

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DIFERENTES CRITERIOS DE FERTILIZACIÓN N-P-K EN EL CULTIVO DE
ARROZ Y SU EFECTO EN PARÁMETROS VEGETATIVOS,
PRODUCTIVOS, ECONÓMICOS Y DE EFICIENCIA**

por

**Mathias Agustín LAUZ ARNAL
Constanza TARÁN ALDERETE**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2016**

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Jesús Castillo

Ing. Agr. Guillermo Siri

Ing. Agr. Esteban Hoffman

Fecha:

13 de diciembre de 2016

Autores:

Mathias Agustín Lauz Arnal

Constanza Tarán Alderete

AGRADECIMIENTOS

Al INIA, por permitirnos llevar a cabo nuestro trabajo experimental en la Estación Experimental Paso de la Laguna, donde nos brindaron todos sus materiales e infraestructura para realizar este trabajo.

A todo el personal de INIA, por estar dispuestos a ayudarnos en todo momento, en especial al personal de Suelos y Plantas.

A nuestro tutor, Ing. Agr. Jesús Castillo, por el apoyo brindado y por guiarnos durante todo este trabajo.

A Sully Toledo, del personal de biblioteca de Facultad de Agronomía, por la ayuda ofrecida en todas las consultas y con la mejor disposición.

A Belky Mesones por la ayuda incondicional en cada momento que la necesitamos con la mejor voluntad.

A Oscar Bentancur por el apoyo en el análisis de los datos estadístico.

A Guillermo Siri y Esteban Hoffman como contraparte de Facultad de Agronomía

A nuestros amigos y compañeros por compartir este camino, y en especial a nuestras familias por apoyarnos incondicionalmente a lo largo de toda la carrera.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
 1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	 1
 2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	 3
2. 1 NUTRIENTES EN LA ETAPA AERÓBICA	3
2.1.1 <u>Nitrógeno en suelos de secano</u>	3
2.1.1.1 Mineralización e inmovilización de nitrógeno	3
2.1.1.2 Nitrificación y desnitrificación de nitrógeno	4
2.1.1.3 Volatilización de amoníaco	5
2.1.1.4 Fijación biológica de nitrógeno.....	5
2.1.1.5 Lixiviación	5
2.1.2 <u>Fósforo en suelos de secano</u>	5
2.1.3 <u>Potasio en suelos de secano</u>	7
2.2 NUTRIENTES EN SUELOS ANAERÓBICOS	7
2.2.1 <u>Nitrógeno en suelos inundados</u>	8
2.2.1.1 Mineralización e inmovilización de nitrógeno	9
2.2.1.2 Nitrificación y desnitrificación de nitrógeno	9
2.2.1.3 Volatilización del amoníaco.....	10
2.2.1.4 Adsorción de nitrógeno por las arcillas	11
2.2.1.5 Fijación biológica de nitrógeno.....	11
2.2.1.6 Lixiviación	12
2.2.2 <u>Fósforo en suelos inundados</u>	12
2.2.3 <u>Potasio en suelos inundados</u>	13
2.3 MACRONUTRIENTES EN EL ARROZ.....	13
2.3.1 <u>Nitrógeno en arroz</u>	13
2.3.2 <u>Fósforo en arroz</u>	14
2.3.3 <u>Potasio en arroz</u>	15
2.4 OTROS NUTRIENTES EN EL ARROZ	16
2.4.1 <u>Calcio y magnesio</u>	16
2.4.2 <u>Hierro</u>	16

2.4.3	<u>Zinc y cobre</u>	17
2.4.4	<u>Boro y molibdeno</u>	17
2.4.5	<u>Azufre</u>	17
2.4.6	<u>Silicio</u>	17
2.5	CRITERIOS DE FERTILIZACIÓN DE CULTIVOS	18
2.5.1	<u>Nivel de suficiencia</u>	18
2.5.2	<u>Construir y mantener</u>	19
2.5.2.1	Construir	19
2.5.2.2	Mantener	19
2.6	BALANCE APARENTE DE NUTRIENTES	20
2.6.1	<u>Nutrientes en el sistema</u>	20
2.6.1.1	Entradas	20
2.6.1.2	Salidas	21
2.6.2	<u>Balance aparente como indicador de estatus nutricional del suelo</u>	21
2.7	FERTILIZACIÓN DE ARROZ	22
2.7.1	<u>Antecedentes de investigación de la fertilización de arroz en el Uruguay</u>	22
2.7.2	<u>Fertilización a nivel comercial de arroz en el Uruguay</u>	24
2.7.3	<u>Fertilización a nivel comercial de arroz en otros sistemas productivos</u>	24
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1	LOCALIZACIÓN	28
3.1.1	<u>Suelos</u>	28
3.1.2	<u>Clima</u>	28
3.2	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	30
3.3	MANEJO DEL EXPERIMENTO	33
3.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	33
3.5	DETERMINACIONES Y REGISTROS	34
3.5.1	<u>Análisis de suelo</u>	34
3.5.2	<u>Determinación de población lograda</u>	34
3.5.3	<u>Determinación de materia seca</u>	34
3.5.4	<u>Medidas con SPAD</u>	35
3.5.5	<u>Lecturas con LCC</u>	35
3.5.6	<u>Determinación de índice de área foliar (IAF)</u>	35
3.5.7	<u>Altura de planta</u>	35

3.5.8	<u>Evaluación de enfermedades</u>	36
3.5.9	<u>Materia seca de grano y paja a cosecha</u>	36
3.5.10	<u>Componentes del rendimiento</u>	36
3.5.11	<u>Rendimiento</u>	37
3.5.12	<u>Rendimiento molinero</u>	37
3.5.13	<u>Estimación de la eficiencia de uso del nitrógeno</u>	37
3.5.14	<u>Balance aparente de nutrientes</u>	38
3.5.15	<u>Estimación del margen económico</u>	38
3.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	38
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	39
4.1	PARÁMETROS DETERMINADOS PREVIO A FLORACIÓN	39
4.1.1	<u>Población lograda</u>	39
4.1.2	<u>Acumulación de materia seca</u>	40
4.1.3	<u>Altura de planta</u>	43
4.1.4	<u>ÍAF</u>	45
4.1.5	<u>SPAD y Leaf Color Chart (LCC)</u>	45
4.2	LECTURA DE ENFERMEDADES	47
4.3	RENDIMIENTO EN GRANO	49
4.4	COMPONENTES DEL RENDIMIENTO	53
4.5	CALIDAD MOLINERA	56
4.6	ÍNDICE DE COSECHA	58
4.7	EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO	59
4.8	BALANCE APARENTE DE NUTRIENTES	61
4.9	NUTRIENTES EN SUELO A COSECHA	64
4.10	ANÁLISIS ECONÓMICO	66
4.11	SÍNTESIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	70
6.	<u>RESUMEN</u>	71
7.	<u>SUMMARY</u>	73
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	74
9.	<u>ANEXO</u>	91

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Cantidades agregadas de N, P ₂ O ₅ y K ₂ O a S0, V6 y R0, según los tratamientos evaluados.....	32
2. Agregado de N a R0 según análisis en el tratamiento 5	32
3. Cálculos de ajuste de densidad de siembra	33
4. Análisis de suelo previo a siembra.....	34
5. Población lograda 15 DDS según variedad	39
6. Acumulación de MS (kg ha ⁻¹) en los estadios de V6, R0 y R3, según las variedades y tratamientos de fertilización evaluados.....	41
7. Índice de área foliar (m ² de hoja/m ² de suelo) según efecto de los tratamientos y las variedades	45
8. Valores de LCC y SPAD en los estadios de R0 y R3 según los tratamientos de fertilización y las variedades utilizadas	47
9. IGS para podredumbre de tallo (SO) y manchado de las vainas (ROS) en R3 y cosecha según efecto de los tratamientos de fertilización y las variedades utilizadas	48
10. Número de granos (Gr) llenos por panoja y de granos por m ² según efecto de los tratamientos de fertilización y las variedades	54
11. Peso de mil granos (PMG) según efecto de los tratamientos y de las variedades	54
12. Número de panojas por metro cuadrado en función al efecto de los tratamientos de fertilización y a las variedades	55

13. Parámetros de calidad molinera según efecto de los tratamientos	57
14. Parámetros de calidad molinera según efecto de las variedades	58
15. Índice de cosecha según los efectos de los diferentes tratamientos de fertilización y las variedades.....	59
16. Eficiencia de uso del nitrógeno	61
17. Valores de P en suelo según ácido cítrico en siembra y cosecha y contenido de P en rastrojo (kg ha^{-1})	65
18. Valores de K en suelo según análisis en siembra y cosecha y contenido de K en rastrojo (kg ha^{-1})	66
19. Costo total, ingresos económicos y margen de ganancia sobre costos directos en US\$/ha según tratamiento evaluado	67

Gráfica No.

1. Evolución de la radiación ($\text{cal cm}^{-2}\text{d}^{-1}$) y heliofanía (hs sol día^{-1}), durante la zafra en estudio (2012-13) y en la serie histórica para los meses octubre-marzo.....	29
2. Evolución de la precipitación (mm) y temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) durante la zafra en estudio (2012-13) y en la serie histórica para los meses octubre- marzo.....	29
3. Relación entre N agregado (kg ha^{-1}) y producción de materia seca (kg ha^{-1}) en R3	42
4. Relación entre acumulación de MS a R0 (kg ha^{-1}) y rendimiento en grano (kg ha^{-1})	43
5. Altura de planta (cm) a R3 y cosecha según efecto de los tratamientos de fertilización	44
6. Altura de planta (cm) a R3 y cosecha según variedades utilizadas	44

7. Interacción entre efecto de los tratamientos y las variedades, en las lecturas de podredumbre del tallo (SO) a cosecha	49
8. Rendimiento en grano sano, seco y limpio (kg ha^{-1}) según el efecto de los tratamientos de fertilización	52
9. Rendimiento en grano sano, seco y limpio (kg ha^{-1}) según efecto de las variedades	53
10. Relación entre rendimiento (kg ha^{-1}) y granos m^{2-1} (Gr. m^2-1), rendimiento y peso de mil granos (PMG), granos m^{2-1} y granos panoja $^{-1}$ y granos m^{2-1} y panojas m^{2-1} según el efecto de los tratamientos	56
11. Entradas, salidas y balance aparente de nutrientes para N, P y K (kg ha^{-1}) según los tratamientos de fertilización	62

1. INTRODUCCIÓN

La producción de arroz en Uruguay en los últimos años ha alcanzado un rendimiento promedio de $7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, siendo la superficie sembrada 167 mil ha (MGAP. DIEA, 2009, 2010, 2012, 2014). Este aspecto posiciona al país como uno de los de mayor productividad a nivel mundial, así como uno de los de mejor calidad de grano.

En términos generales, en las últimas décadas la tasa de incremento en rendimiento se ha situado en los $176 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, sustentada principalmente por un ajuste en el manejo del cultivo ya que la base genética no ha experimentado cambios significativos. Este ajuste en el manejo del cultivo está asociado a una fuerte adopción de tecnología, característica que diferencia al sector arrocerero Uruguayo por sobre otros rubros. No obstante, aspectos como el manejo de la fertilización del cultivo han experimentado muy pocos cambios, siendo utilizada en gran parte del área cultivada la propuesta de fertilización definida hace varias décadas atrás la cual estaba basada en la utilización de fósforo (P) y nitrógeno (N).

Este paquete de fertilización, ha generado en varios casos aumentos en el contenido de P en suelo de los sistemas arroceros, debido al agregado de dosis superiores a las exportadas por el cultivo (Méndez et al., 2015). En forma contraria, la falta de cultura en el agregado de K hace que comiencen a constatare zonas donde este nutriente es incluido en el plan de fertilización (Castillo, 2015), si bien las dosis agregadas no siguen ningún criterio objetivo. Algo similar a esto último sucede con el N, donde la información sectorial muestra en los últimos años un leve pero marcado aumento de las dosis utilizadas (Ricetto et al., 2013).

Como contraparte al manejo de la fertilización realizado a nivel comercial mencionado anteriormente, la investigación nacional ha definido criterios objetivos para la fertilización con P (Hernández et al., 2003) y más recientemente para el manejo de las coberturas N durante el cultivo (Castillo et al., 2012b). También existe información orientativa para el manejo del K (Deambrosi et al., 2015), la que es coincidente con la reportada por Dobermann y Fairhurst (2000).

Por otro lado, en países como Brasil, Colombia, EEUU y Australia; lugares donde la producción de arroz es realizada con fines empresariales y no familiares, la investigación ha propuesto un manejo nutricional según criterios objetivos, resultando en casos en una mejora productiva respecto al manejo tradicional (SOSBAI 2005, Russell et al. 2006, Roberts et al. 2012, Castilla y Flórez 2014). De la misma manera, en nuestras condiciones, utilizar en conjunto

los indicadores objetivos desarrollado en nuestras condiciones podría ser de utilidad al momento de definir la estrategia de fertilización.

En función de lo mencionado anteriormente, el objetivo del trabajo es comparar diferentes criterios y cantidades de fertilización N-P-K en el cultivo de arroz, midiendo su efecto en parámetros vegetativos, producción de grano, dinámica de nutrientes e indicadores económicos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El sistema de producción de arroz en Uruguay se desarrolla sobre condiciones de humedad de suelos contrastantes. Desde la siembra hasta inicios de V6 (macollaje, según Counce et al., 2000) se produce en secano, siendo inundado luego de este momento. Esto produce cambios en las propiedades del sistema debido a que ocurren reacciones físicas entre el suelo y el agua. Como consecuencia del anegamiento entran en funcionamiento procesos químicos y biológicos asociados a la falta de O_2 (Patrick y Mahapatra, 1968).

Los cambios de humedad en suelo afectan la dinámica de N, P y K por lo que es importante comprender y evaluar la capacidad de suministro de nutrientes por parte del suelo en las dos situaciones (Patrick et al., 1985).

2.1 NUTRIENTES EN LA ETAPA AERÓBICA

2.1.1 Nitrógeno en suelos de secano

Aproximadamente el 98% del N presente en el suelo se encuentra formando compuestos orgánicos, por lo que dicho nutriente depende del contenido de materia orgánica (MO) en suelo. Es aceptado por la mayoría que las plantas pueden absorber únicamente el N inorgánico que representa un 2% del N total del suelo, encontrándose en formas de nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y nitrito (NO_2^-). Estas formas inorgánicas presentan baja estabilidad en suelo, por lo cual las cantidades de N inorgánico del suelo son variables (Stevenson 1982, Bertsch 1995, Frioni 2006).

2.1.1.1 Mineralización e inmovilización de nitrógeno

Ambos procesos biológicos se dan en forma simultánea, regulando el pasaje de N orgánico a inorgánico y viceversa (Jansson y Persson, 1982).

La mineralización es el proceso mediante el cual los microorganismos del suelo utilizan la MO para obtener energía. Como consecuencia las formas orgánicas de N son convertidas en formas inorgánicas (NO_3^- y NH_4^+) las cuales están disponibles para las plantas. También pueden ser inmovilizadas, en el caso de NH_4^+ puede ser nitrificado, fijado por arcillas o puede ser liberado a la atmósfera como N_2 (Tisdale et al. 1993, Stevenson, citado por Baethgen et al. 1994). La amonificación (pasaje de N orgánico a NH_4^+) es independiente de la concentración de humedad en suelo, ya que es realizada por muchas clases de microorganismos, tanto aeróbicos como anaeróbicos, mientras que la

nitrificación (pasaje a NO_3^-) ocurre en un rango de contenido de agua más estrecho (Campbell, 1978).

La capacidad de un suelo de suministrar N a los cultivos a través de la mineralización de la MO, depende fundamentalmente del tipo de suelo (nivel de MO original, textura, estructura/aireación, etc.), pH, relación C/N del material en descomposición, temperatura y la disponibilidad de agua en el suelo (Stevenson, citado por Baethgen et al., 1994).

Las dos formas de N orgánico propensas a ser mineralizadas son sustancias con un alto grado de estabilidad (MOS o humus). Estas se caracterizan por tener una relación C/N baja y constante y una mineralización lenta, situándose entre 1 y 3% anual. La otra forma son restos orgánicos recientemente incorporados al suelo y en procesos iniciales de descomposición. Estos restos no tienen mecanismos de estabilidad por lo que la tasa de mineralización va a depender de la relación C/N (Stevenson, 1982).

La inmovilización es la transformación de N inorgánico del suelo a N orgánico. Este proceso es llevado a cabo por microorganismos, los cuales absorben N mineral y lo transforman en el N constituyente de sus células y tejidos (Jansson y Persson, 1982).

2.1.1.2 Nitrificación y desnitrificación de nitrógeno

Las transformaciones de las distintas formas de N inorgánico se dan por procesos biológicos como la nitrificación (NH_4^+ a NO_2^- y luego a NO_3^-) y desnitrificación (reducción de NO_2^- y NO_3^- a las formas gaseosas de óxido nitroso N_2O y N_2 , Hauck, 1981).

La desnitrificación es un proceso llevado a cabo por microorganismos anaerobios facultativos que tienen la capacidad de utilizar NO_3^- en vez de O_2 para su respiración, siendo este proceso favorecido en condiciones de anegamiento (Stevenson, 1982). Las pérdidas de N ocasionada por dicho proceso pueden ser importante en los casos en que ocurra: una alta disponibilidad de NO_3^- , una alta disponibilidad de fuente de energía, y una baja concentración de O_2 (Holt et al., 1988).

Los factores que influyen en la nitrificación son: la presencia de O_2 , ya que los microorganismos que llevan a cabo dicho proceso son aeróbicos estrictos, la temperatura, el pH y las concentraciones de NH_4^+ (Stevenson, 1982).

2.1.1.3 Volatilización de amoníaco

Al igual que la desnitrificación, la volatilización es un proceso en el cual el N tiene como destino final la atmosfera. Este proceso comienza cuando el NH_4^+ se transforma en NH_3^+ siendo influido por factores como la temperatura, pH del medio, velocidad del viento, humedad en suelo (suelos que se están secando favorecen a la volatilización) y por el equilibrio entre el NH_4^+ intercambiable y el NH_4^+ disuelto en la solución del suelo (Keeney y Nelson 1982, Fillery y Vlek 1986). A mayores valores de pH mayor va a ser la proporción de NH_4^+ que se encuentre como NH_3^+ (Nelson, 1982).

El aumento en la concentración de NH_3^+ por agregado de NH_4^+ o por aumento de pH, resulta en un aumento en la presión parcial del NH_3^+ del aire. La tasa de pérdida de NH_3^+ de una solución está relacionada con la diferencia de la presión parcial entre el NH_3^+ gas y el NH_3^+ de la solución. Debido a que las concentraciones de NH_3^+ gas son bajas y constantes, la tasa de volatilización está directamente relacionada con la concentración de NH_3^+ en solución. Por lo tanto, las pérdidas por este proceso pueden ocurrir siempre que existan altas concentraciones de NH_3^+ en la superficie del suelo, situación esperable luego de una aplicación de fertilizantes amoniacales (Hauck, 1981).

2.1.1.4 Fijación biológica de nitrógeno

En la fijación de N, ocurre la conversión de N_2 a NH_4^+ por medio de bacterias de vida libre o bacterias formando asociaciones simbióticas con plantas u otros organismos (Stevenson, 1986). Un ejemplo clásico es el de las leguminosas, las que suministran carbohidratos a las bacterias instaladas en los nódulos a cambio de N fijado (N_2), el cual es utilizado por las plantas para la formación de proteínas (Stute y Poener, 1995).

2.1.1.5 Lixiviación

La lixiviación implica una pérdida de NO_3^- del sistema, ya que este nutriente no es retenido por la fracción coloidal del suelo debido a su carga negativa, moviéndose libremente con el agua en el perfil del suelo. La magnitud con la que se pierde dicho nutriente, depende de las características del suelo, prácticas de manejo, humedad, condiciones agroclimáticas y tipo y métodos de uso de fertilizantes nitrogenados (Heathman et al. 1995, Bjorneberg et al. 1996).

2.1.2 Fósforo en suelos de secano

En la dinámica de P intervienen procesos químicos y biológicos, los cuales están en equilibrio con el suelo.

El P en la fase sólida del suelo se encuentra en tres grupos: en solución, en forma inorgánica y orgánica. El P inorgánico se encuentra combinado con aluminio (Al^{3+}), hierro (Fe^{2+}), calcio (Ca^{2+}) y minerales arcillosos; los procesos de retención son la adsorción y precipitación (Kamprath y Watson, 1980). La fracción orgánica se halla en tres fracciones: humus del suelo, restos frescos de cultivos no humificados y deposiciones de origen animal (Stumm y Morgan, 1970).

A través del proceso microbiológico de mineralización, el P orgánico es transformado a formas inorgánicas utilizables por las plantas y el proceso donde el P inorgánico pasa a P orgánico es conocido como inmovilización (Stevenson, 1986). Cuando los sistemas pierden significativamente MO, aumentará el P inorgánico lábil por mineralización. Si hay acumulación de MO, como por ejemplo períodos de pasturas en rotación, existirá una inmovilización de P en esa MO acumulada a expensas de formas inorgánicas asimilables (Morón y Khriel, 1992).

Dentro de la fracción inorgánica, los tipos de compuestos pueden variar según las características del material generador de los suelos y las condiciones de meteorización (Hernández, 1995). También es posible hallarlo en numerosas combinaciones con Fe^{2+} , Al^{3+} , Ca^{2+} (Tisdale et al., 1993) y con minerales arcillosos de tipo 1:1 o 2:1 (Morón y Khriel, 1992). Generalmente el contenido de P en suelo en su conjunto aumenta a medida que el contenido de arcillas de los suelos es mayor (Hernández y Berger, 2003).

El P presente en la solución del suelo se encuentra en diferentes formas iónicas, los cuales varían de acuerdo al pH de la solución. En el medio ácido predomina la forma H_2PO_4^- la cual es de más alta absorción por las plantas, cuando el pH es superior a 7,2 predomina la forma HPO_4^{2-} (Tisdale et al., 1993).

Las plantas absorben el P inorgánico desde la fracción soluble en el suelo, la que a su vez es reabastecida por una fracción lábil de naturaleza orgánica e inorgánica (Tisdale et al., 1993). Esta fracción de P lábil está en equilibrio con fracciones moderadamente lábiles y de muy baja labilidad. Estas son de menor estabilidad química y capaz de ser degradados más rápidamente. Dada la baja concentración de P soluble hay niveles reducidos de fosfatos en suelo por lo que el abastecimiento del nutriente desde la fracción lábil es de extrema importancia para garantizar un adecuado suministro de P a las plantas (Ciampitti, 2009). El tiempo de permanencia en la fracción lábil depende fundamentalmente de la actividad química de los cationes fijadores (Fe^{2+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Morón y Khriel, 1992).

Los procesos de inmovilización, precipitación y adsorción no son considerados como pérdidas de P, ya que si bien afectan la disponibilidad del nutriente al cultivo, este se mantiene en el sistema (Tisdale et al., 1993).

2.1.3 Potasio en suelos de secano

Desde el punto de vista de su asimilabilidad para las plantas, el K en los suelos se ha clasificado en cuatro categorías: mineral (estructural), no intercambiable (fijado o lentamente asimilable), intercambiable y en solución. Existe un equilibrio entre las diferentes formas de K en el suelo, las cuales están en equilibrio entre sí (Melo et al., 2000).

Las formas no asimilables constituyen entre el 90 y el 98% del K total del suelo; las formas lentamente asimilables, entre 1 y 10%, y las formas rápidamente asimilables (K intercambiable y K en solución), de 0,1 a 2%. La transferencia de las formas minerales hacia las otras formas, es extremadamente lenta en la mayoría de los suelos por lo que se las considera no asimilables para las plantas (Mielniczuk 1982, Stevenson 1986).

La reserva de K intercambiable y no intercambiable depende fundamentalmente de la cantidad y calidad de las arcillas presentes en el suelo. La fuerza de retención varía con el tipo de arcilla y la posición del ión en la misma (Conti, 2000). Las formas de K no intercambiable y en minerales, constituyen varios minerales y existen básicamente dos grupos: minerales primarios (feldespatos y micas) y minerales secundarios (arcillas de la familia de la illita, Castilhos et al., 2002).

Los factores de suelo que afectan la disponibilidad de K para las plantas son: cantidad y tipo de arcilla, complejo intercambio catiónico (CIC), K intercambiable, profundidad del suelo, aeración, humedad, temperatura, pH, tipo de laboreo y otros nutrientes (Melo et al., 2000). Los vegetales obtienen el K del suelo proveniente de la meteorización de los minerales, de la mineralización de los residuos orgánicos y del fertilizante (Conti, 2000).

2.2 NUTRIENTES EN SUELOS ANAERÓBICOS

La inundación del suelo tiene un marcado efecto en el comportamiento de varios nutrientes importantes, y como consecuencia en el crecimiento y rendimiento de los cultivos sembrados en él (Wells et al., 1993).

El agua reemplaza al aire en los espacios porosos, y el nivel de O₂ comienza a descender tendiendo a cero en no más de 24 a 48 hs (De Datta,

1981). La inundación estimula la actividad de la microflora la que rápidamente descompone el sustrato oxidable disponible, creando una alta demanda de O_2 . Como producto de la respiración microbiana, la desaparición de O_2 es acompañada por la liberación de otros gases: dióxido de carbono (CO_2), N_2 o N_2O , metano (CH_4^+) e hidrógeno (H_2^+) (Patrick et al., 1985).

Por otro lado, el agregado de grandes cantidades de agua hace que el pH del suelo tienda a la neutralidad, descienda el potencial redox, ocurriendo cambios en el sistema de oxidación-reducción (Ponnamperuma, 1972, 1981, 1985).

Los organismos aeróbicos se vuelven latentes o mueren y entran en acción bacterias anaeróbicas obligadas o facultativas, produciéndose la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos. La descomposición de la MO en suelos anegados es lenta, ineficiente y menos completa que en un ambiente aerobio (De Datta, 1981).

Otra característica de los suelos anaeróbicos, es su mayor capacidad de acumular MO si se compara con suelos aeróbicos. Esto se debe a que la tasa de producción de la MO supera a la tasa de descomposición (Gorham, citado por Sahrawat, 2005). La MO en este tipo de suelo está relacionada con el régimen de humedad y el tipo de drenaje. Trabajos conducidos en Filipinas encontraron que a mayor intensidad de cultivo de arroz, mayor contenido de C orgánico y N total en suelo. Ensayos conducidos durante 15 años de arroz irrigado consecutivos demostraron que la MO aumentó 5 a 10% respecto a la situación original (Sahrawat, 2005).

2.2.1 Nitrógeno en suelos inundados

En los sistemas de producción de arroz, la inundación genera cuatro zonas las que influyen en la dinámica del nutriente. La primera corresponde a una lámina de agua superficial con flora viviente la cual contribuye a la fijación biológica del N_2 . En segundo lugar encontramos una capa oxidada de pocos mm de espesor que se localiza inmediatamente por debajo de la lámina de agua, estando en tercer lugar una capa gruesa de suelo reducido. Por último, existe una delgada capa oxidada en la zona rizosférica (Narteh y Sahrawat, 2000).

Según varios autores (De Datta 1981, Savant y De Datta 1982, Patrick 1982, Patrick et al. 1985, Keeney y Sahrawat 1986, Mikkelsen 1987, Mosier et al. 2004) los principales procesos asociados a las transformaciones de N en suelos sumergidos son mineralización, inmovilización, nitrificación, desnitrificación, volatilización de amoníaco y fijación biológica de N_2 .

2.2.1.1 Mineralización e inmovilización de nitrógeno

La mineralización es la conversión del N orgánico del suelo a NH_4^+ . En los sistemas arroceros esto ocurre por la ausencia de O_2 , inhibiéndose el proceso de nitrificación, dando como resultado una descomposición anaeróbica de MO. El proceso de descomposición anaeróbica involucra a diferentes microorganismos anaeróbicos y productos finales como CO_2 , CH_4^+ , ácidos orgánicos, NH_4^+ , H_2^+ (Ponnamperuma 1972, Mikkelsen 1987).

El NH_4^+ formado por mineralización de la MO puede quedar disponible para el intercambio catiónico (CIC), adsorción química por sustancias húmicas, fijación en arcillas e inmovilización por microorganismos (Stevenson, 1994).

La velocidad e intensidad de la tasa de mineralización está influenciada por la naturaleza y cantidad de MO, período de inundación, adición de fertilizantes y tipo de labranza y la temperatura entre otros (Stevenson 1994, Paul 1996). Alexander (1980), encontró que la tasa de mineralización en suelos secos son bajas si se compara con suelos húmedos. La cantidad de N inorgánico acumulado en suelo aumentó de 15 a 80 mg kg^{-1} , cuando el contenido de agua pasó de 10 a 30% en un período de sólo dos semanas.

2.2.1.2 Nitrificación y desnitrificación de nitrógeno

La desnitrificación es un proceso de respiración microbiana en el cual el NH_4^+ formado por la mineralización se transporta a las zonas aeróbicas donde ocurre una oxidación biológica. Como producto de esa oxidación se generan NO_3^- y NO_2^- los que difunden a la zona anaeróbica convirtiéndose en N_2 o N_2O para luego perderse a la atmosfera por desnitrificación (Nicholas, citado por Ponnamperuma 1972, Knowles 1982, De Battista 2006).

