montevideo, INIA. pp. 83-85 (Serie Técnica no. 233).
7. Baethgen, W. 1996. El nitrógeno en los sistemas agrícola ganaderos. In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 9-22 (Serie Técnica no.76).
8. Beecher, H. G.; Thompson, J. A.; Bacon, P. E.; Heenan, D. P. 1994a. Effect of cropping sequences on soil nitrogen levels, rice growth, and grain yields. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 34(7):977-986.
9. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Dunn, B. W. 1994b. Soil nitrogen supply to rice: crop sequence effects. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 34(7):987-994.

10. Benintende, S.; Benintende, M.; De Battista, J.; Saluzzio, M.; Sánchez, C.; Sterren, M.; Arias, N.; Oszust, J.; Pretto, G.; Faccendini, N. 2011. Estimación de la mineralización y fijación biológica del nitrógeno en suelos inundados para optimizar su utilización en cultivo de arroz y minimizar el daño ambiental. *Ciencia, Docencia y Tecnología*. 1(1):1-15.
11. Blanco, P.; Molina, F.; Pérez de Vida, F.; Ávila, S.; Lavecchia, A.; Marchesi, C.; Deambrosi, E.; Méndez, R.; Saldain, N.; Roel, Á.; Zorrilla, G.; Acevedo, A. 2004. INIA Olimar: características y comportamientos en la zafra 2003/2004. *Arroz*. no. 38:40-48.
12. Boaretto, A.; Muraoka, T.; Trevelin, P. 2007. Uso eficiente de nitrogênio nos fertilizantes convencionais. *Informações Agronômicas*. 120:13-14.
13. Bonilla, O.; Acevedo, A.; Grierson, J. 1979. Producción de carne en rotaciones con arroz. *In: Jornada Producción de Carne en Rotación con Arroz (4ª., 1979, Treinta y Tres)*. Memorias. Treinta y Tres, CIAAB. pp. 1-24.
14. Carracelas, G.; Guilpart, N.; Grassini, P.; Cassman, K. 2016. Determinación del potencial y de la brecha de rendimiento en los sistemas de arroz en Uruguay. *In: Arroz: resultados experimentales zafra 2015-2016*. Montevideo, INIA. pp. 33-39 (Actividades de Difusión no. 766).
15. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2017. Evolución del rendimiento del arroz producido en Uruguay y comparación con otros países arroceros. *In: Zorrilla, G.; Martínez, S.; Terra, J. A.; Saravia, H. eds. Arroz 2017*. Montevideo, INIA. pp. 51-55 (Serie Técnica no. 233).
16. Cassman, K. G.; Peng, S.; Olk, D.C.; Ladha, J. K.; Reichardt, W.; Dobermann, A.; Singh, U. 1998. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crop Research*. 56:7-39.
17. Casterá, F. G.; Fernández, J. 1999. Evaluación de distintas temperaturas bases para la suma de grados días en diferentes cultivares de arroz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 152 p.
18. Castillo, J.; Terra, J.; Perdomo, C.; Mori, C. 2011. Contribución relativa de las distintas fuentes de nitrógeno al cultivo de arroz, evaluada mediante técnica isotópica de abundancia natural  $^{15}\text{N}$ . *In: Jornada Anual de Arroz (2011, Treinta y Tres)*. *Arroz: resultados experimentales 2010-2011*. Montevideo, INIA. pp. 54-68 (Actividades de Difusión no. 651).

19. \_\_\_\_\_.; Bonilla, F.; Lucas, T.; Amaral, R.; Terra, J. 2013. La soja llegó a la rotación arroz-pastura en el este: algunos resultados y particularidades de la zafra 2012-13. *Arroz*. no. 75:13-20.
20. \_\_\_\_\_.; Ferreira, A.; Méndez, R.; Terra, J. 2014. Fertilización N en arroz en base a indicadores objetivos. ¿Qué sabemos luego de 3 años de experimentación? *In: Jornada Anual de Arroz-Soja (2014, Treinta y Tres)*. Arroz-soja: resultados experimentales 2013-2014. Montevideo, INIA. pp. 4-6 (Actividades de Difusión no. 735).
21. \_\_\_\_\_.; Terra, J.; Perdomo, C.; Mori, C. 2015. Eficiencia de uso del N y respuesta a la fertilización N en el cultivo de arroz utilizando técnicas isotópicas  $^{15}\text{N}$  y no isotópicas. *In: Conferencia Internacional do Arroz para América Latina e Caribe (2015, Brasil)*. Posters. Montevideo, INIA. s.p.
22. \_\_\_\_\_. 2018. Ciclo del nitrógeno en el cultivo de arroz en Uruguay: estudios con técnicas isotópicas y convencionales. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 84 p.
23. 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. 12 p.
24. \_\_\_\_\_. 2012. Arroz uruguayo. Montevideo, Hemisferio Sur. 352 p.
25. Courdin, V.; Hernández, A. 2013. Dinámica del cultivo de arroz en Uruguay en el “nuevo” escenario agropecuario (2000-2010). *Cangüé*. no. 34:21-31.
26. \_\_\_\_\_. 2014. El complejo arrocero de Uruguay durante 2000-2010: la visión de sus actores. Pampa: *Revista Interuniversitaria de Estudios Territoriales*. no. 10:247-262.
27. Deambrosi, E.; Méndez, R. 2000. Firmes beneficios de la rotación arroz-praderas. *Arroz*. no. 23:20-23.
28. \_\_\_\_\_. 2003. El sistema de producción de arroz en Uruguay y su sustentabilidad. *In: Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado (3º, 2003, Punta del Este, Uruguay)*. Resúmenes. Montevideo, ACA/INIA/GMA/FLAR. p. 19.

29. \_\_\_\_\_.; Méndez, R.; Ávila, S. 2004. Respuesta de INIA Olimar a densidades de siembra y aplicación de nitrógeno. In: Jornada Técnica Anual de Arroz (2004, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2003-2004. Montevideo, INIA. pp. 16-19 (Actividades de Difusión no. 373).
30. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2005a. Estudio sobre la problemática de disminución de los rendimientos en los rastrojos de arroz. In: Jornada Anual de Arroz (2005, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2004-2005. Montevideo, INIA. cap.3. pp. 6-16 (Actividades de Difusión no. 418).
31. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2005b. Fertilización. In: Jornada Anual de Arroz (2005, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2004-2005. Montevideo, INIA. cap.3. pp. 1-5 (Actividades de Difusión no. 418).
32. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2007. Respuesta de cultivares de arroz de tipo indica a densidades de siembra y aplicación de nitrógeno en la zona Este del Uruguay. Montevideo, INIA. 36 p. (Serie Técnica no. 167).
33. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Castillo, J. 2011. Estimuladores de crecimiento. In: Jornada Anual de Arroz (2011, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2010-2011. Montevideo, INIA. pp. 45-53 (Actividades de Difusión no. 651).
34. De, P. K.; Sarkar, S. N. 1936. Transformation of nitrate in water-logged soils. *Soil Science*. 42(2):143-156.
35. De Datta, S. 1981. Principles and practices of rice production. New York, Wiley. 618 p.
36. Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; Robledo, C. W. 2008. InfoStat. Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba. FCA. Grupo InfoStat. 336 p.
37. Dobermann, A.; Fairhurst, T. 2000. Rice: nutrient Disorders and Nutrient Management. Singapore, PPI/PPIC/IRRI. 191 p.
38. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2005. Manejo del nitrógeno en arroz. *Informaciones Agronómicas*. 58:1-6.
39. \_\_\_\_\_. 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: proceedings. Paris, France, International Fertilizer Industry Association. pp.1-28.
40. Dos Santos, A. B.; Stone, L. F.; Heinemann, A. B.; Santos, T. P. B. 2017. Índices fisiológicos do arroz irrigado afetados pela inundação e fertilização nitrogenada. *Revista Ceres*. 64(2):122-131.
  41. Duan, Y.; Yin, X.; Zhang, Y.; Shen, Q. 2007. Mechanisms of Enhanced Rice Growth and Nitrogen Uptake by Nitrate. *Pedosphere*. 17(6):697-705.
  42. Fabini, G.; Castillo, J.; Marchesi, C. 2018. Curvas críticas de dilución de nitrógeno en Uruguay. Montevideo, INIA. pp. 87-89 (Serie Técnica no. 246).
  43. Fageria, N. K.; Baligar, V. C. 2001. Lowland rice response to nitrogen fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 32(9):1405-1429.
  44. \_\_\_\_\_.; Slaton, N.; Baligar, V. 2003a. Nutrient Management for Improving Lowland Rice Productivity and Sustainability. *Advances in Agronomy*. 80:63-152.
  45. \_\_\_\_\_. 2003b. Plant tissue test for determination of optimum concentration and uptake of nitrogen at different growth stages in lowland rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 34(1-2):259-270.
  46. \_\_\_\_\_.; Baligar, V. C. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*. 88:97-185.
  47. Fernández, F.; Vergara, V. S.; Yapit, N.; García, O. 1985. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. *In*: Tascón, J.; García, D. eds. *Arroz: investigación y producción*. Cali, CIAT. pp. 83-102.
  48. Fixen, P.; Brentrup, F.; Bruulsema, T.; García, F.; Norton, R.; Zingore, S. 2015. Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends. *In*: Drechsel, P.; Heffer, P.; Magan, H.; Mikkelsen, R.; Wichelns, D. eds. *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*. Paris, France, IFA/IWMI/IPNI/IPI. pp. 1-30.
  49. Gabrielli, A.; Pintos, F. 2013. Respuesta a nitrógeno del cultivar INIA Olimar según tipo de riego y sistematización. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 75 p.

