

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

FERTILIZACIÓN POTÁSICA EN ARROZ (*Oryza sativa*)

por

Mariano Rafael FERNÁNDEZ JUNCAL

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Agronomía, opción
Suelos y Aguas

MONTEVIDEO
URUGUAY
2014

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (MSc) Jorge Hernández, Ing. Agr. (MSc) Martín Bordoli e Ing. Agr. (PhD) Andrés Quincke, el 22 de diciembre de 2014. Autor: Ing. Agr. Mariano Fernández Juncal. Directora Ing. Agr. (PhD) Mónica Barbazán, Co-director: Ing. Agr. (MSc) Marcelo Ferrando.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores Mónica y Marcelo por su orientación, consejo y apoyo.

Al productor arrocero Ing. Agr. Francisco Porto y al molino Casarone Agroindustrial que amablemente brindaron sus predios para el presente estudio.

A la memoria de mis padres.

A Alejandra, Conrado y Amparo, por todo el tiempo que me regalaron para poder estudiar.

Muy especialmente al Ing. Agr. Juan Collazo por su apoyo y ayuda invaluable.

TABLA DE CONTENIDO

| | Página |
|------------------------------------------------------------------|--------|
| PÁGINA DE APROBACIÓN..... | II |
| AGRADECIMIENTOS..... | III |
| RESUMEN..... | V |
| SUMMARY..... | VI |
| 1. <u>INTRODUCCIÓN</u> | 1 |
| 1.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 1.1.1. <u>Potasio en la planta</u> | 3 |
| 1.1.2. <u>Potasio en el suelo</u> | 6 |
| 1.1.3. <u>Situación del potasio en Uruguay</u> | 8 |
| 2. <u>FERTILIZACIÓN POTÁSICA EN ARROZ</u> | 12 |
| 2.1. SUMMARY..... | 12 |
| 2.2. RESUMEN..... | 12 |
| 2.3. INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 15 |
| 2.4.1. <u>Sitios experimentales</u> | 15 |
| 2.4.2. <u>Muestras de suelos y plantas</u> | 17 |
| 2.4.3. <u>Análisis estadístico</u> | 17 |
| 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 18 |
| 2.5.1. <u>Rendimiento seco y limpio</u> | 18 |
| 2.5.2. <u>Concentración de K en hoja</u> | 19 |
| 2.5.3. <u>Cambios en el K intercambiable</u> | 21 |
| 2.6. CONCLUSIONES | 22 |
| 2.7. BIBLIOGRAFÍA | 23 |
| 3. <u>DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES</u> | 28 |
| 4. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> | 29 |

RESUMEN

El arroz es uno de los cultivos más importantes en Uruguay, pero la información nacional sobre potasio (K) en dicho cultivo es escasa. En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica sobre K, la información disponible sobre el mismo generada en el país y, por último, los resultados de un estudio en el que se explora la respuesta a K en arroz en sitios comerciales de la zona de producción arrocería de la Cuenca de la Laguna Merín. Durante las zafas 2011-12 y 2012-13, se instalaron experimentos de respuesta a K en arroz en tres suelos que presentaron a la siembra 0,14, 0,19 y 0,25 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K intercambiable, medido con Acetato de Amonio 1N a pH 7. Los tratamientos fueron cinco dosis de K (0, 30, 60, 120 y 240 kg ha^{-1} de K_2O) aplicados en un diseño de bloques completos con parcelas dispuestas al azar. La fuente de K aplicada fue cloruro de potasio. El agregado de K aumentó el rendimiento en grano en los tres sitios y la respuesta fue inclusive en la dosis más baja aplicada, pero la concentración foliar de K a floración no cambió significativamente. La fertilización potásica produjo incrementos en rendimiento entre 1200 y 1400 kg ha^{-1} . Estos resultados son promisorios e indican la necesidad de continuar profundizando en este nutriente en los sistemas de producción de arroz y suelos asociados.

Palabras clave: potasio intercambiable, concentración foliar, rendimiento en grano

POTASSIC FERTILIZATION IN RICE (*Oriza sativa*)

SUMMARY

Rice is one of the most important crops in Uruguay, but the local information about potassium (K) in this crop is scarce. This paper presents a literature review of this nutrient, the available information on it generated in the country and, finally, the results of a study that explores the response to K from commercial rice crops in sites located in the area representative of the rice production of the Laguna Merin. During the 2011-12 and 2012-13, K trials were installed in three soils with 0.14, 0.19, and 0.25 cmolc kg⁻¹ exchangeable K, measured with Acetate Ammonium 1N at pH 7. The treatments were five rates of K (0, 30, 60, 120 and 240 kg ha⁻¹ of K₂O), using a complete block design with plots randomly arranged. The source of K was potassium chloride. The addition of K increased grain yield in the three sites and the response was even to the lowest rate applied, but the leaf K concentration at flowering did not change significantly. Potassium fertilization produced increases in grain between 1200 and 1400 kg ha⁻¹. These results are promising and indicate the need to continue developing this nutrient in rice production systems and associated soils.

Key words: exchangeable potassium, foliar concentration, grain yield

1. INTRODUCCIÓN

El sector arrocero presenta en Uruguay un dinamismo y desarrollo que lo han hecho referente en innovación tecnológica y productividad a nivel nacional. Mientras en 1980 se produjeron unas 300 mil toneladas de arroz con cáscara, esa cifra pasó a ser más de 1,4 millones de toneladas en 2012 (DIEA, 2013). Este incremento en el volumen estuvo asociado tanto al aumento de la superficie sembrada, como al aumento del rendimiento por unidad de superficie. Según DIEA (2013) en 1980 se sembraron en el país unas 62 mil hectáreas de arroz, con un rendimiento promedio de 5,3 ton ha⁻¹, y en 2012 el área sembrada fue de 180 mil hectáreas, con un rendimiento promedio de 7,8 ton ha⁻¹.

Por cada tonelada de grano producida, el cultivo de arroz requiere 22, 4 y 26 kg de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), respectivamente (García y Correndo, 2013). De estos nutrientes, N y P han sido los más manejados en la mayoría de los cultivos del país, mientras que el K, salvo excepciones, no ha sido considerado en los programas de fertilización de los cultivos. Esto se ha atribuido a que en la región los suelos destinados a agricultura (en especial en Uruguay y en la pampa argentina) presentan en su condición prístina una relativamente alta disponibilidad de K, que explica la escasa o nula respuesta a la fertilización potásica estudiada en varios cultivos. Por lo tanto, la información nacional disponible en sobre este nutriente es en general muy poca, comparada con la de N y P (Barbazán et al., 2012).

En agricultura de secano, relevamientos nutricionales y estudios recientes de respuesta a K realizados en varios cultivos, han mostrado que este nutriente es una de las limitantes de la producción de cultivos en el país (Morón y Baethgen, 1996; Cano et al., 2007; Boutes et al., 2009; García et al., 2009; Barbazán et al., 2011; Bordoli et al., 2012). La respuesta a la fertilización potásica se ha explicado, en parte, por la expansión de la agricultura hacia suelos con menores contenidos de K, facilitada por la adopción de sistemas de laboreo conservacionista y nuevos materiales genéticos. Además, se han constatado descensos en los niveles de K intercambiable en suelos naturalmente ricos en este nutriente, asociados principalmente a la extracción realizada por los cultivos. Por ejemplo, Morón y Quincke (2010) encontraron que

algunos suelos del departamento de Soriano bajo agricultura presentaban valores de K intercambiable entre 40 y 44% más bajos, en comparación con los mismos suelos sin historia agrícola, para las profundidades de 0-7,5 cm y de 7,5-15 cm, respectivamente.

Los suelos dominantes de la Zona Este de Uruguay, que es donde se concentra la actividad arrocerá (DIEA, 2013), se caracterizan por presentar contenidos medios a bajos de K intercambiable, según los datos de suelos presentados por Altamirano et al. (1979). Si bien existen algunos experimentos de respuesta a K en arroz, estos han sido escasos y poco consistentes (Deambrosi y Méndez, 1999; Deambrosi et al., 2000 y 2001; Lavecchia et al., 2004; Lavecchia y Marchesi, 2011).