Los microorganismos que intervienen en el proceso de la desnitrificación son un gran número de bacterias y hongos incluyendo especies heterótrofas y autótrofas (Painter, 1971). Ponnamperuma (1972) menciona que las frecuentes fluctuaciones de humedad en suelo crean condiciones ideales para que este proceso ocurra, ya que existe alternancia de ambientes aeróbicos que favorecen la nitrificación y anaeróbicos los cuales favorecen la desnitrificación.

En suelos cultivados la desnitrificación es indeseable, ya que significa una pérdida de N, por ende el mismo no estará disponible para el cultivo (Ponnamperuma, 1972). Este proceso es uno de los que explican la baja eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados en el cultivo de arroz (De Datta et al., 1987). Trabajos realizados por Mosier et al. (1990) utilizando

^{15}N como trazador, confirmaron que por este proceso se pierde el 10% del total de la urea aplicada. Estos mismos autores encontraron que mayores pérdidas de N agregado fueron ocasionadas por el proceso de volatilización de NH_3^+ .

La nitrificación en suelos inundados es un proceso estricto aeróbico microbiano, que ocurre en la capa superficial oxidada donde el NH_4^+ se transforma en NO_3^- (Dobermann y Fairhurst, 2000).

Considerando lo expuesto anteriormente es que se han generado tecnologías que minimizan las potenciales pérdidas de N. Algunas de estas son: localizar más eficazmente los fertilizantes nitrogenados en la zona anaeróbica o con un inhibidor de la nitrificación y de liberación controlada (De Datta y Buresh, citados por Buresh et al., 2008).

2.2.1.3 Volatilización de amoníaco

Como se mencionó anteriormente este es un proceso de pérdida de N donde el NH_4^+ en el agua de inundación pasa a la atmósfera como NH_3^+ .

De los varios factores que afectan a la volatilización, el pH del sistema suelo-agua ha sido reconocido como el factor determinante más importante ya que con un pH inferior a 7 predominan iones NH_4^+ , mientras que con un pH superior a 8,5 existe predominancia de NH_3^+ libre (Humphreys et al., 1988). A medida que aumenta el pH (mayor a 8,5) aumentan las pérdidas por volatilización, siendo éste un proceso rápido pudiendo durar de seis a diez días después de la aplicación de N (Christianson et al., 1995). Mayores pérdidas de NH_3^+ fueron causadas por urea en comparación con otras fuentes de NH_4^+ , ya que la hidrólisis de la urea proporciona alcalinidad que puede mantener o iniciar el proceso de pérdida (Keeney y Sahrawat, 1986).

Este proceso ocasiona pérdidas entre el 60 y 80% del N aplicado, comenzando entre los primeros 2 a 5 días después de la aplicación de urea (De Datta, 1981). Las pérdidas se estimaron en 27-56% del N agregado en estado vegetativo y en estado reproductivo 10-15% del N agregado (Buresh et al., 2008).

Debido a esto, son varios los trabajos a nivel internacional que realizan una serie de propuestas para disminuir las pérdidas y aumentar la eficiencia de éste nutriente. Entre otras son mencionadas, la colocación profunda del fertilizante en suelo (Youngdahl et al., 1986), incorporación de N en seco con posterior inundación (Frenay y Denmead, 1992) y manejar dosis de N en función a los requerimientos del cultivo (Diekmann et al., 1993).

En el primer caso, la aplicación en profundidad minimizaría la exposición al fertilizante a los factores que desencadenan estos procesos de pérdida. Similar a esto, la aplicación en secano y posterior inundación hace que exista una rápida hidrólisis de la urea, quedando el NH_4^+ resultante fijado a los coloides del suelo. Por último, la adición de N en función a los requerimientos del cultivo, minimizaría las potenciales pérdidas por el agregado en exceso de este nutriente. En tal sentido, en ocasiones donde se duplicó el agregado de N de 30 a 60 kg N ha^{-1} , la pérdida total de N aumentó en un rango de 37 hasta 54% (Diekmann et al., 1993).

Según Peoples et al. (1995), una forma eficiente para maximizar la absorción de la planta y minimizar las pérdidas es sincronizar el suministro de N con la demanda del cultivo.

2.2.1.4 Adsorción de nitrógeno por las arcillas

La acumulación de NH_4^+ y las condiciones anaeróbicas siguientes a la inundación del suelo, son favorables para la fijación temporal de este nutriente, principalmente en aquellos suelos con grandes concentraciones de arcilla tipo 2:1. Esto podría proteger al N de las pérdidas, al tiempo que permite una liberación oportuna del nutriente a las plantas (Scherer y Zhang, citados por Buresh et al., 2008). Una porción del NH_4^+ aplicado podría ser fijado entre las capas expandibles de los minerales arcillosos silicatos y se vuelven no disponibles para las plantas (Williams, 2010). Estudios realizados por Keeney y Sahrawat (1986) determinaron que la fijación de NH_4^+ en suelos inundados se correlacionó significativamente con la cantidad de Fe^{2+} activo.

2.2.1.5 Fijación biológica de nitrógeno

Suelos sumergidos son entornos favorables para la fijación biológica debido al agotamiento de O_2 y presencia de C como fuente de energía (Buresh et al., 2008).

En sistemas centenarios de producción de arroz, la entrada de N por fijación biológica ha ayudado al cultivo a obtener productividades bajas (2-3 Mg ha^{-1}) pero estables, con bajos niveles de N agregado o sin agregado de éste (Vaishampayan et al. 2001, Ladha y Reddy 2003). Las bacterias aeróbicas pueden prosperar en la capa superficial oxigenada y en la rizósfera. La parte anaeróbica del suelo sería un medio ideal para fijadores de N anaeróbicos como *Clostridium*, especialmente si la MO está presente (Ponnamperuma, 1972).

Por lo mencionado anteriormente, en Uruguay se especuló con la posibilidad de contar con estos microorganismos en la producción de arroz, ya que se lograban altas productividades con bajo agregado de N (Deambrosi et al., 2009).

No obstante trabajos posteriores (Castillo et al., 2011) sugieren que esta fuente es de poca contribución de N en forma directa, a juzgar por la señal isotópica $\delta^{15}\text{N}$ encontrada en el cultivo.

2.2.1.6 Lixiviación

Estudios realizados por Humphreys et al. (1987), Williams (2010) comprobaron que la pérdida de N por lixiviación no es de relevancia en los suelos arroceros ya que el NH_4^+ se une estrechamente a los sitios de intercambio catiónico y a la MO, por lo que dicho nutriente se mueve muy poco en la solución del suelo.

Por el contrario, Patrick y Mahapatra, citados por De Datta (1981) establecen que las pérdidas de NH_4^+ por percolación son más severas en suelos inundados que en suelos de secano, ya que el constante contacto con el agua de riego resulta en la reducción de iones hierro (Fe^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) los cuales desplazan el NH_4^+ de las posiciones de intercambio hacia la solución del suelo, donde está más expuesto a ser lavado.

La pérdida máxima de N por lixiviación se da en suelos con baja CIC y altas tasas de percolación. El encharcamiento de un suelo y su compactación deben reducir en gran medida la tasa de movimiento del agua y por lo tanto la lixiviación (Keeney y Sahrawat 1986, Kundu y Ladha 1999). En sistemas productivos como los de Uruguay, donde el cultivo se desarrolla sobre suelos con un horizonte Bt muy desarrollado, este tipo de pérdidas son consideradas despreciables (Irisarri et al., 2008).

2.2.2 Fósforo en suelos inundados

La disponibilidad de P es mayor en los suelos inundados que en secano, debido a la reducción de fosfato férrico a forma ferrosa más soluble y la hidrólisis de fosfatos. Esto puede ser más pronunciado en suelos ácidos donde el P se inmoviliza por óxidos de Fe^{2+} y Al^{3+} . Del mismo modo, el nivel de P en suelos alcalinos inundados, mejora debido a la liberación de P retenido por Ca^{2+} y carbonato de calcio (CaCO_3 , Fageria et al., 2011).

Otras causas que explican el aumento de la concentración de P en suelos inundados, es la liberación de P por la MO, por desplazamiento de los

iones fosfatos de los compuestos de Fe^{2+} y Al^{3+} y por aniones orgánicos (Williams, 2010).

La respuesta a la aplicación de fertilizantes fosfatados en suelos inundados no es tan marcada si lo comparamos a suelos de secano, salvo que las concentraciones de este elemento sean muy bajas (Williams, 2010).

2.2.3 Potasio en suelos inundados

La influencia de los suelos anegados en la química de este nutriente, es menor que la del P y N (Fageria et al., 2011). La liberación de una proporción de iones de Fe^{2+} , Mg^{2+} y la producción de iones de NH_4^+ , resulta en un desplazamiento de algunos iones de K que se encontraban en CIC, a la solución del suelo. Esto da como resultado una mayor disponibilidad de K en condiciones de anegamiento (Machado 1985, Williams 2010).

Dicho nutriente se mueve hacia las raíces de las plantas vía flujo de masa y otro tanto se desplaza por gradiente de difusión. Estos procesos son afectados por el contenido de agua, la temperatura y las características físicas del suelo (Aguado et al., 2002). Con respecto al contenido de agua del suelo, éste es necesario para el movimiento de difusión del K a la raíz. La sequía y los anegamientos reducen la absorción de este nutriente por la plantas. Según Troeh y Thompson (2005), la difusión constituye el mecanismo principal de acceso al K para las plantas (80 a 95 %).

2.3 MACRONUTRIENTES EN EL ARROZ

2.3.1 Nitrógeno en arroz

Los suelos inundados se caracterizan por poseer una concentración alta de NH_4^+ y baja de NO_3^- . Esto se considera benéfico, ya que el cultivo de arroz utiliza mejor el NH_4^+ y los excesos de este nutriente no son tóxicos para él (Ponnamperuma, 1972).

El N se considera el elemento nutritivo que repercute en forma más directa a la producción de arroz, afectando el rendimiento y sus componentes. Es constituyente esencial de aminoácidos, ácidos nucleicos y clorofila (De Battista, 2006). Según Dobermann y Fairhurst (2000) el N promueve el rápido crecimiento, incremento en el tamaño de planta, número de macollos y aumenta el tamaño de las hojas, incrementándose la fotosíntesis por unidad de área. Por otro lado Williams (2010) encontró que el N promueve el incremento de la altura, el número de tallos, granos por panoja y la concentración de proteínas en grano.

Los componentes de rendimiento tales como peso de mil granos y panoja por metro cuadrado se ven incrementados con la presencia de N. Según Dobermann y Fairhurst (2000), la relación entre N aplicado y el tamaño de la panoja es lineal. Por otro lado, Yoshida (1981) establece que el incremento del rendimiento se debe fundamentalmente al aumento en números de granos por superficie, ya que el peso de mil granos es poco afectado por el agregado de N.

Según Gamarra, citado por Méndez y Deambrosi (2009) para lograr altos rendimientos, los cultivos requieren del nutriente en todo su ciclo, pero las mayores demandas del mismo comienzan de V6 extendiéndose hasta R3 (inicio de floración, según Counce et al., 2000). Williams (2010) demostró que el N se absorbe rápidamente durante la etapa vegetativa y más lentamente cuando la planta florece y madura. Luego de ser absorbido, éste es almacenado en la lámina y vaina de las hojas hasta la etapa de floración, momento en el cual se transloca el 70-90 % del N almacenado en la planta a la formación de grano. El restante 10-30% se absorbe luego de la floración (Mae, 1997). Las plantas absorben entre un 50-80% del N requerido del suelo, considerándose el resto de lo absorbido como aporte del fertilizante (Sharma y De Datta, 1985).

La importancia de este nutriente en términos absolutos es mencionada por Deambrosi y Méndez (2007), quienes sostienen que para obtener rendimientos de arroz de 7 Mg ha^{-1} (menores a los conseguidos en la actualidad) los cultivos deben absorber 170 kg N ha^{-1} aproximadamente.

Tejeda et al. (1980) al revisar varios trabajos sobre nuevas formas de fuentes inorgánicas de N, uso de variedades modernas y nuevos métodos de aplicación, encontraron que el incremento en rendimiento puede llegar a $41 \text{ kg de arroz kg de N aplicado}$. Estos valores son similares a los reportados por el IPNI (2013), estableciéndose que para producir 1 Mg de arroz son necesarios 22 kg N . Datos locales aportados por De León et al. (1994) reportan que existió una respuesta de $20 \text{ kg de arroz por kg N aplicado}$. Según Chebataroff (1998) no sería esperable encontrar respuesta en rendimiento al agregado de N en aquellas situaciones donde el contenido de MO en suelo sea mayor a 3%.

2.3.2 Fósforo en arroz

El P juega un rol importante en el crecimiento y desarrollo de los cereales. Dicho nutriente es móvil dentro de la planta pero poco móvil en el suelo, siendo un elemento esencial que forma parte de los nucleótidos, fosfolípidos y de adenosintrifosfato (ATP), responsable del almacenaje y transferencia de energía. Su deficiencia en la planta de arroz produce disminución del macollaje y del crecimiento radicular, retraso en la floración y

disminución del porcentaje de granos llenos, sobre todo si ocurren bajas temperaturas en el llenado de grano (Doberman y Fairhurst, 2000). Las plantas absorben el P de la solución del suelo en forma de ortofosfatos HPO_4^{2-} o H_2PO_4^- (Williams, 2010).

Boschetti et al., citados por De Battista (2006) publican que hay una evidente falta de relación entre el P disponible y la respuesta a la fertilización en el arroz. Esto podría explicarse por la dinámica del nutriente en los suelos arroceros donde ciclos de inundación hacen variar su disponibilidad, por la liberación y el secado posterior que determina una fijación, lo que hace difícil un correcto ajuste de calibración para recomendaciones de fertilización.

Datos aportados por Doberman y Fairhurst (2000) establecen que el contenido óptimo de P en hoja es de 0,20 a 0,30% y el nivel crítico para deficiencia 0,10 a 0,18% en V6 y R3 respectivamente. Según García, citado por De Battista (2006) los requerimientos nutricionales de este nutriente para el cultivo de arroz son de 3 kg P Mg^{-1} de grano.

Información nacional (De León et al., 1994), muestra un valor crítico de 0,26% de P en hojas en V6, con un rango de 0,18 a 0,29%. Estos autores también encontraron que el arroz absorbe 3 kg de P Mg^{-1} de granos y se estima que 1 kg de P Mg^{-1} vuelve al suelo con la paja. En trabajos realizados por Hernández y Berger (2003) concluyeron que el mejor método para determinar la disponibilidad de P para el cultivo fue a nivel de suelo, por extractante ácido cítrico. Según estos autores, éste presenta mejores valores de calibración si lo comparamos con otros métodos, siendo el nivel crítico 7 mg P kg^{-1} de suelo.

2.3.3 Potasio en arroz

El K es tomado por las plantas de arroz en grandes cantidades, es esencial para la activación de algunas enzimas y procesos fisiológicos como la apertura y el cierre de estomas, favorece el macollaje, incrementa el tamaño y peso del grano, la resistencia al vuelco, ayuda a conferir resistencia a enfermedades, proporciona vigor a las plantas, resistencia a temperaturas bajas y evita la senescencia temprana de hojas (Williams, 2010). También participa en la división celular y fotosíntesis, dirige la síntesis de proteínas y almidones, interviene en los mecanismos de turgencia y plasmólisis, estimula la absorción y reducción de los NO_3^- (De Datta, 1981).

Cerca del 50% del K se absorbe hasta R0 (Primordio, según Counce et al., 2000) y el 75% en la etapa de desarrollo de la hoja bandera. Aproximadamente un 25% del K en la planta es traslocado para el desarrollo del grano, y el restante a las hojas y tallos. La mayor parte del K absorbido se sitúa

en la paja por lo que una vez cosechado el cultivo dicho nutriente va a ser incorporado al suelo rápidamente (Williams y Smith, 2001). Esto está explicado porque el K no está vinculado a compuestos orgánicos dentro de la planta (Williams, 2010). Sachet (2011) sugiere que 41 días luego de madurez fisiológica, un 80 % del K es devuelto al suelo, contribuyendo en forma importante al reciclaje de dicho nutriente.

Deambrosi et al. (2015), utilizando como base información nacional recabada en diferentes años y utilizando diferentes variedades, estimaron el nivel crítico de K para arroz entorno a los $0,2 \text{ meq } 100 \text{ gr suelo}^{-1}$. Dobermann y Fairshurst (2000) sugieren utilizar como indicador el porcentaje de saturación de K en la CIC. Si el porcentaje de saturación es menor a 1,5 es esperable una respuesta al agregado de K.

2.4 OTROS NUTRIENTES EN EL ARROZ

2.4.1 Calcio y magnesio

Las deficiencias de Ca^{2+} y Mg^{2+} son poco comunes en suelos arroceros y los cambios en las concentraciones son mínimos. Sólo una pequeña cantidad de estos elementos se exportan al grano y a menos que el rastrojo sea retirado del campo, la extracción total de dichos nutrientes es pequeña. Esta no supera 1 kg de Ca^{2+} y $8,8 \text{ kg de Mg}^{+2}$ aún con rendimientos de 10 Mg ha^{-1} (Fageria et al. 2011, IPNI 2013).

2.4.2 Hierro

Williams (2010) determinó que la inundación incrementa la concentración de Fe^{2+} soluble, particularmente en suelos ácidos ya que luego de la inundación los hidratos de óxido Fe^{3+} se reducen a compuestos de Fe^{2+} . El proceso de inundación hace que la reducción del Fe^{2+} tenga consecuencias químicas importantes, aumenta el pH, los cationes son desplazados de los sitios de intercambio y aumenta la solubilidad de P y sílice (Si^{4+}) (Ponnamperuma, 1972).

Fageria et al. (2011) indican que si la concentración de Fe^{2+} es mayor a 300 mg kg^{-1} en suelo pueden ser tóxicas para las plantas bajo ciertas condiciones. La toxicidad de metales en las plantas pueden expresarse de dos maneras. Una es cuando se absorbe metales en mayores cantidades y se convierte en letal para las células vegetales, definiéndose esto como toxicidad directa. Otra toxicidad de metales está asociada con la inhibición de la captación y utilización de nutrientes esenciales por las plantas, siendo esto conocido como toxicidad de metales indirecta.

2.4.3 Zinc y cobre

Las concentraciones de zinc (Zn^{2+}) y cobre (Cu^+) generalmente disminuyen tras la inundación en los suelos de arroz. La disminución de la concentración puede estar asociada con el aumento en el pH del suelo y posiblemente por la formación de complejos insolubles (Fageria et al., 2011). La disponibilidad de Zn^{2+} decrece con la inundación por precipitación de hidratos $\text{Zn}(\text{OH}_2)^{2+}$ o carbonatos (ZnCO_3^{2+}) o fijado por el azufre (ZnS). Con respecto a la respuesta por agregado de Zn^{2+} , es esperable encontrarla en casos típicos como lo son los suelos de blanqueales o en aquellas situaciones con exceso de Ca^{2+} activo en el suelo, los que hacen reducir la disponibilidad de Zn^{2+} para las plantas (Quintero et al., 2006).

2.4.4 Boro y molibdeno

Poco se sabe sobre el comportamiento de boro (B^{3+}) y molibdeno (Mo) en los suelos sumergidos. La concentración de B^{3+} parece permanecer más o menos constante después de la inundación. Con respecto al Mo la concentración aumenta luego de la sumersión posiblemente debido al aumento del pH (Fageria et al., 2011).

2.4.5 Azufre

En suelos inundados, el ion SO_4^{2-} se reduce a sulfuro de hidrógeno por actividad microbiana anaerobia (Fageria et al., 2011). Según Ponnampetuma (1972) la reducción de sulfato es provocada por un pequeño grupo de bacterias anaeróbicas obligadas, que utilizan SO_4^{2-} como receptor terminal de electrones en la respiración. Estas bacterias toleran altas concentraciones de NaCl, H, S, y funcionan mejor en un rango de pH 5,5-9.

En suelos inundados, según Fageria et al. (2011) acontece la reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} , la cual precede a la reducción de SO_4^{2-} . El Fe siempre estará presente en la solución una vez que se produce H_2S . De modo que el H_2S se convertirá a sulfuro de hierro insoluble (FeS). Esta reacción protege a los microorganismos y plantas superiores de los efectos tóxicos de H_2S (Patrick y Reddy, 1978). En general, la disponibilidad de S se reduce en suelos inundados debido a la formación de FeS insolubles.

2.4.6 Silicio

Williams (2010) encontró que la acción del agua en el mineral ácido silicato da como resultado una lenta solubilización a varias formas de ácido silícico las cuales van a ser absorbidas por las plantas de arroz.

La cantidad de SiO_2 en la solución del suelo se incrementa con la inundación. Este incremento se debe probablemente a la liberación de silicios de oxihidróxidos de Fe^{2+} y Al^{3+} , así como el efecto del aumento del pH resultante de la inmersión. La descomposición de la paja de arroz con su alto contenido de sílice también puede contribuir al mayor contenido de SiO_2 en la solución del suelo (Yoshida, 1981). Sin embargo, Ponnampetuma (1972) encontró que las concentraciones de SiO_2 en la solución de los suelos sumergidos aumentan poco después de la inundación y luego disminuye gradualmente.

2.5 CRITERIOS DE FERTILIZACIÓN DE CULTIVOS

La búsqueda de aumentos en los rendimientos considerando la eficiencia de uso de los insumos y los aspectos ambiente, ha influido en la investigación de nutrición de cultivos, dando como resultado diferentes enfoques de fertilización. Algunos de ellos hacen una mirada de largo plazo, mientras que otras hacen foco en lo más inmediato. Las primeras fertilizan al suelo en el entendido de construir un nivel nutricional que se mantenga en el tiempo, y en el otro caso se mide los requerimientos de un cultivo en un momento en particular. En tal sentido, algunas filosofías hacen foco en fertilizar el suelo, mientras que otras lo hacen fertilizando al cultivo.

2.5.1 Nivel de suficiencia

Este enfoque establece que hay un nivel de nutriente en suelo por debajo del cual hay una alta probabilidad de respuesta a la fertilización. Este nivel se denomina nivel crítico y es particular para cada nutriente y cada cultivo (Mallarino, 2005). Esta estrategia de fertilización se basa en aplicar la menor cantidad de nutriente sin desmedro del rendimiento potencial, y es utilizado generalmente para nutrientes inmóviles o muy poco móviles en suelo como lo son el P y K. El nivel de suficiencia, a diferencia de otras estrategias de fertilización tiene como objetivo "fertilizar el cultivo" (Macnack et al., 2012).

El nivel crítico varía entre diferentes tipos de suelos; por ejemplo, los suelos con alto contenido de arcilla requieren dosis más altas de K para mantener un óptimo crecimiento del cultivo (Vitosh et al., 1995).

Un aspecto positivo de este enfoque es que los rendimientos se maximizan mientras que las entradas anuales de fertilizante se reducen al mínimo. Sin embargo, tendrán que hacerse cada año para mantener los niveles de rendimiento (Leikam et al., 2003).

2.5.2 Construir y mantener

2.5.2.1 Construir

Esta estrategia de fertilización busca formar niveles óptimos de nutrientes en suelos con deficiencias nutricionales. Esto se logra mediante el agregado de cantidades de fertilizantes superiores a las que el cultivo va a requerir ese año, y a su vez, construir un nivel de nutriente en suelo hasta el punto en que éste no sea limitante. A diferencia de la anterior estrategia de fertilización, esta busca fertilizar el suelo y no el cultivo (Macnack et al., 2012).

Este concepto se basa en el poder residual de los fertilizantes fosfatados y potásicos. La acumulación de los excesos de fertilizante necesarios para llegar al nivel crítico no debe hacerse en una sola aplicación o año, sino que es recomendable hacerla durante un período previsto de tiempo; generalmente entre cuatro y seis años. Dependiendo de la situación económica del agricultor, este puede optar por una lenta o rápida acumulación de P y/o K (Mallarino, 2011).

Esta filosofía de fertilización no puede ser aplicada en suelos de textura liviana ya que estos no son capaces de mantener los excesos de nutriente por períodos considerables de tiempo, por lo tanto toda cantidad de nutriente agregado por encima del nivel crítico genera una pérdida económica y ambiental (Hanlon y Hochmuth, 2009).

2.5.2.2 Mantener

De acuerdo con el concepto de mantenimiento, los nutrientes que se han exportado de la chacra con el cultivo durante la cosecha deben ser repuestos. A continuación se aplica fertilizante en función a la cantidad de nutrientes exportados del campo por los cultivos, por lo que el nivel de nutrientes del suelo tendría que mantenerse (Vitosh et al., 1995).

Un supuesto del concepto de mantenimiento es que no habrá ningún cambio en los valores de análisis de suelo, si la salida de nutrientes por los cultivos se utiliza para la tasa de mantenimiento (Macnack et al., 2012).

En la misma línea, los trabajos de Siri y Ernst (2011) demostraron en un experimento de larga duración, que la fertilización de cultivos en función de la extracción de P en la etapa anterior, mantuvo constante los valores de análisis de suelo a través del tiempo.

2.6 BALANCE APARENTE DE NUTRIENTES

El balance de nutriente es la diferencia entre la cantidad de nutriente que entra y sale de un sistema definido en el espacio y en el tiempo (Tierí et al., 2013). En general estos balances se realizan para períodos anuales y estos pueden resultar negativos o positivos, generando situaciones de pérdida o de ganancia (Ciampitti y García, 2008). El balance es “aparente”, lo que implica que no considera transformaciones de nutrientes en el sistema suelo-planta, pérdidas gaseosas, lavado o erosión de nutrientes, ni ingresos por deposiciones atmosféricas. Posiblemente, este aspecto signifique que en ocasiones se esté subestimando el resultado obtenido (Ernst et al., 2012).

Un balance negativo a nivel de una chacra que presenta excesivos niveles de fertilidad no debe ser considerado necesariamente como desfavorable. De la misma forma, balances de nutrientes neutros (ingreso = egreso), no deben tomarse ciegamente como óptimo en prácticas de manejo sustentable. Esto indicaría que el stock nutricional del suelo no varió, pero esto no hace referencia a cambios en la estructura física, los cuales pueden estar deteriorando el suelo o su fertilidad (Ciampitti y García, 2008).

El concepto de balance de nutrientes, es ampliado en el tiempo cuando se considera una rotación determinada que incluye más de un cultivo. Dados los beneficios de ésta, es de importancia considerar un ciclo de rotación y no cultivos aislados. Por ejemplo, la dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta implican transformaciones que en muchas ocasiones exceden el período de crecimiento de un cultivo, por ejemplo la residualidad del P (García, 2003).

2.6.1 Nutrientes en el sistema

En los balances aparentes el flujo de nutrientes se caracteriza por entradas y salidas del sistema.

2.6.1.1 Entradas

Se considera ingreso a la concentración de nutrientes en el fertilizante y abono orgánico agregado en el período de estudio. Para el caso de N, las cantidades de N₂ fijado vía simbiótica y asimbiótica también es un ingreso para el balance, la cual varía según especie, condición ambiental y de manejo (Ernst et al., 2012). Según Ciampitti y García (2008) los residuos de cultivos generados en otra chacra, también se consideran fuente de ingreso de nutrientes.

El aporte de nutriente de los residuos generados en la misma chacra, se considera un reciclaje de nutrientes dentro del mismo sistema suelo-planta, y por tanto no se incluye en los ingresos (García, 2003).

2.6.1.2 Salidas

La extracción de nutrientes producida por un cultivo es aquella que corresponde a los elementos contenidos en los granos y paja que salen del sistema de producción con la cosecha. No debe confundirse con las necesidades nutricionales del cultivo, que son de mayor magnitud aun, ya que considera el total de nutrientes necesarios para la producción de toda la biomasa del cultivo (raíces, tallos, hojas y granos, Forjan, 2004).

2.6.2 Balance aparente como indicador de estatus nutricional del suelo

El manejo de nutrientes es un área de mucho interés para la investigación nacional y de creciente preocupación por parte de la sociedad y de los organismos reguladores del medio ambiente, como forma de disminuir la contaminación.

El balance de nutrientes es una herramienta que se utiliza como indicador del manejo de nutrientes (indicadores de sustentabilidad) la cual sirve para cuantificar la entrada y salida de nutrientes de los sistemas productivos. Estos balances favorecen un manejo apropiado de los nutrientes desde el punto de vista de su eficiencia de utilización y del impacto potencial que los nutrientes tienen sobre el medio ambiente (Tierí et al., 2013).

En diferentes estados de USA (California, Maryland y Florida) y en la Unión Europea, el cálculo anual del balance de nutrientes es obligatorio por parte de los productores. Este indicador constituye una herramienta importante para determinar la eficiencia de los distintos sistemas productivos, los que bien utilizados pueden significar un ahorro en fertilizantes y por ende reducir los costos en la compra de insumos (Tierí et al., 2013). Según Cano et al. (2006) en nuestro país la evolución de los niveles totales de P en los suelos de los actuales sistemas agrícolas es desconocida. Esto sería un problema evitable al aplicarse la obligatoriedad del cálculo del balance como en los países antes mencionados.