50. Gamarra, G. 1996. Arroz: manual de producción. Montevideo, Hemisferio Sur. 439 p.
51. García, J. A.; Labandera, C.; Pastorini, D.; Curbelo, S. 1994. Fijación de nitrógeno por leguminosas en La Estanzuela. In: Seminario de Actualización Técnica (1994, La Estanzuela). Nitrógeno en pasturas. Montevideo, INIA. pp. 13-18 (Serie Técnica no. 51).
52. Goulart, R. Z.; Reichert, J. M.; Rodrigues, M. F. 2020. Cropping poorly-drained lowland soils: alternatives to rice monoculture, their challenges and management strategies. *Agricultural Systems*. 177:1-7.
53. Hernández, F. A. 2016. Absorción de nutrientes de la variedad fl- fedearroz 68 en la zona del ariari-meta. *Arroz*. 64 (521):4-12.
54. Holzschuh, M.; Bohnen, H.; Anghinoni, J.; de Campos, C.; Valadão, S. 2009. Resposta do arroz irrigado ao suprimento de amônio e nitrato. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 33 (5):1323-1331.
55. Hou, W.; Khan, M. R.; Zhang, J.; Lu, J.; Ren, T.; Cong, R.; Li, X. 2019. Nitrogen rate and plant density interaction enhances radiation interception, yield and nitrogen use efficiency of mechanically transplanted rice. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. no. 269:183-192.
56. INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2006. El cultivo en Uruguay: Uruguay exportador de arroz. (en línea). INIA. Suplemento Tecnológico Expoprado. set. 2006:12. Consultado 16 feb. 2020. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5749/1/Suplemento-tecnologico-2006.pdf>
57. IRGA (Instituto Rio Grandense do Arroz, BR). 2019. 6000 razões para cultivar. *Lavoura Arrozeira*. 66(470):28.
58. Jansson, S. L.; Persson, J. 1982. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In: Stevenson, F. J. ed. *Nitrogen in agricultural soils*. Madison, WI, American Society of Agronomy. pp. 229-252 (Monography no. 22).
59. Johnston, T. H.; Miller, M. D. 1973. Culture. In: Adair, C. R. ed. *Rice in the United States: varieties and production*. Washington, D. C., USDA. pp. 88-94 (Agriculture Handbook no. 289).

60. Justes, E.; Mary, B.; Meynard, J. M.; Machet, J. M.; Thelier-Huche, L. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*. no. 74:397-407.
61. Keeler, B. L.; Gourevitch, J. D.; Polasky, S.; Isbell, F.; Tessum, C. W.; Hill, J. D.; Marshall, J. D. 2016. The social cost of nitrogen. *Science Advances*. 2(10):1-9.
62. Kirk, G. 2001. Plant-mediated processes to acquire nutrients: nitrogen uptake by rice plants. *Plant and Soil*. 232(1-2):129-134.
63. Litzenberger, S. C. 1974. Arroz (*Oryza sativa*). In: Guía para cultivos en los trópicos y los subtrópicos. México, CRAT. pp. 30-41.
64. Liu, X.; Xu, G.; Wang, Q.; Hang, Y. 2017. Effects of insect-proof net cultivation, rice-duck farming, and organic matter return on rice dry matter accumulation and nitrogen utilization. *Frontiers in Plant Science*. 8(47):1-15.
65. Lu, S.; Lepo, J. E.; Song, H.; Guan, C.; Zhang, Z. 2018. Increased rice yield in long-term crop rotation regimes through improved soil structure, rhizosphere microbial communities, and nutrient bioavailability in paddy soil. *Biology and Fertility of Soils*. no. 54:909-923.
66. Macedo, I.; Castillo, J.; Saldain, N.; Martínez, S.; Bermúdez, R.; Ayala, W.; Hernández, J.; Terra, J. 2015. Rotaciones arroceras: resumen de resultados productivos en las primeras tres zafras. In: Jornada Anual de Arroz-Soja (2015, Treinta y Tres). Resultados experimentales 2014-2015. Montevideo, INIA. pp. 1-3 (Actividades de Difusión no. 748).
67. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Ayala, W.; Hernández, J.; Serrón, N.; Bordagorri, A.; Zorrilla, G.; Terra, J. 2016a. Nuevas rotaciones arroceras: primeros datos de productividad. *Arroz*. no. 88:34-39.
68. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Serrón, N.; Hernández, J.; Terra, J. 2016b. Rotaciones arroceras: resultados productivos en las primeras cuatro zafras. In: Jornada Anual de Arroz (2016, Treinta y Tres). *Arroz: resultados experimentales 2015-2016*. Montevideo, INIA. pp. 1-3 (Actividades de Difusión no. 765).
69. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Terra, J. 2017. Intensificando la rotación arroz-pasturas: implicancias en el carbono del suelo durante la transición. Montevideo, INIA. pp. 66-68 (Serie Técnica no. 233).

70. Mascarenhas, H. A. A.; Nogueira, S. S. S.; Tanaka, R. T.; Martins, A. L. M.; Carmello, Q. A. C. 1998. Efeito na produtividade da rotação de culturas de verão e crotalaria no inverno. *Scientia Agrícola*. 55(3):534-537.
71. MAP (Ministerio de Agricultura y Pesca, UY). 1976. Descripción de grupos de suelos CONEAT. (en línea). Montevideo. 62 p. Consultado 10 abr. 2019. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/descripcion\\_de\\_grupos\\_de\\_suelos\\_coneat.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/descripcion_de_grupos_de_suelos_coneat.pdf)
72. Mejia De Tafur, S.; Menjivar, J. 2010. Nutrición mineral del arroz: nitrógeno, funciones importantes. *In*: Degiovanni, B.; Martínez, R.; Motta, O. eds. Producción eco-eficiente del arroz en América latina. Cali, Centro Internacional de Agricultura Tropical. pp. 306-335.
73. Méndez, R. 1993. Rotación arroz-pastura: análisis físico-económico del cultivo. Montevideo, INIA. 21 p. (Serie Técnica no. 38).
74. \_\_\_\_\_; Deambrosi, E.; Blanco, P.; Saldain, N.; Pérez de vida, F.; Gaggero, M.; Lavecchia, A.; Méndez, J.; Marchesi, C. 2001. Reducción de laboreo y siembra directa en el cultivo de arroz. Montevideo, INIA. 18 p. (Serie Técnica no. 122).
75. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2009. Coberturas nitrogenadas para la producción de arroz. Parte 1. Eficiencia de aplicación. Montevideo, INIA. 386 p. (Serie Técnica no. 179).
76. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Castillo, J. 2011. Evaluación de los efectos de la aplicación de verde urea (con inhibidor de la ureasa) en arroz. (en línea). *In*: Jornada Anual de Arroz (2011, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2010-2011. Montevideo, INIA. pp. 15-21 (Actividades de Difusión no. 651). Consultado 13 feb. 2020. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/9257/1/Ad-651-cap.3-p.15-21.pdf>
77. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2019a. Anuario estadístico agropecuario 2019. Montevideo. 255 p.
78. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2019b. Encuesta de arroz zafra 2018-2019. Montevideo, Uruguay. 22 p. (Serie Encuestas no. 359).