Dados los resultados encontrados en cultivos de secano, este nutriente ha comenzado a tomar relevancia nacional y regional, y se ha percibido mayor inquietud en el cultivo de arroz, especialmente en suelos bajos en K como los de la Cuenca de la Laguna Merín, donde, además, se está incluyendo el cultivo de soja en la rotación de cultivos.

Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo fue explorar la respuesta a K en el cultivo de arroz en la zona de producción de la Cuenca de la Laguna Merín. Para esto primero se realiza una revisión bibliográfica sobre dicho nutriente. Posteriormente se presenta en formato de artículo científico un estudio para explorar la respuesta a K en cultivos comerciales de arroz en una de las zonas más importantes de producción de este cultivo en el país. Dicho artículo cumple con las normas de la Revista Agrociencia Uruguay, que se encuentran en el sitio: <http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio/about/submissions#authorGuideline>. Luego se delinearán algunas necesidades de investigación para profundizar en esta temática.

1.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1.1. Potasio en la planta

El potasio (K) es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, y uno de los tres macronutrientes primarios, junto al Nitrógeno (N) y Fósforo (P) (Marschner, 1986).

Es absorbido por las plantas en forma iónica (K^+) y en grandes cantidades, mayores que para el resto de los nutrientes, a excepción del N (Marschner, 1986; Tisdale et al., 1993).

El K cumple funciones importantes en la fisiología de las plantas, actuando a nivel del proceso de la fotosíntesis, en la translocación de fotosintatos, síntesis de proteínas, activación de enzimas claves para varias funciones bioquímicas (Marschner, 1986).

El K también mejora la nodulación de las leguminosas.

La absorción del N y del K en cereales, desde macollaje hasta la maduración sigue un patrón similar a la acumulación de la materia seca. Al momento de la cosecha, cerca del 18% del K se transloca hacia los granos (De Datta y Mikkelsen, 1985; Marschner, 1986; Solórzano, 2003), mientras que el resto es reciclado desde el rastrojo al suelo. En cereales gran parte del K absorbido por los cultivos retorna al suelo desde los restos de cosecha.

El K no forma compuestos orgánicos, sino que permanece como un catión móvil en el floema y el xilema, cumpliendo un rol fundamental en el control osmótico (Marschner, 1986).

Este nutriente tiene también un importante rol en la división celular y la fotosíntesis, interviene en la síntesis de almidón y proteínas, y en mecanismos de turgencia y plasmólisis.

Junto con el Magnesio (Mg) y el N, tiene una influencia importante en la fijación fotosintética de CO_2 (Marschner, 1986).

El metabolismo de los carbohidratos está influido por el K y el Mg. Es importante el papel de estos cationes en la producción de ATP y en la actividad de la

enzima rubisco. Una deficiencia de K - como de Mg, Zn y B- puede aumentar la susceptibilidad de los cloroplastos a sufrir daños por fotooxidación (formación de especies reactivas de oxígeno (o sustancias ROS) - como el H₂O₂) (Marschner, 1986; Cakmak, 2011).

La exportación de hidratos de carbono al floema está afectada por la absorción de K y Mg en la etapa reproductiva, cuando ocurre el transporte masivo de carbohidratos. En esa etapa es necesario que la hoja presente una adecuada concentración de estos nutrientes para mantener y maximizar el transporte hacia los granos. A nivel radicular, deficiencias de K y Mg afectan la partición de carbohidratos ya que reducen severamente el crecimiento radicular debido a un impedimento en la translocación de carbohidratos (Cakmak, 2011).

El rol del K en la tolerancia a enfermedades y resistencia al vuelco en vegetales es importante. Es considerado uno de los nutrientes que más afectan la relación hospedante-patógeno. Carmona y Sautua (2011), trabajando en maíz, encontraron que una alta relación N/K y deficiencia de K provocaba un aumento de plantas enfermas. El K estimula la acción de sustancias anti fúngicas en la planta, haciendo más difícil la entrada de patógenos. Una deficiencia en K puede provocar una disminución de fenoles y fitoalexinas que poseen propiedades anti fúngicas (Carmona y Sautua, 2011).

La deficiencia de K puede provocar acumulación de azúcares de bajo peso molecular, amidas y aminoácidos, favoreciendo la infección de hongos patógenos que no pueden atacar la proteína vegetal como tal, pero sí los componentes que aparecen con las deficiencias potásicas (Dobermann y Fairhurst, 2000).

Una característica que hace a las plantas más susceptibles al ataque e infestación de fitopatógenos, es la disponibilidad de fotosintatos en el tejido apoplástico. Alteraciones en la permeabilidad de las membranas celulares de raíces y hojas, causadas por la deficiencia de K, pueden promover el crecimiento de patógenos. Plantas con deficiencias inducidas de K, Ca, Zn y B aumentan la sensibilidad a enfermedades, atribuida a una exudación estimulada de compuestos de carbono a tejidos apoplásticos (Marschner, 1986; Cakmak, 2011; Fontanetto et al., 2011; Carmona y Sautua, 2011).

Los síntomas de deficiencia de K en las plantas en general corresponden a un color verde claro en hojas, con puntas con manchas amarillentas y necrosadas, marchitez en hojas adultas, reducción de la altura de las plantas, espiguillas estériles, por baja viabilidad del polen y translocación tardía de carbohidratos, bajo peso de granos, reducción del poder de oxidación en raíces, y disminución de la resistencia a sustancias tóxicas en raíces que se encuentran en condiciones anaeróbicas. Dobermann y Fairhurst (2000) informan toxicidad por hierro (Fe) bajo estas circunstancias y baja resistencia a enfermedades.

En el cultivo de arroz, el K es requerido en cantidades similares a las de N. Se ha estimado que por cada tonelada de arroz producido el cultivo requiere 22 kg de N, 4 kg de P y 26 kg de K (García y Correndo, 2013). Otros investigadores han sugerido que por cada kg de K absorbido en arroz se obtienen 69 kg de grano (Dobermann y Fairhurst, 2000). Según Von Uexkul (citado por Chebataroff, 2013), en variedades modernas de arroz, los requerimientos de K son el doble que los de N y P sumados. Con rendimientos entre 5,6-8 ton ha⁻¹, el cultivo absorbe aproximadamente entre 130 y 180 kg ha⁻¹ de K (García y Correndo, 2013). En Venezuela, según Solórzano (2003), un cultivo de arroz (variedad Cimarrón de 109 días de ciclo) absorbió 195 kg de K ha⁻¹, acumulando el 18% del mismo en las panículas.

Durante el macollaje del cultivo de arroz, el K interviene en la determinación del número de panojas, promueve la síntesis y el movimiento de carbohidratos en la planta, interviniendo en la formación y peso de los granos.

El K también tiene un importante papel en la resistencia a enfermedades y condiciones climáticas adversas (en especial al frío luego de la floración), aspecto muy importante en el cultivo de arroz. Un incremento en la relación K/N en hojas al momento de la floración reduce los índices de esterilidad por bajas temperaturas (Dobermann y Fairhurst, 2000). Se han reportado disminuciones en la esterilidad en variedades susceptibles, del 80% al 20% de granos vanos, cuando la relación K/N pasó de 0,2 a 0,6 (Chebataroff, 2013).

Un indicador de suficiencia de K en el cultivo de arroz es la concentración del mismo en planta. Para macollaje, el valor crítico de K en hoja es 1,00 a 2,53%,

mientras que en la planta entera varía de 0,57 a 1,36% (Dobermann y Fairhurst, 2000; Solórzano, 2003). Otros autores, en una revisión de análisis de plantas, mencionan los valores de 1,0-3,5 % en hoja bandera (Correndo y García, 2012).