Estos mismos autores trabajaron con una base de datos con información comprendida dentro del período 1999 – 2005, de chacras comerciales en secuencia continua de al menos 5 cultivos en el Litoral Oeste de Uruguay. Este trabajo mostró que el balance aparente promedio anual de las rotaciones en estudio fue de $0,37 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, representando una reposición

del P extraído en grano del 102%. Estos datos muestran un balance aparente de P que se podría clasificar como neutro o levemente positivo. Evidenciando la importancia de considerar ciclos agrícolas al momento de efectuar el balance de nutrientes, ya que cultivos con mayor y menor extracción pueden compensarse al finalizar un ciclo agrícola.

El seguimiento de los balances en el transcurso de los años funciona como un indicador de los cambios tecnológicos que se han ido generando en la agricultura. Estos cambios han propiciado la intensificación de los sistemas productivos, aumentando el rendimiento por unidad de superficie y en consecuencia, la extracción de nutrientes.

Mancassola y Casanova (2015) mencionan que la extracción de N en el arroz en 1990 fue de 58 kg ha^{-1} y en los años 2000 y 2010 fue de 87 y 109 kg ha^{-1} respectivamente. Estos mismos autores, realizaron un balance a nivel país que tomó como entrada los nutrientes importados al Uruguay, asociados a la superficie de cada producción en particular, y como salida el total de la producción uruguaya en el 2010. Según esta metodología de cálculo, el P presentó un balance negativo en arroz a nivel país, con una pérdida aproximada de $7 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Por otro lado Méndez et al. (2015) analizando este aspecto desde otro punto de vista, sostienen que el cultivo de arroz generó en el pasado balances positivos de P los cuales tras sucesivos años de rotación han incrementado el contenido de este nutriente en suelo. Seguramente esto se debió a décadas de rendimientos no tan elevados, los cuales generaban salidas de P menores a las cantidades de P agregadas.

2.7 FERTILIZACIÓN DE ARROZ

2.7.1 Antecedentes de investigación de la fertilización de arroz en el Uruguay

La mayor atención en los últimos 20 años se centró en el manejo del N, este es sumamente complejo debido a la interacción que tiene con múltiples factores como: época de siembra, variedad, manejo del riego, condiciones climáticas y suelo.

La información publicada muestra que en un 78% de los casos se encontró respuesta significativa al agregado de N, mientras que en los restantes casos esta respuesta no fue tan clara, e incluso según Deambrosi et al. (2002) en casos particulares puede llegar a ser negativa. Esta disminución en el rendimiento, puede estar explicada por una mayor susceptibilidad del cultivo a las bajas temperaturas en su etapa crítica, la cual es generada por la alta fertilización nitrogenada (Amano, citado por Nakamura et al., 1999). Esto

demuestra la variada respuesta del cultivo de arroz al agregado de éste nutriente.

El agregado del fertilizante N de forma fraccionada en S0 (siembra, según Counce et al., 2000), V6 y R0 trae mejoras en el rendimiento, en relación a una dosis única a siembra (Deambrosi y Méndez 1998, Deambrosi et al. 2010b). Esto podría deberse a que el N basal no es capaz de cubrir los requerimientos durante todo el ciclo del cultivo. El N agregado en siembra tiene efectos hasta V6, medido como N en planta, no así hasta R0. Es por esto que en ensayos dirigidos a la fertilización a R0 se vio que su efecto puede ser de significancia para el aumento de los rendimientos (Deambrosi y Méndez, 1993a).

En ensayos de respuesta a la aplicación de N a V6 interaccionando con el riego, se observó que con la aplicación de N en seco con posterior inundación, el cultivo absorbió más N que el tratamiento donde la fertilización N fue realizada en agua (Deambrosi y Méndez, 1995). De la mano de esto, se midió el tiempo óptimo necesario luego de la aplicación de la cobertura nitrogenada para realizar el riego. Estos trabajos mostraron que el tratamiento que se inundó al día siguiente de la fertilización obtuvo mejores resultados que los tratamientos con inundación retrasada, medidos en términos de N absorbido y producción de materia seca (Deambrosi y Méndez, 2010a).

Como puede apreciarse, el enfoque de la investigación priorizó la generación de información respecto al momento, fraccionamiento y a diferentes dosis de fertilizante nitrogenado, frente a conocer parámetros que dieran una orientación objetiva en cuanto al manejo de este nutriente.

En el caso del P, se han propuesto manejos más objetivos basados en análisis de suelo. En ensayos de respuesta al agregado de P, se vieron diferentes resultados en función del cultivo antecesor. En estos trabajos se observó que la respuesta al agregado del nutriente era muy poco probable cuando el suelo provenía de una historia reciente de fertilización fosfatada, como podrían ser los rastrojos de arroz o las praderas. En suelos sin historia de fertilización la respuesta no era la misma, siendo muy probable el aumento en rendimiento por el agregado de éste nutriente (Hernández y Berger, 2003).

Los mismos autores lograron establecer un nivel crítico de 7 mg kg^{-1} de P en suelo, según el método de ácido cítrico, extractante que mejor interpreta la respuesta vegetal en suelos de textura media y liviana del este y noreste del país.

Por último, en el caso del K, no se han obtenido grandes resultados ya que en reiteradas ocasiones donde se estudió la respuesta al agregado de este nutriente no se vieron resultados positivos (Deambrosi et al., 2001). No obstante, existió un caso en el que si hubo respuesta lineal positiva al agregado del nutriente, donde el valor del análisis de suelo para K estuvo situado entre 0,11 y 0,13 meq/100 gr de suelo (Deambrosi et al., 2000). La falta de respuesta posiblemente podría estar explicada debido a que los suelos arrosables de nuestro país eran capaces de suplir los requerimientos del cultivo, al menos, con los niveles productivos de ese momento. El promedio de K en suelo donde se realizaron los ensayos sin respuesta al agregado, estuvo entorno a los 0,24 meq/100 gr de suelo, con mínimos y máximos de 0,16 a 0,48 meq/100 gr de suelo respectivamente. Cabe señalar, que en ese momento el manejo del cultivo no presentaba el grado de ajuste que se cuenta en la actualidad, consiguiéndose rendimientos del orden de 7,5 Mg ha⁻¹.

2.7.2 Fertilización a nivel comercial de arroz en el Uruguay

Aunque el cultivo de arroz en el Uruguay es realizado en ambientes edáficos muy distintos, la fertilización utilizada por los productores es prácticamente la misma y esta ha permanecido incambiada al menos en los últimos 25 años.

Un trabajo que resume para los últimos 9 años la cantidad de nutrientes utilizados en las regiones de producción arroceras más importantes de Uruguay, muestra que no existe variación entre años y zonas en el agregado de N y P basal, habiéndose comenzado a utilizar K en los últimos años pero en una frecuencia poco mayor al 40% de las situaciones (Castillo, 2013).

En términos generales, a la siembra son agregados 48-50 kg P₂O₅ ha⁻¹ y de 12 a 18 kg N ha⁻¹. Por otro lado, en las situaciones donde se utiliza K son adicionados 31 kg K₂O ha⁻¹. En el caso de las coberturas de N, estas son a V6 (previo a la inundación del cultivo) y a R0, con 25 kg de N ha⁻¹ en cada uno de estos dos estadios. Un porcentaje menor de los productores aplica una única cobertura, pudiendo ser a V6, en R0 o intermedio a estos dos momentos, con cantidades entorno a los 35 – 49 kg de N ha⁻¹ (Riccetto et al., 2013).

2.7.3 Fertilización a nivel comercial de arroz en otros sistemas productivos

El principal país productor de arroz en el mundo es China (ACA, 2014), en el cual la producción de arroz difiere mucho a la realizada en Uruguay, tanto en su sistema de producción como en su destino final de consumo.

Ji-yun Jin et al. (2002) reportan datos de fertilización nitrogenada de siete provincias de China, donde en promedio se agrega $196 \text{ kg de N ha}^{-1}$, dentro de un rango que va desde $152 \text{ kg de N ha}^{-1}$ en la provincia de Sichuan, hasta 274 kg en la provincia de Jiangsu, una de las provincias con mayor desarrollo económico rural. Según Harrell y Sachuk (2009), en EEUU la mayoría de las variedades de arroz cultivadas demandan entre 135 y $202 \text{ kg de N ha}^{-1}$, para producir rendimientos económicamente aceptables con buena calidad molinera dependiendo del tipo de suelo. En este mismo país, Funderburg et al. (2000) divulgan datos de requerimientos de 79 a 185 kg ha^{-1} de N, dependiendo de la variedad.

En cuanto al fraccionamiento de N, Peng et al. (2006) mencionan que éste es realizado en cuatro momentos durante el desarrollo del cultivo: unos días antes del trasplante, a V6, en R0 y en R3; en una proporción de 35%, 20%, 30% y 15% respectivamente. Una gran diferencia entre los sistemas de producción de China y nuestro país, radica en que el 56% del N en Uruguay es aplicado en seco, mientras que el 100% del N agregado en China se realiza con el cultivo inundado. Esto genera una menor eficiencia de utilización del fertilizante, ya que el agregado del N en agua disminuye su eficiencia de uso (Deambrosi y Méndez, 1995).

Al igual que en China, en EEUU el N es aplicado en forma fraccionada aunque difiere un poco en su momento y dosis de aplicación. Este es aplicado hasta tres veces durante el desarrollo del cultivo, aproximadamente 50 a 70% se aplica pre-inundación, 15 a 25% a elongación de los entrenudos y de 15 a 25%, 10 a 14 días después (Snyder y Slaton, 2002). Shipp (2005) reporta otro criterio de fertilización en donde el N se puede aplicar cuando los síntomas se presentan en el cultivo, o en cualquier momento hasta la diferenciación de la panícula (2 mm. de panoja). Este mismo autor propone un agregado de 17 a 22 kg N ha^{-1} previo a la siembra, para una buena implantación de las plántulas, evitando la aplicación con mayor anterioridad a 7 días pre-siembra.

En el sur de Estados Unidos, la mayor eficiencia del uso del N, se ha logrado mediante la aplicación de menos del 50% del N total inmediatamente antes de la inundación permanente, y el restante en el intervalo entre elongación de entrenudos y 10 días posterior (Wilson et al., 1998). Sin embargo trabajos realizados en Arkansas han demostrado que algunos cultivares pueden producir rendimientos comparables y a veces mayores, cuando se hace una única aplicación de N previo a la inundación permanente (Norman et al., 2003).

Con respecto al P, en China son utilizados $58 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ en un rango entre los 46 y 69 kg , siendo esta diferencia causada principalmente por la

variedad de arroz utilizada (Ji-yun Jin et al., 2002). Estas cantidades son muy similares a los 48-50 kg de P_2O_5 ha⁻¹ que se agregan en nuestro país.

En Luisiana, las tasas de aplicación típicas de P varían entre 22 y 67 kg de P_2O_5 ha⁻¹ en siembra (Harrell y Sachuk, 2009). Según Shipp (2005), el P es aplicado a la siembra o antes de la inundación, también pudiendo ser aplicado de forma anticipada en el otoño anterior. En el delta del Mississippi, las deficiencias de P son comunes. En el caso que el análisis de suelo lo indique, se recomienda una aplicación de entre 34 y 90 kg de P_2O_5 ha⁻¹ desde antes de la siembra hasta inicio de V6 (Walker y Street, 2003).

En cuanto al manejo de K, similar a lo que sucede con el N, en países asiáticos las cantidades de fertilizante K agregado son muy elevadas en relación a nuestro país. Según Ji-yun Jin et al. (2002) en la provincia de Guangxi se agrega en promedio 119 kg de K_2O ha⁻¹, probablemente debido al bajo nivel del nutriente en suelo y a una larga historia de promoción de uso del fertilizante. Estos mismos autores publican información que resume las cantidades de fertilizante agregadas en varias localidades de China, donde en promedio son agregados 71 Kg de K_2O ha⁻¹, lo que corresponde al doble del fertilizante K agregado en Uruguay.

En EEUU, el K es aplicado en la siembra, antes de la inundación o en el otoño previo (Shipp, 2005), siendo utilizadas cantidades entorno a 22 a 67 kg de K_2O ha⁻¹ (Harrell y Sachuk, 2009). Snyder y Slaton (2002) sugieren como práctica común entre los agricultores de la zona del sur de EEUU, el agregado de 65 a 100 kg ha⁻¹ de K_2O , cantidades superiores a las descritas por Harrell y Sachuk (2009). Norman et al. (2003) afirman que el K aumenta la tolerancia de las plantas de arroz a las enfermedades y plagas, al igual que Shipp (2005) quien asocia deficiencias de K con el aumento de incidencia y severidad de enfermedades.

Como se mencionó más tempranamente en la revisión bibliográfica, las deficiencias, por lo tanto aplicaciones de micro elementos, se dan en casos puntuales y en ambientes con ciertas particularidades.

Un ejemplo de esto es el Zn, el cual en EEUU se aplica en ocasiones en sedimentos alcalinos y suelos francos de pH mayor a 7; a tasas de 1 a 11 kg ha⁻¹ dependiendo de la fuente de Zn y el tiempo y método de aplicación (Snyder y Slaton, 2002). Harrell y Sachuk (2009) proponen el agregado de 6 a 17 kg de Zn ha⁻¹ y Shipp (2005) un aproximado de 8 a 9 kg ha⁻¹ de una fuente inorgánica como sulfato de zinc. Suelos calcáreos con pH alcalino, suelos con aplicaciones excesivas de cal, el uso de aguas profundas para riego durante el crecimiento de las plántulas y temperaturas frías que retarden el crecimiento de las raíces,

son prácticas de manejo que pueden contribuir a la deficiencia de Zn (Harrell y Sachuk, 2009).

Para el caso del S, en situaciones donde se detecten deficiencias es recomendado el agregado de cantidades entorno a las necesidades totales del cultivo, siendo esto común en suelos con grandes cantidades de tierra movida en trabajos de nivelación del terreno. En estas situaciones se sugiere realizar la aplicación antes de siembra y hasta la etapa de dos o tres hojas (Walker y Street, 2003). Funderburg et al. (2000), Shipp (2005), Harrell y Sachuk (2009) recomiendan la aplicación de 112 kg ha^{-1} de sulfato de amonio para corregir las deficiencias de S cuando estas son diagnosticadas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN

El ensayo fue instalado en la zafra 2012/13, en la Unidad Experimental Paso de la Laguna de INIA Treinta y Tres. La misma está ubicada a 28 km de la ciudad de Treinta y Tres, dirección Este, a una altitud de 25 m sobre el nivel del mar, siendo sus coordenadas geográficas: 33° 14', 54° 22'.

3.1.1 Suelos

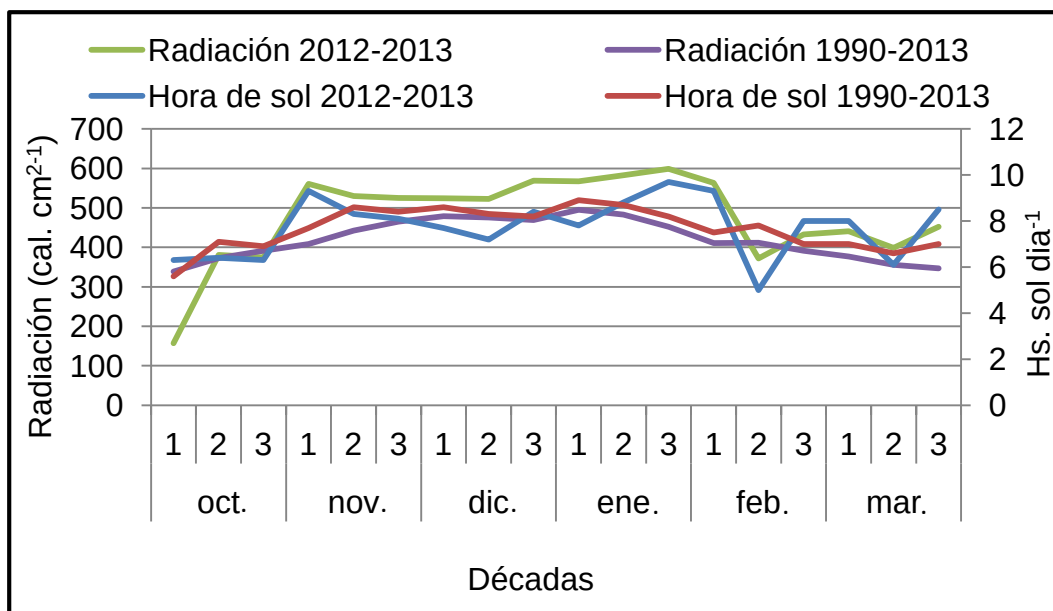
El suelo sobre el cual se condujo el ensayo corresponde a un Brunosol Subéutrico Lúvico con fase Hidromórfica, perteneciente a la Unidad “La Charqueada” (MAP. DSF, 1979).

3.1.2 Clima

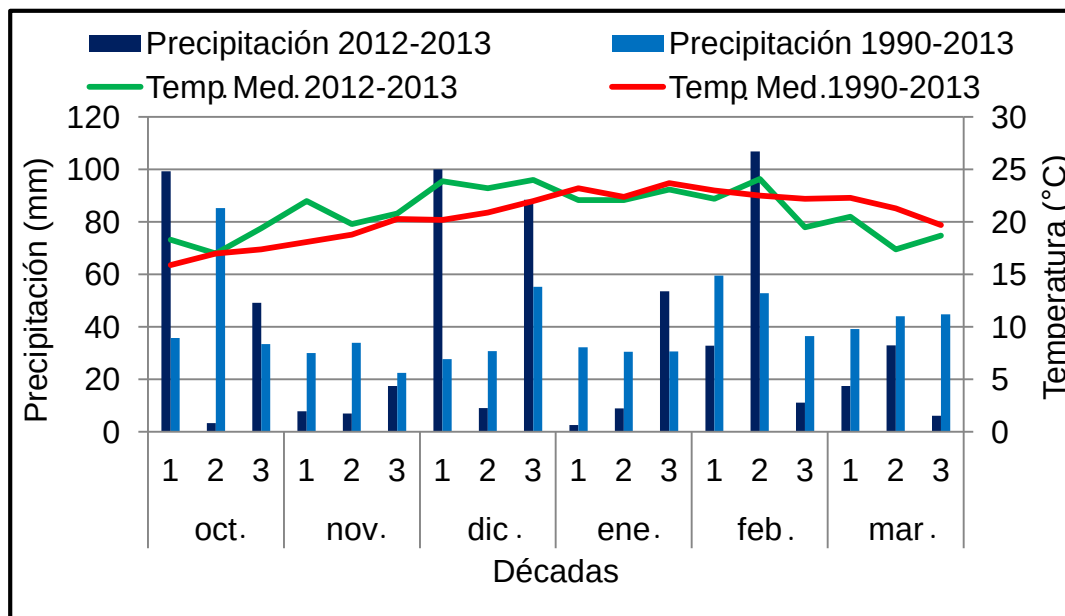
La información climática corresponde a la estación meteorológica instalada en la Unidad Experimental Paso de la Laguna.

En las siguientes gráficas se presenta el comportamiento de las variables climáticas: heliofanía, radiación, precipitación, temperatura media (med) de la zafra 2012/13, y registros promedios de la serie histórica, comprendida entre los años 1990 al 2013.

Gráfica No. 1. Evolución de la radiación (cal cm^{-2}) y heliofanía (hs sol día^{-1}), durante la zafra en estudio (2012-13) y en la serie histórica para los meses octubre- marzo



Gráfica No. 2. Evolución de la precipitación (mm) y temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) durante la zafra en estudio (2012-13) y en la serie histórica para los meses octubre- marzo



Climáticamente, la zafra en cuestión fue favorable lo que se tradujo en un buen año agrícola. Se dieron condiciones favorables para la germinación y el establecimiento del cultivo en cuanto a temperaturas medias, radiación y precipitaciones (tercera década de octubre; Gráficas No. 1 y 2). El macollaje se vio favorecido por las temperaturas medias mayores a las requeridas por el cultivo (16 °C según Yoshida, 1981) y alta radiación con valores superiores a los registros históricos (segunda y tercera década de noviembre). Al igual que al macollaje, las condiciones climáticas favorecieron la etapa de primordio y floración, en este período las temperaturas medias oscilaron entre los 20 a 25 °C (primordio segunda y tercera década de diciembre). De igual forma las horas de sol dia^{-1} superaron la media histórica, generando muy buenas condiciones durante el período crítico del cultivo (últimos días de diciembre, enero). Contrario a las buenas condiciones descriptas anteriormente, el período de llenado de grano ocurrió con precipitaciones abundantes por encima de las medias históricas, lo que evidencio una baja en la radiación y heliofanía en el período de llenado de grano (febrero). Este hecho no alteró el alto potencial de rendimiento concretado hasta el momento, ya que no ocurrió durante el período crítico el cual es entorno a 20 días a R3 (Diekmann et al., 1993).

3.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento evaluó cuatro tratamientos de fertilización, los que variaron en la cantidad de N, P y K agregada, existiendo además un testigo sin fertilización. Las variedades utilizadas fueron, dos de tipo índicas: El Paso 144 (EP144) e INIA Olimar y dos de tipo japónica tropical: Parao (L5502) e INIA Tacuarí.

Los tratamientos evaluados se detallan a continuación:

- Tratamiento 1 (Testigo absoluto, T1): sin agregado de fertilizante.
- Tratamiento 2 (Testigo comercial, T2): simula el manejo de fertilización típico de la mayoría de las zonas productoras del país (Cuadro No. 1).
- Tratamiento 3 (Fertilización elevada, T3): independientemente de la buena concentración de nutrientes en suelo, el objetivo de este tratamiento fue agregar cantidades de N, P y K entorno a los requerimientos totales de un cultivo de arroz de 10 Mg ha^{-1} , por lo tanto no existirían limitantes de estos nutrientes para el cultivo (IPNI, 2013).

- Tratamiento 4 (Testigo de investigación, T4): la información para la confección de este tratamiento es generada por la Sociedad Brasileira de Arroz Irrigado (SOSBAI, 2005). En nuestro trabajo se convirtieron los resultados del análisis de suelo obtenidos previo a la siembra del experimento a las unidades utilizadas en Brasil. Se asumió igual respuesta vegetal entre estos dos sistemas de recomendación de fertilización. Las cantidades de fertilizante a agregar están en función de las concentraciones de nutrientes en suelo y una expectativa de rendimiento mayor o igual a 9 Mg ha⁻¹. Este enfoque es similar al de subir y mantener, el cual agrega un rango de seguridad por encima del nivel crítico del cultivo.
- Tratamiento 5 (Fertilización objetiva según información local, T5): esta recomendación de fertilización se basó en el criterio de nivel de suficiencia, utilizando información disponible para P y K y preliminar de N (Castillo et al., 2012b). Para realizar la fertilización con P basal se tomó en cuenta un nivel crítico de 7 mg kg⁻¹ de suelo extractado según la metodología de ácido cítrico, según lo reportado por Hernández y Berger (2003).

La fertilización con K fue realizada tomando en cuenta la saturación de K en la CIC del suelo en función a un rangos de respuesta al agregado de K (Dobermann y Fairhurst, 2000) y la relación Mg/K. Estos autores mencionan como aceptable un porcentaje de saturación de K sobre la CIC del suelo superior o igual a 1,5%, mientras que la relación Mg/K fue definida en 15. El criterio para la fertilización fue la de agregar K hasta obtener las relaciones mencionadas anteriormente, utilizándose para esto un equivalente fertilizante de 1170 kg de K₂O ha⁻¹ para elevar 1 meq en 100 gr de suelo (Hernández et al., 2010). Considerando lo anteriormente mencionado, la cantidad de K agregado fue de 40 kg de KCl ha⁻¹ cumpliendo con los dos criterios fijados.

En cuanto al N, el mismo fue aplicado en V6 en función a niveles críticos de los parámetros potencial de mineralización de nitrógeno (P.M.N) y en R0 según absorción de N (kg ha⁻¹) (Castillo et al., 2012b). Las características de la técnica para este primer indicador son las descritas por García y Quincke (2011) mientras que el último indicador es el producto entre la M.S acumulada (kg ha⁻¹) a R0 y la concentración de N (gr kg⁻¹) de la muestra. Los niveles críticos fueron de 35 mg NH₄ kg⁻¹ de suelo a V6 para P.M.N (incubación anaeróbica) y 57 kg ha⁻¹ de N absorbido para el indicador utilizado a R0. El equivalente fertilizante de respuesta esperada fue de 4 kg N

ha⁻¹ y 7 kg N ha⁻¹ para el parámetro P.M.N y absorción de N respectivamente (Castillo et al., 2012b). Por último, no se utilizó N basal debido a que la relación C/N en suelo fue menor a 10, valor reportado como nivel por debajo del cual no es esperable encontrar inmovilización neta (Frioni, 2006). Asociado a esto, trabajos realizados por Castillo et al. (2011) demuestran que la fertilización basal con N en diferentes localidades de nuestro país, no generaron cambios en el rendimiento del cultivo, cuando fueron sembrados en situaciones similares a las de este experimento.

Cuadro No. 1. Cantidades agregadas de N, P₂O₅ y K₂O a S0, V6 y R0, según los tratamientos evaluados

Tratamiento	Fertilización basal (kg ha ⁻¹)			Coberturas N (kg ha ⁻¹)	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	V6	R0
1	-	-	-	-	-
2	18	46	0	23	23
3	32	83	180	69	69
4	14	37	50	45	45
5	0	0	24	24	40 (Cuadro No. 2)

Cuadro No. 2. Agregado de N a R0 según análisis en el tratamiento 5

Variedad	Bloque	MS (kg ha ⁻¹)	%N	Abs. de N (kg ha ⁻¹)	N (kg ha ⁻¹)
EP 144	1	3271	2,3	75	0
	2	2357	2,0	47	69
	3	3147	2,4	75	0
Promedio		2925	2,2	66	23
INIA Olimar	1	3059	1,7	52	35
	2	3050	1,7	51	42
	3	3278	1,8	59	0
Promedio		3129	1,8	54	26
Parao	1	3186	1,6	51	42
	2	3005	1,6	48	62
	3	2926	1,7	50	51
Promedio		3039	1,6	50	52
INIA Tacuarí	1	3358	1,9	64	0
	2	1858	1,8	33	92
	3	2799	1,6	45	85
Promedio		2672	1,8	47	59

3.3 MANEJO DEL EXPERIMENTO

Para la preparación de la sementera, se realizó un laboreo mínimo sobre un laboreo de verano. Se sembró el 21 de octubre de 2012, fertilizándose el mismo día con fosfato de amonio y cloruro de K a aquellos tratamientos que correspondían. La densidad de siembra se ajustó en base a una población objetivo de 250 plantas m^{-2} (Gamarra, 1996), siguiendo para esto la información presentada en el Cuadro No. 3. El control de malezas se realizó el 15 de noviembre con la aplicación de 3,5 l ha^{-1} de propanil, 1,7 l ha^{-1} de quinclorac, 0,8 l ha^{-1} de clomazone.

Cuadro No. 3. Cálculos de ajuste de densidad de siembra

Variedad	Germinación (%)	Recuperación estimada (%)	PMS (gr)	Densidad de siembra ($kg\ ha^{-1}$)
INIA Olimar	91	60	26,2	144
INIA Tacuarí	95	60	21,6	113
Parao	91	60	28,1	154
EP 144	92	60	26,3	143

A V6 se aplicó la dosis de N correspondiente a cada tratamiento en suelo seco con posterior inundación del cultivo. Las variedades El Paso 144 e INIA Olimar alcanzaron este estadio el 19 de noviembre mientras que INIA Tacuarí y Parao lo alcanzaron el 29 de noviembre. En R0 se aplicó la segunda cobertura de N en cada tratamiento, siendo realizadas en diferentes fechas según el ciclo de cada variedad. En tal sentido, el 19 de diciembre correspondió la segunda cobertura para El Paso 144 e INIA Olimar, el 24 de diciembre a INIA Tacuarí y finalmente el 31 de diciembre le correspondió a Parao.

Para el control de enfermedades, a R3 fue aplicada una mezcla de 400 cc ha^{-1} de picoxistrobin+ ciproconazol y 500 cc ha^{-1} de nimbus. Se cosechó el 19 de marzo las variedades INIA Tacuarí e INIA Olimar, el 26 de marzo El Paso 144 y el 5 de abril Parao.

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar en parcelas divididas con tres repeticiones.

Las parcelas principales dentro de cada bloque correspondieron a los diferentes cultivares utilizados, mientras que las subparcelas corresponden a

los diferentes tratamientos de fertilización, siendo el tamaño de esta última de 10 m de largo por 3,06 m de ancho.