79. Nguyen, T. T. H.; Dinh, M. T. L.; Nguyen, Q. T.; Cuong, P. V. 2018. Nitrogen-use efficiency evaluation and genome survey of vietnamese rice landraces (*Oryza sativa* L.). Vietnam Journal of Agricultural Sciences. 1(2):142-155.
80. Olaizola, C. A. 1968. Coparroz: plan de represas. Arroz. no. 1:16-18.
81. Oliveira, S. S. de; Giorgi, I. U.; Souza, H. B. de. 1977. Rotação de culturas. Lavoura Arrozeira. no. 301:4-5.
82. Olk, D. C.; Anders, M. M.; Boeckmann, J. M.; Grantham, J.; Holzhauer, J. 2005. Impaired cycling of soil nitrogen under continuous rice rotations in the Arkansas Grand Prairie area. In: Rice Technical Working Group Meeting (31<sup>st</sup>, 2005, Little Rock). Proceedings. Little Rock, University of Arkansas. pp. 148-149.
83. Olmos, S. 2006. Apunte de morfología, fenología, ecofisiología y mejoramiento genético del arroz. (en línea). Corrientes. s.p. Consultado 13 feb. 2020. Disponible en <https://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/academico/Apunte-MORFOLOGIA.pdf>
84. Patrick, H.; Mahapatra, I. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. Advances in Agronomy. 20:323-359.
85. Perdomo, C.; Barbazán, M.; Durán, J. M. 1999. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 72 p.
86. Perdomo, M. A.; González, J.; de Gavis, Y. C.; García, E.; Arregoces, O. 1985. Los macronutrientes en la nutrición de la planta de arroz. In: Tascón, J.; García, D. eds. Arroz: investigación y producción. Cali, CIAT. pp. 103-132.
87. Pittelkow, C.; Zorrilla, G.; Terra J.; Riccetto, S.; Macedo, I.; Bonilla, C.; Roel, A. 2016. Sostenibilidad de la intensificación arroceras en el Uruguay desde 1993 al 2013. In: Jornada Anual de Arroz (2016, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2015-2016. Montevideo, INIA. pp. 7-10 (Actividades de Difusión no. 765).
88. Priore, J.; Lima, C. 1980. Respuesta del arroz a la fertilización sobre rastrojo de dos años de soja (con dos diseños experimentales). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 207 p.

89. Quintero, C. E. 2009. Factores limitantes para el crecimiento y productividad del arroz en Entre Ríos, Argentina. Tesis Doctoral. La Coruña, España. Universidade da Coruña. 167 p.
90. \_\_\_\_\_.; Prats, F.; Zamero, M.; Arévalo, E.; Spinelli, N.; Boschetti, G. 2011. Absorción de nitrógeno y rendimiento de arroz con diferentes formas de nitrógeno aplicado previo al riego. *Ciencia del Suelo*. 29(2):233-239.
91. Reynolds, E. B. 1954. Research on rice production in Texas. Texas Agricultural Experiment Station. Bulletin no. 775. 29 p.
92. Roberts, S. R.; Hill, J. E.; Brandon, D. M.; Miller, B. C.; Scardaci, S. C.; Wick, C. M.; Williams, J. F. 1993. Biological yield and harvest index in rice: nitrogen response of tall and semidwarf cultivars. *Journal of Production Agriculture*. 6(4):585-588.
93. Rodríguez, H. A.; Lis Arteaga, R.; Cardona, R.; Ramón, M.; Alemán, L. 2002. Respuesta de las variedades de arroz Fonaiap 1 y Cimarrón a dos densidades de siembra y dos dosis de nitrógeno. *Bioagro*. 14(2):105-112.
94. Rovira, P.; Buffa, I.; Zorrilla, G. 2019. ¿Cómo están hoy los sistemas arroz-pasturas?: primeros pasos para articular la investigación que se viene. *Revista INIA*. no. 56:5-10.
95. Sánchez, A. 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. 69 p.
96. Sharma, R. P. 2006. Dry-matter accumulation and nitrogen uptake pattern in direct-seeded upland rainfed rice (*Oryza sativa*) as influenced by nitrogen and weed management practices. *Journal of Farming Systems Research & Development*. 13(2):191-197.
97. Silveira, M.; Tarán, J. 2009. Respuesta de INIA Olimar, nuevo cultivar de arroz de tipo indica, a la aplicación de nitrógeno y a su fraccionamiento. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 123 p.
98. Spiertz, J. H. J. 2009. Nitrogen sustainable agriculture and food security: a review. In: Lichtfouse, E.; Navarrete, M.; Debaeke, P.; Véronique, S.; Alberola, C. eds. *Sustainable agriculture*. Dordrecht, Springer. pp. 635-651.

99. Stirling, E. 2014. La Organización Institucional como secreto del éxito: la experiencia de Uruguay. s.l., Ecuador, ACA. 36 diapositivas.
100. Subedi, P.; Sah, S. K.; Marahattha, S.; Panta, S.; Shrestha, J. 2018. Nitrogen use efficiency in dry direct seeded rice under LCC based nitrogen management. *Oryza-An International Journal on Rice*. 55(4):590-595.
101. Terra, J.; Sánchez, A.; Méndez, R.; Deambrosi, E. 2010. Efecto de cultivos de cobertura invernal sobre la respuesta 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).
102. \_\_\_\_\_; Castillo, J.; Saldain, N.; Martínez, S.; Bermúdez, R.; Hernández, J.; Macedo, I. 2014a. Rotaciones arroceras: resumen de resultados productivos en las primeras zafras. In: Jornada Anual de Arroz-Soja (2014, Treinta y Tres). Arroz-soja: resultados experimentales 2013-2014. Montevideo, INIA. pp. 22-24 (Actividades de Difusión no. 735).
103. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_; Bonilla, F.; Amaral, R.; Lucas, T.; Macedo, I. 2014b. Soja en sistemas arroceros. *Arroz*. no. 78:26-29.
104. Tommasino, H.; Hernández, A. 2003. El cultivo de arroz en Uruguay: contribución a su conocimiento. Montevideo, MGAP. DIEA. 34 p.
105. Topolanski, E. 1975. El arroz: su cultivo y producción. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 304 p.
106. Uruguay XXI. 2013. Sector arrocerero: la producción de arroz posee rendimientos excelentes, producto de esto es que en el año 2012 Uruguay fue el octavo exportador de arroz a nivel mundial. Montevideo, s.e. 14 p.
107. Xiong, H.; Zhang, L.; Zhu, Y.; Guo, X.; Jiang, P.; Liu, M.; Zhou, X.; Xu, F. 2018. Yields and Nitrogen Use Efficiencies of Rice (*Oryza sativa*) at Different Sites Using Different Nitrogen Fertilizer Application Rates and Controlled-release Urea to Conventional Urea Ratios. *Agricultural Biotechnology*. 7(3):149-157.
108. Yoshida, S. 1972. Physiological aspects of grain yield. *Annual Review Plant Physiology*. 23:437-464.
109. \_\_\_\_\_. 1981. Fundamentals of rice crop science. Los Baños, Philippines, International Rice Research Institute. 269 p.

110. Zorrilla, G. 2017. Investigación en sistemas arroceros: más arroz, más calidad, menos costos y reduciendo la huella ambiental. Revista INIA. no. 50:29-33.