En suelos inundados pueden aparecer síntomas de deficiencia de K por inhibición de su absorción, asociado a toxicidad de H₂S o ácidos orgánicos (Chebataroff, 2013). Por otro lado, el K puede aumentar en la solución del suelo, cediendo posiciones en el complejo de intercambio catiónico al Fe y Mn. En estas condiciones de suelos, además, las interacciones entre el metabolismo del N y la absorción del K son conocidas. En suelos inundados, con ambientes reductores, el NH₄⁺ es la forma más abundante de N disponible para el arroz. En esta situación este catión puede competir con el K⁺ por transportadores a nivel de la raíz. El K presenta una cinética bifásica, según la concentración en el medio externo a la raíz con transportadores de baja afinidad para [NH₄⁺] > 1mM (Monza y Márquez, 2004). Hasta ahora no se han identificado los transportadores de baja afinidad para NH₄⁺, salvo los canales y transportadores de K⁺, los cuales pueden transportar el NH₄⁺, generando la competencia. La afinidad por el NH₄⁺ y el K⁺ es igual, lo que puede provocar la situación anterior. Los transportadores de alta afinidad se inhiben a altas concentraciones de K⁺, quedando la absorción a cargo de los transportadores de baja afinidad, en los que puede haber competencia con el NH₄⁺ (Taiz y Zeiger, 2006).

1.1.2. Potasio en el suelo

En la corteza terrestre, el K es uno de los nutrientes de mayor abundancia (2,6% de la corteza), estando en séptimo lugar luego del O, Si, Al, Fe, Ca y el Na (Evangelou, 1998). La dinámica del K en el suelo es más sencilla comparada con la de nutrientes como el P y el N, puesto que no forma compuestos orgánicos (Black, 1975). En el suelo aparece en cuatro formas en equilibrio: K en la solución del suelo, desde donde lo absorben las plantas; el K intercambiable, adsorbido en arcillas y coloides orgánicos (entre estas dos fracciones acumulan entre 0,1 al 2% del total); el K fijado o no intercambiable (entre el 1 y 10% del total), aprovechable a mediano y largo plazo por liberación desde las micelas de las arcillas (sobre todo en inundación)

y, por último, el K en formas estructurales (90-98% del total), componentes de la red cristalina de minerales en el suelo, no aprovechables por las plantas (Tisdale et al., 1993).

El K llega a las raíces de las plantas principalmente por difusión (88-96%), a través de un gradiente de zonas de mayor a menor concentración. Secundariamente, es absorbido por flujo masal e intercepción radicular (4-12%) (Black, 1975; Marschner, 1986, Tisdale et al., 1993).

La dinámica del K en los primeros 20 cm del suelo no depende sólo del balance acumulado de K, sino que se deben considerar otras variables como interacciones entre propiedades del suelo y dinámica entre las distintas fracciones del K o interacción entre capas del perfil y estratificación superficial del K. Adicionalmente, los ciclos de secado y humedecimiento del suelo ocasionan la contracción y expansión de las micelas de arcillas que pueden liberar K a la solución que no estaba disponible (Black, 1975; Hernández et al., 1988; Mallarino, 2013). Chebataroff (2013) sugiere que esto puede ser la causa de la variación entre los análisis de suelo en relación a las condiciones previas del cultivo, explicando respuestas erráticas.

Diversas condiciones del suelo pueden hacer variar la dinámica del K y su disponibilidad: en suelos arcillosos con altos contenidos de arcillas 2:1 se puede producir una alta fijación del K agregado. Por otro lado, en suelos con una alta proporción de cationes divalentes como Calcio (Ca) y Mg pueden crear una relación desfavorable para la absorción de K por las plantas, lo cual es una situación frecuente en suelos calcáreos. Fontanetto et al. (2011) mencionan los siguientes umbrales críticos: $Ca/K = 13$ y $Ca+Mg/K = 7-11$. Relaciones mayores a estos valores podrían indicar una baja disponibilidad de K para los cultivos.

La dinámica en suelos inundados tiene variaciones respecto de la situación en secano. En la capa superior de un suelo cuyos primeros 15 o 20 cm están cubiertos por una lámina de agua, se producen cambios físico-químicos importantes, asociados a condiciones anaeróbicas. En esta capa, con menor presión de oxígeno (O_2), los poros y agregados del suelo se saturan de agua, las arcillas se expanden, y disminuye

la estabilidad de los agregados del suelo; se produce una modificación de la dinámica del N y aumento de la disponibilidad de P y K (Gamarra, 1996).

A medida que el suelo adquiere un ambiente reductor (luego de la desaparición del O₂ en solución), algunos elementos de suelo como el Fe, el S y el Mn varían su forma, pudiendo incluso originar sustancias tóxicas para el cultivo (Black, 1975).

1.1.3. Situación del potasio en Uruguay

Los suelos de Uruguay en su condición casi prístina presentan un rango muy amplio en el contenido de K intercambiable, según los datos presentados por Altamirano et al. (1979). De acuerdo a esos datos, Barbazán et al. (2012) estimaron que los suelos con menores contenidos de K intercambiable abarcarían un área de más de cinco millones de hectáreas, incluyendo varias unidades de suelo en zonas de importancia en el cultivo de arroz (Unidades: Lascano, Río Branco, Rincón de Ramírez, entre otras).

Según Oudri et al. (1976) la respuesta al agregado de K había sido muy escasa, por lo cual sólo se recomendaba fertilizar con K los cultivos más exigentes. Estos autores sugirieron tomar como referencia en cultivos de secano el dato de K intercambiable de los primeros 20 cm del perfil del suelo, extraído con Acetato de Amonio 1N a pH 7, el cual es el método más comúnmente usado a nivel mundial para la extracción de K. El valor de K intercambiable tomado como referencia fue 0,30 cmol_c kg⁻¹, sin una clara base de datos.

Con la intensificación de la agricultura, relevamientos nutricionales (Morón y Baethgen, 1996; Barbazán et al., 2011; Bautes et al., 2009; Bordoli et al., 2012) y recientes estudios de respuesta a K en varios cultivos (Cano et al., 2007; Bautes et al., 2009, García et al., 2009; Barbazán et al., 2011) muestran que este nutriente es una de las limitantes de la producción de cultivos en el país.

La respuesta a la fertilización potásica se ha explicado, en parte, por la expansión de la agricultura hacia suelos con menores contenidos de K, facilitada por la adopción de sistemas de laboreo conservacionista y de nuevos materiales

genéticos. A partir de un estudio resumiendo resultados de experimentos recientes, se ha sugerido tomar provisoriamente en cultivos de secano, el nivel crítico de $0,34 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Barbazán et al., 2011).

Por otro lado, se han constatado descensos en los niveles de K intercambiable en suelos naturalmente ricos en este nutriente, asociados principalmente a la extracción realizada por los cultivos. En un estudio de 48 sitios de una de las zonas agrícolas tradicionales del Litoral Oeste del país, Morón y Quincke (2010) encontraron que los suelos con historia agrícolas presentaban niveles de K intercambiable entre un 40 y 44% más bajos que los mismos suelos sin historia agrícola para las profundidades de 0-7,5 cm y de 7,5-15 cm, respectivamente.

En otras regiones, como en molisoles de la región pampeana norte argentina, no se ha encontrado respuesta a K, debido a que los suelos son naturalmente ricos en este nutriente. No obstante, en un estudio realizado en Entre Ríos y Santa Fé (zona este de la República Argentina), Fontanetto et al. (2011) observaron incrementos de rendimiento de hasta 998 kg ha^{-1} por el agregado K en el rendimiento acumulado de 12 cultivos sucesivos de trigo, maíz y soja. En esa región se ha registrado también una disminución del K intercambiable en el suelo, en rotaciones agrícolas integradas por maíz, trigo y soja (para el período comprendido entre 2000 y 2009), con tasas de disminución anual de $0,02$ a $0,04 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K intercambiable en los primeros 20 cm del perfil del suelo. Los experimentos de ese trabajo tenían tres tratamientos: fertilización con NPS, sin fertilización y situación prístina. Los sitios más productivos siempre acusaron mayor tasa de extracción. En otros suelos se encontraron disminuciones entre $0,08$ y $0,09 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Con esta tasa de disminución, teniendo en cuenta los niveles críticos de K disponible reportados a nivel internacional (entre $0,38$ y $0,51 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) se podría comenzar a observar respuesta a fertilización potásica dentro de unos 15 años (Correndo et al., 2011).