3.5 DETERMINACIONES Y REGISTROS

3.5.1 Análisis de suelo

Fueron realizados dos análisis de suelo, uno previo a la siembra y otro posterior a la cosecha. Para el análisis a siembra se realizó un muestreo exhaustivo que intentó captar la variabilidad espacial del suelo en donde se instaló el ensayo, mientras que para el análisis a cosecha el muestreo fue realizado por parcela. El primero sirvió para realizar los cálculos de necesidades de fertilizante de los tratamientos de fertilización objetiva (T4 y T5), mientras que el último muestreo fue con el objetivo de ver posibles variaciones en el nivel de los nutrientes en suelo causadas por los diferentes tratamientos.

Cuadro No. 4. Análisis de suelo previo a siembra

Parámetros	Unidad	Resultados
Calcio	meq Ca/100g	9,6
Magnesio	meq Mg/100g	4,2
Fósforo Bray No. 1	mg kg ⁻¹ P	5,1
Fósforo Ác. Cítrico	mg kg ⁻¹ P	8,2
Carbono orgánico	%	1,3
Potasio Intercambiable	meq K/100g	0,26
PMN	mg/Kg	29
Nitrógeno total	% N total	0,16
CIC	meq /100g	17,8

3.5.2 Determinación de población lograda

Quince días después de la siembra (DDS), al momento de estabilización de la emergencia del cultivo, fueron realizados conteos de plantas para determinar población lograda. Para esto se contabilizó cuatro zonas en cada parcela, siendo cada submuestra de 1 m lineal.

3.5.3 Determinación de materia seca

En cada parcela fueron seleccionados al azar dos tramos de 0,5 m lineales en V6 y R0 para muestreo mediante un corte a ras de suelo. Las muestras vegetales fueron lavadas con agua destilada y colocadas en estufa a

60°C hasta alcanzar un peso constante. De igual manera a R0 fueron extraídas muestras para MS en todos los tratamientos. En las parcelas correspondientes al tratamiento 5, a inicio de elongación de entrenudos (inmediatamente previo a R0) se determinó acumulación de MS y concentración de N. Esta determinación junto a la estimación de acumulación de MS en este momento sirvió para estimar la absorción de N en kg ha^{-1} , indicador utilizado para la cobertura de R0 como se mencionó anteriormente.

Para la determinación de MS a R3, se tomaron dos muestras por parcela de 0,50 m lineales cada una. A esta muestra se le extrajo 20 macollos al azar para determinar IAF, el resto de la muestra fue colocada en la estufa para determinar peso seco y así estimar acumulación de MS en kg ha^{-1} .

3.5.4 Medidas con SPAD

Esta determinación fue realizada sobre la última hoja totalmente desarrollada, en el centro de la lámina. Para esto fue utilizado un aparato SPAD 502-plus. Las determinaciones fueron realizadas a R0 y R3 en las cuales fueron tomadas ocho lecturas al azar por parcela.

3.5.5 Lecturas con LCC

La tabla Leaf Color Chart (LCC) es una escala con diferentes tonalidades del color verde. Esta herramienta tiene el objetivo de estimar el contenido de clorofila en planta, estando indirectamente ligado con la concentración de N. La tabla utilizada fue de 6 paneles, desarrollada por investigadores del International Rice Research Institute (IRRI) y el Philippine Rice Research Institute (PhilRice), producida por la compañía Nitrogen Parameters. Para realizar esta determinación se tomaron ocho mediciones por parcela en los estadíos de R0 y R3.

3.5.6 Determinación de índice de área foliar (IAF)

Para la determinación del IAF se partió de una muestra de 20 macollos por parcela los cuales fueron tomados en R3. A cada macollo se le retiraron sus correspondientes hojas y se les midió el IAF con el escáner Leaf Área Meter LI3000 v 1.0.0. Esta determinación al igual que la acumulación de MS pretende recoger las variaciones debido a los tratamientos.

3.5.7 Altura de planta

La determinación de altura de plantas fue realizada a R3 y cosecha, seleccionándose para esto 6 plantas al azar por parcela. Para determinar esta

variable, se midió con regla desde la base de la planta hasta la última estructura totalmente extendida.

3.5.8 Evaluación de enfermedades

La evaluación de enfermedades se realizó en R0 y a cosecha. En los dos momentos, se tomó una muestra de 100 tallos por parcela, a estos se les midió incidencia mediante el conteo de plantas enfermas sobre el total evaluadas. Posterior a esto, mediante una escala de severidad (cantidad de tejido dañado por planta) y la fórmula de Yoshimura (IRRI, 2002) se calculó el Índice de Grado de Severidad utilizado para el análisis estadístico.

$$IGS = (n_5 * 4 + n_7 * 3 + n_9 * 2) / n_{\text{Total}}$$

Siendo: 5, 7 y 9 la escala de severidad.

3.5.9 Materia seca de grano y paja a cosecha

A cosecha fueron extraídas dos muestras de 0,5 m por parcela las cuales fueron cortadas al ras del suelo. Posteriormente en forma manual se separaron los granos de la paja y se secaron a 60° C hasta que las mismas alcanzaron un peso constante. Finalmente fueron enviadas al laboratorio para determinación de concentración de N, P y K en grano y paja. Esta determinación también permitió calcular el Índice de Cosecha, calculado como:

$$IC = \frac{MS_{\text{grano}}}{(MS_{\text{grano}} + MS_{\text{paja}})}$$

3.5.10 Componentes del rendimiento

Antes de la cosecha se extrajeron dos muestras de 0,5 m lineales de panojas por parcelas. Con estas se estimó el número de panojas por metro cuadrado. Posteriormente de cada muestra fueron extraídas 15 panojas al azar las cuales se trillaron manualmente, con el objetivo de estimar el número de granos por panoja. Las muestras de grano fueron pasadas por una máquina de viento, la cual clasificó a los granos como: llenos, medios llenos y estériles. Con estos datos se pudo determinar los granos totales por panoja, número de granos enteros, medio grano y vano. A partir de los granos enteros, se obtuvo el peso de mil granos (PMG).

3.5.11 Rendimiento

La cosecha fue realizada previo desborde de 1 m de cabecera y 1 m de fondo y de 3 líneas de cultivo hacia ambos lados de la parcela. Se logró un área efectiva de cosecha de 16,3 m² por parcela. Posteriormente se trilló con una trilladora estacional y se obtuvo el rendimiento húmedo (kg ha⁻¹). El grano se limpió con zaranda y ventilador, siendo luego secado hasta 13% de humedad. El rendimiento seco y limpio se lo corrigió por el rendimiento molinero, obteniendo así el rendimiento sano, seco y limpio.

3.5.12 Rendimiento molinero

Se tomó una muestra limpia de 100 gr de granos de arroz a 13% de humedad, esta se descascaró y pulió. Posterior a esto se separaron los granos enteros de los quebrados, los cuales fueron pesados para calcular el porcentaje de granos enteros y medios granos. Partiendo de la muestra de granos enteros, fueron separados manualmente los granos yesados (mayor de 50% de su superficie del grano yesado), manchados y los blancos, para luego pesarlos y determinar el porcentaje de cada uno de ellos.

3.5.13 Estimación de la eficiencia de uso del nitrógeno

En este punto se estimaron la eficiencia agronómica (EA) y eficiencia de recuperación aparente (ERA) según los trabajos de Cassman et al. (1996). La EA del N se expresa como la diferencia en rendimiento entre el tratamiento fertilizado y el testigo absoluto sobre la cantidad de nutriente agregado tal cual se observa en la siguiente ecuación.

$$EA = \frac{(\text{kg de arroz tratamiento no.} - \text{kg arroz testigo absoluto})}{\text{Kg de nutrientes agregado al tratamiento no.}}$$

Y por último la ERA se calculó como la diferencia en absorción de N entre el tratamiento fertilizado y el testigo absoluto, sobre la cantidad de N agregado al tratamiento fertilizado.

$$ERA = \frac{(\text{kg N absorbido en tratamiento no.} - \text{kg N absorbido por testigo absoluto})}{\text{Kg de nutrientes agregado al tratamiento no.}}$$

Cabe aclarar que si bien este cálculo fue realizado para las diferentes dosis de N evaluadas, a cada tratamiento lo acompañan diferentes cantidades de P y K.

3.5.14 Balance aparente de nutrientes

Para la realización de los balances aparentes de N, P y K, se consideraron como entrada las fertilizaciones realizadas y como salida las cantidades de nutriente extraídas en el grano. La diferencia entre entradas y salidas da como resultado el balance aparente de nutrientes del sistema.

3.5.15 Estimación del margen económico

Esta estimación se realizó con el objetivo de observar cómo influyen los diferentes tratamientos de fertilización en el margen económico. Para la estimación de costos se tomó como base 2054 U\$S ha⁻¹, según información de la asociación de cultivadores de arroz (ACA), los cuales incluyen gastos de insumos en general, mano de obra, arrendamiento de tierra, agua y maquinaria, considerando el costo de una fertilización estándar representada en este trabajo por el T2. La diferencia en costo de los restantes tratamientos estuvo asociada a este factor (fertilización).

Los ingresos fueron estimados según el rendimiento obtenido y el precio del grano. El rendimiento es llevado a 13% de humedad y corregido según las tablas de premios o castigos en función del rendimiento del molino. El precio de referencia utilizado fue de 12,5 dólares por bolsa de 50 kg, correspondiente a la zafra 2012-13. De la diferencia entre los ingresos y los costos surge el margen económico.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las respuestas agronómicas y económicas fueron evaluadas ajustando modelos mixtos donde la variedad, los tratamientos de fertilización y sus interacciones fueron definidos como efectos fijos, mientras que el bloque fue definido como efecto aleatorio. Se utilizó el paquete estadístico Infostat (Balzarini et al., 2008) y para la comparación múltiple de medias se usó la prueba de LSD de Fisher al 5%.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PARÁMETROS DETERMINADOS PREVIO A FLORACIÓN

Cabe aclarar antes del desarrollo de este capítulo que no hubo interacción variedad por tratamiento en casi la totalidad de las variables estudiadas. En tal sentido solo se hace referencia a esta interacción en donde la misma fue significativa. De todas maneras esto se puede ver en anexo.

4.1.1 Población lograda

Se tomó como objetivo una población de 250 plantas m^{-2} en base a lo mencionado por Gamarra (1996). Para todas las variedades se logró un número de plantas superior al objetivo (Cuadro No. 5), el cual estuvo explicado por una buena recuperación debido a lluvias frecuentes en el período pos siembra, los que permitieron una rápida y homogénea emergencia.

Si bien a causa de lo explicado anteriormente la población lograda fue superior al objetivo, no se detectaron diferencias entre las variedades. De detectarse diferencias en las variables agronómicas determinadas, éstas estarían asociadas al efecto de los tratamientos evaluados.

Los kilogramos de semilla utilizados en siembra (138 kg ha^{-1}) fueron menores a los que se usa a nivel comercial (180 kg ha^{-1}), esto demuestra que es posible disminuir los kg adicionados manteniendo inalterada la población objetivo.

Cuadro No. 5. Población lograda 15 DDS según variedad

Variedad	Población (pl m^{-2})
INIA Olimar	296 a
INIA Tacuarí	288 a
Parao	268 a
EP 144	310 a
p-valor	0,08

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

4.1.2 Acumulación de materia seca

Se detectaron diferencias significativas en la acumulación de materia seca (MS) asociadas a las variedades y los tratamientos de fertilización. Estas diferencias se mantuvieron en los estadios de V6, R0 y R3, salvo para el factor fertilización en la primera fecha de muestreo (Cuadro No. 6). Al estadio de V6, las variedades tipo japónica (INIA Tacuarí y Parao) fueron diferentes estadísticamente a las de tipo indica (EP 144 e INIA Olimar), acumulando estas últimas un 50% menos de MS en comparación al primer grupo. Por otro lado, a R0, las variedades INIA Olimar y Parao presentaron las mayores cantidades de MS acumulada, no difiriendo estadísticamente entre ellas. Las restantes variedades (EP 144 e INIA Tacuarí) fueron estadísticamente iguales entre si y diferentes del grupo anterior. En R3, se mantuvo la mayor acumulación de MS a favor de INIA Olimar, la cual supero en 2241 kg de MS ha⁻¹ a EP144 y en 4185 kg ha⁻¹ al promedio de INIA Tacuarí y Parao, no difiriendo estas últimas estadísticamente entre sí.

Posiblemente el no haber encontrado diferencias significativas en la acumulación de MS en V6 asociado al efecto de los tratamientos, esté explicado porque esta determinación fue realizada en forma previa al comienzo de las coberturas de N, no habiéndose expresando el rápido crecimiento vegetativo asociado a este tipo de fertilización. Según Murayama (1971), el agregado de dosis creciente de este nutriente genera un aumento en la acumulación de MS. Por otro lado, el hecho de que los niveles de P y K en suelo estuvieron cercanos y por encima a los niveles de suficiencia para esos nutrientes, hacen poco probable diferencias en acumulación de MS debido al efecto de las diferentes fertilizaciones basales. Tanto en R0 como en R3 los valores más altos de MS fueron obtenidos con el T3 y los menores con el T1, no pudiendo diferenciarse este último del T5.

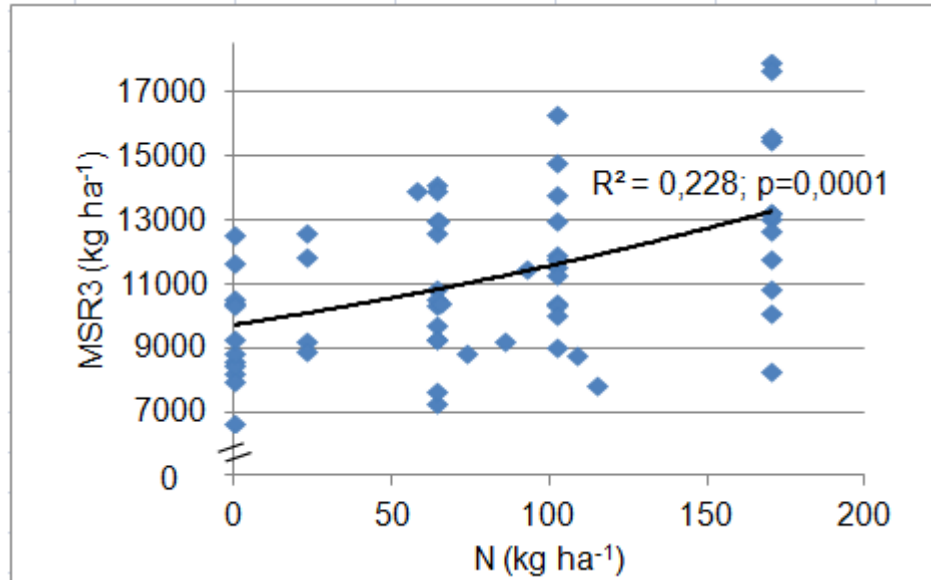
Cuadro No. 6. Acumulación de MS (kg ha^{-1}) en los estadios de V6, R0 y R3, según las variedades y tratamientos de fertilización evaluados

	MS en kg ha^{-1}		
Variedad	V6	R0	R3
INIA Tacuarí	345 a	3228 b	9384 c
Parao	309 a	4825 a	10032 c
El Paso 144	228 b	3642 b	11652 b
INIA Olimar	208 b	4387 a	13893 a
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Tratamientos	V6	R0	R3
1	255 a	3095 c	9498 d
2	289 a	4036 b	10743 c
3	281 a	4997 a	13365 a
4	287 a	4505 ab	12053 b
5	251 a	3470 c	10541 cd
p-valor	0,7	<0,0001	<0,0001

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

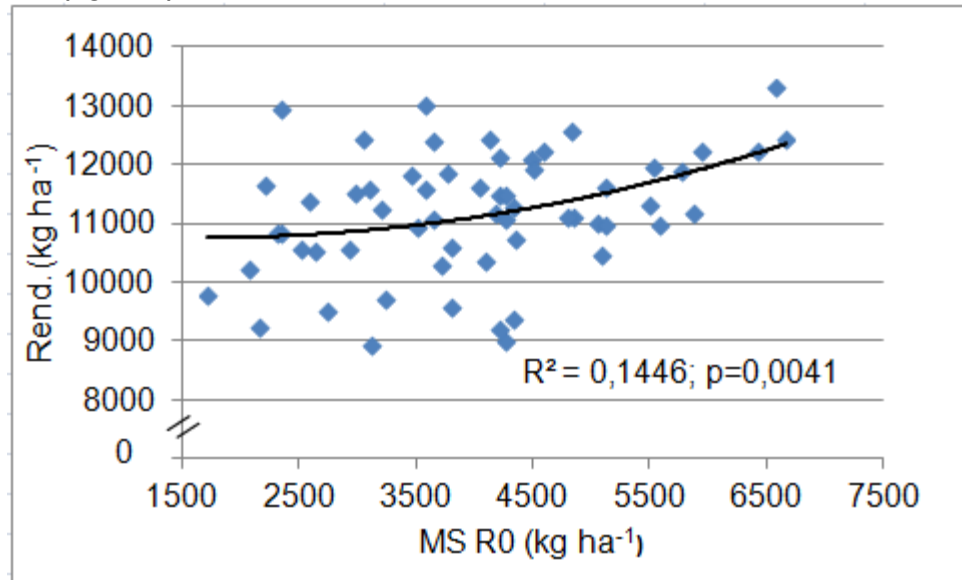
El análisis de la información mostró una correlación positiva entre la cantidad de N agregado y la acumulación de MS (Gráfica No. 3) en el estadio de R3 ($r=0,48$), concordando con lo expresado en el párrafo anterior.

Gráfica No. 3. Relación entre N agregado (kg ha^{-1}) y producción de materia seca (kg ha^{-1}) en R3



Por otro lado también se encontró una correlación positiva entre las variables acumulación de MS a R0 y el rendimiento en grano (Gráfica No. 4), si bien esta correlación fue más débil ($r=0,37$). Este hecho es constatable en el cultivo de arroz, ya que mayores acumulaciones de MS no siempre aseguran la concreción de altos rendimientos. Entre otros son citados aspectos climáticos como las bajas temperaturas, las que producen esterilidad independientemente del desarrollo vegetativo, o altas acumulaciones de MS las que compiten por fotoasimilados con las estructuras reproductivas disminuyendo el rendimiento. Por otro lado, es sabido que bajas acumulaciones de biomasa en ese estadio están asociadas a rendimientos bajos. Para nuestras condiciones, considerando un IC típico de estas variedades (0,55) y la MS media del ensayo en etapas avanzadas del ciclo (R3), sería esperable obtener buenos rendimientos como se verá más adelante. Trabajos recientes con este tipo de variedades reportan rendimientos entre 10 y 12 Mg ha^{-1} con IC entre 0,5 y 0,55 respectivamente (Del Barrio y Techera 2012, Hernández et al. 2012)

Gráfica No. 4. Relación entre acumulación de MS a R0 (kg ha^{-1}) y rendimiento en grano (kg ha^{-1})



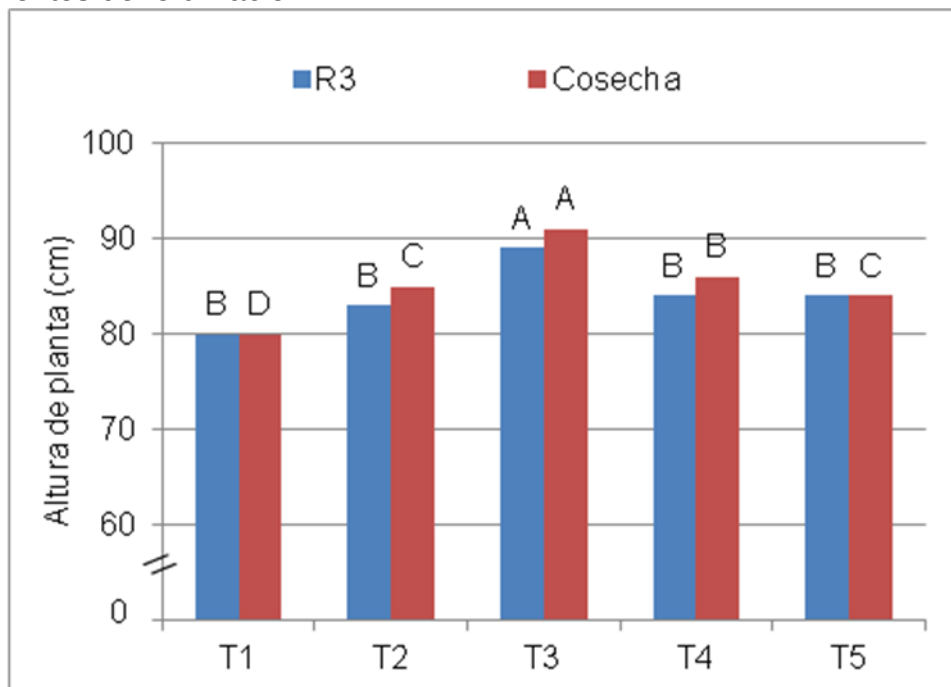
4.1.3 Altura de planta

Como es esperable, la variable altura de planta está asociada en definitiva a la acumulación de MS de un cultivo. Estas diferencias comienzan a cobrar magnitud hacia etapas avanzadas del cultivo, debido por un lado a las características intrínsecas de cada variedad y a que la totalidad de los tratamientos de fertilización están realizados.

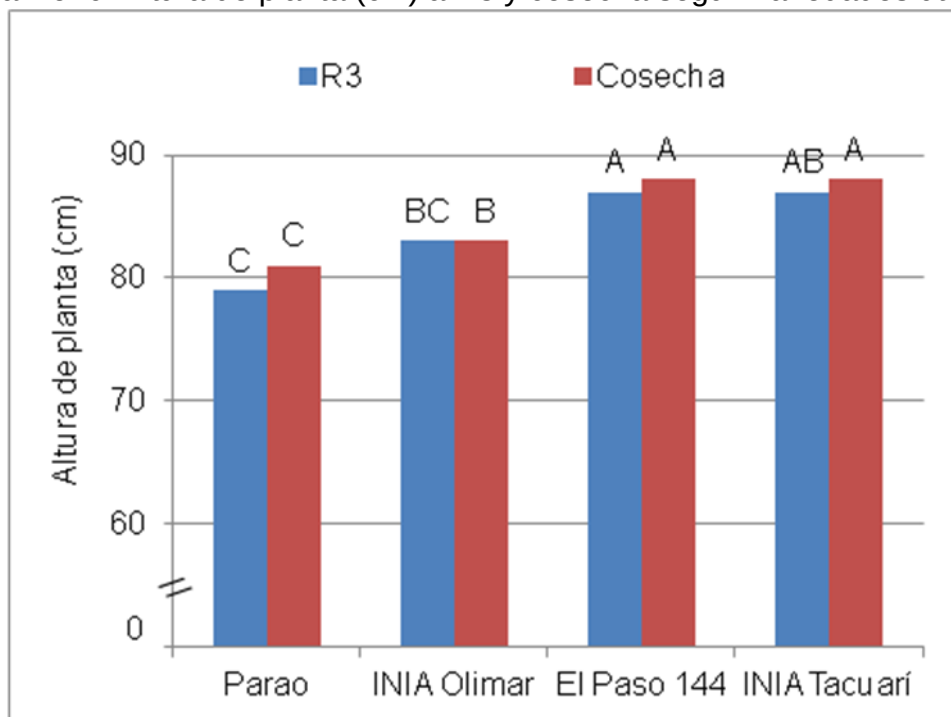
En la misma línea, fueron encontrados efectos significativos en la altura de planta a R3 ($p < 0.001$) y cosecha ($p < 0.0001$) asociados a los tratamientos de fertilización y a las variedades. Las diferencias en R3 estuvieron asociadas al T3, ya que fue el único en diferenciarse estadísticamente del resto. A cosecha se vio un comportamiento similar, observándose una tendencia de que, a mayor cantidad de N agregado mayor altura de planta lograda, coincidiendo con lo reportado por Singh y Murayama, citados por Rojas et al. (1983, Gráfica No. 5).

Para el promedio de los tratamientos, las diferencias estadísticas en altura asociadas a las variedades se constataron en R3 ($p < 0.001$) y cosecha ($p < 0.0001$). El Paso 144 fue la variedad más alta siendo un 8,3% mayor que Parao, la cual presentó la menor altura (Gráfica No. 6). Estas diferencias se deben a los materiales genéticos, siendo consistentes con lo reportado por la red de evaluación de cultivares de INIA-INASE (Cassou, 2011).

Gráfica No. 5. Altura de planta (cm) a R3 y cosecha según efecto de los tratamientos de fertilización



Gráfica No. 6. Altura de planta (cm) a R3 y cosecha según variedades utilizadas



En términos prácticos, todas las alturas alcanzadas por cada variedad y por efecto de los tratamientos de fertilización fueron adecuadas, tomando en cuenta que al momento de la cosecha pueden existir potenciales problemas por la interacción de una variedad baja con taipas altas, o en cultivos sembrados en pendientes pronunciadas. Por otro lado, las alturas máximas no fueron tales como para ocasionar problemas de volcado.

4.1.4 ÍAF

Como se mencionó esta determinación fue realizada en R3. En tal sentido es esperable encontrar cambios en esta variable, ya que su medición fue posterior a la aplicación del fertilizante correspondiente a cada momento y tratamiento. Según Yoshida (1972) el IAF crítico para el cultivo de arroz se encuentra dentro del rango de 4 a 7 m² de hoja por m² de suelo. En nuestro estudio, todos los valores obtenidos se encontraron dentro del valor crítico y superiores a este. Este índice presentó cambios significativos por efecto de los tratamientos y las variedades (Cuadro No. 7). El T3 fue el que produjo el mayor IAF, superando en un 38% al promedio de los restantes tratamientos. A éste, le siguen en orden decreciente los tratamientos 4, 2, 5 y 1, este último con una producción 55% inferior al T3. Según Murata y Matsushima, citados por Jarma et al. (2010), la fertilización con N provoca un incremento en el IAF. Lo mencionado anteriormente se constató en este trabajo, ya que los tratamientos con mayor agregado de N fueron los de mayor IAF, observándose esto en la correlación alta y positiva entre estas dos variables ($r=0,7$; $p<0,0001$). Entre las variedades se pueden diferenciar claramente los dos ideotipos, donde las indicas fueron las de mayor IAF siendo estas un 21% superior a las japónicas.

Cuadro No. 7. Índice de área foliar a R3 según efecto de los tratamientos y las variedades

Tratamientos	IAF m ² m ⁻²⁻¹	Variedad	IAF
1	5,3 d	EP 144	7,5 a
2	6,2 c	INIA Olimar	7,2 a
3	8,6 a	Parao	6,3 b
4	7,2 b	INIA Tacuarí	5,8 b
5	6,1 cd		
p-valor	<0,0001	p-valor	0,0001

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

4.1.5 SPAD y Leaf Color Chart (LCC)

Las herramientas SPAD y LCC tienen como objetivo estimar indirectamente el contenido de N en hoja. El SPAD mide indirectamente la

concentración de clorofila, mientras que la LCC es una determinación subjetiva realizada con una tabla de diferentes tonalidades de verde. Mientras en el primer caso, la herramienta SPAD ha sido de utilidad para predecir respuesta a la segunda cobertura nitrogenada en sistemas arroceros a escala comercial, la LCC ha sido utilizada en sistemas arroceros a escala familiar debido a su simplicidad y bajo costo. Turner y Jund (1994) mencionan que es recomendado el agregado de N con valores de SPAD inferiores a 40 unidades, mientras que para la LCC, Peng et al. (1996) reportan agregados entre 20 y 45 kg N ha⁻¹ cuando la lectura tomada con esta herramienta se sitúa debajo del umbral crítico ajustado. Según Pocojeski et al. (2012), el SPAD es más preciso en determinar el contenido de N de la hoja en comparación al LCC, este último presenta una mayor dependencia de interpretación de quien toma la muestra, pudiendo generarse errores subjetivos al momento de interpretar la medición. El análisis estadístico de los datos obtenidos por medio de estos instrumentos mostró diferencias significativas asociadas a los tratamientos y las variedades (Cuadro No. 8).

Para el promedio de las variedades, las determinaciones de SPAD a R0 mostraron que el T3 fue diferente a los demás tratamientos, diferencia que desapareció en etapas avanzadas del cultivo (R3). Según Pocojeski et al. (2012), existen ocasiones donde el hecho de realizar la medición con SPAD en una hoja dada, no representa el estado nutricional de toda la planta, tendiendo a no mostrar diferencias entre tratamientos.

Por otro lado, para el promedio de los tratamientos, el análisis de varianza mostró diferencias entre los ideotipos de arroz, las que se mantuvieron en R0 y R3. En tal sentido las 2 variedades del ideotipo japónica (INIA Tacuarí y Parao) presentaron valores de SPAD 13% y 18% superiores a los ideotipos indica (EP 144 e INIA Olimar) en R0 y R3 respectivamente. Las diferencias entre valores de SPAD encontradas en nuestro trabajo son similares a las reportadas por Huang et al. (2008), quienes atribuyen valores entre 35 y 37 unidades de SPAD para variedades indicas mientras que para japónicas estos valores se sitúan en torno a 37-39 unidades.

El análisis estadístico de las lecturas con la LCC a R0 no presento diferencias asociadas a los tratamientos, hecho que si se manifestó a R3. En el caso de las variedades y para el promedio de los tratamientos, solo se constataron diferencias a R3 para la variedad INIA Tacuarí, la que fue diferente estadísticamente del resto.