## 9 ANEXOS

### Anexo 1. Anava instalación y crecimiento inicial

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	424161,67	27	15709,69	3,45	0,0005
Bloque	98714,53	2	49357,27	1,42	0,3131
Rotación	52826,33	3	17608,78	0,51	0,6923
Dosis N	3725,57	4	931,39	0,2	0,9341
Rotación*dosis N	60070,17	12	5005,85	1,1	0,3941
Bloque*rotación	208825,07	6	34804,18	7,64	<0,0001
Error	145785,07	32	4555,78		
Total	569946,73	59			

### Anexo 2. Anava producción de biomasa

#### Inicio de macollaje

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	56626,78	5	11325,36	3,71	0,0708
Bloque	6523,9	2	3261,95	1,07	0,4008
Rotación	50102,87	3	16700,96	5,47	0,0375
Error	18312,73	6	3052,12		
Total	74939,51	11			

#### Pleno macollaje

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	15828137,55	27	586227,32	20,26	<0,0001
Bloque	4244897,42	2	2122448,71	7,23	0,0252
Rotación	6017938,39	3	2005979,46	6,83	0,0231
Dosis N	3636573,52	4	909143,38	31,41	<0,0001
Rotación*dosis N	167145,31	12	13928,78	0,48	0,9109
Bloque*rotación	1761582,91	6	293597,15	10,14	<0,0001
Error	926097,34	32	28940,54		
Total	16754234,9	59			

Primordio

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	140576482,46	27	5206536,39	13,65	<0,0001
Bloque	10840962,85	2	5420481,43	5,12	0,0504
Rotación	43749688,05	3	14583229,35	13,78	0,0042
Dosis N	75887387,36	4	18971846,84	49,73	<0,0001
Rotación*dosis N	3748857,56	12	312404,8	0,82	0,6303
Bloque*rotación	6349586,64	6	1058264,44	2,77	0,0276
Error	12208141,3	32	381504,42		
Total	152784623,76	59			

Floración

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	221966053,1	27	8220964,93	16,74	<0,0001
Bloque	13296737,96	2	6648368,98	2,3	0,1817
Rotación	82025124,97	3	27341708,32	9,45	0,0109
Dosis N	102950097,2	4	25737524,39	52,4	<0,0001
Rotación*dosis N	6326639,24	12	527219,94	1,07	0,413
Bloque*rotación	17367453,39	6	2894575,57	5,89	0,0003
Error	15718903,6	32	491215,74		
Total	237684956,7	59			

Mitad de llenado de grano

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	302631576,4	27	11208576,9	5,97	<0,0001
Bloque	11343517,46	2	5671758,73	0,97	0,4326
Rotación	39518258	3	13172752,67	2,24	0,1835
Dosis N	205135859,4	4	51283964,86	27,3	<0,0001
Rotación*dosis N	11426225,54	12	952185,46	0,51	0,8946
Bloque*rotación	35207715,96	6	5867952,66	3,12	0,0159
Error	60106307,1	32	1878322,1		
Total	362737883,5	59			

## Cosecha

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	413258360,4	27	15305865,2	45,34	<0,0001
Bloque	19927118,64	2	9963559,32	8,53	0,0176
Rotación	16341778,98	3	5447259,66	4,66	0,052
Dosis N	356234219,4	4	89058554,84	263,81	<0,0001
Rotación*dosis N	13746855,57	12	1145571,3	3,39	0,0028
Bloque*rotación	70008387,8	6	1168064,63	3,46	0,0095
Error	10802902,26	32	337590,7		
Total	424061262,6	59			

## Anexo 3. Anava contenido de nitrógeno

## Inicio de macollaje

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,91	5	0,78	25,31	0,0006
Bloque	0,41	2	0,21	6,71	0,0295
Rotación	3,49	3	1,16	37,72	0,0003
Error	0,19	6	0,03		
Total	4,09	11			

## Pleno macollaje

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	14,24	27	0,53	23,3	<0,0001
Bloque	0,96	2	0,48	1,61	0,2764
Rotación	1	3	0,33	1,11	0,4155
Dosis N	10,18	4	2,54	112,43	<0,0001
Rotación*dosis N	0,3	12	0,03	1,11	0,3836
Bloque*rotación	1,8	6	0,3	13,23	<0,0001
Error	0,72	32	0,02		
Total	14,96	59			

Primordio

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10,86	27	0,4	28,08	<0,0001
Bloque	0,75	2	0,38	1,01	0,4191
Rotación	2,49	3	0,83	2,23	0,1855
Dosis N	5,07	4	1,27	88,51	<0,0001
Rotación*dosis N	0,32	12	0,03	1,83	0,0845
Bloque*rotación	2,23	6	0,37	25,99	<0,0001
Error	0,46	32	0,01		
Total	11,32	59			

Floración

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,89	27	0,07	8,21	<0,0001
Bloque	0,32	2	0,16	2,63	0,1511
Rotación	0,03	3	0,01	0,17	0,9101
Dosis N	1,09	4	0,27	31,99	<0,0001
Rotación*dosis N	0,09	12	0,01	0,88	0,5784
Bloque*rotación	0,36	6	0,06	7,05	0,0001
Error	0,27	32	0,01		
Total	2,16	59			

Mitad de llenado de grano

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,59	27	0,06	13,23	<0,0001
Bloque	0,39	2	0,19	3,51	0,0978
Rotación	0,03	3	0,01	0,16	0,9196
Dosis N	0,74	4	0,18	41,48	<0,0001
Rotación*dosis N	0,11	12	0,01	2,01	0,0566
Bloque*rotación	0,33	6	0,05	12,38	<0,0001
Error	0,14	32	0,0044		
Total	1,73	59			

## Cosecha paja

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,6	27	0,02	16,02	<0,0001
Bloque	0,08	2	0,04	3,34	0,106
Rotación	0,18	3	0,06	5,05	0,0442
Dosis N	0,25	4	0,06	45,1	<0,0001
Rotación*dosis N	0,02	12	0,0015	1,09	0,4015
Bloque*rotación	0,07	6	0,01	8,59	<0,0001
Error	0,04	32	0,0014		
Total	0,65	59			

## Cosecha grano

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,98	27	0,11	20	<0,0001
Bloque	2,08	2	1,04	22,56	0,0016
Rotación	0,1	3	0,03	0,73	0,5706
Dosis N	0,5	4	0,13	22,81	<0,0001
Rotación*dosis N	0,03	12	0,0023	0,41	0,9491
Bloque*rotación	0,28	6	0,05	8,33	<0,0001
Error	0,18	32	0,01		
Total	3,16	59			

## Anexo 4. Anava absorción de nitrógeno

## Paja

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	16750,38	27	620,38	44,29	<0,0001
Bloque	1246,52	2	623,26	5,44	0,0449
Rotación	2064,79	3	688,26	6,01	0,0307
Dosis N	12463,14	4	3115,78	222,45	<0,0001
Rotación*dosis N	288,85	12	24,07	1,72	0,1091
Bloque*rotación	687,08	6	114,51	8,18	<0,0001
Error	448,22	32	14,01		
Total	17198,61	59			

## Grano

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	36044,84	27	1334,99	22,7	<0,0001
Bloque	17031,42	2	8515,71	27,85	0,0009
Rotación	1275,26	3	425,09	1,39	0,3337
Dosis N	15116,39	4	3779,1	64,25	<0,0001
Rotación*dosis N	786,85	12	65,57	1,11	0,3825
Bloque*rotación	1834,93	6	305,82	5,2	0,0008
Error	1882,22	32	58,82		
Total	37927,06	59			

## Total

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	89830,34	27	3327,05	40,42	<0,0001
Bloque	23645,45	2	11822,72	22,08	0,0017
Rotación	6432,18	3	2144,06	4	0,07
Dosis N	54983,59	4	13745,9	166,98	<0,0001
Rotación*dosis N	1555,72	12	129,64	1,57	0,1493
Bloque*rotación	3213,41	6	535,57	6,51	0,0001
Error	2634,22	32	82,32		
Total	92464,56	59			

## Anexo 5. Anava rendimiento en grano

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	70286533,48	27	2603204,94	23,71	<0,0001
Bloque	6580970,33	2	3290485,16	8,92	0,016
Rotación	5553719,77	3	1851239,92	5,02	0,0449
Dosis N	51383052,12	4	12845763,03	116,99	<0,0001
Rotación*dosis N	4554578,88	12	379548,24	3,46	0,0025
Bloque*rotación	2214212,38	6	369035,4	3,36	0,0111
Error	3513756,42	32	109804,89		
Total	73800289,9	59			

Anexo 6. Anava componentes de rendimiento

Panojas/m<sup>2</sup>

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	729091,27	27	27003,38	9,67	<0,0001
Bloque	14920,23	2	7460,12	5,22	0,0486
Rotación	308135,8	3	102711,93	71,85	<0,0001
Dosis N	363924,27	4	90981,07	32,58	<0,0001
Rotación*dosis N	33533,87	12	2794,49	1	0,4703
Bloque*rotación	8577,1	6	1429,52	0,51	0,7948
Error	89360,67	32	2792,52		
Total	818451,93	59			

Granos/panoja

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	16215,27	27	600,57	2,69	0,004
Bloque	2852,8	2	1426,4	1,39	0,3184
Rotación	3662,47	3	1220,82	1,39	0,3892
Dosis N	737,5	4	184,38	0,83	0,5188
Rotación*dosis N	2820,37	12	235,03	1,05	0,4292
Bloque*rotación	6142,13	6	1023,69	4,58	0,0018
Error	7147,73	32	223,37		
Total	23363	59			