Particularmente en el cultivo de arroz en Uruguay, los estudios de respuesta a K son escasos y con resultados inconsistentes. En dos experimentos de respuesta a K realizados en suelos de la Zona Este, con valores de K intercambiable de $0,28 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, no se observó efecto del agregado de K (Deambrosi y Méndez 1999). Sin embargo, en otros estudios realizados en la misma zona el agregado de K aumentó el

rendimiento en grano de entre 10-12% con dosis de 60 kg ha⁻¹ de K₂O, en suelos con 0,11-0,13 cmol_c kg⁻¹ de K intercambiable (Deambrosi et al., 2000). También se observó que con dosis crecientes de K en uno de los sitios aumentó el número de granos llenos y semi-llenos por m², disminuyendo la esterilidad (aunque en otro sitio con la variedad INIA Tacuarí, ésta aumentó).

En otros seis experimentos de respuesta a K, con valores de K intercambiable entre 0,15 y 0,46 cmol_c kg⁻¹, Deambrosi et al. (2001) no encontraron respuesta en rendimiento en grano en ningún sitio. Los mismos autores estudiaron la relación entre el agregado de K y el índice de severidad de enfermedades del tallo (principalmente *Sclerotium oryzae*), resultando en un descenso lineal de dicho índice con el agregado de K. En igual sentido, diversos autores mencionan la relación inversa entre la incidencia de la enfermedad a *Pyricularia oryzae* y la fertilización K, N y P (Fontanetto et al., 2011; Deambrosi, 2000 y 2001; Chebataroff, 2013). Por su parte, Gamarra (1996) no encontró relación entre la incidencia de enfermedades, en especial *Pyricularia oryzae* y la fertilización potásica, aunque observó que estuvo más asociada a la fertilización nitrogenada y a excesos de P.

Lavecchia et al. (2004), trabajando con la variedad El Paso 144, en Planosoles de la Unidad Río Tacuarembó con 0,17 cmol_c kg⁻¹ de K intercambiable, encontraron una tendencia positiva en el rendimiento frente al agregado de K, pero no diferente significativamente. Las dosis probadas fueron 0, 40 y 60 unidades de K₂O. El aumento de rendimiento fue de 525 kg ha⁻¹ con 40 unidades de K₂O y de 581 kg ha⁻¹ con 60 unidades de K₂O. Más tarde (Lavecchia y Marchesi, 2011) trabajando en dos sitios de la Zona Noeste del país, encontraron respuesta a K en el sitio que presentaba 0,11 cmol_c kg⁻¹ de K intercambiable, pero no en el que tenía inicialmente 0,33 cmol_c kg⁻¹ de K intercambiable.

La carencia de respuesta a la fertilización con K puede tener los siguientes motivos. Por un lado, el nivel de K existente en el suelo podría ser suficiente para cubrir las necesidades del cultivo, o sea, el nivel crítico de K en el suelo para arroz podría ser inferior al de cultivos de secano. En suelos arcillosos o con valores altos de arcillas 2:1 con alta cantidad de K retenido en posiciones no intercambiables, ese K podría ser aprovechable por el cultivo. Además, en suelos inundados habría un

aumento de la disponibilidad del nutriente, en donde el K desplazaría al Fe^{2+} y Mn^{2+} de las posiciones de intercambio incrementando su disponibilidad, especialmente en suelos livianos. Por otro lado, el Na presente en este tipo de suelos (Solods, ricos en este elemento) podría sustituir parcialmente alguna función del K dentro de la planta (Machado, 1985; Chebataroff, 2013). Además, podría haber un ingreso adicional de K en el sistema a través del agua de riego.

Aún sin una clara base de datos, la Guía de Buenas Prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay recomienda fertilizar con K aplicando una única dosis a la siembra (Uraga et al., 2013). En esa Guía se recomienda usar el dato del análisis de suelos de $0,20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K intercambiable medido con Acetato de Amonio 1N como valor de referencia. Por debajo de este valor se recomienda aplicar entre 20 y 30 kg ha^{-1} de K_2O , como fue sugerido por Gamarra (1996). Chebataroff (2013) sugiere tomar como referencia el valor de $0,154 \text{ cmol kg}^{-1}$ de K, recomendando aplicar 20 kg ha^{-1} de K_2O o menos si el K intercambiable está por encima de ese valor, 60 si el suelo presenta entre 0,08 y $0,154 \text{ y } 80 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O si el K intercambiable es menor a 0,08. En otros países, como en Brasil, para suelos de Río Grande de Sur y Santa Catarina el valor de referencia medido con el extractante Mehlich 1 es de $0,248 \text{ cmol kg}^{-1}$ de K (Bacha et al., 2003).

2. FERTILIZACIÓN POTÁSICA EN ARROZ

Fernández Mariano^{1*}, Barbazán Mónica², Ferrando Marcelo²

¹Asesor privado

²Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Av. E. Garzón 780, Montevideo 12900, Uruguay

*Autor de correspondencia: Mariano Fernández

Correo electrónico: marianofernandez@gmail.com

2.1. SUMMARY

Recent nutritional surveys and studies of response to the addition of potassium (K) in various dryland crops have shown that this nutrient is one of the limiting of the crop production in Uruguay, but in rice these types of studies are scarce. Therefore, the aim of this study was to explore the response to K in commercial rice crops on sites located in the main area of rice production of Uruguay, in the Laguna Merin Basin. During the harvest season of 2011-12 and 2012-13, K-response trials were installed in three commercial rice crops in soils with 0.14, 0.19, and 0.25 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ exchangeable K, measured with Acetate Ammonium 1 N to pH 7. The treatments were five rates of K (0, 30, 60, 120, and 240 kg ha^{-1} of K_2O), using a randomized complete block design. The K source of K was potassium chloride. The addition of K increased grain yield in the three sites and the response was even at the lowest dose applied, but the K concentration in leaves did not change. Potassium fertilization produced increases in grain yield between 1200 and 1400 kg ha^{-1} . These results are promising and indicate the need to continue the studies on this nutrient in different rice production systems and associated soils.

Key words: exchangeable potassium, foliar concentration, grain yield

2.2. RESUMEN

Recientes relevamientos nutricionales y estudios de respuesta al agregado de potasio (K) en varios cultivos de secano han mostrado que este nutriente es una de las

limitantes de la producción de los cultivos en Uruguay, pero en arroz estos tipos de estudios son escasos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue explorar la respuesta a K en arroz en cultivos comerciales de la principal zona de producción arroceras de Uruguay, en la Cuenca de la Laguna Merín. Durante las zafras 2011-12 y 2012-13, se instalaron experimentos de respuesta a K en arroz en tres suelos que presentaron a la siembra 0,14, 0,19 y 0,25 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de K intercambiable, medido con Acetato de Amonio 1 N a pH 7. Los tratamientos fueron cinco dosis de K (0, 30, 60, 120 y 240 kg ha^{-1} de K_2O) aplicados en parcelas dispuestas al azar en un diseño de bloques completos. La fuente de K aplicada fue cloruro de potasio. El agregado de K aumentó el rendimiento en grano en los tres sitios y la respuesta fue inclusive en la dosis más baja aplicada. La fertilización potásica produjo en promedio incrementos en rendimiento entre 1200 y 1400 kg ha^{-1} , pero la concentración de K en hoja no cambió en forma significativa. Estos resultados son promisorios e indican la necesidad de continuar profundizando en este nutriente en distintos sistemas de producción de arroz y suelos asociados.