Cuadro No. 8. Valores de LCC y SPAD en los estadios de R0 y R3 según los tratamientos de fertilización y las variedades utilizadas

Tratamientos	SPAD R0	SPAD R3	Variedad	SPAD R0	SPADR3
1	32,8 b	35,0 a	El Paso 144	31,4 b	33,4 c
2	33,4 b	35,1 a	INIA Olimar	31,4 b	31,2 d
3	35,2 a	35,8 a	Parao	35,5 a	37,2 b
4	33,2 b	34,8 a	INIA Tacuarí	35,6 a	39,0 a
5	32,8 b	35,4 a			
p-valor	0,0008	0,59	p-valor	<0,0001	<0,0001
Tratamientos	LCC R0	LCC R3	Variedad	LCC R0	LCC R3
1	3,0 a	2,8 c	El Paso 144	3,0 a	3,0 a
2	3,0 a	2,8 bc	INIA Olimar	2,9 a	3,0 a
3	3,0 a	3,2 a	Parao	3,0 a	3,0 a
4	2,9 a	2,9bc	INIA Tacuarí	3,0 a	2,8 b
5	3,0 a	3,0 b			
p-valor	0,53	0,0014	p-valor	0,20	0,0049

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

4.2 LECTURA DE ENFERMEDADES

La mancha agregada de las vainas (*Rhizoctonia oryzae sativae*) y el manchado de vainas (*Rhizoctonia oryzae*), junto con la Podredumbre del Tallo (*Sclerotium oryzae*) son los principales organismos causantes de problemas sanitarios en el cultivo de arroz en Uruguay (Ávila, 2001). Es por esto que fueron analizadas estas enfermedades en R3 y cosecha, momentos donde se da el mayor progreso de estas enfermedades.

En R3 se encontraron diferencias significativas entre tratamientos de fertilización y variedades para podredumbre de tallo (SO), y entre variedades para mancha agregada de la vaina (ROS). A la cosecha, tanto para SO como ROS las diferencias estuvieron asociadas a las variedades, no observándose efecto significativo de los tratamientos de fertilización (Cuadro No. 9).

Existe información que sostiene que mayores niveles de incidencia y severidad de enfermedades son encontrados conforme aumentan los niveles de fertilización N (Deambrosi y Méndez 1993b, Ávila 2001). En nuestro trabajo, a pesar de estos antecedentes, no hubo efecto de los tratamientos sobre ROS en R3 y cosecha, al igual que SO a cosecha. Para este patógeno, solo se encontraron efecto de los tratamientos en R3. Esto último, concuerda con los autores antes citados, ya que el tratamiento de mayor fertilización nitrogenada fue el que presentó mayor incidencia de SO. Una posible explicación a esto son

las diferencias en las densidades utilizadas en el pasado (200 kg ha⁻¹) y las utilizadas en el ensayo (138 kg ha⁻¹). En tal sentido menores densidades como las utilizadas en este experimento pudieron minimizar las condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades.

Shipp (2005) en estudios realizados en Arkansas, Luisiana y Mississippi, asocia deficiencias de K con el aumento de incidencia y severidad en enfermedades, especialmente en mancha marrón (*Helminthosporium oryzae*) y SO. Norman et al. (2003), también afirman que el K aumenta la tolerancia de las plantas de arroz a las enfermedades y plagas. En nuestro estudio, esto podría haberse evidenciado en los tratamientos 2 y 5, los que tienen un muy similar agregado de P y N, siendo la diferencia el agregado o no de K. Esto no se evidencio, ya que no se pudo diferenciar entre ellos un mayor o menor ataque de enfermedades del tallo. El hecho de haber aplicado fungicida preventivo podría haber enmascarado lo reportado anteriormente. Deambrosi et al. (1991) intentaron comprobar el efecto benéfico del K frente a las enfermedades, pero de igual forma no se pudo obtener respuestas claras de tolerancia frente a estos patógenos. Al igual que los autores anteriores, Martínez y Escalante (2013) no encontraron diferencias significativas entre K y manchado de vaina a R3 y cosecha. Sin embargo, para podredumbre de tallo se encontró diferencias solo a cosecha en los tratamientos con agregado de K y fungicidas, independientemente de la dosis de N agregada.

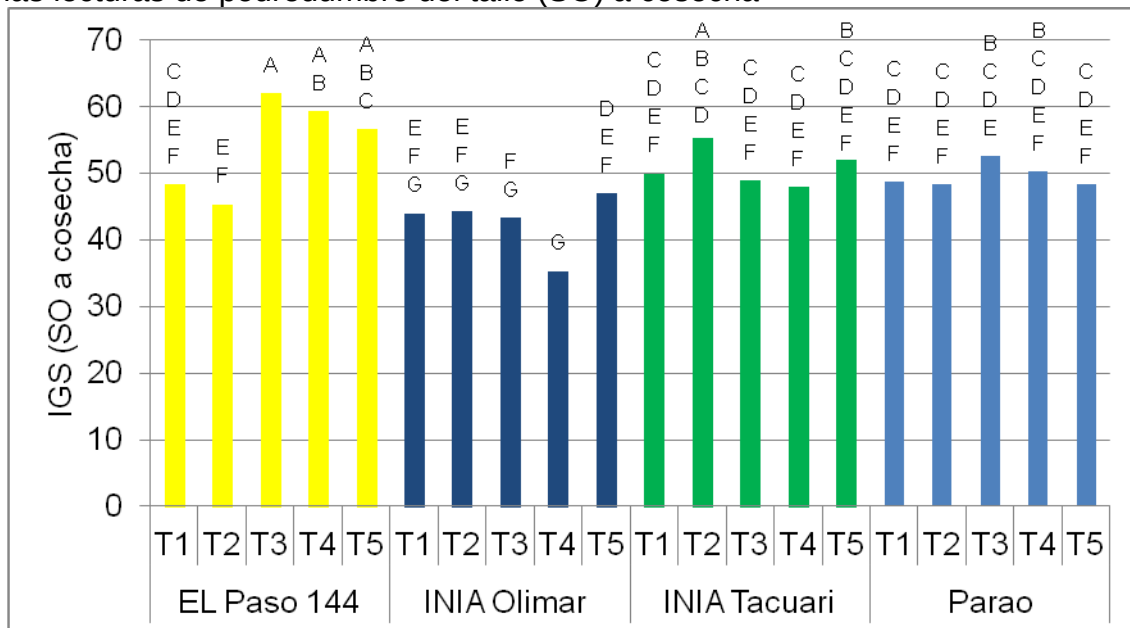
Cuadro No. 9. IGS para podredumbre de tallo (SO) y manchado de las vainas (ROS) en R3 y cosecha según efecto de los tratamientos de fertilización y las variedades utilizadas

Tratamientos	SO R3	SO Cos.	Variedad	SO R3	SO Cos.
1	2,0 c	47,75 a	El Paso 144	11,2 a	54,3 a
2	6,8bc	48,33 a	INIA Olimar	3,7 b	42,8 c
3	18,7 a	51,75 a	INIA Tacuarí	5,9 b	50,9 ab
4	9,1 b	48,25 a	Parao	12,7 a	49,7 b
5	5,2bc	51,00 a			
p-valor	<0,0001	0,28	p-valor	0,0003	<0,0001
Tratamientos	ROS R3	ROS Cos.	Variedad	ROS R3	ROS Cos.
1	0,11 a	1,18 a	El Paso 144	0,2 b	0,5 b
2	0,18 a	2,21 a	INIA Olimar	0,1 b	0,4 b
3	0,42 a	1,16 a	INIA Tacuarí	0,5 a	2,4 ab
4	0,27 a	1,79 a	Parao	0,1 b	3,3 a
5	0,11 a	1,87 a			
p-valor	0,09	0,85	p-valor	0,0028	0,0133

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

Cuando las lecturas de SO fueron realizadas a cosecha, se observó una interacción significativa entre las variedades y los tratamientos. Como se observa en la Gráfica No. 7, INIA Olimar fue la variedad menos atacada por este patógeno en los 5 tratamientos. Contrario a esto, el EP 144 fue quien más afectada se vio en 3 de los 5 tratamientos, de las dos variedades restantes, fue INIA Tacuarí quien presentó el mayor ataque. El T3 fue el que presentó los mayores efectos de este patógeno en las variedades EP 144 y Parao, quizás por su alta fertilización N como ya es mencionado por otros autores (Méndez et al., 2014). De todos modos, estos valores de SO son de poca significancia para el cultivo en cuanto merma de rendimiento. Ávila (2000) reporta que valores de IGS entorno al 50% producen merma de rendimientos inferiores al 10%, algo que quizás se constata con la correlación baja y no significativa ($r=0,03$; $p=0,84$) obtenida entre esta enfermedad y el rendimiento para este trabajo.

Gráfica No. 7. Interacción entre efecto de los tratamientos y las variedades, en las lecturas de podredumbre del tallo (SO) a cosecha



4.3 RENDIMIENTO EN GRANO

Sin dudas la variable rendimiento es la que presenta mayor importancia, debido a que es la que engloba los resultados de manejo realizadas durante el ciclo del cultivo. En nuestro caso, el análisis estadístico mostró diferencias significativas en el rendimiento en grano alcanzado debido a los tratamientos de fertilización ($p<0,001$) y a las variedades utilizadas ($p<0,0001$).

Los tratamientos 4 y 5 fueron estadísticamente iguales y superiores a los restantes tratamientos. La excepción fue el T3 el cual se comportó de forma intermedia. Este último, solo se diferenció estadísticamente del T1, el cual como era de esperar obtuvo la menor producción ya que no fue fertilizado. De todas formas, el hecho de haber alcanzado una productividad de $10,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ es de destacar, posibilitado seguramente por las buenas aptitudes del suelo en donde se instaló el ensayo (Gráfica No. 8). Dolmat et al. (1980) reportan producciones de arroz en Luisiana que van desde 2,3 hasta $5,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ en experimentos sin agregado de N conducidos en 31 localidades. Más recientemente Roberts et al. (2012) en el mismo estado de Luisiana, en ensayos dirigidos al manejo de la fertilización del cultivo de arroz, observaron rendimientos superiores ($7,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) a los reportados por Dolmat et al. (1980) en los tratamientos sin agregado de N. De igual forma estos rendimientos se ubican por debajo de los obtenidos en este trabajo en los tratamientos sin fertilización. Las diferencias entre estos dos sistemas productivos podrían estar explicadas por el tipo de rotación (arroz-pasturas) y la corta historia de uso del suelo donde se instaló el ensayo, en comparación a los suelos de Luisiana caracterizados por un mayor desgaste a causa de un uso intenso y una mayor historia agrícola. Según IPNI (2013), en cultivos de arroz fertilizados la cantidad de nutrientes movilizadas para producir una biomasa total similar a la del T1 corresponde a 191 kg de N, 37 kg de P y 183 kg de K. En nuestro caso aun siendo un tratamiento sin fertilización, el suelo fue capaz de suministrar el 79% de los valores de N y P utilizados como referencia y el 51% del K. Cabe aclarar que en la base de datos utilizada por este instituto, predominan variedades antiguas utilizadas en Asia, las que tenían en sus características una alta acumulación de paja. Es por esto, que posiblemente los altos valores reportados tomados como referencia en este ejemplo, estén asociados a una alta concentración de K en esa fracción. Otro aspecto relacionado a los altos valores reportados es debido a que los datos surgen de situaciones donde el cultivo se encuentra en “consumo de lujo”, lo que trae aparejado mayores extracciones. Otro indicador que refleja la buena aptitud para la producción de arroz del suelo donde se instaló el ensayo, son los kg de N absorbidos por el T1. Dicho tratamiento absorbió 151 kg de N durante todo el ciclo del cultivo, lo cual equivale para el promedio de las variedades a una absorción diaria de 1,12 kg de N. Dobermann y Fairhurst (2000) reportan absorciones diarias de 1,15 kg de N en situaciones con nutriciones balanceadas y óptimas condiciones de crecimiento. De igual forma Quintero et al. (2011) publican absorciones diarias de 1,01 kg de N en el tratamiento testigo y de 1,21 a $1,37 \text{ kg de N día}^{-1}$ en los tratamientos fertilizados, siendo estos datos muy similares a los reportados por los autores antes mencionados y a los observados en este trabajo. No obstante y a modo de resumen, el rol del suelo como proveedor de nutrientes al cultivo queda de manifiesto con los valores obtenidos.

La respuesta en rendimiento de los tratamientos de fertilización frente al testigo absoluto (T1) fue mayor en los tratamientos 4 y 5 (11,6% y 10,3% respectivamente), mientras que con el T2 solo se alcanzó un 1,6%. En el caso del T3, la respuesta fue de 6,3%. Estos incrementos en rendimiento muestran la superioridad lograda con el manejo objetivo de los nutrientes respecto a los de dosis fija, tanto en altas como en bajas dosis.

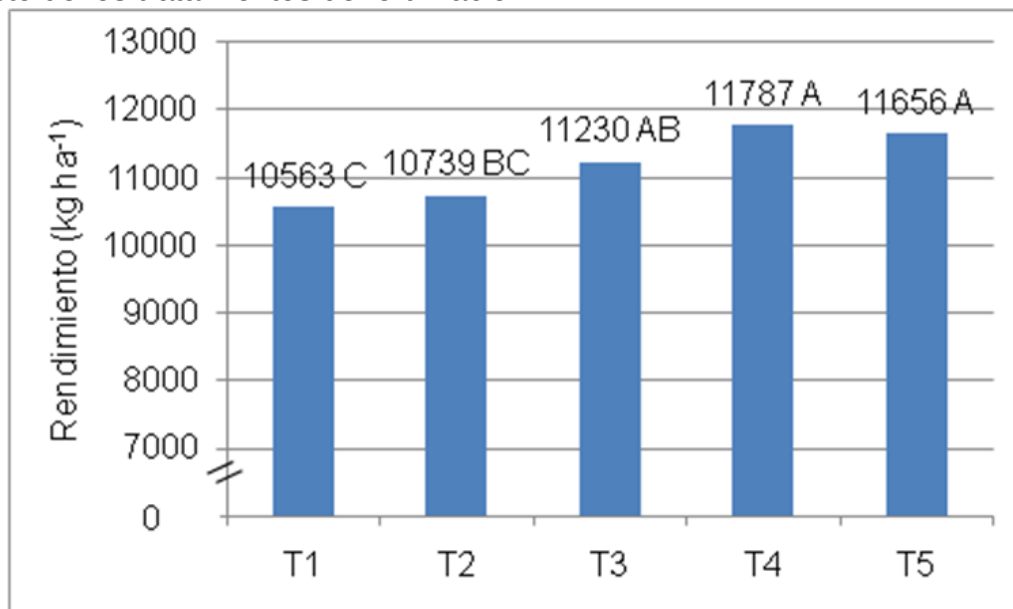
En el caso del T5, las dosis de nutrientes utilizadas no solo permitieron alcanzar altos rendimientos, sino que como se verá más adelante, también en una reducción en la cantidad total de fertilizante utilizado. En promedio, los tratamientos 4 y 5 (similares en rendimiento absoluto e iguales estadísticamente) superaron en un 9,1% al rendimiento del T2, el cual representa al testigo comercial (situación típica a nivel productivo).

Como se mencionó en el párrafo precedente, el alto rendimiento alcanzado por el testigo absoluto hizo que no se detectaran diferencias significativas con el testigo comercial (T2). En situaciones reales, en sistemas arroceros de mayor intensidad respecto al utilizado en este experimento, seguramente existirían diferencias en los rendimientos alcanzados con manejos que simulan estos tratamientos.

Por otro lado, el rendimiento alcanzado por el T3 estuvo en una posición intermedia entre los grupos de tratamientos de altos (T5 y T4) y bajos (T2 y T1) rendimientos, indicando que grandes cantidades de fertilizante agregado al cultivo, no se tradujeron en mayores rendimientos. Similares resultados obtuvieron Roberts et al. (2012) en Luisiana, donde con 168 kg de N ha⁻¹ no obtuvieron respuesta en rendimiento en comparación al agregado de 106 kg ha⁻¹, logrando los dos tratamientos un rendimiento muy similar.

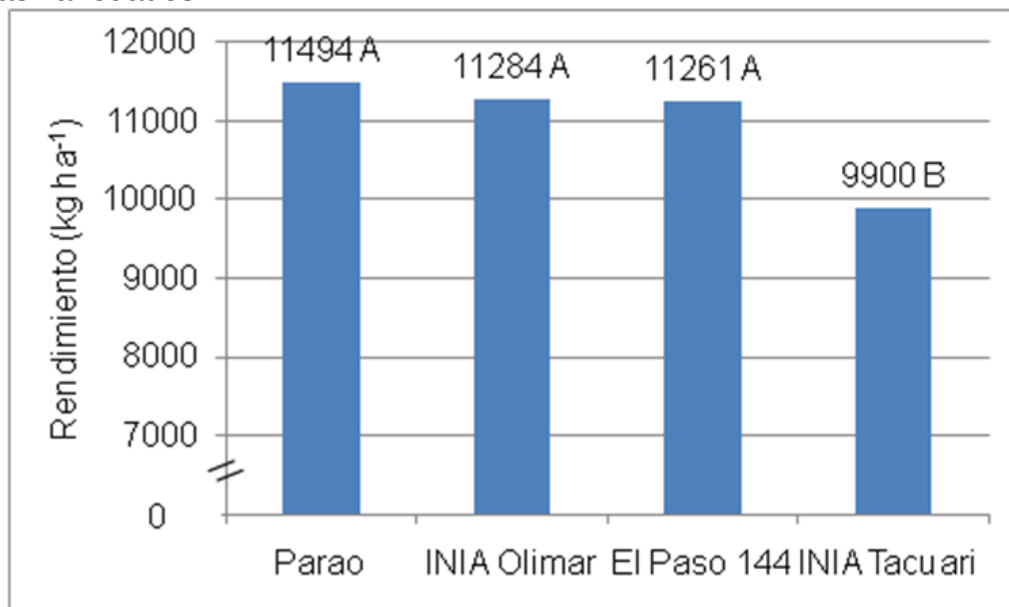
Cabe resaltar que a pesar de que los tratamientos 4 y 5 fueron iguales estadísticamente en producción de grano, estos se diferenciaron en el agregado o no de P (T4= 17 kg ha⁻¹ y T5= 0). Esto último quizás reafirma lo descrito por Hernandez y Berguer (2003) para este cultivo, los cuales describen como zona de no respuesta a los niveles de P en suelo iguales o superiores a 7 mg kg⁻¹.

Gráfica No. 8. Rendimiento en grano sano, seco y limpio (kg ha^{-1}) según el efecto de los tratamientos de fertilización



Para el promedio de los tratamientos, el estudio de las variedades muestra que INIA Tacuarí fue la única variedad en diferenciarse estadísticamente, alcanzando una productividad 13% inferior respecto al promedio de las restantes (Gráfica No. 9). Estos resultados son similares a los reportados por Molina et al. (2011) quienes en una serie de 7 años determinaron rendimientos (kg ha^{-1}) de la variedad INIA Tacuarí 7% menores al promedio de las otras variedades evaluadas. Según Gamarra (1996) no es esperable encontrar diferencias en rendimiento entre INIA Tacuarí y EP 144 cuando estas variedades son sembradas en una fecha óptima. No obstante las productividades reportadas por este último autor son menores a las conseguidas en este ensayo, siendo posible que en esos casos no se hubiese estado cercano al potencial de rendimiento.

Gráfica No. 9. Rendimiento en grano sano, seco y limpio (kg ha^{-1}) según efecto de las variedades



4.4 COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

El rendimiento fue desglosado en sus tres principales componentes (panojas por m^2 , granos por panoja y peso de mil granos), intentando comprender el peso que le confiere cada uno de ellos al resultado final.

El efecto de los tratamientos no provocó cambios significativos en el número de granos m^{-2} , si encontrándose diferencia entre las variedades (Cuadro No. 10). INIA Tacuarí fue la variedad con el mayor número de granos llenos por panoja (NGLLP), siendo un 30% superior al promedio de las restantes variedades. Esta variedad, también fue la que logró el mayor número de granos por m^2 . No obstante, a pesar de esto, INIA Tacuarí fue la única variedad en diferenciarse estadísticamente de las restantes por su menor rendimiento. En este caso, la superioridad en número de granos por unidad de superficie de INIA Tacuarí no pudo absorber el menor peso de grano respecto a las demás variedades (Cuadro No. 11), lo que se tradujo en un menor rendimiento (Gráfica No. 8).

Cuadro No. 10. Número de granos (Gr.) llenos por panoja y de granos por m² según efecto de los tratamientos de fertilización y las variedades

Tratamiento	Gr. panoja ⁻¹	Gr. m ²⁻¹	Variedad	Gr. panoja ⁻¹	Gr. m ²⁻¹
1	103 a	49198 a	EP 144	78 c	44555 bc
2	91 ab	45166 a	INIA Olimar	78 c	41460 c
3	85 b	43480 a	INIA Tacuarí	124 a	59900 a
4	95 ab	53830 a	Parao	99 b	49777 b
5	101 a	52942 a			
p-valor	0,029	0,11	p-valor	<0,0001	0,0004

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

Los diferentes tratamientos provocaron cambios significativos en el número de granos llenos por panoja y en las panojas por m². Esto no ocurrió con el componente PMG, el que si presentó diferencias significativas entre cultivares como era de esperar (Cuadro No. 11). En el caso del cultivo de arroz este componente es el menos afectado por el ambiente, debido a que el crecimiento del grano se ve limitado por su cubierta rígida, por lo cual las diferencias encontradas son debidas a las características genéticas de cada variedad (Yoshida, 1981). Las variedades EP 144 e INIA Olimar obtuvieron los mayores pesos (28,1 y 28,4 gr cada mil granos), siendo mayores a los obtenidos por Parao e INIA Tacuarí tal cual muestra la información.

Cuadro No. 11. Peso de mil granos (PMG) según efecto de los tratamientos y de las variedades

Tratamiento	PMG (gr)	Variedad	PMG (gr)
1	26,5 a	EP 144	28,1 a
2	26,3 a	INIA Olimar	28,4 a
3	25,8 a	INIA Tacuarí	21,6 c
4	26,5 a	Parao	27,0 b
5	26,0 a		
p-valor	0,06	p-valor	<0,0001

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

El mayor número de panojas por m² fue obtenido con los tratamientos 3, 4 y 5, los que no difirieron estadísticamente entre sí (Cuadro No. 12). Tomando como base al testigo comercial (T2), fueron agregados 166 y 64% más de N en los tratamientos 3 y 4, mientras que al T5 se le adicionó la misma

cantidad de N. La diferencia en este último fue la adición 40 kg de K_2O ha^{-1} , y una mayor proporción del N total en las coberturas a macollaje y primordio lo que quizás haya favorecido el macollaje, aumentando el número de panojas por m^2 .

En la misma línea, se puede observar los diferentes comportamientos asociados entre el número de panojas y el IAF. Mientras que no fue posible diferenciar estadísticamente entre los tratamientos 3, 4 y 5 en cuanto al número de panojas por m^2 , si fue posible detectar diferencias en el IAF obtenido por estos tres tratamientos. El T3 fue el que logro el mayor IAF (Cuadro No. 7), muy posiblemente debido a la alta fertilización N, como lo reportan Dobermann y Fairhurst (2000), seguido en orden decreciente por los tratamientos 4 y 5, los cuales copian el agregado de N.

Cuadro No. 12. Número de panojas por metro cuadrado en función al efecto de los tratamientos de fertilización y a las variedades

Tratamiento	Panoja m^{-2-1}	Variedad	Panoja m^{-2-1}
1	485 b	EP 144	561 a
2	502 b	INIA Olimar	535 ab
3	518 ab	INIA Tacuarí	482 b
4	578 a	Parao	507 b
5	522ab		
p-valor	0,0407	p-valor	0,0298

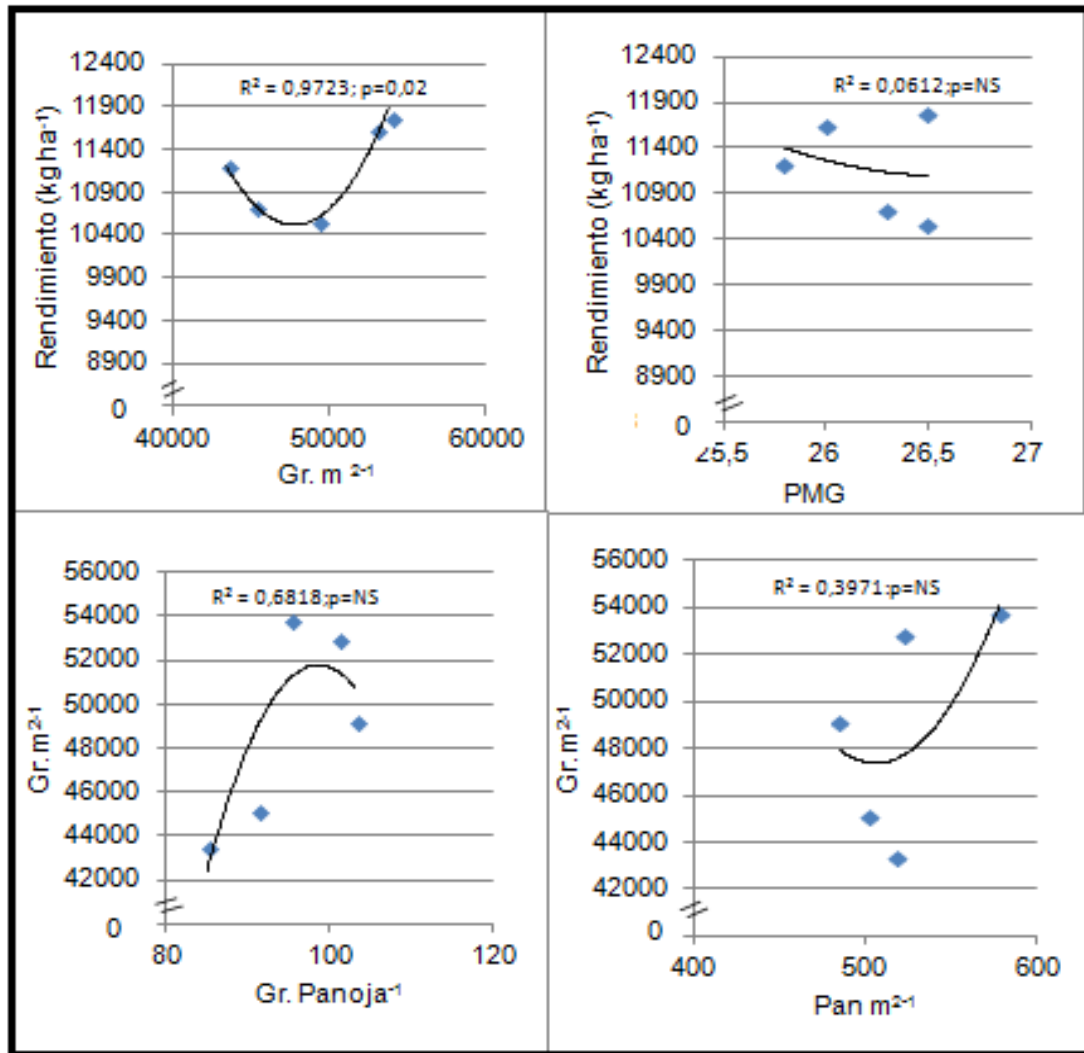
Medias poblacionales que no comparten letras en la misma columna son estadísticamente diferentes según el test de LSD de Fisher al 5%.

Las diferencias estadísticas que se observaron en la producción de panojas por variedades, estuvieron dadas por características propias de cada cultivar. INIA Olimar y EP 144 obtuvieron valores muy cercanos a los reportados por Deambrosi et al. (2003) de 565 y 539 panojas por m^2 respectivamente. Estos dos cultivares presentaron una mayor cantidad de panojas debido a factores genéticos que predispusieron un macollamiento abundante. Esto no sucedió en las variedades Parao e INIA Tacuarí las que presentan un macollamiento regular como lo demuestra Cassou (2011) en la red de evaluación de cultivares de INIA-INASE.

La Gráfica No. 10, asocia el rendimiento en grano con sus respectivos componentes según el efecto de los tratamientos. En estas se observa que solo fue significativa la relación entre el rendimiento y los granos m^2 , siendo esta última variable la de mayor relevancia en determinar los kg ha^{-1} producidos. Las

demás relaciones mostraron simples tendencias entre las variables las cuales se podrían atribuir a errores de muestreo.

Gráfica No. 10. Relación entre rendimiento (kg ha^{-1}) y granos m^{-2} (Gr. m^{-2}), rendimiento y peso de mil granos (PMG), granos m^{-2} y granos panoja m^{-2} y granos m^{-2} y panojas m^{-2} según el efecto de los tratamientos.