Peso de mil granos

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	146,15	27	5,41	19,95	<0,0001
Bloque	3,3	2	1,65	0,47	0,6441
Rotación	48,56	3	16,19	4,65	0,0524
Dosis N	68,94	4	17,24	63,52	<0,0001
Rotación*dosis N	4,44	12	0,37	1,36	0,2331
Bloque*rotación	20,91	6	3,48	12,84	<0,0001
Error	8,68	32	0,27		
Total	154,83	59			

Índice de cosecha

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1633,64	27	60,51	5,57	<0,0001
Bloque	92,46	2	46,23	0,77	0,5055
Rotación	757,12	3	252,37	4,18	0,0644
Dosis N	362,69	4	90,67	8,34	0,0001
Rotación*dosis N	59,22	12	4,94	0,45	0,9267
Bloque*rotación	362,14	6	60,36	5,55	0,0005
Error	347,92	32	10,87		
Total	1981,55	59			

Anexo 7. Anava eficiencia de uso de nitrógeno

Eficiencia agronómica

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6616,5	23	287,67	3,34	0,0023
Bloque	1021,24	2	510,62	1,41	0,3154
Rotación	1286,85	3	428,95	1,18	0,3924
Dosis N	1544,05	3	514,68	5,98	0,0034
Rotación*dosis N	586,95	9	65,22	0,76	0,6545
Bloque*rotación	2177,41	6	362,9	4,22	0,0049
Error	2064,79	24	86,03		
Total	8681,29	47			

Eficiencia de utilización interna

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9243,26	27	342,34	28,13	<0,0001
Bloque	3678,07	2	1839,03	15,36	0,0044
Rotación	712,83	3	237,61	1,99	0,2177
Dosis N	4069,96	4	1017,49	83,6	<0,0001
Rotación*dosis N	64,24	12	5,35	0,44	0,9342
Bloque*rotación	718,16	6	119,69	9,83	<0,0001
Error	389,46	32	12,17		
Total	9632,72	59			

Eficiencia fisiológica

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5165,17	23	224,57	3,08	0,0041
Bloque	1933,63	2	966,81	5,45	0,0448
Rotación	472,33	3	157,44	0,89	0,4993
Dosis N	996,83	3	332,28	4,56	0,0115
Rotación*dosis N	697,83	9	77,54	1,06	0,4221
Bloque*rotación	1064,54	6	177,42	2,44	0,0555
Error	1747,83	24	72,83		
Total	6913	47			

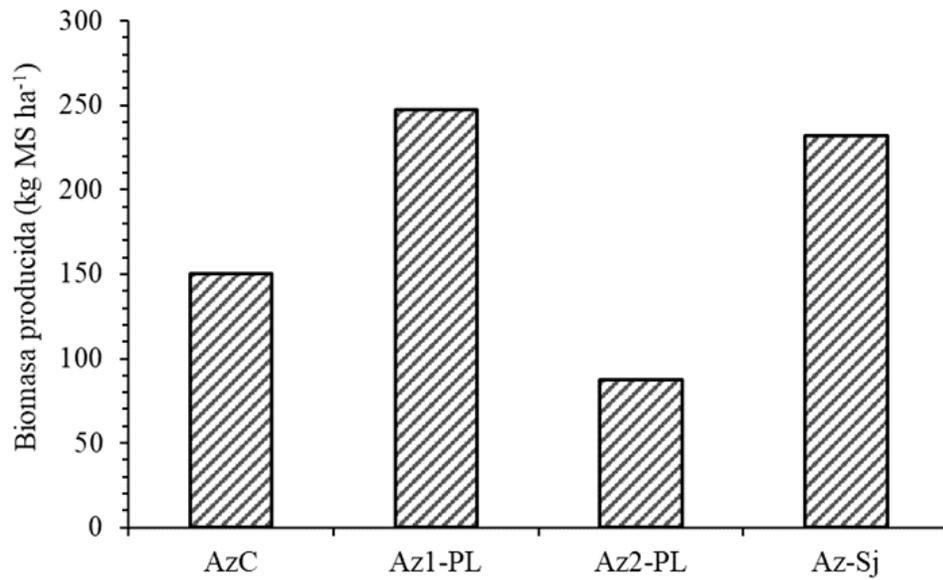
Eficiencia de recuperación aparente

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	17928,98	23	779,52	3,19	0,0032
Bloque	1577,04	2	788,52	0,76	0,5087
Rotación	7988,4	3	2662,8	2,56	0,1509
Dosis N	1090,73	3	363,58	1,49	0,243
Rotación*dosis N	1032,02	9	114,67	0,47	0,8808
Bloque*rotación	6240,79	6	1040,13	4,26	0,0047
Error	5863,5	24	244,31		
Total	23792,48	47			

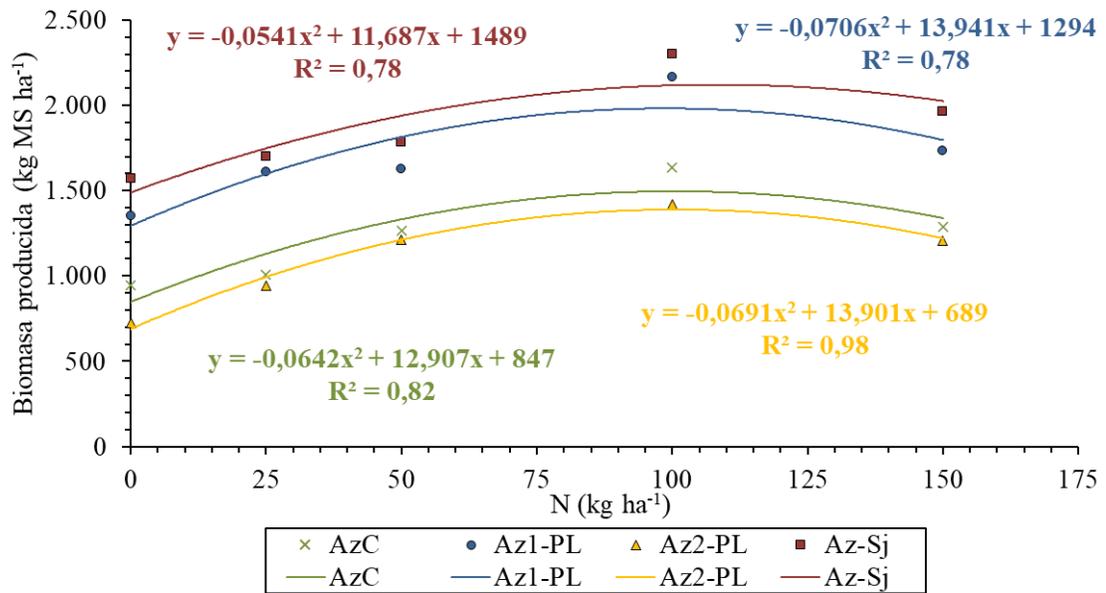
Factor parcial de productividad

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	582566,97	23	25329	278,99	<0,0001
Bloque	1581,19	2	790,59	3,53	0,0968
Rotación	2767,2	3	922,4	4,12	0,0562
Dosis N	573706,49	3	191235,5	2106,36	<0,0001
Rotación*dosis N	3169,86	9	352,21	3,88	0,0038
Bloque*rotación	1342,24	6	223,71	2,46	0,0533
Error	2178,95	24	90,79		
Total	584745,92	47			