Palabras clave: potasio intercambiable, concentración foliar, rendimiento en grano

2.3. INTRODUCCIÓN

El arroz es uno de los cultivos más importantes en Uruguay, el cual está posicionado entre los diez primeros países exportadores de este grano. A nivel nacional el rendimiento promedio es de casi 7,8 t ha^{-1} (DIEA, 2013), y, dados los precios de producción y las proyecciones del aumento de la demanda, uno de los desafíos para el país es aumentar el volumen exportado en base al aumento de la productividad por superficie.

Las Zonas del Norte, Litoral Oeste, Centro y Este son las principales áreas donde se ubica la actividad arroceras en el país (DIEA, 2013). Los suelos dominantes de la Zona Este son Planosoles ócricos de la Unidad Río Branco y Gleysoles de la Unidad India Muerta (Durán y García, 2007), los cuales se caracterizan por presentar contenidos medios a bajos de K intercambiable, según los datos presentados por

Altamirano et al. (1979). En esta zona, los resultados de experimentos de respuesta a K en arroz han sido escasos y poco consistentes. Deambrosi y Méndez (1999) en un sitio con $0,28 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K intercambiable estudiaron la respuesta a K en dos variedades (INIA Tacuarí y El Paso 144), no encontrando respuesta en ninguno de los dos sitios. Más tarde, Deambrosi et al. (2000 y 2001) estudiaron la respuesta del cultivo de arroz al agregado de K en siete sitios de la Zona Este, con valores de K intercambiable dentro del rango de $0,11$ a $0,48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Sólo se encontró respuesta a K en el sitio con valores de K intercambiable de $0,11 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, aunque en un sitio con valor de $0,24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ la respuesta en rendimiento fue significativa a la probabilidad de $0,11\%$.

Lavecchia et al. (2004), trabajando con la variedad El Paso 144, en Planosoles de la Unidad Río Tacuarembó, con $0,17 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K intercambiable en la profundidad de 0 a 20 cm del perfil, encontraron tendencia positiva al agregado de K, pero no significativa estadísticamente. Los incrementos en rendimiento respecto al tratamiento sin agregado de K fueron de 525 kg ha^{-1} con 40 unidades de K_2O y de 581 kg ha^{-1} con 60 unidades. Otros estudios en la Zona Este y Noreste han encontrado aumentos en rendimiento de arroz de entre 10 - 12% con dosis de hasta 60 kg ha^{-1} de K_2O , en suelos con $0,17 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K intercambiable (Lavecchia y Marchesi, 2011).

La Guía de Buenas Prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay recomienda fertilizar con K aplicando una única dosis a la siembra (Uraga et al., 2013). En esa Guía se recomienda usar como valor de referencia de $0,20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K intercambiable extraído con Acetato de Amonio 1N . Por debajo de este valor se recomienda aplicar entre 20 y 30 kg ha^{-1} de K_2O , como fue sugerido por Gamarra (1996).

Este valor es mucho menor al valor de $0,34 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, sugerido por Barbazán et al. (2011) para cultivos de secano y en siembra directa. Las diferencias entre los valores de referencia pueden atribuirse a la diferente dinámica del K en sistemas que incluyen riego e inundación (como es el caso del arroz), y a que algunas funciones del K en las plantas podrían ser sustituidas por otros cationes como sodio (Na), frecuentes en los suelos donde se realiza este cultivo.

Debido a estas diferencias y dados los resultados encontrados en cultivos de secano, este nutriente ha comenzado a tomar relevancia nacional y regional, y se ha percibido mayor inquietud en el cultivo de arroz, especialmente en suelos bajos en K como los de la Cuenca de la Laguna Merín, que, además, están incluyendo el cultivo de soja en el sistema de producción.

Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo fue explorar la respuesta a K en cultivos comerciales de arroz en tres sitios representativos de la principal zona de producción arrocerá del país, ubicada en la Cuenca de la Laguna Merín.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Sitios experimentales

Se instalaron tres experimentos en predios comerciales del Departamento de Cerro Largo, en la Cuenca de la Laguna Merín. En el Cuadro 1 se presenta la información resumida para los tres sitios.

Cuadro 1. Localización geográfica de los sitios experimentales de respuesta a potasio.

| Sitio | Establecimiento | Latitud | Longitud |
|-------|--------------------------|------------|------------|
| 1 | Alfonso Porto | -32.712854 | -53.498050 |
| 2 | Alfonso Porto | -32.712892 | -53.495297 |
| 3 | Casarone Agro Industrial | -32.657944 | -53.329987 |

Los suelos utilizados fueron clasificados como Planosoles Dútricos Ócricos de la Unidad Río Branco (MAP- DSF, 1976), cuyo material de origen corresponde a la Formación Dolores. En el Cuadro 2, se presentan características químicas y físicas de los suelos de los sitios, para muestras tomadas de los primeros 20 cm de suelo de profundidad.

Cuadro 2. Características químicas y físicas de los suelos de los sitios estudiados, de muestras de suelo de 0-20 cm.

| Sitio | N-NO ₃ | P | pH | MO | Ca | Mg | K | Na | CIC | Textura | | |
|--------|---------------------|---|------------------|-----|-------|------------------------------------|-------|-------|------|---------|----|----|
| | | | | | | | | | | Arc | Ar | L |
| Bray 1 | | | | | | | | | | | | |
| | mg kg ⁻¹ | | H ₂ O | % | ----- | cmol _c kg ⁻¹ | ----- | ----- | % | ----- | | |
| 1 | 38 | 3 | 6 | 1,9 | 3,00 | 2,00 | 0,25 | 0,20 | 5,40 | 21 | 24 | 55 |
| 2 | 11 | 2 | 6 | 3,3 | 4,00 | 2,00 | 0,19 | 0,90 | 6,70 | 24 | 27 | 49 |
| 3 | 13 | 7 | 5,2 | 3,0 | 3,00 | 1,00 | 0,14 | 0,50 | 5,10 | 18 | 34 | 48 |

El manejo del cultivo en los tres sitios -salvo la fertilización con K- siguió las prácticas de manejo de los predios comerciales en los cuales fueron instalados. En el Cuadro 3 se muestran los principales manejos de los cultivos estudiados. En los tres sitios se aplicó entre 60 y 70 kg ha⁻¹ de urea a fines de diciembre y durante la primera quincena de enero.

Cuadro 3. Principales prácticas de manejo de los sitios.

| Sitio | Fecha de siembra | Variedad | Densidad de siembra kg ha ⁻¹ | Fertilización base kg ha ⁻¹ | Fecha de Inundación | Fecha de Cosecha |
|-------|------------------|--------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|------------------|
| 1 | 20/11/11 | INIA Tacuarí | 190 | 200 (18-46-46-0) | 18/12/11 | 25/03/12 |
| 2 | 25/10/12 | El Paso 144 | 185 | 150 (22-23-23-0) | 10/12/12 | 14/03/13 |
| 3 | 28/10/12 | El Paso 144 | 130 | 150 (22-23-23-0) | 25/11/12 | 15/03/13 |

El diseño experimental fue de parcelas de 3 x 6 m, dispuestas en bloques completos al azar, con tres repeticiones. Los tratamientos fueron: 0, 30, 60, 120 y 240 kg ha⁻¹ de K₂O aplicadas como cloruro de K (KCl) en superficie. La aplicación de K se realizó en forma manual, a la siembra.

2.4.2. Muestras de suelos y plantas

Las muestras de suelo (de 0 a 20 cm de profundidad) fueron tomadas en dos momentos: previo a la instalación de los experimentos se tomó una muestra compuesta por repetición, y luego de la cosecha, se tomaron muestras compuestas en los tratamientos testigo y 240 kg ha⁻¹ de K₂O.