4.5 CALIDAD MOLINERA

La calidad molinera es un parámetro que tiene asociado premios y castigos, los que bonifican o penalizan al rendimiento alcanzado a nivel de campo. En nuestro trabajo, el efecto de los tratamientos generó cambios en el porcentaje de granos blancos y vanos, no observándose diferencias en los

restantes parámetros de calidad (Cuadro No. 13). El T3, fue el único en diferenciarse estadísticamente del resto por su mayor porcentaje de granos vanos. Esto podría deberse a la predisposición al daño por bajas temperaturas en el período crítico generado por el agregado de altas dosis de N. Amano, citado por Nakamura et al. (1999) menciona que la interacción entre alto contenido de N en hoja y bajas temperaturas aumenta significativamente la esterilidad de la espiguilla.

Por otro lado, el análisis por variedad mostró diferencias significativas en todas las variables evaluadas (Cuadro No. 14). INIA Tacuarí fue la variedad que difirió en mayor medida del resto, presentando un menor porcentaje de blanco, mayor porcentaje de granos enteros y por lo tanto menor de quebrados, mayor número de granos potenciales y un mayor porcentaje de granos vanos. Seguramente estos resultados estén asociados a factores genéticos particulares a esta variedad, ya que el hecho de contar con un grano más corto en relación a las otras variedades, genera un menor daño mecánico al momento del descascarado y pulido, lo que se traduce en mayor porcentaje de entero. De igual forma, las diferencias de granos vanos y yesados son características intrínsecas a cada variedad, si bien en ocasiones, son modificadas por variables climáticas.

Cuadro No. 13. Parámetros de calidad molinera según efecto de los tratamientos

	Blanco	Entero	Quebrado	Manchado	Yeso	Vanos
Tratamiento	Porcentaje					
1	70,6 ab	62,6 a	8,0 a	0,2 a	2,6 a	13 b
2	70,0 c	62,6 a	7,5 a	0,3 a	3,8 a	16 b
3	70,2 bc	60,3 a	9,9 a	0,3 a	2,4 a	19 a
4	70,6 ab	62,6 a	8,0 a	0,2 a	2,9 a	14 b
5	70,8 a	61,8 a	9,0 a	0,2 a	4,0 a	13 b
p-valor	0,0385	0,45	0,39	0,58	0,14	0,0001

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

Cuadro No. 14. Parámetros de calidad molinera según efecto de las variedades

	Blanco	Entero	Quebrado	Yeso	Vanos	Manchado
Variedad	Porcentaje					
EP 144	70,4 a	61,0 b	9,5 a	2,8 b	12 b	0,3 a
INIA Olimar	70,6 a	60,1 b	10,4 a	1,4 c	14 b	0,5 a
INIA Tacuarí	69,9 b	64,6 a	5,3 b	3,5 b	22 a	0,0 b
Parao	70,9 a	62,2 ab	8,7 a	4,9 a	13 b	0,2 b
p-valor	0,0052	0,017	0,0025	<0,0001	<0,0001	<0,0001

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

En términos absolutos, y para este año en particular, la calidad molinera influyó positivamente en el rendimiento final alcanzado. En tal sentido, la mayor bonificación fue obtenida con INIA Tacuarí, la cual incremento su rendimiento sobre la base de campo en un 3% (296 kg ha⁻¹). Para las restantes variedades la bonificación alcanzada fue de 2,5% (293 kg ha⁻¹), 1,4% (161 kg ha⁻¹) y 0,8% (90,4 kg ha⁻¹) para Parao, EP 144 e INIA Olimar respectivamente. Estos premios en rendimiento estuvieron correlacionados positivamente con el porcentaje de granos enteros ($r= 0,95$; $p<0,0001$) y negativamente con el porcentaje de granos quebrado ($r= -0,89$; $p<0,0001$) y manchado ($r= -0,48$; $p<0,0001$). Posiblemente la inexistencia de períodos de humedad y amplitudes térmicas bajas, pueden haber contribuido a contar con buenos porcentajes de granos enteros lo cual explica los premios obtenidos.

4.6 ÍNDICE DE COSECHA

El IC es la relación entre el rendimiento de grano con el rendimiento biológico (Donald y Hamblin, 1976). Para éste se detectaron diferencias significativas en función a las fertilizaciones y las variedades (Cuadro No. 15).

Los tratamientos 3 y 4 presentaron los menores IC, siendo esto explicado por una excesiva producción de paja aún logrando altos rendimientos. Este aspecto fue observado desde etapas tempranas del cultivo (R0 y R3) siendo estos dos tratamientos (3 y 4) los de mayor acumulación de MS (Cuadro No. 6). Este mismo fenómeno ocurrió con las variedades de tipo índica. Las cuales, al igual que ocurrió con los tratamientos de fertilización que agregaron más fertilizante, obtuvieron un menor IC debido a su mayor producción de biomasa, la que también se pudo observar desde etapas tempranas de desarrollo (R3, Cuadro No. 6).

Cuadro No. 15. Índice de cosecha (IC) y MS de paja del cultivo según los efectos de los diferentes tratamientos de fertilización y las variedades

Tratamiento	IC	MS de paja (kg ha ⁻¹)	Rend. (kg ha ⁻¹)
1	0,58 a	6537 c	10563 c
2	0,56 a	7122 bc	10739 dc
3	0,52 b	9019 a	11230 ab
4	0,53 b	8842 a	11787 a
5	0,57 a	7498 b	11656 a
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Variedad	IC	MS de paja (kg ha ⁻¹)	Rend. (kg ha ⁻¹)
EP 144	0,53 c	8667 a	11261 a
INIA Olimar	0,55 bc	8194 a	11284 a
INIA Tacuarí	0,56 b	7177 b	9900 b
Parao	0,58 a	7177 b	11494 a
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001

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

4.7 EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO

Dentro del término eficiencia de uso del N están contemplados varios parámetros, siendo los más referidos la Eficiencia Agronómica (EA) y la Eficiencia de Recuperación Aparente (ERA) (Cassman et al., 1996). Según estos autores, estos dos indicadores engloban parámetros biológicos (EA y ERA) mientras que otros como el Factor Parcial de Productividad (FPP) son cálculos matemáticos. En nuestro trabajo, como ya se explicó en materiales y métodos, hay que hacer la salvedad de que el cálculo de las eficiencias de uso del N considera también dosis diferentes de P y K, las que acompañan a cada tratamiento. En tal sentido, se asume que estos otros nutrientes (P y K) no interactúan con el N, no teniendo efecto sobre la eficiencia del N propiamente dicha. En parte, esto es asumido así ya que los niveles iniciales de estos nutrientes en suelo eran elevados y entorno a los niveles de suficiencia del cultivo.

Pittelkow et al. (2016) mencionan que desde el año 2010, se constata en el sistema arrocerero uruguayo un aumento en las dosis de N agregadas, las que no alteraron la EUN (kg de grano por kg de N aplicado) debido a un acompañamiento de los rendimientos los que han ido al alza. En nuestro caso

los tratamientos 4 y 5 presentaron una alta EA en comparación a la reportada por otros autores como se verá más adelante.

Para el promedio de las variedades se encontró efecto significativo de los tratamientos de fertilización en la EA_N y ERA_N . No fueron detectadas interacciones variedad por tratamiento (Cuadro No. 16).

El análisis mostró mayores EA_N en los T4 y T5, siendo el promedio de estos dos tratamientos 4,35 veces superior al promedio de los restantes tratamientos. El T5 fue el que logro la mayor EA_N , debiéndose esto a que combinó una alta producción de grano con un bajo agregado de N. El T4 tuvo rendimientos similares al T5, pero con una menor EA_N ya que se le adicionó mayores cantidades de N. El testigo comercial (T2) a pesar de tener mayores rendimientos que el testigo absoluto (T1), obtuvo EA_N menores ya que el T1 no se fertilizo y obtuvo rendimientos buenos por razones antes mencionadas. El T3 a pesar de tener un muy buen rendimiento obtuvo una EA_N baja, ya que le fueron agregadas altas dosis de fertilizante nitrogenado. En términos generales, la mayores EA_N estuvieron vinculadas con manejos objetivos de la fertilización (T4 y T5). La ERA_N no mostró grandes cambios entre tratamientos a pesar de mostrar diferencias significativas, pero nuevamente fue el T5 el que logro la mayor utilización del N, logrando la mayor absorción del nutriente por kilogramo agregado, como se ve en el Cuadro No. 16. Si bien los tratamientos 2 y 5 tuvieron un similar agregado de N, las ERA_N del T5 fue superior a la del T2. Una posible causa de esto podría ser el diferente fraccionamiento del fertilizante N, donde al tratamiento 5 se le adicionó 0%, 37% y un 63% en S0, V6 y R0 respectivamente, mientras que al T2 fue de 28%, 36% y 36% en S0, V6 y R0 respectivamente. Según Diekmann (1993) el agregado de un mayor porcentaje del N cercano a la etapa reproductiva generaría una mayor ERA_N , explicando quizás los resultados obtenidos en nuestro trabajo.

Los valores de ERA_N obtenidos con los tratamientos 3, 4 y 5 están acordes a los valores esperados (0,30 a 0,50 kg kg⁻¹) reportados por Doberman y Cassman (2004), salvo el T2 que presento valores por debajo a los normales. Si bien existen otros métodos para medir ER, como lo son las técnicas isotópicas de ¹⁵N, estos mismos autores señalan que el método de recuperación aparente refleja más fielmente lo que sucede en condiciones de campo, debido a los procesos que le ocurren al N en el suelo en interacción con los microorganismos.

Las EA_N de los tratamientos 4 y 5 son similares a otras obtenidas en trabajos conducidos por INIA, las cuales mediaron 15,3 Kg de arroz kg⁻¹ de N, si bien los rendimientos obtenidos en esos trabajos fueron de 7,5 Mg ha⁻¹. Otros autores también han reportado datos de eficiencia agronómica entorno a las

anteriores. Cassman et al. (1996) estimaron ganancias de 15 a 18 kg de arroz por kg de N en Filipinas y Wang (2001) reportó datos de 6,1 kg de arroz por kg de N en la provincia de Zhejiang, China. Peng et al. (2006) al igual que Cassman et al. (1996) publican datos 15 a 18 kg de arroz Kg^{-1} de N en China. Alineado con lo que se mencionó arriba los rendimientos logrados en estos trabajos estuvieron entorno a los $7,3 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Cuadro No. 16. Eficiencia de uso del nitrógeno

Tratamientos	EA kg kg^{-1}	ERA kg kg^{-1}
1	-	-
2	2,8 c	0,21 b
3	3,9bc	0,38 a
4	12,0 ab	0,39 a
5	17,1 a	0,40 a
p-valor	0,0005	<0,0001

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

El ajuste objetivo de nutrientes, como parte de un manejo general objetivo del cultivo es una práctica que ha requerido la atención de equipos de investigación en varias partes del mundo con el fin de aumentar los rendimientos en grano, la rentabilidad económica y la eficiencia de uso de los nutrientes. Trabajos de Khurana et al. (2008) reportan aumentos en el rendimiento del 12% mientras que le EA fue superior en 83%. Otros trabajos (Dobermann et al., 2002) muestran aumentos del orden del 7% en el rendimiento cuando se ajustó el uso de nutrientes junto al paquete de manejo, de la misma forma que la EA pasó del $11,5$ a $14,8 \text{ kg kg}^{-1}$.

4.8 BALANCE APARENTE DE NUTRIENTES

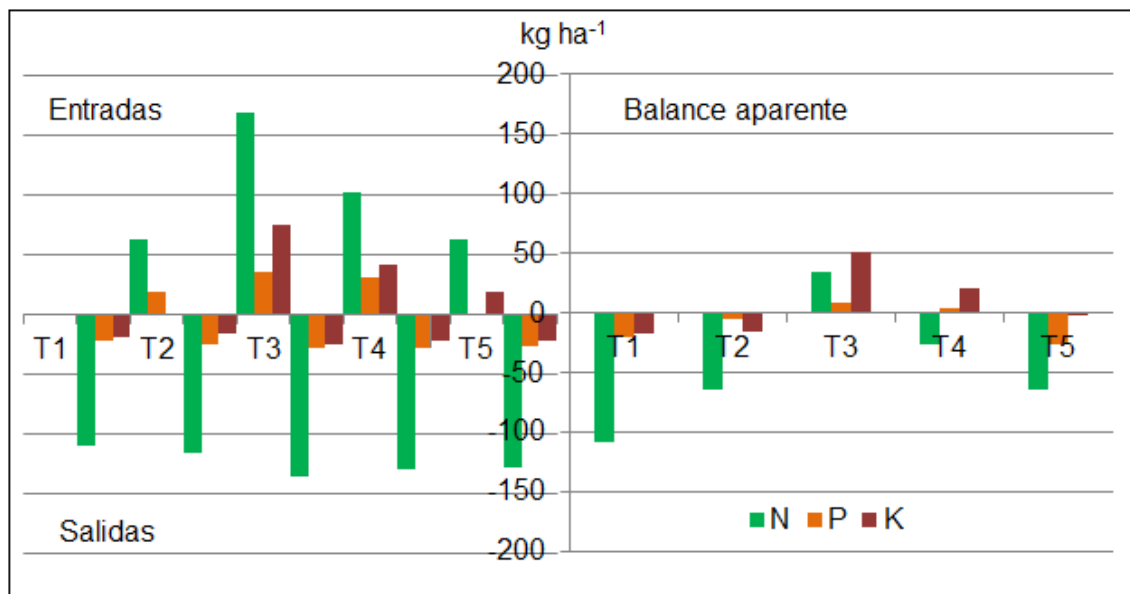
Éste parámetro es tomado como un indicador de sustentabilidad al momento de evaluar un sistema de producción. De forma muy simple cuantifica las entradas y salidas del sistema, dando un panorama al momento de cuantificar los excesos o deficiencias en la fertilización. Balances positivos evidencian un ingreso de nutriente al cultivo por sobre sus requerimientos, lo cual puede generar problemas ambientales o de gasto excesivo o innecesario de insumos. Contrario a esto, balances negativos en suelos de baja fertilidad generan alarma en lo que refiere a una disminución en la fertilidad de suelos.

Asociado a nuestro trabajo, los tratamientos de fertilización evaluados, generaron diferencias significativas en el balance aparente de N, P y K (Gráfica No. 11). Lógicamente, los balances más negativos fueron obtenidos con el T1,

el que no fue fertilizado y donde todo lo exportado por el cultivo se tradujo en pérdidas de nutriente para el sistema. En forma contraria, el T3 generó los balances más positivos, asociados a una alta fertilización y a que los rendimientos si bien aumentaron, no llegaron a un nivel que logre una situación de neutralidad o pérdida. Los demás tratamientos generaron balances negativos, con excepción del T4 el que generó un balance positivo para P y K.

Comparando los balances de los tres nutrientes, la mayor variación se dio con el N. Este nutriente presentó una correlación positiva ($r=0,57$; $p<0,0001$) entre la exportación y el agregado (a mayor agregado de N, mayor exportación de N). La excepción a esto se dio entre los tratamientos 1 y 2, los cuales no presentaron diferencia estadísticas en la extracción de nutrientes, considerando que el T1 no fue fertilizado y el T2 adicionó menor cantidad de N en comparación con los otros tratamientos.

Gráfica No. 11. Entradas, salidas y balance aparente de nutrientes para N, P y K (kg ha^{-1}) según los tratamientos de fertilización



En términos de balance de N, a excepción del T3, los restantes tratamientos presentaron valores negativos. El testigo comercial (T2) tuvo un balance negativo de $52 \text{ kg de N ha}^{-1}$, similar a la reportada por Mancassolo y Casanova (2015) del orden de $81 \text{ kg de N ha}^{-1}$ para el cultivo de arroz en nuestro país. Si bien parece una pérdida que sostenida en el tiempo puede causar gasto de N del sistema vía mineralización de la MO, las características productivas hacen que la baja intensidad de cultivo enlentezca este proceso.

Debido a que estos balances son realizados solo en la fase de cultivo, sería oportuno considerar los restantes componentes de la rotación. El hecho de que el 22% del área nacional destinada al cultivo de arroz sea en rotación con pasturas que incluyen leguminosas en sus mezclas (Ricchetto et al., 2013) puede reponer en esas situaciones vía fijación biológica las cantidades de N que salen del sistema. Por otro lado, en el actual sistema productivo donde las pasturas vienen siendo desplazadas por otros cultivos como el sorgo y la soja, manteniendo el paquete tecnológico actual podría significar balances de N aún más negativos.

A diferencia del N, el P no tuvo grandes cambios en la exportación vinculado al tratamiento, quizás debido al contenido inicial de P en suelo, el que se encontraba en un nivel de suficiencia para el cultivo. Las diferencias en el balance de este nutriente en este caso, estuvieron explicadas mayormente por el agregado de fertilizante en cada tratamiento. En tal sentido, el T3 presentó el balance más positivo generando una ganancia neta de 8 kg de P ha⁻¹ mientras que el T5, el cual no se fertilizó con P, generó la mayor pérdida neta (26 kg ha⁻¹). Esta pérdida no se debería tomar de forma estricta como negativa, ya que el T5 no fue fertilizado debido a que el nivel de P en suelo se encontraba en un nivel de suficiencia para el cultivo. Esto seguramente se deba a la larga historia de fertilización fosfatada que tiene el sistema donde se instaló el experimento, similar a lo que ocurre en los suelos arroceros del este del país (Méndez et al., 2015). Para el caso del testigo comercial (T2), el balance obtenido fue de -5 kg de P ha⁻¹, siendo esto nuevamente, muy similar a los datos publicados por Mancassolo y Casanova (2015). Estos autores estimaron una pérdida de 7 kg P ha⁻¹ en la producción de arroz uruguayo.

Si bien en las últimas décadas los niveles de P encontrados a nivel de campo indicarían que el balance de P ha sido positivo, situaciones de productividad entorno o mayores a los 10 Mg ha⁻¹ generarían una mayor extracción de nutrientes por el cultivo, haciendo el balance negativo. La información de los rendimientos medios alcanzados manejada a nivel nacional (Ricchetto et al., 2013) indicaría que los 20 kg de P agregado ha⁻¹ son suficientes para reponer el P exportado y generar un balance levemente positivo.

El K tuvo un comportamiento muy similar al del P, no mostrando grandes variaciones en extracción, debido nuevamente quizás a que el contenido de éste en suelo presento niveles entorno o levemente superiores a los reportados como zona de no respuesta para éste cultivo. El resultado de los balances estuvo muy marcado por el agregado del nutriente, y no por su extracción. El T2 generó una pérdida de 16 kg de K ha⁻¹, lo que sumado al hecho de una falta de cultura en el agregado de este nutriente pueda explicar por qué zonas pioneras en la producción de arroz incluyen desde hace un

tiempo en su plan de fertilización a este nutriente, asociándolo con el mantenimiento de altos rendimientos (INIA, 2011).

Tomando como base el manejo de fertilización a nivel país realizado hasta ahora, donde existen según esta información balances negativos, se podría especular que el contexto de producción de arroz realizado en nuestro país (rotación laxa arroz-pasturas) puede haber ayudado hasta ahora a dilatar potenciales deficiencias nutricionales que son comunes en otros sistemas de arroz continuo como los que se manejan en Asia. En contrapartida, aspectos estructurales como por ejemplo nuevas fuentes de agua que hagan a la intensificación agrícola, haría que este escenario cambiase.

4.9 NUTRIENTES EN SUELO A COSECHA

Ligado al punto anterior, el estatus nutricional del suelo luego de la cosecha del cultivo será un factor de importancia el cual puede depender del balance de nutrientes. Esto podría tener implicancias a la hora de atender los requerimientos nutricionales de los próximos cultivos (inmediatos o del próximo ciclo), en función del nivel de nutrientes remanente. En nuestro trabajo, el análisis de suelo realizado posterior a la cosecha, mostró diferencias significativas debido al efecto de los tratamientos (Cuadro No. 17).

En tal sentido, el análisis de la información mostró variaciones en el contenido de P del suelo a cosecha según el método de ácido cítrico. Según esta metodología de extracción el T3 fue diferente de los tratamientos que no agregaron P a la base (T1 y T5). Los restantes tratamientos se mostraron en forma intermedia entre los dos grupos mencionados anteriormente. Aquellos tratamientos que generaron los balances de P más negativos (T1 y T5) fueron los que presentaron las menores concentraciones de este nutriente en suelo, siendo inferiores al nivel de partida. En caso contrario el T3 que presentó el balance más positivo fue el que mostró a final de ciclo los niveles más altos de P en suelo. Por último, tanto el T4 como el T2 que tuvieron balances entorno a la neutralidad, manteniendo la concentración de P en suelo respecto al punto original. Considerando el T3, el agregado de dosis altas de P partiendo de niveles entorno al nivel de suficiencia del cultivo, aparte de presentar un balance positivo, generó que los niveles de este nutriente en suelo aumentara 30% respecto a la situación original. Resultados similares fueron reportados por Castillo et al. (2012a) quienes encontraron niveles 37% superiores a cosecha respecto al inicio luego del agregado de dosis de $86 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. En términos prácticos esto podría tener implicancia a la hora de instalar una pastura de leguminosas luego de la cosecha donde la oferta de nutrientes podría estar en torno a las necesidades de la pastura sin la necesidad de fertilizarla. En

términos generales existió una relación entre los niveles de P en suelo encontrados a cosecha con los balances de P del cultivo ($r=0,33$; $p=0,0097$).

Otro aspecto a considerar en el reciclaje de P en el sistema, es la cantidad de P remanente en el rastrojo del cultivo. Existen tratamientos que mantienen secuestrado en la paja cantidades de P equiparable a una cantidad de 60 kg ha^{-1} de fertilizante. Sachet (2011) menciona que la liberación de este nutriente puede ser lenta y permanecer en este residuo por un tiempo de 164 días, quedando aun un 30% de este nutriente retenido en paja. Esta desincronización entre la oferta y necesidad de P por el cultivo siguiente a la cosecha del arroz, sumado a la inmovilización microbiana que existirá una vez que este nutriente comience a liberarse, hará que este pool de P no tenga incidencia en los momentos de mayor necesidad del cultivo próximo.

Cuadro No. 17. Valores de P en suelo (mg kg^{-1}) según ácido cítrico en siembra y cosecha y contenido de P en rastrojo (kg ha^{-1})

	P		
	Análisis siembra	Análisis cosecha	Contenido en rastrojo
Tratamientos	Ácido cítrico (mg kg^{-1})		Kg ha^{-1}
1	8,2	7,5 b	7,3 d
2	8,2	8,6 ab	8,0 cd
3	8,2	10,6 a	12,5 a
4	8,2	8,9 ab	10,4 b
5	8,2	7,7 b	8,8 c
p-valor		0,0055	<0,0001

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

Para el caso del K, el hecho de haberse aplicado diferentes dosis según los tratamientos, no generó diferencias significativas en los valores de análisis de suelo a final del ciclo. Una posible causa de la falta de diferencias significativas en los valores del análisis de suelo de este nutriente, sería la falta de liberación de K por el rastrojo al suelo. Como lo reporta Sachet (2011) el 80% del K retenido en la paja de arroz es liberado entorno a los 40 días luego de la cosecha, aspecto que en nuestro trabajo no se manifestó ya que el muestreo fue realizado diez días pos cosecha. En concordancia con lo reportado por Sachet (2011) sí se encontraron diferencias significativas en el contenido de K en la paja de arroz, donde los tratamientos con agregado de K (T3, T4 y T5) presentaron los contenidos más altos de nutriente en paja (Cuadro No. 18). A su vez, el contenido de K en paja y el agregado de K como

fertilizante reportaron una correlación positiva ($r=0,4$; $p<0,001$), que si bien es de media a baja, daría un indicio de que la falta de diferencias de este nutriente en suelo, por efecto de los tratamientos, puede estar enmascarada por la falta de liberación de K por el rastrojo al suelo.

Cuadro No. 18. Valores de K en suelo según análisis en siembra y cosecha y contenido de K en rastrojo (kg ha^{-1})

	K		
	Análisis siembra	Análisis cosecha	Contenido en el rastrojo
Tratamientos	meq K/100g		Kg ha^{-1}
1	0,26	0,196 a	75,2 bc
2	0,26	0,194 a	69,1 c
3	0,26	0,204 a	96,1 a
4	0,26	0,203 a	90,2 ab
5	0,26	0,198 a	77,8 bc
p-valor		0,72	0,006

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

4.10 ANÁLISIS ECONÓMICO

No se detectaron diferencias significativas en ninguno de los indicadores económicos analizados debidos a las variedades utilizadas.

En cuanto al factor fertilización, como era de esperar, el agregado de cantidades contrastantes de fertilizante asociado a los tratamientos, generó efectos significativos en la simulación de costos, ingresos económicos y la estimación del margen de ganancia sobre costos directos. No obstante la variación encontrada tanto en costos como ingresos de los tratamientos evaluados parece baja, no superándose en ambos casos el 6%. Donde sí cobra magnitud esta variación es en los márgenes (20%) debido al efecto que tuvieron algunos tratamientos en cuanto a lograr altos rendimientos con bajo costo de fertilización y en forma contraria rendimientos moderados con alto costo de fertilización (Cuadro No. 19).

Cuadro No. 19. Costo total, ingresos económicos y margen de ganancia sobre costos directos en US\$/ha según tratamiento evaluado

Tratamientos	Costos Total (US\$/ha)	Costo Fertilizante (US\$/ha)	Ingresos (US\$/ha)	Margen (US\$/ha)
1	2053 e	0 e	2844 c	791bc
2	2200 c	147 c	2890bc	690 cd
3	2453 a	400 a	3021 ab	568 d
4	2272 b	219 b	3174 a	902 ab
5	2160 d	107 d	3138 a	978 a
p-valor	<0,0001	<0,0001	0,0004	0,0001
CV%	6,7	77,7	4,8	20,8
Desv. Est.	148,8	135,6	146,1	163,6
Media	2227,6	174,6	3013,4	785,8

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

Analizando cada indicador por separado, grandes cantidades de fertilizantes agregados (T3) implicaron lógicamente mayores costos. Esto significó un gasto extra del 12% comparado con el testigo comercial (T2). En la misma línea, el T4, que fue el segundo en agregar altas dosis de fertilizante fue el segundo tratamiento en tener los mayores costos. El tratamiento más económico (evidentemente sin considerar el testigo absoluto T1) fue el T5, el cual difirió estadísticamente del testigo comercial (T2) siendo este aceptado a nivel de producción como una propuesta de fertilización económica que permite alcanzar altos rendimientos. Sin dudas, para el promedio de las variedades, el hecho de que el T5 sea más económico que el T2, aun agregando K queda absorbido por el abaratamiento en el no uso de P, nutriente que en el suelo estaba en el nivel de suficiencia. A nivel comercial, existe una tendencia por parte de los productores a no variar el paquete de insumos, y menos aún el paquete de fertilización, bajo el supuesto de no alterar en forma negativa el rendimiento, por lo tanto los ingresos. Como se verá en el párrafo siguiente este concepto es relativizado.

El otro indicador en análisis es el ingreso económico. Este indicador copia el comportamiento del rendimiento alcanzado, ya que no hubo castigos por calidad molinera y los premios se otorgaron a todos los tratamientos. Los tratamientos 4 y 5 fueron los de mayor producción y por esto los de mayor ingreso. En el caso del T5, la combinación de mayor ingreso y menor costo permitió que se lograra el mayor margen neto seguido en términos absolutos por la otra propuesta de fertilización objetiva (T4). Este último tratamiento fue un

8% menor en términos de margen al T5 y 32% mayor al promedio de los restantes tratamientos.

En el caso del T3, las altas cantidades de fertilizante agregadas no garantizaron un alto margen económico. El aumento en rendimiento logrado por el T3 respecto a los testigos no fue suficiente como para absorber el sobrecosto de la fertilización realizada.

Por último, como ya se ha discutido, el muy buen margen logrado por el testigo absoluto (T1), igual estadísticamente al testigo comercial (T2), se debió a las buenas aptitudes del suelo en términos de disponibilidad de nutrientes los que le garantizaron un alto rendimiento sin agregado de fertilizante.

4.11 SÍNTESIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo de este punto es resumir en forma integrada y continua, el comportamiento observado de las variables analizadas debido al agregado de diferentes tratamientos de fertilización. En tal sentido, el análisis mostró para estas variables una conducta diferente cuando el efecto de los tratamientos fue medido en la etapa vegetativa hasta R3 y posterior a ésta.

Es entonces que, en el período desde emergencia hasta R3, existió una asociación entre los valores de los parámetros acumulación de MS, IAF, altura de planta y la cantidad de fertilizante agregada en cada tratamiento, más precisamente, con las cantidades de N agregada, esto ya es reportado por diferentes autores como Singh y Murayama, citados por Rojas et al. (1983), Dobermann y Fairhurst (2000), Williams (2010). Para estos parámetros, los valores máximos fueron alcanzados con el T3 siendo un 24%, 39% y 9% superior en MS, IAF y altura de planta respectivamente, respecto al promedio de los restantes tratamientos. Lo siguieron en orden decreciente los tratamientos 4, 2, 5 y 1, los que reflejaron como se dijo las cantidades de N agregadas al cultivo.