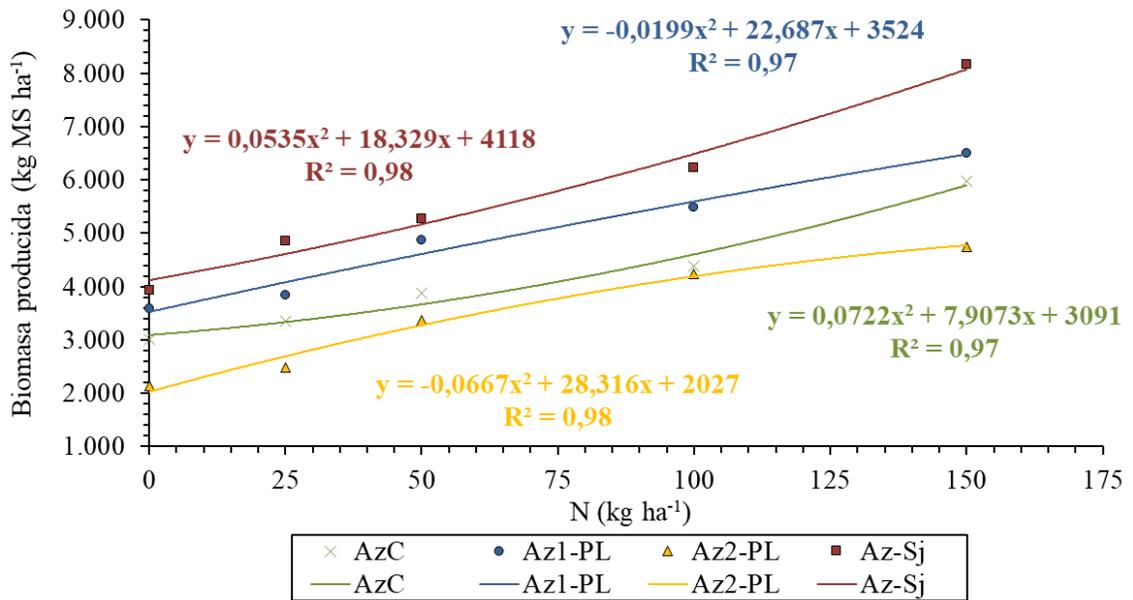
Anexo 8. Efecto de la rotación sobre la biomasa acumulada 15 días luego de la emergencia del cultivo de arroz



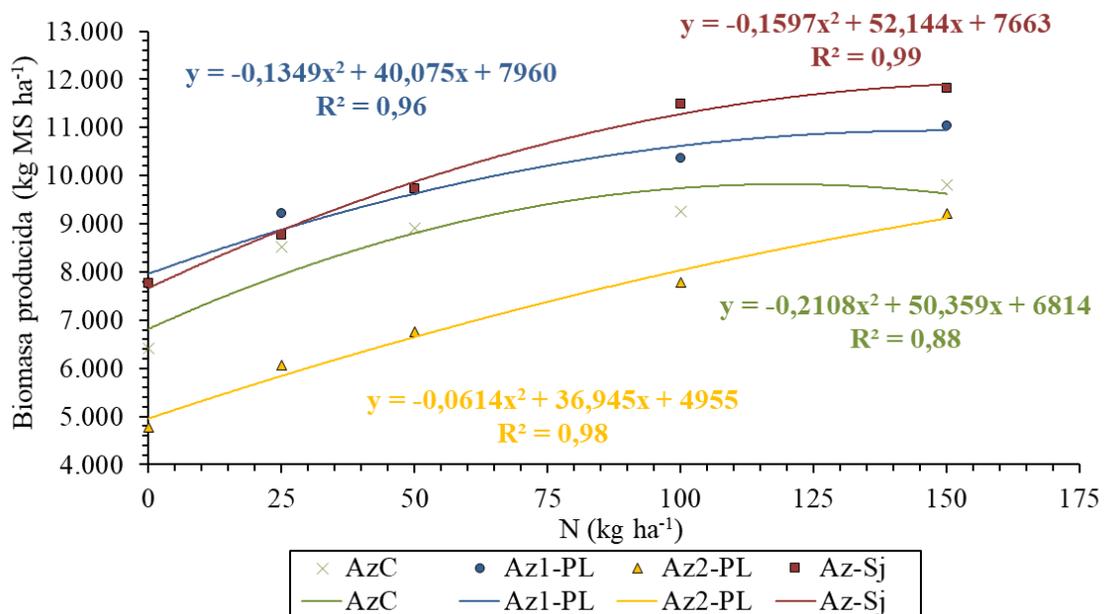
Anexo 9. Efecto de la rotación y la dosis de N sobre la producción de biomasa a pleno macollaje en el cultivo de arroz



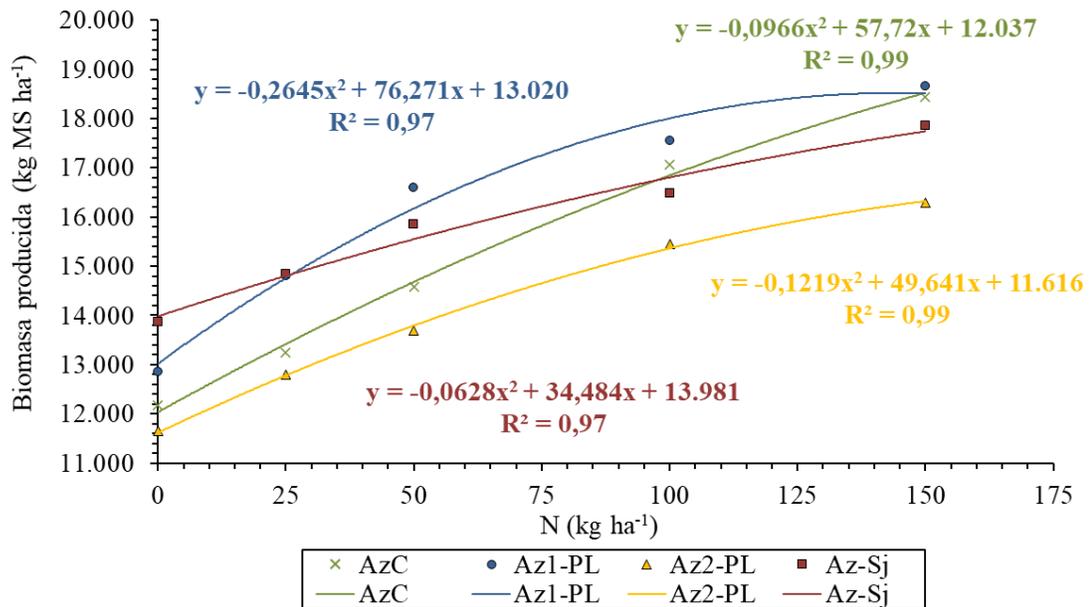
Anexo 10. Efecto de la rotación y la dosis de N sobre la producción de biomasa a primordio en el cultivo de arroz



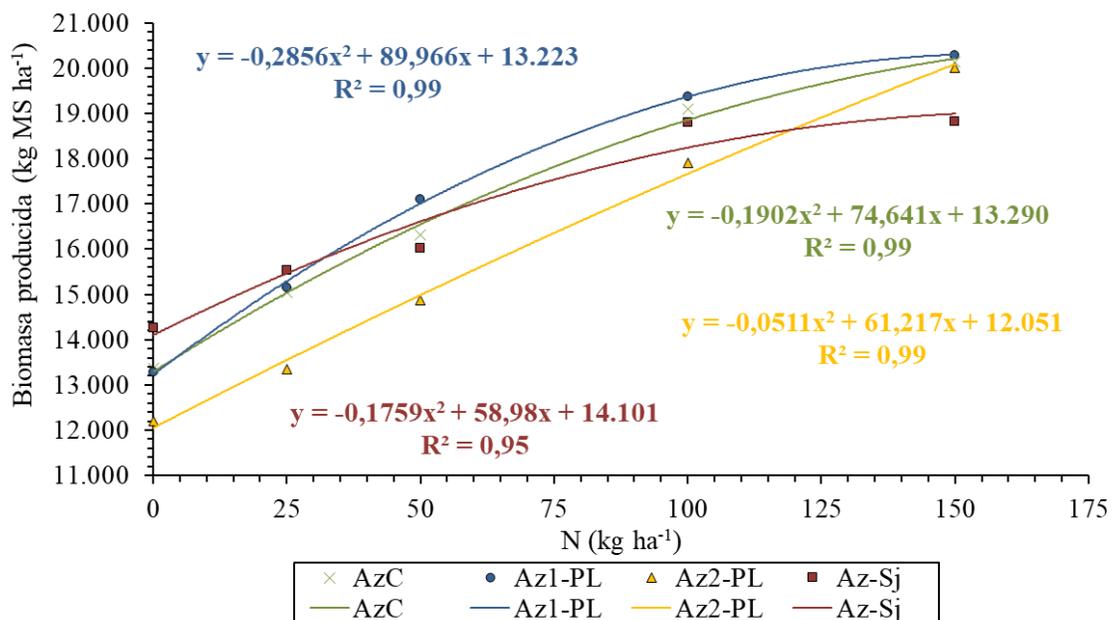
Anexo 11. Efecto de la rotación y la dosis de N sobre la producción de biomasa a floración en el cultivo de arroz