Las muestras fueron secadas a estufa por 48 horas a 40°C y molidas hasta un tamaño menor a 2 mm. En cada muestra se midió pH en agua y en KCl 1M por potenciometría (relación suelo/agua o suelo/ KCl= 1/2,5). La materia orgánica fue calculada a partir de la determinación de carbono orgánico por titulación con sulfato ferroso, luego de atacar una muestra con dicromato de K y ácido sulfúrico, sin calor exterior. El P asimilable fue analizado por el método Bray-1. La extracción de Ca, Mg, K y Na se realizó con Acetato de Amonio 1 N a pH 7 y luego se determinaron por absorción atómica (Ca y Mg) y emisión (K y Na).

Para el análisis foliar se recolectaron 40 hojas bandera de cada parcela, en prefloración. Las muestras fueron secadas a 60°C por 48 horas (hasta peso constante) y molidas hasta un tamaño menor a 1mm. Para conocer la concentración de K total se usó el método de cenizas (dilución con ácido fluorhídrico de 1 g de muestra sometida a calentamiento en mufla a 500°C), y determinación por espectrometría de emisión.

El cultivo se cosechó en forma manual a madurez fisiológica, determinándose el rendimiento con 13% de humedad de grano. Los rendimientos se expresaron en peso de granos secos y limpios. No se realizaron mediciones de calidad del grano.

2.4.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante Análisis de Varianza, realizándose contrastes ortogonales entre distintos tratamientos, utilizando el programa SAS (2008).

2. 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. Rendimiento seco y limpio

El rendimiento promedio entre tratamientos en los tres sitios varió de 8856 y 10817 kg ha⁻¹, y fue superior a la media nacional (7794 kg ha⁻¹ para la cosecha 2011-12 según DIEA, 2013). En todos los sitios, el agregado de K produjo un aumento en el rendimiento (P <0,10), siendo mayor el incremento con la dosis más baja aplicada (Cuadro 4). Con el agregado de más K el rendimiento no aumentó. La respuesta al agregado de K era esperada porque todos los sitios presentaron niveles en suelo menores o cercanos a los de referencia. En el Sitio 2, donde la respuesta fue significativa a P< 0,08, es de destacar que el valor de sodio (Na) intercambiable del suelo era superior al de K, pudiendo indicar que en este suelo el Na podría haber sustituido al K en algunas funciones dentro de la planta.

Cuadro 4. Rendimiento de grano seco y limpio de arroz según tratamiento y sitio.

| Sitio | Dosis de K ₂ O (kg ha ⁻¹) | | | | | Contrastes ortogonales | | | | |
|-------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|------------|-----------|------------|------------|
| | 0 | 30 | 60 | 120 | 240 | Efecto K | 0 vs resto | 30 vs +60 | 60 vs +120 | 120 vs 240 |
| | ----- Rendimiento (kg ha ⁻¹) ----- | | | | | ----- P>F ----- | | | | |
| 1 | 10018 | 11080 | 11000 | 11108 | 10878 | 0,01 | 0,01 | 0,65 | 0,97 | 0,33 |
| 2 | 7924 | 9650 | 9323 | 9447 | 8774 | 0,08 | 0,01 | 0,33 | 0,67 | 0,26 |
| 3 | 7963 | 9058 | 9787 | 8988 | 8483 | 0,05 | 0,02 | 0,95 | 0,04 | 0,33 |

No hubo diferencias significativas entre los tratamientos fertilizados, salvo en el Sitio 3, donde el tratamiento con la dosis de 60 unidades de K₂O presentó un rendimiento mayor al promedio obtenido con las dosis 120 y 240 (P<0,04).

Las diferencias entre el testigo y el promedio de todos los tratamientos fertilizados, fueron de 999, 1375 y 1117 kg ha⁻¹, para los Sitios 1, 2 y 3, respectivamente.

Para la dosis más baja aplicada (30 kg ha⁻¹ de K₂O), la respuesta fue mayor en el Sitio 2 con 58 kg de grano por kg de K₂O agregado; luego le siguieron los Sitios 1 y 3 con respuestas similares (35 y 36 kg de grano por kg de K₂O, respectivamente). Estas diferencias no se relacionaron directamente con el nivel de K en el suelo u otras propiedades del mismo, por lo cual se sugiere que existieron otras variables explicando estos resultados.

2.5.2. Concentración de K en hoja

En el Cuadro 5 se muestran los niveles encontrados en hoja por sitio y tratamiento. Según los autores que se consulten, la concentración de K en hoja estuvo siempre por encima o por debajo a los niveles considerados adecuados. Si se toman los valores de Reuter et al. (1997), donde se menciona que el valor considerado adecuado es 0,80 % de K en hoja bandera, todos los valores de concentración de K de los sitios estuvieron por encima de dicha referencia. En cambio, si se toman los valores propuestos por otros autores, como el de 3,5% que mencionan Correndo y García (2012), en todos los sitios los valores de K foliar estuvieron por debajo de las concentraciones adecuadas.

En ninguno de los sitios el agregado de K produjo diferencias significativas en la concentración de K en hoja entre tratamientos, aunque con las dosis de 120 kg ha⁻¹ de K₂O se observó un incremento en la concentración de K respecto al tratamiento testigo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Concentración de K en hoja según tratamientos para todos los sitios.

| Sitio | Dosis de K ₂ O (kg ha ⁻¹) | | | | | Efecto K | Contrastes ortogonales | | | |
|-------|--------------------------------------------------|------|------|------|------|----------|------------------------|-----------|------------|------------|
| | 0 | 30 | 60 | 120 | 240 | | 0 vs resto | 30 vs +60 | 60 vs +120 | 120 vs 240 |
| | Concentración de K en hoja (%) | | | | | | P>F | | | |
| 1 | 1,23 | 1,37 | 1,22 | 1,32 | 1,28 | 0,50 | 0,39 | 0,24 | 0,36 | 0,62 |
| 2 | 1,21 | 1,05 | 1,23 | 1,25 | 1,20 | 0,73 | 0,81 | 0,21 | 0,94 | 0,78 |
| 3 | 1,17 | 1,10 | 1,11 | 1,34 | 1,26 | 0,42 | 0,74 | 0,26 | 0,15 | 0,61 |

Sólo en el Sitio 1 se observó una relación entre la concentración de K en hoja y el rendimiento en grano (Fig. 1). Algunas explicaciones para este comportamiento podrían ser que durante el ciclo se hubiera aportado K con el agua de riego (lo cual no fue medido) y/o que hubiera ocurrido una sustitución en algunas funciones del K por el Na (cationes que pueden intercambiar funciones y que ante una riqueza del Na puede obstaculizar o competir con el K en sus funciones provocando la falta de respuesta a éste último). Los suelos donde se ubicaron los experimentos presentaron niveles altos en Na, lo que puede provocar dichas interacciones. En los Sitios 2 y 3 los suelos presentaron casi 5 veces más Na que K intercambiable.

La menor concentración foliar de K en los Sitios 2 y 3 con el aumento de rendimiento reflejarían un efecto dilución del K en planta.