Cuando el análisis fue realizado en la etapa posterior a R3, el rendimiento en grano obtenido con los diferentes tratamientos evaluados no reprodujo el orden mencionado para la primera etapa. Los tratamientos que alcanzaron los máximos rendimientos fueron el T4 (SOSBAI, 2005) y T5 (Hernández y Berger 2003, Hernández et al. 2010, Castillo et al. 2012b), ambas propuestas de fertilización objetiva. Vistos en conjunto, el promedio de estos tratamientos presentó una superioridad de 880 kg ha^{-1} en comparación al resto. En forma complementaria, estos 2 tratamientos alcanzaron también la mayor EA_N , siendo 4 y 6 veces superior al testigo comercial (T2), para el T4 y T5 respectivamente.

Continuando dentro de la segunda etapa y analizando ahora el balance aparente de nutrientes, a diferencia del T3 (IPNI, 2013) los restantes tratamientos presentaron valores negativos o levemente positivos como es el caso del T4 para P y K. En un escenario de potencial intensificación arroceras o frente a la aparición de nuevos cultivos integrantes de la rotación, este aspecto podría generar preocupación debido a un empobrecimiento de la condición química del suelo por una exportación de nutrientes más intensa. Posiblemente, estos potenciales problemas han estado enmascarados hasta hoy debido al propio sistema, caracterizado por rotaciones laxas, o la inclusión de pasturas muchas veces consociadas con leguminosas.

Ligado a lo anterior, un ejemplo de los posibles impactos en función de los diferentes balances, fueron los valores de P en suelo encontrados a cosecha, los cuales se vieron alterados por efecto de los tratamientos. El T3, luego de lograr una alta productividad, logró generar un aumento de este nutriente en suelo del orden de los 3 mg kg⁻¹. En forma contraria, los tratamientos 1 y 5, aún sin haber recibido P generaron leves pérdidas del orden de 1 mg kg⁻¹. Los demás tratamientos generaron situaciones entorno a la neutralidad. Para el caso del K, los valores de análisis de suelo a cosecha no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. Para estos 2 nutrientes, el hecho de haber realizado el muestreo de suelo inmediatamente posterior a la cosecha, aunque con 20 días de oxidación, puede no estar considerando P y K retenidos en el rastrojo, el que en el promedio de los tratamientos se encuentra en los 10 Mg ha⁻¹ (Sachet, 2011).

Las diferencias en la carga de fertilizante asociada a cada tratamiento, la cual tiene intrínseco un costo económico, y las distintas productividades alcanzadas con cada tratamiento generaron como era de esperar, diferencias en el margen de ganancia logrado (Castillo, 2015). En términos prácticos, sobre la base del testigo comercial (T2), existieron tratamientos en los cuales fue posible disminuir el costo y aumentar la productividad (T5), mantener el costo y aumentar la productividad (T4) y aumentar la productividad pero asociado a un muy alto costo (T3), haciendo de ese tratamiento el menos lucrativo.

Por último y como concepto final, al menos para las condiciones en las que fue conducido el experimento, los tratamientos de fertilización objetiva permitieron alcanzar el mayor beneficio económico, consecuencia de combinar productividad y una disminución o mantenimiento de costos.

5. CONCLUSIONES

Se rechaza la hipótesis nula asociada a los tratamientos de fertilización y las variedades utilizadas, aceptándola para la interacción de estas dos fuentes de variación.

Bajo las condiciones en que se llevó a cabo el experimento, los tratamientos de fertilización en base a parámetros objetivos (T4 y T5) lograron los mayores rendimientos, siendo un 11, 9 y 4% superior al testigo absoluto (T1), testigo comercial (T2) y a la fertilización elevada (T3) respectivamente.

Las variedades utilizadas en el experimento presentaron el mismo comportamiento frente a las distintas fertilizaciones evaluadas. Para el caso de los tratamientos de fertilización objetiva (T4 y T5), los criterios utilizados para la confección de estos tratamientos fueron válidos en las 4 variedades evaluadas.

El agregado de altas cantidades de fertilizante (T3) logró las mayores acumulaciones de MS total desde R0 hasta finales del ciclo, lo que no significó la obtención de los mayores rendimientos. El comportamiento contrario sucedió con los tratamientos de fertilización objetiva (T4 y T5), los que obteniendo acumulaciones de MS similares al testigo comercial (T2) lograron mayor rendimiento en grano y mayor EA y ERA.

Los balances aparentes de nutrientes (N-P-K) fueron en su mayoría negativos, con excepción del T3 el cual adicionó grandes cantidades de fertilizante al cultivo. Esto se reflejó en el análisis de suelo a cosecha, donde los valores de P para los tratamientos sin agregado (T1 y T5) disminuyeron en comparación a los niveles iniciales en suelo. Esto no sucedió para el caso de los balances entorno a la neutralidad (T2 y T4), donde los valores de P se mantuvieron constantes.

El resultado económico se vio incrementado por la combinación de menores costos de fertilización y aumentos en la producción de grano, combinación lograda con los tratamientos de fertilización objetiva (T4 y T5). Estos tratamientos superaron el MB del testigo comercial (T2) en 31 y 41% (T4 y T5 respectivamente). En contraposición, la fertilización elevada (T3) permitió aumentar los rendimientos por sobre el testigo comercial (T2) pero con costos muy elevados que hicieron deprimir el MB en 18%.

6. RESUMEN

La fertilización del cultivo de arroz en Uruguay ha permanecido incambiada desde hace varias décadas, utilizándose básicamente N y P, mientras que en los últimos años algunas zonas productoras han comenzado a fertilizar con K. A esto se suma el hecho de que el paquete de fertilización utilizado es prácticamente el mismo entre los distintos ambientes donde se produce este cultivo, no aplicándose criterios objetivos que permitan manejar la fertilización en forma diferencial en función de los distintos escenarios productivos. El objetivo del trabajo es evaluar diferentes criterios de fertilización, los que varían en las cantidades de N, P y K en cuatro variedades de arroz. Los tratamientos de fertilización correspondieron a un testigo absoluto sin agregado de fertilizante (T1), testigo comercial (T2), fertilización elevada (T3), testigo de investigación extranjero (T4) y fertilización en base a indicadores objetivos nacionales (T5). Cada tratamiento de fertilización fue adjudicado a 4 variedades de arroz: EP 144, INIA Olimar, INIA Tacuarí y Parao. Las respuestas agronómicas fueron estudiadas con modelos mixtos definiéndose los tratamientos de fertilización, las variedades y sus interacciones como efectos fijos mientras que los bloques fueron definidos como efectos aleatorios. Se utilizó un diseño en parcelas divididas con 3 repeticiones, correspondiendo la parcela grande a la variedad mientras que la chica a los tratamientos de fertilización. Las determinaciones realizadas hasta inicio de floración incluyeron MS, SPAD, LCC, IAF, altura de planta y lectura de enfermedades mientras que a fin de ciclo fueron estimados rendimiento en grano, calidad industrial y componentes de rendimiento. En forma complementaria se calculó la EUN, el balance aparente para los nutrientes N, P y K y un análisis de margen económico de los distintos tratamientos evaluados. Se encontraron diferencias asociadas a las variedades en altura de planta y MS acumulada, siendo mayor en las variedades Índicas vs. Japónicas. Fueron observadas diferencias en la altura de planta, IAF y acumulación de MS en las diferentes etapas de crecimiento asociadas a los tratamientos de fertilización evaluados, estando correlacionadas la MS con las dosis de N agregada y la MS con el rendimiento en grano. La productividad del T4 y T5 fue un 4,9 y 10% superior en promedio al T3, T2 y T1 respectivamente, siendo a su vez los de mayor EUN y MB. El balance de N, P y K estuvo influenciado por los tratamientos de fertilización siendo positivos con el T3. Los restantes tratamientos presentaron pérdidas de N entre 26 y 109 kg ha⁻¹ y tendieron a la neutralidad o fueron negativos para P y K (-26 y 4 kg P ha⁻¹ y -18 y 21 kg K ha⁻¹). Estos balances podrían ser aún más negativos en aquellos sistemas que sustituyen las pasturas por otros cultivos. Los resultados sugieren que es posible realizar la fertilización con criterios objetivos, aumentando los rendimientos y los márgenes económicos, manteniendo el balance de nutrientes similar a la situación actual.

Palabras clave: Arroz; Manejo de nutrientes; Criterios de fertilización.

7. SUMMARY

Rice fertilization in Uruguay has remained unchanged for decades, based on N and P, while in recent years some producing sites have begun to use K. In addition, rice fertilization package is the same among sites, while no objectives fertilization criteria considering different rice production scenarios have been used. The aim of the study is to evaluate different fertilization criteria, setting up NPK treatments. Fertilization treatments are: an absolute control with no fertilizer (T1), commercial control (T2), high subjective fertilization (T3), foreign research control (T4) and fertilization based on national objective parameters (T5). Each fertilization treatment was applied to four rice varieties: EP 144, INIA Olimar, INIA Tacuarí, and Parao. Agronomic responses were evaluated using mixed models. Fertilization treatment, varieties and their interaction were defined as fixed effects meanwhile blocks were defined as random effects. A split plot design with three replication was used corresponding the large plot to the variety while the small plot was related to fertilization treatments. DM, SPAD, LCC, LAI, plant height and disease incidence were measured until the beginning of flowering while grain yield, grain quality and yield components were estimated at the end of the crop cycle. Additionally, NUE, NPK apparent balance and an economic analysis of the evaluated treatments were calculated. Differences associated to varieties in plant height and MS accumulated were found, being higher in the Indica vs. Japonica ideotypes. Differences in plant height, LAI and DM accumulation at different growth stages associated with fertilization treatments were observed and the DM was correlated with the added N dose and with grain yield. On average, T4 and T5 productivity was 4, 9 and 10% higher than T3, T2 and T1 respectively, and they were the high stuns NUE and GM. The N, P and K balance was influenced by fertilization treatments being positive on T3. The remaining treatments had N losses between 26 and 109 kg ha⁻¹ and tended to neutrality or were slightly negative for P and K (-26 and 4 kg P ha⁻¹ and -18 and 21 kg K ha⁻¹). These balances could even be more negative on systems that replace pastures with other crops. The results suggest that fertilization based on objective criteria is possible increasing yields and economic profit and at the same time, maintaining NPK balance similar to the current situation.

Keywords: Rice; Nutrient management; Fertilization criteria.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ACA (Asociación de Cultivadores de Arroz, UY). 2014. Mercado mundial del arroz, rendimientos mundiales del arroz. Arroz. 16 (77): 3-4.
2. Aguado, L. G.; Echevers, J. D.; Hidalgo, C.; Galvis, A.; Aguirre, A. 2002. Dinámica del potasio en suelos agrícolas. Agrociencia. 36 (1): 11-21.
3. Alexander, M. 1980. Introducción a la microbiología del suelo. México, D. F., AGT. 492 p.
4. Ávila, S. 2001. Mancha agregada o manchado confluyente de las vainas; *Rhizoctonia oryzae sativae*. Arroz. 6 (27): 41-45.
5. Baethgen, W. E.; Morón, A.; Díaz-Roselló, R. M. 1994. Modeling long-term soil organic carbon changes in six cropping systems of SW Uruguay. In: World Congress of Soil Science (15th, 1994, Acapulco). Proceedings. Acapulco, s.e. pp. 300-301.
6. Balzarini, M. G.; Gonzales, L.; Tablada, M.; Casanoves, F.; Di Rienzo, J. A.; Robledo, C. W. 2008. Infostat; manual de usuario. Córdoba, Brujas. 336 p.
7. Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, ACCS. 157 p.
8. Bjorneberg, D. L.; Kanwar, R. S.; Melvin, S. W. 1996. Seasonal changes in flow and nitrate-N loss from subsurface drains. (en línea). Transactions of the ASAE. 39 (3): 961-976. Consultado 13 ago. 2015. Disponible en http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1969&context=abe_eng_pubs
9. Bollich, P.; Saichuk, J. K.; Funderburg, R. E. 2000. Soils, plant nutrition and fertilization. (en línea). In: Louisiana rice production handbook. Louisiana, Louisiana State University. Agricultural Center Research. pp. 32-37. Consultado 14 ago. 2015. Disponible en https://beaumont.tamu.edu/elibrary/RiceResource/Rice_Production_Handbook.pdf
10. Buresh, R. J.; Readdy, K. R.; Van Kessen, C. 2008. Nitrogen transformations in submerged soils. In: Schepers, J. S.; Raun, W. R.

eds. Nitrogen in agricultural systems. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 401-436 (Agronomy Monograph no. 49).

11. Campbell, C.A. 1978. Soil organic carbon, nitrogen, and fertility. *In*: Schnitzer, M.; Khan, S. U. eds. Soils organic matter. Amsterdam, Elsevier Scientific. pp. 173-271 (Development in Soil Science no. 8).
12. Cano, D.; Ernst, O.; García, F. 2006. Balance aparente de fósforo en rotaciones agrícolas del litoral oeste del Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 32: 8-11.
13. Cassman, K. G.; Gines, G. C.; Dizon, M. A.; Samson, M. I.; Alcantara, J. M. 1996. Nitrogen - use efficiency in tropical lowland rice systems; contributions from indigenous and applied nitrogen. *Field Crop Research*. 47 (1): 1-12.
14. Cassou, S. 2011. Descripción de variedades de arroz. (en línea). Montevideo, INASE. 17 p. Consultado 23 may. 2015. Disponible en <http://www.inase.org.uy/files/docs2b9a2e9aed46cfef.pdf>
15. Castilhos, R. M. V.; Meurer, E. J.; Kampf, N.; Pinto, L. F. S. 2002. Mineralogía y fuentes de potasio en suelos de Rio Grande do Sul cultivados con arroz irrigado. *Revista Brasileira de Ciencias del Suelo*. 26 (3): 579-587.
16. Castilla, L. A.; Flórez, E. 2014. SIFA sistema de fertilización en el cultivo de arroz a través de la web. *Arroz*. 15 (62): 4-10.
17. Castillo, J.; Terra, J.; Perdomo, C.; Mori, C. 2011. Manejo de suelos y nutrición vegetal. Contribución relativa de las distintas fuentes de N al cultivo de arroz evaluada mediante la técnica isotópica de abundancia natural de ^{15}N . *In*: Arroz; resultados experimentales 2010-2011. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 1-55 (Actividades de Difusión no. 651).
18. _____.; Méndez, R.; Deambrosi, E.; Ferreira, A. 2012a. Fertilización anticipada con fosforita. *In*: Arroz; resultados experimentales 2011-2012. Montevideo, INIA. cap. 3. pp. 10-16 (Actividades de Difusión no. 686).
19. _____.; _____.; Terra, J. 2012b. Indicadores para la recomendación de fertilización de N en el cultivo de arroz; resultados preliminares

primer año. In: Arroz; resultados experimentales 2011-2012. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 4-10 (Actividades de Difusión no. 686).

20. _____. 2013. Ajuste a la fertilización N-P-K en el cultivo de arroz. [Presentación]. (en línea). In: Jornada Arroz-Soja (2013, Treinta y Tres). Sumando para ganar. Treinta y Tres, INIA. Consultado 15 ene. 2015. Disponible en <http://www.inia.org.uy/estaciones/ttres/actividades/2013/12Ajustes a la fert NPK.pdf>
21. _____. 2015. En sus dosis justas; N-P-K como forma de explorar altos rendimientos en arroz. (en línea). In: Seminario de Actualización Técnica en Fertilización de Arroz (2015, Treinta y Tres). Puesta a punto y avances de información sobre la nutrición del cultivo de arroz. Montevideo, INIA. pp. 1-19 Consultado 14 nov. 2015. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Seminario%20Fertilizacion%202015/8-J%20Castillo.pdf>
22. Chebataroff, N. 1998. Posibilidades del control de la bacteriosis en arroz. Arroz. 4 (14): 26-27.
23. Christianson, C. B.; Carmona, G.; Klein, M. O.; Howard, R. G. 1995. Impact on ammonia volatilization losses of mixing KCL of high pH with urea. Fertilizer Research. 40: 89-92.
24. Ciampitti, A.; García, F. 2008. Balance y eficiencia de uso de los nutrientes en sistemas agrícolas. Horizonte A. 4 (18): 22-28.
25. _____. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. Tesis MSc. Scientiae en Ciencias del Suelo. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 116 p.
26. Conti, M. E. 2000. Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 8: 1-14.
27. Counce, P. A.; Keisling, T. C.; Mitchell, A. J. 2000. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. Crop Science. 40 (2): 436-443.

28. De Battista, J. J. 2006. Fertilización del arroz con NPK en Entre Ríos. In: Benavidez, R. A. ed. El arroz; su cultivo y sustentabilidad. Entre Ríos, EDUNER. pp. 379-390.
29. De Datta, S. K. 1981. Principles and practices of rice production. New York, John Wiley and Sons. 618 p.
30. _____; Fillery, I. R. P.; Obcemea, W. N.; Evangelista, R. C. 1987. Floodwater properties, nitrogen utilization and nitrogen 15 balance in a calcareous lowland rice soil. Soil Science Society of America Journal. 51 (5): 1355-1362.
31. De León, J.; Amaral, R.; Irigoyen, R.; Iglesias, M. 1994. Respuesta del arroz a la fertilización de nitrógeno y fósforo en campo virgen y rastrojo en suelo de la unidad la charqueada. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 380 p.
32. Deambrosi, E.; Píriz, M.; Chebataroff, N.; Lavecchia, A. 1991. Manejo fertilización; ensayos NK. In: Arroz; resultados experimentales 1990-1991. Treinta y Tres, INIA. cap. 5. pp. 19-24.
33. _____; Méndez, R. 1993a. Fertilización; eficiencia de utilización del nitrógeno aplicado en cobertura. Respuesta del arroz a la aplicación de urea en cobertura y determinación de niveles críticos a nivel foliar. In: Arroz; resultados experimentales 1992-1993. Treinta y Tres, INIA. t. 2, cap. 5, pp. 1-47.
34. _____; _____. 1993b. Fertilización; respuesta de cultivares de arroz a densidades de siembra en diferente niveles de fertilización nitrogenada. In: Arroz; resultados experimentales 1992-1993. Treinta y Tres, INIA. t. 2, cap. 5, pp. 1-47.
35. _____; _____. 1995. Fertilización; eficiencia de aplicación de nitrógeno en cobertura al macollaje con respecto al riego. In: Arroz; resultados experimentales 1994-1995. Treinta y Tres, INIA. cap. 2, pp. 1-21 (Actividades de Difusión no. 62).
36. _____; _____. 1998. Fertilización; manejo del nitrógeno para INIA Tacuarí y El Paso 144. In: Arroz; resultados experimentales 1997-1998. Treinta y Tres, INIA. cap. 5, pp. 1-10 (Actividades de Difusión no. 166).

37. _____.; _____.; Ávila, S. 2000. Fertilización; respuesta a las aplicaciones de fósforo y potasio. In: Arroz; resultados experimentales 1999-2000. Treinta y Tres, INIA. cap. 5, pp. 1-22 (Actividades de Difusión no. 224).
38. _____.; _____.; _____. 2001. Fertilización; respuesta a las aplicaciones de fósforo y potasio. In: Arroz; resultados experimentales 1999-2000. Treinta y Tres, INIA. cap. 5, pp. 1-22 (Actividades de Difusión no. 257).
39. _____.; _____. 2002. Manejo de suelos y nutrición. Fertilización; respuesta de cultivares de arroz a densidades de siembra y a aplicaciones de nitrógeno. In: Arroz; resultados experimentales 2001-2002. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 8-16 (Actividades de Difusión no. 292).
40. _____.; _____.; Ávila, S. 2003. Fertilización; respuestas de cultivares de arroz a densidades de siembra y aplicaciones de nitrógeno. In: Investigaciones Agronómicas. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 16-24 (Reporte Técnico Anual no. 1).
41. _____.; _____. 2007. Respuesta de cultivares de tipo indica a densidades de siembra y aplicaciones de nitrógeno en la zona este del Uruguay. Montevideo, INIA. 36 p. (Serie Técnica no. 167).
42. _____.; _____.; Ávila, S. 2009. Manejo de suelos y nutrición vegetal; Respuesta del arroz a la inoculación con *Azospirillum* y *Herbaspirillum*. In: Arroz; resultados experimentales 2008-2009. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 17-22 (Actividades de Difusión no. 571).
43. _____.; _____. 2010a. Manejo de suelos y nutrición vegetal; evaluación de los efectos de la aplicación de verde urea en arroz. In: Arroz; resultados experimentales 2009-2010. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 33-38 (Actividades de Difusión no. 611).
44. _____.; _____.; Ávila, S. 2010b. Manejo de suelos y nutrición vegetal; respuesta de cultivares de arroz de tipo indica a coberturas nitrogenadas en 4 épocas de siembra. In: Arroz; resultados experimentales 2009-2010. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 33-38 (Actividades de Difusión no. 611).

45. _____.; _____.; Castillo, J. 2015. Elementos a considerar en la inclusión de potasio en la fertilización del arroz. (en línea). In: Seminario de Actualización Técnica en Fertilización de Arroz (2015, Treinta y Tres). Puesta a punto y avances de información sobre la nutrición del cultivo de arroz. Treinta y Tres, INIA. pp. 1-11. Consultado 14 dic. 2015. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4767/1/EDeambrosi-potasio-en-la-fertilizacion.pdf>
46. Diekmann, K. H.; De Datta, S. K.; Ottow, J. C. G. 1993. Nitrogen uptake and recovery from urea and green manure in lowland rice measured by ¹⁵N and non-isotope techniques. *Plant and Soil*. 148 (1): 91-99.
47. Dobermann, A.; Fairhurst, T. H. 2000. Rice; nutrient disorders and nutrient management. Manila, PPI/IRRI/PPIC. 190 p.
48. _____.; Witt, C.; Dawe, D. 2002. Performance of site-specific nutrient management in intensive rice cropping systems of Asia. *Better Crops*. 16 (1): 25-30.
49. _____.; Cassman, K. G. 2004. Environmental dimensions of fertilizer N: What can be done to increase nitrogen use efficiency and ensure global food security. In: Mosier, A. R.; Syers, J.; Freney, J. eds. *Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*. Washington, D.C., Island Press. pp. 261-278.
50. Donald, M.; Hamblin, J. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy*. 28: 361-405.
51. Dolmat, M. T.; Patrick, W. H.; Peterson, F. J. 1980. Relation of available soil nitrogen to rice yield. *Soil Science*. 129 (4): 229-237.
52. Ernst, O.; Siri, G.; Ackermann, P.; Gaspari, N. 2012. Balance aparente de N, P y K en función de la intensidad de uso de los suelos por la agricultura. (en línea). *Cangüé*. no. 32: 9-15. Consultado 7 jun. 2014. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/cangue032_ernst.pdf

53. Fageria, N. K.; Carvalho, G. D.; Santos, A. B.; Ferreira, E. P. B.; Knupp, A. M. 2011. Chemistry of lowland rice soils and nutrient availability. *Soil Science and Plant Analysis*. 42: 1913–1933.
54. Fernández, F.; Vergara, B.S.; Yapit, N.; García, O. 1978. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. Cali, CIAT. 29 p.
55. Fillery, I. R. P.; Vlek, P. L. G. 1986. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields. *Fertilizer Research*. 9: 79-98.
56. Forjan, H. 2004. Balance de nutrientes en secuencias agrícolas de la región sur Bonaerense. (en línea). *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 21: 8-11. Consultado 9 jun. 2014. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/DA988FB5678E4276852579990060EBB7/\\$FILE/Balance%20Nutrientes-Forj%C3%A1n.pdf](http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/DA988FB5678E4276852579990060EBB7/$FILE/Balance%20Nutrientes-Forj%C3%A1n.pdf)
57. Freney, J. R.; Denmead, O. T. 1992. Transfer coefficients for water-air exchange of ammonia, carbon dioxide and methane. *Ecological Bulletins*. 42: 31-41.
58. Frioni, L. 2006. Microbiología; básica, ambiental y agrícola. Montevideo, Universidad de la Republica. Facultad de Agronomía. 407 p.
59. Gamarra, G. 1996. Arroz; manual de producción. Montevideo, Hemisferio Sur. 438 p.
60. García, F. 2003. Balance de nutrientes en la rotación; impacto en rendimiento y calidad de suelo. (en línea). In: Simposio de Fertilidad y Fertilización en Siembra Directa (2º.), Congreso Nacional de AAPRESID (11º., 2003, Rosario, Santa Fé). Actas. Rosario, Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. pp. 26-29. Consultado 9 jun. 2014. Disponible en <http://www.profertilnutrientes.com.ar/images/archivos/520.pdf>
61. García, A.; Quincke, A. 2011. El análisis de potencial de mineralización de nitrógeno; su significado y desarrollo de su aplicación agronómica. In: Jornada de Divulgación (2011, Durazno, Uruguay). Aportes a la zafra de cultivos de invierno. Montevideo, INIA. pp. 43-46 (Actividades de Difusión no. 646).

62. Hanlon, E.; Hochmuth, G. 2009. Principles of sound fertilizer recommendations. (en línea). Gainesville, FL, USA, University of Florida. Institute of Food and Agricultural Sciences. pp 1-7. Consultado 23 jul. 2014. Disponible en <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/SS/SS52700.pdf>
63. Harrell, D.; Saichuk, J. 2009. Soil, plant nutrition and fertilization. In: Saichuk, J. ed. Louisiana rice production handbook. Louisiana, LSU AgCenter. cap. 3, pp. 24-34.
64. Hauck, R. D. 1981. Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes. In: Clark, F. E.; Rosswall, T. eds. Terrestrial nitrogen cycles. Stockholm, Swenden, Swendish Natural Science Research Council. pp. 551- 562 (Ecological Bulletins no. 33)
65. Heathman, G. C.; Sharpley, A. N.; Smith, S. J.; Robinson, J. 1995. Land application of poultry litter and water quality. Fertilizer Research. 40 (3): 165-173.
66. Hernández, J. 1995. Dinâmica de fósforo em alguns solos de Uruguai afetada pela variação temporal nas condições de oxidação-redução. Tesis MSc. Porto Alegre, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. 173 p.
67. _____.; Berger, A. 2003. Indicadores de disponibilidad de fósforo y respuesta del cultivo de arroz a la fertilización fosfatada. In: Investigaciones agronómicas. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 34-40 (Reporte Técnico Anual no. 1)
68. _____.; Barbazán, M.; Perdomo, C. 2010. Potasio. Montevideo, Facultad de Agronomía. 62 p.
69. Holt, L. S.; Christianson, C. B.; Austin, E. R.; Katyal, J. C. 1988. A laboratory technique for releasing and measuring denitrification products trapped in soil. Soil Science Society of America Journal. 52: 1510-1511.
70. Huang, J.; He, F.; Cui, K.; Buresh, R. J.; Xu, B.; Gong, W.; Peng, S. 2008. Determination of optimal nitrogen rate for rice varieties using a chlorophyll meter. Field Crops Research. 105 (1): 70-80.
71. Humphreys, E.; Chalk, P. M.; Muirhead, W. A.; Melhuish, F. M.; White, R. J. G. 1987. Effects of time of urea application on combine-sown calrose

rice in south-east Australia. Australian Journal of Agricultural Research. 38 (1): 129-138.