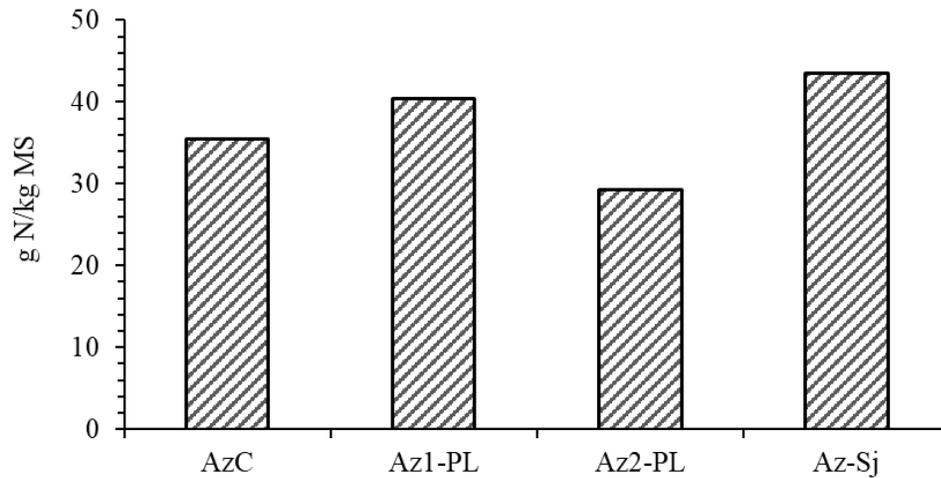
Anexo 12. Efecto de la rotación y la dosis de N sobre la producción de biomasa a mitad del llenado de grano en el cultivo de arroz



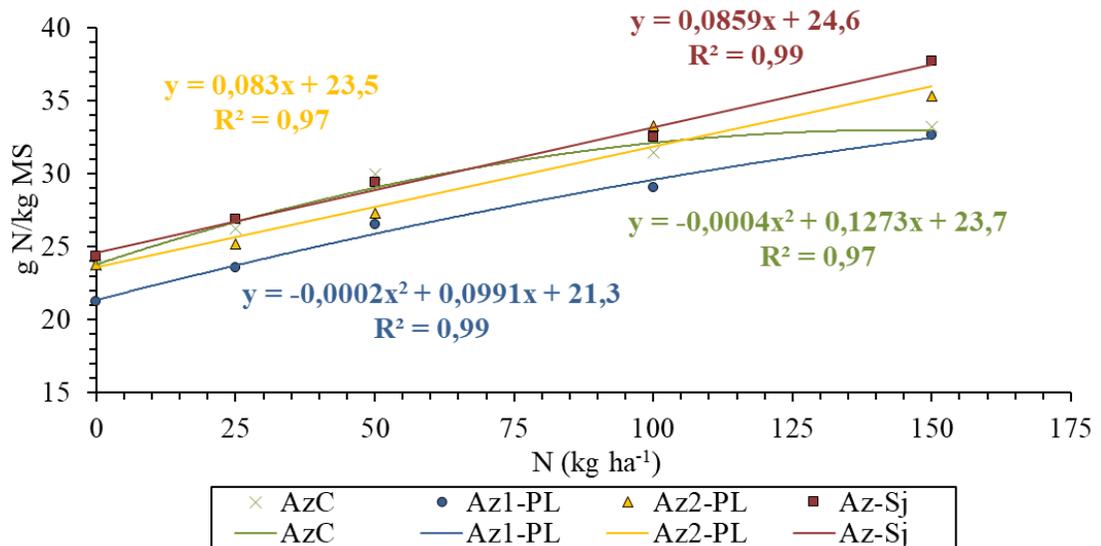
Anexo 13. Efecto de la rotación y la dosis de N sobre la producción de biomasa en el cultivo de arroz a cosecha



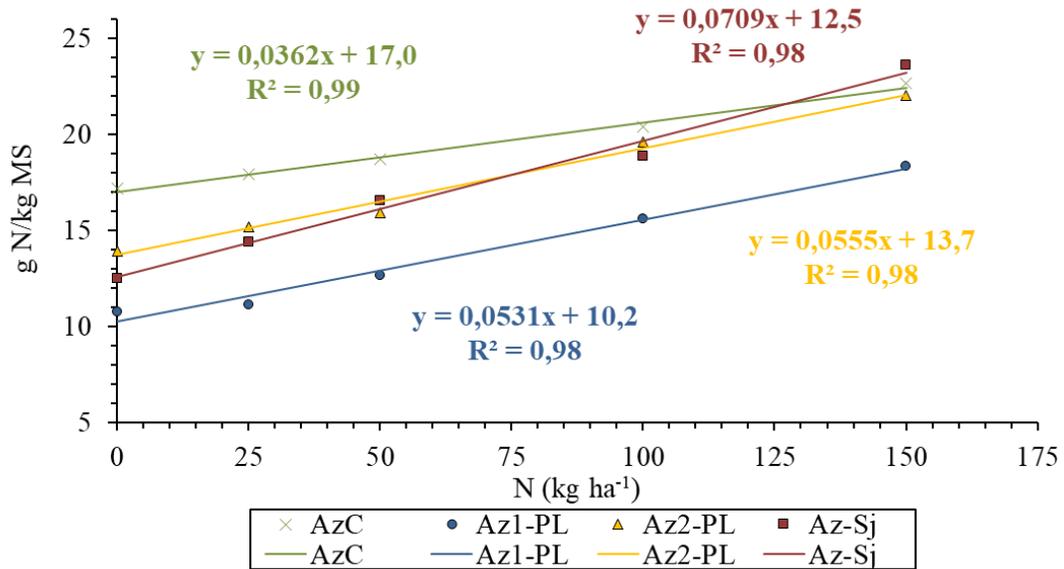
Anexo 14. Efecto de la rotación sobre el contenido de nitrógeno en el cultivo de arroz 15 días luego de la emergencia



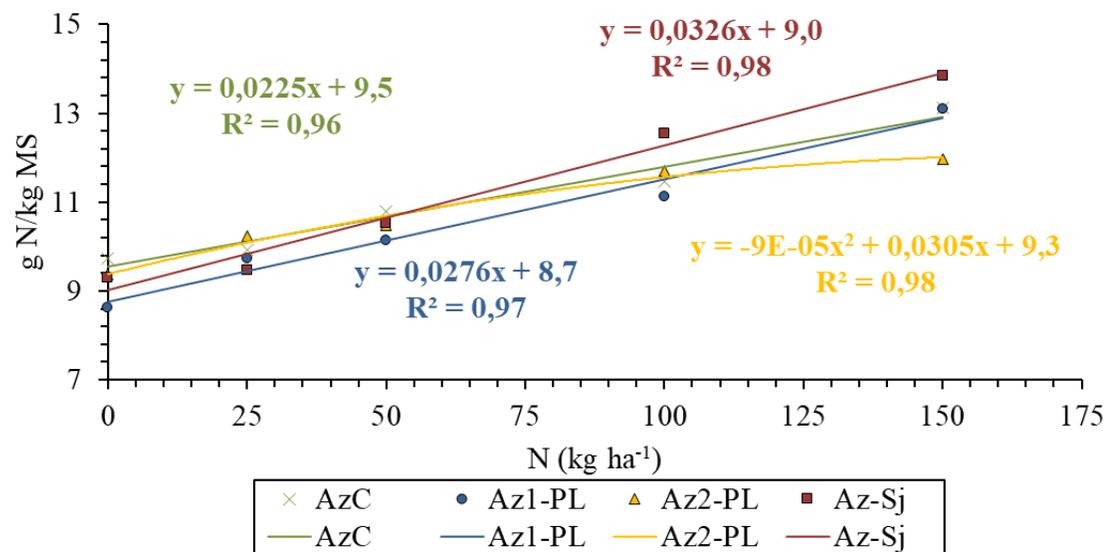
Anexo 15. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre el contenido de N en planta a pleno macollaje en el cultivo de arroz