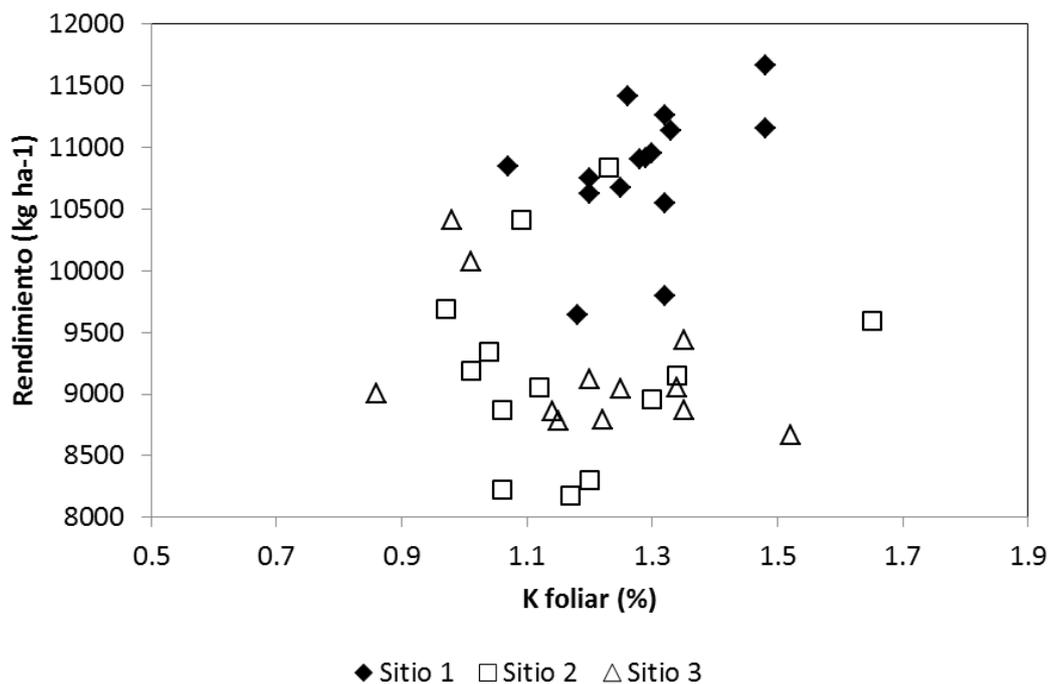


Figura 1. Relación entre el rendimiento en grano y la concentración de K en hoja para todos los sitios.

2.5.3. Cambios en el K intercambiable

En el Cuadro 6 se muestran los valores de K intercambiable antes de la aplicación de las dosis 0 y 240 kg ha⁻¹ de K₂O y luego de la cosecha del cultivo en ambos tratamientos. Estos valores provienen de una muestra compuesta de las tres repeticiones en cada tratamiento.

Cuadro 6. Potasio intercambiable antes de la aplicación de potasio y a la cosecha del cultivo de arroz, y el cambio producido.

| Sitio | Dosis kg ha ⁻¹ | K antes | K después | Cambio |
|-------|------------------------------|------------------------------------------------|-----------|--------|
| | | ----- cmol _c kg ⁻¹ ----- | | |
| 1 | 0 | 0,25 | 0,16 | -0,09 |
| | 240 | 0,25 | 0,12 | -0,13 |
| 2 | 0 | 0,19 | 0,21 | 0,02 |
| | 240 | 0,19 | 0,10 | -0,09 |
| 3 | 0 | 0,14 | 0,19 | 0,05 |
| | 240 | 0,14 | 0,19 | 0,05 |

En estos sitios, los valores de K intercambiable al momento de la cosecha en los tratamientos sin agregado de K respecto al valor observado en la instalación de los experimentos registraron cambios muy bajos, menores a 0,1 cmol_c kg⁻¹. Mientras en el Sitio 1 se produjo un descenso de 0,09 cmol_c kg⁻¹, en el Sitio 2 se registró un aumento en el K intercambiable de 0,02 y en el Sitio 3 de 0,05. Estos valores equivalen a 88, 20 y 49 kg ha⁻¹ de K, respectivamente, asumiendo una densidad aparente del suelo a los 20 cm de profundidad de 1,25 g cc⁻¹.

Las variaciones del K intercambiable en el suelo entre el K medido a la siembra y luego de la cosecha de los cultivos puede deberse a varios factores.

Por un lado, los descensos podrían estar asociados a la extracción que realizan los cultivos. Según los valores de extracción de 2,3 kg de K ton⁻¹ de grano (García y Correndo, 2013), la extracción de K estimada en el tratamiento testigo fue de 23, 18

y 18 kg ha^{-1} de K para los Sitios 1, 2 y 3, respectivamente. Para la dosis de 240 kg ha^{-1} de K_2O (o sea, 200 kg ha^{-1} de K), la estimación de K extraído en grano fue de 25, 20 y 20 kg ha^{-1} de K, para los mismos sitios, respectivamente, lo cual corresponde a aproximadamente un 9% del K total absorbido. Sin embargo, es probable que en el momento de la cosecha parte del K absorbido aún se encontrara en los restos vegetales. Para estos experimentos, las cantidades estimadas fueron 260, 206 y 207 kg ha^{-1} de K absorbido en los tratamientos sin agregado de K en los Sitios 1, 2 y 3, respectivamente, de acuerdo con los valores de García y Correndo (2013). Con 240 kg ha^{-1} de K_2O (o 200 kg ha^{-1} de K), las estimaciones fueron 283, 228 y 231 kg ha^{-1} de K absorbido en los Sitios 1, 2 y 3, respectivamente. Otra razón explicando descensos del K en el suelo es que parte del mismo se hubiera lixiviado o perdido con el agua retirada del cultivo previo a la cosecha, o que una proporción del K haya sido fijado por las arcillas, especialmente en los tratamientos donde se aplicó K.

Por otro lado, los aumentos de K intercambiable a la cosecha respecto al K a la siembra, pueden atribuirse en parte al K proveniente de la planta al llegar a madurez fisiológica, o al aporte de K en el agua de riego, aunque esto no fue medido en este estudio.

2.6. CONCLUSIONES

En los tres sitios estudiados se encontró respuesta en rendimiento a la fertilización con K. La respuesta se observó inclusive en la dosis más baja.

La concentración foliar de K no cambió significativamente, frente al agregado creciente de K, aunque estuvo relacionada con el rendimiento.

Todo lo anterior amerita seguir estudiando la dinámica de este nutriente en este cultivo. Particularmente, aspectos complementarios como el tipo y cantidad de arcilla, dinámica del potasio en suelos inundados, así como indicadores de fijación de K, pueden contribuir a la interpretación de la información.

2.7. BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano A, Da Silva H, Duran A, Echevarria A, Panario D, Puentes R. 1979. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, Tomo III: Descripción de las unidades de suelos. Montevideo: MAP/DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes). 273 p.
- Bacha R, Turino M, Marchezan E, Silva Gomes A, Ferreira P, Mussoi V, Pauletto E. 2003. Arroz Irrigado. Recomendaciones técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. III Congreso brasileiro de arroz Irrigado. XXV Reunião da cultura do arroz irrigado. 2003. Balneário Camboriú, Santa Catarina, Brasil.
- Barbazán MM, Bautes C, Beux L, Bordoli J, Califra A, Cano J, del Pino A, Ernst O, García A, García F, Mazzilli S, Quincke A. 2012. Soil Potassium in Uruguay: Current Situation and Future Prospects. Better Crops. Vol 96.
- Barbazán MM.; del Pino A.; Bordoli J.; Califra A.; Mazzilli S.; Ernst O. 2011. Situación de potasio en Uruguay: perspectivas de corto y largo plazo. En Ribeiro A. (Ed.) II Simposio Nacional de Agricultura. Editorial Hemisferio Sur, Montevideo. Vol. 1, 21-33.
- Barbazán M, Fiorelli J, Rodríguez J, Del Pino A, Mazzilli S, Ernst O. 2011. Liberación de potasio desde rastrojos de maíz y soja y variación en el suelo. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Barbazán MM, Bautes C, Beux L. 2010. Respuesta a Potasio en cultivos extensivos en suelos de Soriano. Serie Actividades de Difusión N°605. Jornada Técnica. El efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos. Mercedes, Uruguay.
- Bautes C, Barbazán M, Beux L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre Areniscas Cretácicas y transicionales. IPNI N° 41.
- Black C. 1975. Relaciones suelo-planta. Tomo II. Páginas 717-848. Editorial Hemisferio Sur.
- Bordoli JM, Barbazán MM, Rocha L. 2012. Soil nutritional survey for soybean production in Uruguay. Agrocienca (Uruguay). Special Issue Striving for