72. _____.; Freney, J. R.; Muirhead, W. A.; Denmead, O. T.; Simpson, J. R.; Leuning, R.; Trevitt, A. C. F.; Obcemea, W. N.; Wetselaar, R.; Gui-Xin, C. 1988. Loss of ammonia after application of urea at different times to dry-seeded, irrigated rice. Fertilizer Research. 16: 47-57.
73. IPNI (International Plant Nutrition Institute, US). 2013. Crop nutrient removal calculator. (en línea). Georgia, IPNI. s.p. Consultado 14 may. 2014. Disponible en <https://www.ipni.net/app/calculator/home>
74. IRRI (International Rice Research Institute, PH). 2002. Standard Evaluation System for Rice (SES). Los Baños, Philippines. 47 p.
75. Irrisari, P.; Gonnet, S.; Monza J. 2008. Fijación de nitrógeno por cianobacterias y fertilización en arroz. Montevideo, INIA. 27 p. (FPTA-INIA no. 21)
76. Jansson, S. L.; Persson, J. 1982. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In: Stevenson, F. J. ed. Nitrogen in agricultural soils. Madison, WI, ASA. pp. 229-252.
77. Jarma, A.; Degiovanni, V.; Montoya, R. A. 2010. Índices fisiotécnicos, fases de crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. In: Degiovanni, V.; Martínez, C. P.; Motta, F. eds. Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Cali, CIAT. t.1, cap. 5, pp. 60-78.
78. Ji – Yun, J.; Ronggui, W.; Rongle, L. 2002. Rice production and fertilization in China. Rice Production. 16: 26-29.
79. Kamprath, E. J.; Watson, M. E. 1980. Conventional soil and tissue test for assessing the phosphorus status of soils. In: Krasaweneh, F. E.; Simple, E. S.; Kamprath, E. J. eds. The role of phosphorus in agriculture. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 333-359.
80. Keeney, D. R.; Nelson, D. W. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page, A. L. ed. Methods of soil analysis. 2nd. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 2, pp. 643-693 (Agronomy Monograph no. 9)

81. _____; Sahrawat, K. L. 1986. Nitrogen transformations in flooded rice soils. *Fertilizer Research*. 9 (1): 15-38.
82. Khurana, H.; Phillips, S. B.; Bijay-Singh; Alley, M. M.; Dobermann, A.; Sidhu, A. S.; Yadvinder-Singh; Peng, S. 2008. Agronomic and economic evaluation of site-specific nutrient management for irrigated wheat in northwest India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 82: 15-31.
83. Knowles, R. 1982. Denitrification. *Microbiological Reviews*. 46 (1): 43-70.
84. Kundu, D. K.; Ladha, J. K. 1999. Sustaining productivity of lowland rice soils; issues and options related to N availability. *Nutrient Cycling Agroecosystems*. 53: 19-33.
85. Ladha, J. K.; Reddy, P. M. 2003. Nitrogen fixation in rice systems; state of knowledge and future prospects. *Plant Soil*. 252: 151-167.
86. Leikman, D. F.; Lamond, R. E.; Menguel, D. B. 2003. Providing flexibility in phosphorus and potassium fertilizer recommendations. *Better Crops*. 87 (3): 6-10.
87. Machado, M. 1985. Caracterização e adubação do solo. In: Silva, J. ed. *Fundamentos para a cultura do arroz irrigado*. Campinas, Fundação Cargill. pp. 129-179.
88. Macnack, N.; Bee KhimChim.; Amedy, B.; Arnall, B. 2012. Fertilization based on sufficiency, build-up and maintenance concept. (en línea). Stillwater, Oklahoma State University. Cooperative Extension Service. PSS - 2266. s.p. Consultado 15 jul. 2014. Disponible en <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-7528/PSS-2266web.pdf>
89. Mae, T. 1997. Physiological nitrogen efficiency in rice; nitrogen utilization, photosynthesis and yield potential. *Plant and Soil*. 196: 201-210.
90. Mallarino, A. 2005. Criterios de fertilización fosfatada en sistemas de agricultura continúa con maíz y soja en el cinturón del maíz. (en línea). *Informaciones Agronómicas*. no. 28: 9-15. Consultado 25 jul. 2014. Disponible en http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/publica/Fert_P_Maiz_Soja_EEUU.pdf

91. _____. 2011. Del diagnóstico a la aplicación; conceptos básicos y prácticos para la nutrición de cultivos. (en línea). Informaciones Agronómicas. 1: 8-12. Consultado 23 jul. 2014. Disponible en https://www.google.com.uy/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cad=6&cad=rja&uact=8&ved=0CDcQFjAF&url=http%3A%2F%2Fwww.isaosa.com%2Fdl.php%3Fid%3Dbm8uXzcoMSkucGRm&ei=s0HQU_naNobroATYooKIAw&usq=AFQjCNFFVagZSdJFCMuQDEGUxYDhpbFK5g&bvm=bv.71667212,d.cGU
92. Mancassola, V.; Casanova, O. 2015. Balance de nutrientes de los principales productos agropecuarios de Uruguay para los años 1990, 2000 y 2010. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 17: 2-13.
93. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1979. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. Escala 1:1000000. s.p.
94. Martínez, S.; Escalante, F.; Casales, L. 2013. Manejo integrado de enfermedades; influencia de la fertilización con potasio en el rendimiento y desarrollo de enfermedades del tallo y vaina en arroz. In: Arroz; resultados experimentales 2012-2013. Treinta y Tres, INIA. cap. 4, pp. 13-15 (Actividades de Difusión no. 713).
95. Melo, V. F.; Novais, R. F.; Fontes, M. P. F.; Schaefer, C. E. G. R. 2000. Potasio y magnesio en minerales de fracciones de arena y limo de diferentes suelos. Revista Brasileira de Ciencias del Suelo. 24: 269-284.
96. Méndez, R.; Deambrosi, E. 2009. Coberturas nitrogenadas para la producción de arroz; eficiencia de aplicación. Montevideo, INIA. 38 p. (Serie Técnica no. 179)
97. _____.; Castillo, J.; Sosa, B.; Casales, L. 2014. Manejo de suelos y nutrición vegetal. Respuesta del cultivo para la aplicación de nitrógeno y su fraccionamiento. In: Arroz-soja resultados experimentales 2013-2014. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 1-3. (Actividades de Difusión no. 735).
98. _____.; _____.; Deambrosi, E. 2015. Manejo alternativo de fósforo en arroz. (en línea). In: Seminario de Actualización Técnica en

Fertilización de Arroz (2015, Treinta y Tres). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 1-8. Consultado 24 dic. 2015. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4766/1/Articulo-RMendez.pdf>

99. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2009. Encuesta de arroz, zafra 2008/09. (en línea). Montevideo. 31 p. Consultado 21 jul. 2015. Disponible en <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-ipr-produccion-vegetal-arroz,O,es,0>,
100. _____. _____. 2010. Encuesta de arroz, zafra 2009/10. (en línea). Montevideo. 25 p. Consultado 21 jul. 2015. Disponible en <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-ipr-produccion-vegetal-arroz,O,es,0>,
101. _____. _____. 2012. Encuesta de arroz, zafra 2011/12. (en línea). Montevideo. 23 p. Consultado 21 jul. 2015. Disponible en <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-ipr-produccion-vegetal-arroz,O,es,0>,
102. _____. _____. 2014. Encuesta de arroz, zafra 2013/14. (en línea). Montevideo, MGAP. DIEA. 17 p. Consultado 21 jul. 2015. Disponible en <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-ipr-produccion-vegetal-arroz,O,es,0>,
103. Mielniczuk, J. 1982. Avaliacao da resposta das culturas ao potássio em ensaios de longa duração; a experiencia brasileira. In: Yamada, T.; Muzzilli, O.; Usherwood, N. R. eds. Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fosfato. pp. 289-303.
104. Mikkelsen, D. S. 1987. Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. *Plants and Soil*. 100 (1): 71-97.
105. Molina, F.; Blanco, P.; Pérez de Vida, F. 2011. Nuevo cultivar de arroz. *Arroz*. 15 (68): 26-32.
106. Morón, A.; Khiel, J. C. 1992. Dinámica del fósforo en tres sistemas agrícolas en el suroeste de Uruguay. *Investigaciones Agronómicas*. 1 (1): 61-84.

107. Mosier, A. R.; Mohanty, S. K.; Bhadrachalam, A.; Chakravorti, S. P. 1990. Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from the soil to the atmosphere through rice plants. *Biology and Fertility of Soils*. 9: 61–67.
108. _____.; Syers, J. K.; Freney, J. R. 2004. Nitrogen fertilizer: an essential component of increased food, feed and fiber production. *In*: Mosier, A. R.; Syers, J.; Freney, J. eds. *Agriculture and the nitrogen cycle; assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*. Washington, D.C., Island Press. pp. 3-15.
109. Murayama, N. 1971. Nutritional and physiological status of high yielding rice plants. *Agriculture and Horticulture*. 46: 145-149.
110. Nakamura, T.; Zhang, Z.; Chiba, M.; Goto, Y.; Nishiyama, I. 1999. Relationship between root amount and sterility caused by cool temperature at the critical stage in rice cultivars differing in cool tolerance. *In*: *Temperate Rice Conference (2nd., 1999. Sacramento, CA)*. Proceedings. Manila, IRRI. pp. 245-250.
111. Narteh, L. T.; Sahrawat, K. L. 2000. Ammonium in solution of flooded West African soils. *Geoderma*. 95 (3): 205-214.
112. Nelson, D. W. 1982. Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification. *In*: Stevenson, F. J. ed. *Nitrogen in agricultural soils*. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 327-363 (Agronomy Monograph no. 22).
113. Norman, J. R.; Wilson, C. E. Jr.; Slaton, N. A. 2003. Soil fertilization and mineral nutrition. U. S. mechanized rice culture. *In*: Smith, W. C.; Dilday, R. H. eds. *Rice; origen, history, technology and production*. Hoboken, John Wiley. pp 331-411.
114. Painter, H. A. 1971. Chemical, Physical and biological characteristic of wastes and waste effluents. *In*: Ciaccio, L. L. ed. *Water and water pollution handbook*. New York, Marcel Dekker. v.1, pp. 329-364.
115. Patrick, W. H. Jr.; Mahapatra, L. C. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Advances in Agronomy*. 20: 323-359.

116. _____.; Reddy, C. N. 1978. Chemical changes in rice soils. In: Soils and rice. Los Baños, IRRI. pp. 361-379.
117. _____. 1982. Nitrogen transformations in submerged soils. In: Stevenson, F. J. ed. Nitrogen in agricultural soils. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 449-465. (Agronomy Monograph no. 22).
118. _____.; Mikkelsen, D. S.; Wells, B. R. 1985. Plant nutrient behaviour in flooded soils. In: Engelstad, O. P. ed. Fertilizer technology and use. 3rd. ed. Wisconsin, SSSA. pp. 197-228.
119. Paul, E. A. 1996. Soil microbiology, ecology and biochemistry in perspective. In: Paul, E. A. ed. Soil microbiology, ecology and biochemistry. 3rd. ed. San Diego, Academic Press. pp. 3-24.
120. Peng, S.; Buresh, R. J.; Huang, J.; Yang, J.; Zou, Y.; Zhong, X.; Wang, G.; Zhang, F. 2006. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice system in China. *Field Crop Research*. 96: 37-47.
121. Peoples, M. B.; Herridge, D. F.; Ladha, J. K. 1995. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant and Soil*. 174 (1): 3-28.
122. Pocojeski, E.; Souza da Silva, L.; da Cas Bundt, A.; Marchesan, E.; Rabaioli Camargo, E.; Bueno Scivittaro, W. 2012. Estimativa do teor de nitrogênio em arroz irrigado com o clorofilometro e a cartela de cores. *Ciencia Rural*. 42 (11): 1982-1987.
123. Ponnampetuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*. 24: 29-96.
124. _____. 1981. Some aspects of the physical chemistry of paddy soils. In: Symposium on Paddy Soil (1981, Beijing). Proceedings. Beijing, Institute of Soil Science Academia Sinica. pp. 59-94.
125. _____. 1985. Chemical kinetics of wetland rice soils relative to soil fertility. In: Wetland soils; characterization, classification and utilization. Los Baños, IRRI. pp. 71-90.
126. Quintero, C.; Arévalo, E.; Boschetti, N. G.; Spinelli, N. 2006. Clorosis en suelos con calcáreo. *Experiencias en el cultivo de arroz en Entre*

Ríos. In: Vázquez, M. ed. Micronutrientes en la agricultura. Entre Ríos, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. pp. 113-125.

127. _____.; Prats, F.; Zamero, M. A.; Arévalo, E. S.; Spinelli, N. B.; Boschetti, G. N. 2011. Absorción de nitrógeno y rendimiento de arroz con diferentes formas de nitrógeno aplicado previo al riego. (en línea). Ciencia del Suelo. 29(2): 1-3. Consultado 22 feb. 2015. Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672011000200012
128. Riccetto, S.; Molina, F.; Zorrilla, G. 2013. Resumen base de datos empresas arroceras; grupo de trabajo arroz, junio 2013. (en línea). In: Reunión Grupo de Trabajo Arroz (2013, Treinta y Tres). Treinta y Tres, INIA. s.p. Consultado 15 mar. 2015. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202012%20-2013%20.pdf>
129. Roberts, T. L.; Fulford, A. M.; Norman, R. J.; Slaton, N. A.; Walker, T. W.; Wilson, C. E.; Harrell, D. L.; McCauley, G. N. 2012. Development and implementation of n-star; the nitrogen-soil test for rice. Better Crops. 96 (2): 14-16.
130. Rojas, C.; Alvarado, R.; Belmar, C. 1983. Fertilización nitrogenada en arroz; Efecto sobre algunos parámetros agronómicos del cultivo. Agricultura Técnica. 43 (4): 353-357.
131. Russell, C. A.; Dunn, B. W.; Batten, G. D.; Williams, J. F.; Angus, J. F. 2006. Soil test to predict optimum fertilizer nitrogen rate rice. Field Crop Research. 97 (2-3): 286-301.
132. Sachet, P. F. 2011. Dinamica do banco de sementes de arroz vermelho e ciclagem de nutrientes em funcao do manejo por colheita da palha do arroz. Tese de MSc. Santa Maria, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria. Faculdade de Agronomía. 116 p.
133. Sahrawat, K. L. 2005. Organic matter and mineralizable nitrogen relationships in wetland rice soils. Soil Science and Plant Analysis. 37 (5): 787-796.
134. Savant, N. K.; De Datta, S. K. 1982. Nitrogen transformations in wetland rice soils. Advances in Agronomy. 35: 241-302.

135. Seminario-Taller, Brecha de Rendimiento en Arroz (2011, Treinta y Tres). 2011. Presentación. (en línea). Montevideo, INIA. s.p. Consultado 12 dic. 2014. Disponible en http://www.inia.org.uy/estaciones/ttres/actividades/2011/presentacion_introduccion.pdf
136. Sharma, P. K.; De Data, S. K. 1985. Puddling influence on soil, rice development, and yield. Soil Science Society of America Journal. 49 (6): 1451-1457.
137. Shipp, M. 2005. Rice crop timeline for the southern states of Arkansas, Louisiana, and Mississippi. (en línea). Pineville, Louisiana, Louisiana State University. s.p. Consultado 25 feb. 2014. Disponible en <http://legalelectric.org/f/2015/10/RiceCrop-Timeline-for-the-Southern-States.pdf>
138. Siri-Prieto, G.; Ernst, O. 2011. Fertilización con fósforo; por balance o suficiencia?. In: Simposio Nacional de Agricultura (2º., 2011, Paysandú, Uruguay). No se llega, si no se sabe a dónde ir, el abordaje necesario para que el proceso de expansión agrícola madure en Uruguay. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 35-44.
139. Snyder, C. S.; Slaton, N. A. 2002. Rice production in the united state; an overview. Rice Production. 16: 30-35.
140. SOSBAI (Sociedade Sul Brasileira De Arroz Irrigado, BR). 2005. Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Santa Maria, SOSBAI. 159 p.
141. Stevenson, F. J. 1982. Humus chemistry; genesis, composition, reactions. New York, John Wiley and Sons. 443 p.
142. _____. 1986. Cycles of soil; C, N, P, S, micronutrients. New York, John Wiley and Sons. 379 p.
143. _____. 1994. Humus chemistry; genesis, composition, reactions. 2nd. ed. New York, John Wiley and Sons. 512 p.
144. Stumm, W.; Morgan, J. J. 1970. Aquatic chemistry; an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. New York, Wiley Interscience. 583 p.

145. Stute, J. K.; Posner, J. L. 1995. Legume cover crops as a nitrogen source for corn in an oat-corn rotation. *Journal of Production Agriculture*. 8: 385-390.
146. Tejeda, H. R.; Hong, C. W.; Vlek, P. L. G. 1980. Comparison of modified urea fertilizers and estimation of their availability coefficient using quadratic models. *Soil Science Society of America Journal*. 44 (6): 1256-1262.
147. Tieri, M. P.; LaManna, A.; Montossi, F.; Banchero, G.; Mieres, J.; Fernández, E. 2013. El balance de nutrientes en 36 predios comerciales del GIPROCAR II (FUCREA/INIA); una primera aproximación al proceso de intensificación en sistemas agrícola-ganadero y su potencial impacto en el ambiente. *In*: Montossi, F. ed. *Invernada de precisión: pasturas, calidad de carne, genética, gestión empresarial e impacto ambiental*. Montevideo, s.e. pp. 129-136.
148. Tisdale, S. L.; Nelson, W. L.; Beaton, J. D.; Havlin, J. L. 1993. *Soil fertility and fertilizers*. New York, Macmillan. 229 p.
149. Troeh, F. R.; Thompson, L. M. 2005. *Soils and soil fertility*. Iowa, Wiley Blackwell. 498 p.
150. Vaishampayan, A.; Sinha, R.; Häder, D.; Dey, T.; Gupta, A.; Bhan, U.; Rao, L. 2001. Cyanobacterial biofertilizers in rice agriculture. *Botanical Review*. 67: 453-516.
151. Vitosh, M.; Johnson, J.; Mengel, D. 1995. Tri-state fertilizer recommendation for corn, soy bean, wheat and alfalfa. (en línea). Michigan State University/Ohio State University/Purdue University. Extension Bulletin E-2567. pp. 10-17. Consultado 29 jul. 2014. Disponible en <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/AY/AY-9-32.pdf>
152. Walker, W. T.; Street, J. E. 2003. Rice fertilization. (en línea). Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station (MAFES). no. 1341: 1-4. Consultado 14 ago. 2014. Disponible en http://rice.msstate.edu/documents/fertility_i1341.pdf

153. Wang, G.; Dobermann, A.; Witt, C.; Sun, Q.; Fu, R. 2001. Performance of site - specific nutrient management for irrigated rice of Southeast China. *Agronomic Journal*. 93: 869-878.
154. Wells, B. R.; Huey, B. A.; Norman, R. J.; Helms, R. S. 1993. Rice. In: Bennett, W. F. ed. *Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants*. St. Paul, Minnesota, APS. pp. 15-19.
155. Williams, J. F.; Smith, S. G. 2001. Correcting potassium deficiency can reduce rice stem diseases. *Better Crops*. 85 (1): 7-9.
156. _____. 2010. *Rice nutrient management in California*. Richmond, CA, University of California. 137 p.
157. Wilson, C. E.; Bollich, P. K.; Norman, R. J. 1998. Nitrogen application timing effects on nitrogen efficiency of dry-seeded rice. *Soil Science Society of America*. 62: 959-964.
158. Yoshida, S. 1981. *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños, IRRI. 269 p.
159. Youngdahl, L. J.; Lipin, M. S.; Craswell, E. T. 1986. New developments in nitrogen fertilizers for rice. *Fertilization Research*. 9: 149-160.

9. ANEXO

Medidas resumen

Variable	Media	D.E.	CV	Mínimo	Máximo
Población	359,53	53,54	14,89	251,00	488,00
M.S.M.	272,58	77,29	28,35	118,00	471,00
M.S.P.	4020,57	1195,10	29,72	1725,00	6667,00
S.P.A.D.	33,48	2,69	8,03	28,30	40,90
L.C.C.	2,97	0,09	2,89	2,75	3,00
M.S. en	11240,17	2549,02	22,68	6694,00	17935,00
I.A.F.H.	2160,45	309,39	14,32	1321,00	2793,00
S.P.A.D. en	35,21	3,69	10,47	28,20	42,20
L.C.C. en R3	2,94	0,28	9,70	2,50	3,75
Altura en R3	83,80	6,78	8,09	65,00	98,50
S.O. en R3	8,39	8,59	102,32	0,25	30,00
R.O.S. en R3	0,22	0,36	165,32	0,00	1,75
Altura Cosecha	85,16	5,21	6,12	76,33	101,67
REND. SECO 0%	9556,75	876,53	9,17	7573,62	11363,20
REND. S.S.L. 13%	11194,99	1038,03	9,27	8937,31	13322,37
Ingresos	3013,55	249,36	8,27	2449,61	3543,75
Costos	2227,58	135,65	6,09	2053,00	2453,00
Margen	785,97	256,45	32,63	74,33	1291,47
Costo fertilizante	174,58	135,65	77,70	0,00	400,00
%Blanco	70,45	0,92	1,31	67,20	72,20
%entero	61,99	4,31	6,95	46,79	66,99
%quebrado	8,49	4,21	49,58	4,01	23,81
%yeso	3,16	2,29	72,44	0,57	11,02
%manchado	0,25	0,28	110,87	0,00	1,05
1/2 grano no.	6,92	11,07	160,08	0,00	39,00
Panojas por M ²	521,08	81,16	15,58	352,94	696,08
IC	0,64	0,77	120,12	0,04	6,63
M.S. PAJA (kg ha ⁻¹)	7803,87	1411,78	18,09	5233,10	11388,16
M.S. GRANO (kg ha ⁻¹)	12686,60	1673,87	13,19	9774,51	17647,06
P.M.G.	26,26	2,86	10,89	20,12	29,15
N agregado (kg/ha)	79,96	58,25	72,85	0,00	170,40
P agregado (kg/ha)	17,50	15,34	87,64	0,00	36,13
K agregado (kg/ha)	27,29	28,53	104,56	0,00	74,70
Balance de N	-43,46	50,85	117,00	-130,27	75,48
Balance de P	-7,93	14,64	184,69	-34,97	16,42
Balance de K	7,11	26,67	375,42	-25,26	59,75
S.O. en Cosecha	49,42	7,67	15,52	26,00	67,00

R.O.S. en Cosecha	1,64	2,92	178,26	0,00	14,20
Ef. Agro. N	7,15	11,74	1 64,16	-18,89	38,92
M.S. total	20490,47	2115,55	10,32	15321,34	25065,27

Variable dependiente: Población

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	36	1346,02	<0,0001
VAR.	3	36	7,49	0,0005
TRAT.	4	36	4,27	0,0063
VAR. TRAT.	12	36	1,44	0,1938

Variable dependiente: M.S.M.

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	1371,81	<0,0001
VAR.	3	38	19,66	<0,0001
TRAT.	4	38	1,23	0,3136
VAR. TRAT.	12	38	0,38	0,9633

Variable dependiente: M.S.P.

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	293,79	<0,0001
VAR.	3	38	17,65	<0,0001
TRAT.	4	38	15,99	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	1,79	0,0852

Variable dependiente: S.P.A.D.

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	13392,00	<0,0001
VAR.	3	38	41,03	<0,0001
TRAT.	4	38	5,91	0,0008
VAR. TRAT.	12	38	1,05	0,4280

Variable dependiente: L.C.C.

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	63368,00	<0,0001
VAR.	3	38	1,67	0,1904
TRAT.	4	38	0,81	0,5251
VAR. TRAT.	12	38	0,31	0,9829

Variable dependiente: M.S. en R3

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	1286,18	<0,0001
VAR.	3	38	33,88	<0,0001
TRAT.	4	38	15,02	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,68	0,7581

Variable dependiente: I.A.F.H.

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	3737,99	<0,0001
VAR.	3	38	4,16	0,0121
TRAT.	4	38	14,41	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,66	0,7770

Variable dependiente: S.P.A.D. en R3

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	18650,77	<0,0001
VAR.	3	38	47,36	<0,0001
TRAT.	4	38	0,50	0,7363
VAR. TRAT.	12	38	1,41	0,2039

Variable dependiente: L.C.C. en R3

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	10103,42	<0,0001
VAR.	3	38	5,04	0,0049
TRAT.	4	38	5,49	0,0014
VAR. TRAT.	12	38	1,36	0,2265

Variable dependiente: Altura en R3

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	13805,80	<0,0001
VAR.	3	38	7,09	0,0007
TRAT.	4	38	4,11	0,0073
VAR. TRAT.	12	38	1,14	0,3563

Variable dependiente: S.O. en R3

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	125,60	<0,0001
VAR.	3	38	8,11	0,0003
TRAT.	4	38	14,33	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,64	0,7959

Variable dependiente: R.O.S. en R3

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	29,43	<0,0001
VAR.	3	38	5,61	0,0028
TRAT.	4	38	2,18	0,0898
VAR. TRAT.	12	38	1,13	0,3661

Variable dependiente: Altura a Cosecha

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	29383,94	<0,0001
VAR.	3	38	32,97	<0,0001
TRAT.	4	38	34,50	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	3,79	0,0008

Variable dependiente: Rendimiento (SECO)

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	4194,40	<0,0001
VAR.	3	38	20,24	<0,0001
TRAT.	4	38	8,56	0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,80	0,6456

Variable dependiente: Rendimiento (S.S.L.13% de humedad)

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	6238,19	<0,0001
VAR.	3	38	13,47	<0,0001
TRAT.	4	38	6,61	0,0004
VAR. TRAT.	12	38	0,85	0,6057

Variable dependiente: Ingresos Económicos

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	6270,02	<0,0001
VAR.	3	38	5,31	0,0037
TRAT.	4	38	6,66	0,0004
VAR. TRAT.	12	38	0,86	0,5906

Variable dependiente: Costos Totales

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	360830,97	<0,0001
VAR.	3	38	0,86	0,4716
TRAT.	4	38	652,95	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,86	0,5944

Variable dependiente: Margen de ganancia

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	509,43	<0,0001
VAR.	3	38	5,51	0,0030
TRAT.	4	38	8,42	0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,81	0,6360

Variable dependiente: Costo de los Fertilizante

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	2216,37	<0,0001
VAR.	3	38	0,86	0,4716
TRAT.	4	38	652,95	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,86	0,5944

Variable dependiente: Granos Blancos

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	233177,27	<0,0001
VAR.	3	38	4,97	0,0052
TRAT.	4	38	2,82	0,0385
VAR. TRAT.	12	38	2,64	0,0112

Variable dependiente: Granos Enteros

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	7427,29	<0,0001
VAR.	3	38	3,84	0,0170
TRAT.	4	38	0,84	0,5108
VAR. TRAT.	12	38	1,53	0,1553

Variable dependiente: Granos Quebrados

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	211,27	<0,0001
VAR.	3	38	5,71	0,0025
TRAT.	4	38	0,89	0,4804
VAR. TRAT.	12	38	1,58	0,1400

Variable dependiente: Granos Yesados

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	196,97	<0,0001
VAR.	3	38	10,58	<0,0001
TRAT.	4	38	2,16	0,0920
VAR. TRAT.	12	38	1,77	0,0895

Variable dependiente: Granos Manchados

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	78,95	<0,0001
VAR.	3	38	11,15	<0,0001
TRAT.	4	38	0,84	0,5091
VAR. TRAT.	12	38	1,55	0,1486

Variable dependiente: Granos Enteros

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	2447,56	<0,0001
VAR.	3	38	32,44	<0,0001
TRAT.	4	38	3,03	0,0290
VAR. TRAT.	12	38	1,26	0,2824

Variable dependiente: Granos Vanos

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	720,37	<0,0001
VAR.	3	38	53,86	<0,0001
TRAT.	4	38	2,34	0,0729
VAR. TRAT.	12	38	0,63	0,8048

Variable dependiente: ½ Grano

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	18,82	0,0001
VAR.	3	38	7,86	0,0003
TRAT.	4	38	0,39	0,8148
VAR. TRAT.	12	38	1,51	0,1631

Variable dependiente: Panojas

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	1851,40	<0,0001
VAR.	3	38	3,32	0,0298
TRAT.	4	38	2,77	0,0407
VAR. TRAT.	12	38	0,99	0,4731

Variable dependiente: Panojas M^{2-1}

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	1852,30	<0,0001
VAR.	3	38	3,32	0,0298
TRAT.	4	38	2,77	0,0407
VAR. TRAT.	12	38	0,99	0,4731

Variable dependiente: Índice de Cosecha

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	10029,48	<0,0001
VAR.	3	38	17,41	<0,0001
TRAT.	4	38	18,69	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	1,22	0,3033

Variable dependiente: Materia Seca de GRANO (kg ha^{-1})

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	2804,24	<0,0001
VAR.	3	38	11,25	<0,0001
TRAT.	4	38	0,53	0,7136
VAR. TRAT.	12	38	0,19	0,9983

Variable dependiente: Peso de Mil Granos

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	85428,32	<0,0001
VAR.	3	38	312,64	<0,0001
TRAT.	4	38	2,45	0,0625
VAR. TRAT.	12	38	0,74	0,7061

Variable dependiente: N agregado (kg ha^{-1})

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	819,37	<0,0001
VAR.	3	38	0,86	0,4718
TRAT.	4	38	201,97	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,86	0,5948

Variable dependiente: K agregado (kg ha^{-1})

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	2,01610177353199E31	<0,0001
VAR.	3	38	0,47	0,7064
TRAT.	4	38	5,20183465156426E32	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	1,85	0,0740

Variable dependiente: Balance de N

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	318,34	<0,0001
VAR.	3	38	9,92	0,0001
TRAT.	4	38	133,72	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,84	0,6099

Variable dependiente: Balance de P

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	147,70	<0,0001
VAR.	3	38	5,58	0,0028
TRAT.	4	38	107,50	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,67	0,7668

Variable dependiente: Balance de K

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	101,08	<0,0001
VAR.	3	38	1,66	0,1908
TRAT.	4	38	336,47	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,84	0,6120

Variable dependiente: S.O. Cosecha

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	1061,23	<0,0001
VAR.	3	38	11,60	<0,0001
TRAT.	4	38	1,32	0,2813
VAR. TRAT.	12	38	2,30	0,0253

Variable dependiente: R.O.S. Cosecha

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	21,24	<0,0001
VAR.	3	38	4,07	0,0133
TRAT.	4	38	0,33	0,8535
VAR. TRAT.	12	38	1,07	0,4134

Variable dependiente: Eficiencia Agronómica del N

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	8,47	0,0060
VAR.	3	38	1,14	0,3437
TRAT.	4	38	6,30	0,0005
VAR. TRAT.	12	38	0,81	0,6399

Variable dependiente: Materia Seca Total

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	38	5519,15	<0,0001
VAR.	3	38	10,65	<0,0001
TRAT.	4	38	8,93	<0,0001
VAR. TRAT.	12	38	0,42	0,9474