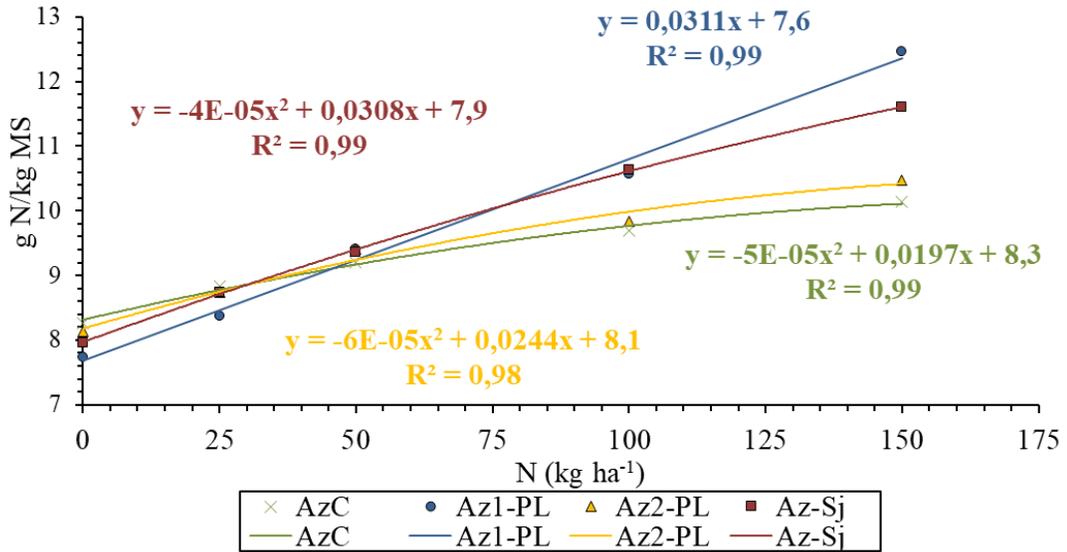
Anexo 16. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre el contenido de N en planta a primordio en el cultivo de arroz



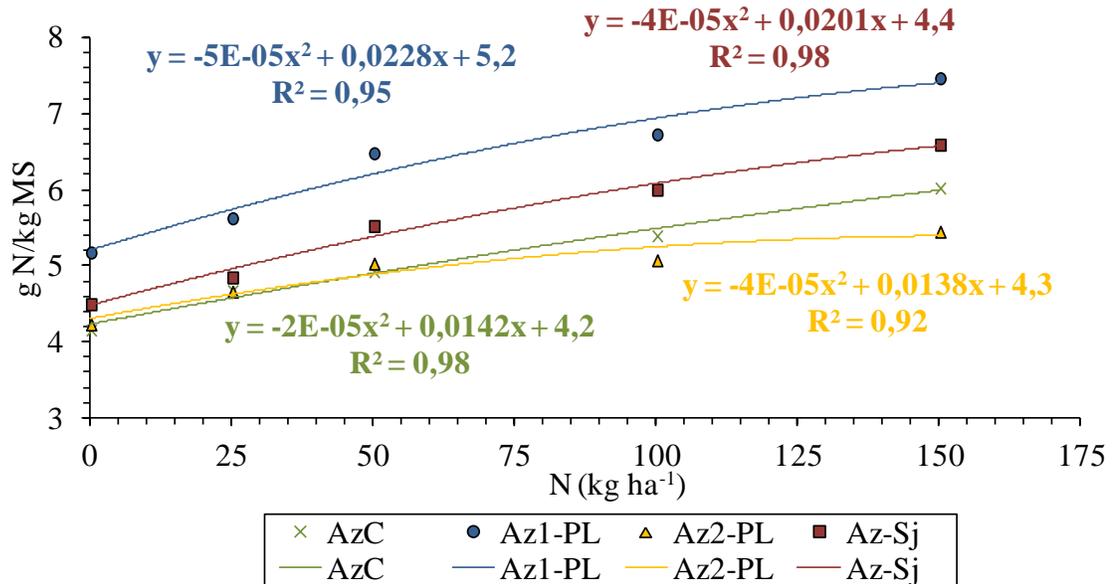
Anexo 17. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre el contenido de N en planta a floración en el cultivo de arroz



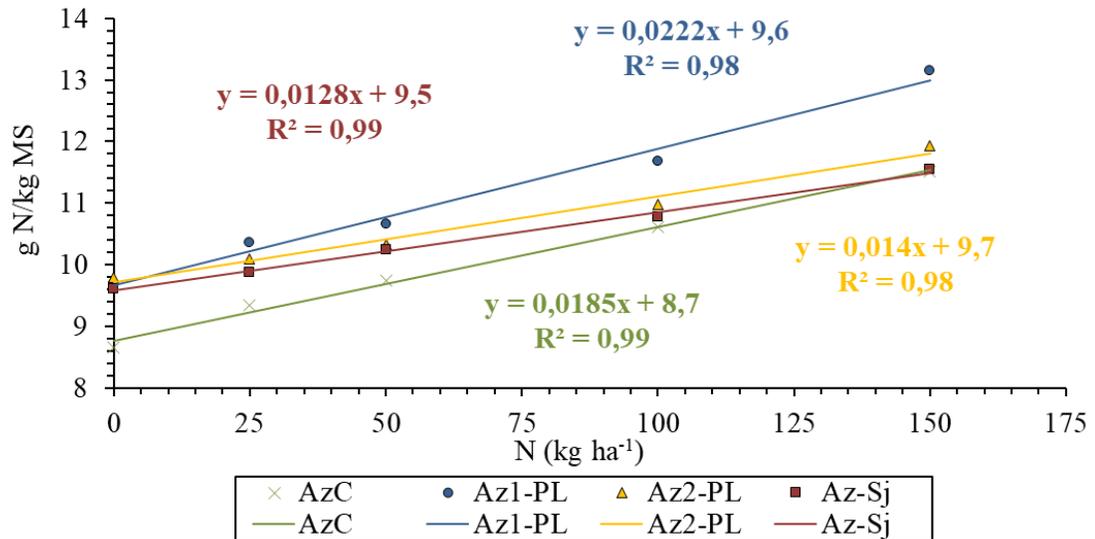
Anexo 18. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre el contenido de N en planta a mitad del llenado de grano en el cultivo de arroz



Anexo 19. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre el contenido de N en paja a cosecha en el cultivo de arroz



Anexo 20. Efecto de la rotación y la dosis de nitrógeno sobre el contenido de N en grano del cultivo de arroz



Anexo 21. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) en el cultivo de arroz sobre la eficiencia agronómica de uso de N en el cultivo de arroz

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg kg <sup>-1</sup> -----				
25	37	41	24	27	32a
50	29	39	26	15	27ab
100	24	26	24	17	22bc
150	18	19	22	9	17c
Media	27A	31A	24A	17A	25
Error estándar (R)	5,50				
Error estándar (D)	2,68				
Error estándar (RxD)	5,36				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

Anexo 22. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) sobre la eficiencia de utilización interna de N en el cultivo de arroz

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg kg <sup>-1</sup> -----				
0	81	71	75	75	76a
25	74	66	72	71	71b
50	69	60	67	65	66c
100	61	53	62	59	59d
150	55	46	56	54	53e
Media	68A	59A	66A	65A	65
Error estándar (R)	2,82				
Error estándar (D)	1,01				
Error estándar (RxD)	2,01				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

Anexo 23. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) sobre la eficiencia fisiológica del uso de N en el cultivo de arroz

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg kg <sup>-1</sup> -----				
25	40	39	35	43	39a
50	37	36	41	26	35a
100	33	30	39	28	32ab
150	28	23	36	20	27b
Media	34A	32A	38A	29A	33
Error estándar (R)	3,85				
Error estándar (D)	2,46				
Error estándar (RxD)	4,93				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

Anexo 24. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) sobre la eficiencia de recuperación aparente de N en el cultivo de arroz

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----%-----				
25	79	90	54	52	69a
50	66	94	55	48	66a
100	63	76	54	52	61a
150	57	70	55	43	56a
Media	66A	83A	55A	49A	63
Error estándar (R)	9,31				
Error estándar (D)	4,51				
Error estándar (RxD)	9,02				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.

Anexo 25. Efecto de la rotación (R) y la dosis de nitrógeno (D) sobre el factor parcial de productividad de N en el cultivo de arroz

Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	AzC	Az1-PL	Az2-PL	Az-Sj	Media
	-----kg kg <sup>-1</sup> -----				
25	359Aa	361Aa	319Ba	370Aa	352a
50	190Ab	199Ab	173Bb	187ABb	187b
100	104Ac	106Ac	98Ac	102Ac	102c
150	71Ad	72Ad	71Ad	67Ad	70d
Media	181A	184A	165B	181A	178
Error estándar (R)	4,32				
Error estándar (D)	2,75				
Error estándar (RxD)	5,50				

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con p=0,05.

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en la misma fila no difieren significativamente con p=0,05.