- sustainable high productivity through improved soil and crop management. Setiembre 2012. p. 76-83.
- Cakmak I. 2011. Impactos de los nutrientes minerales en la producción de cultivos. Sabanci University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Istanbul, Turkey. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Cano J, Ernst O, García F. 2007. Respuesta a la fertilización potásica en maíz para grano en suelos del noroeste de Uruguay. Facultad de Agronomía e IPNI Cono Sur. EEMAC, Paysandú, Uruguay.
- Carmona M, Sautua F. 2011. Impacto de la nutrición y de fosfitos en el manejo de enfermedades en cultivos extensivos de la Región Pampeana. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Chebataroff N. 2013. Arroz uruguayo. Editorial Hemisferio Sur 2013. Montevideo, Uruguay.
- Correndo A, Rubio G, Ciampitti I, García F. 2011. Dinámica del Potasio en Molisoles de la Región Pampeana Norte. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Deambrosi E, Méndez R, Ávila S. 2001. Respuesta a las aplicaciones de fósforo y potasio. In: Arroz: resultados experimentales 2000-2001. INIA Treinta y Tres. Cap. 5, p. 1-11. (Serie Actividades de Difusión 257).
- Deambrosi E, Méndez R, Ávila S. 2000. Respuesta a las aplicaciones de fósforo y potasio. En: Arroz: resultados experimentales 1999-2000. INIA Treinta y Tres. Cap. 5, p. 14-21. (Serie Actividades de Difusión 224).
- Deambrosi E, Méndez R. 1999. Respuesta a las aplicaciones de fósforo y potasio. En: Arroz: resultados experimentales 1998-1999. INIA Treinta y Tres. Cap. 6, p. 11-13. (Serie Actividades de Difusión 194).
- De Datta S, Mikkelsen D. 1985. Potassium nutrition in rice. In: Munson, R.D. Potassium in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2013. Producción [En línea]. En: Anuario estadístico agropecuario 2013. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado 4 diciembre 2014. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2013>.

- Dobermann A, Fairhurst T. 2000. Rice: Nutrient Disorders & Nutrient Management. Handbook Series. Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute (IRRI) Philippines.
- Durán A, García F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, Clasificación, Manejo y Conservación. Montevideo: Hemisferio Sur. v.1, 334 p.
- Evangelou VP. 1998. Environmental Soil and Water Chemistry: Principles and Applications. John Wiley & Sons, New York.
- Fontanetto H, Gambaudo S, Keller O, Albrecht J. 2011. Las mejores prácticas de manejo para los cultivos y sistemas de producción. Avances en la fertilización con calcio, magnesio y potasio en la Argentina. EEA INTA Rafalela. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Gamarra G. 1996. Arroz: manual de producción. Editorial Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay.
- García F, Correndo A. 2013. Cálculo de requerimientos nutricionales de cultivos extensivos. [En línea] 6 de diciembre de 2014. IPNI Cono Sur. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>.
- García A, Quinke A, Pereira S, Días M. 2009. Respuesta a cloruro de potasio (KCl) en trigo y cebada. In: Jornada Cultivos de Invierno (2009, Mercedes, Soriano, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 13-18. (Actividades de Difusión no. 566).
- Hernández J, Casanova O, Zamalvide J. 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía. Montevideo. Uruguay. Boletín de Investigación No. 1 Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay.
- Hernández J. 1983. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agrónomo, Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay.
- Lavecchia A, Marchesi C, Méndez J. 2004. Respuesta a potasio y respuesta a nitrógeno. En: Arroz: resultados experimentales 2003-2004. INIA Tacuarembó. Cap. 5, p. 1-4. (Serie Actividades de Difusión 375).
- Lavecchia A, Marchesi C. 2011. Respuesta a la aplicación de potasio. Cinco Sauces - Tacuarembó. En: Presentación resultados experimentales de arroz zafra 2010-

2011. INIA Tacuarembó. Cap. 2, p. 5. (Serie Actividades de Difusión 652). Tacuarembó, Uruguay.
- Machado M. 1985. Caracterização e adubação do solo. In: EMBRAPA-CPATB. Fundamentos para a cultura do arroz irrigado. Campinas: Fundação Cargill, p.129-179.
<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoBrasil/referencias.htm>
- Mallarino A. 2013. Factores que determinan incertidumbre en los análisis de suelos para potasio y opciones de mejora. En Simposio “Potasio en sistemas agrícolas de Uruguay”. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Mercedes, Uruguay.
- MAP/DSF. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Tomo II. Clasificación de suelos. Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo, Uruguay.
- Marschner H. 1986. Mineral Nutrition of Higher Plants. Second Edition, Academic Press. USA. p: 299.
- Monza J, Márquez A. 2004. El metabolismo del nitrógeno en las plantas. Editorial Almuzara. Córdoba, España.
- Morón A, Quincke A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el Departamento de Soriano. Serie Actividades de Difusión N°605: 5-8.
- Oudri N, Castro J, Doti R, Secondi de Carbonell A. 1976. Guía para fertilización de cultivos. Ministerio de Agricultura y Pesca, Centro de Investigaciones Agrícolas “Alberto Boerger”. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo, Uruguay.
- Reuter D, Edwards D, Wilhelm N. 1997. Temperate and tropical crops. En: Plant analysis, an interpretation manual. 2ª ed. D. J. Reuter, J. B. Robinson (ed.). Collingwood: CSIRO, Australia. pp 83-284.
- SAS INSTITUTE. 2008. SAS/STAT Guide for personal computer. Version 6 Edition. SAS Inst., Cary, NC.

- Solórzano P. 2003. Crecimiento y nutrición del arroz (*Oryza sativa* L.) en Venezuela. Informaciones Agronómicas N°51. Instituto de la Potasa y el Fósforo. Quito, Ecuador.
- Taiz L, Zeiger E. 2006. Plant Physiology. 4th edition, Sinauer Associates, Inc., Sunderland.
- Tisdale SL, Nelson WL, Beaton JD, Havlin JL. 1993. Soil fertility and fertilizers. Macmillan, New York, pp. 176-229.
- Uruga R, Gonnet D, Hill M, Roel A, Cantau G, Martínez, Pippolo D. 2013. Guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay. Asociación de cultivadores de arroz. 2013. Web: www.aca.com.uy. Montevideo, Uruguay.

3. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES

La información sobre K en el cultivo de arroz es muy limitada en el país. De acuerdo a nuestros resultados, en los tres suelos cuyo valor de K intercambiable a la siembra varió de 0,14 a 0,25 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ extraído con Acetato de Amonio 1N, se observó respuesta al agregado de K a la probabilidad del 10%. En el sitio donde se observó respuesta a K a la $P >$ de 0,08 los valores de Na intercambiable eran muy altos, por lo cual este nutriente podría haber estado cumpliendo algunas funciones del K. Los valores de K en planta, según las referencias que se tomen, podrían estar cercanos a los valores considerados adecuados, o por debajo. Sin embargo, con el agregado de K no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Los cambios de K intercambiable observados fueron en general muy bajos.

Estos resultados indican que es necesario continuar los estudios de respuesta a K en el cultivo de arroz, para encontrar un nivel crítico que permita tener pautas claras para la elaboración de recomendaciones de fertilización. A diferencia de lo que ocurre en cultivos en secano, es probable que el nivel crítico de K en el suelo sea menor, debido a la existencia de un mecanismo de difusión más eficiente en suelos inundados. Por otro lado, en suelos donde se desarrolla la producción de arroz en Uruguay, el Na podría tener un rol importante dentro de la planta. Además, es necesario continuar profundizando en aspectos concernientes al tipo de arcillas y la dinámica del amonio y hierro.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano A, Da Silva H, Duran A, Echevarria A, Panario D, Puentes R. 1979. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, Tomo III: Descripción de las unidades de suelos. Montevideo: MAP/DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes). 273 p.
- Bacha R, Turino M, Marchezan E, Silva Gomes A, Ferreira P, Mussoi V, Pauletto E. 2003. Arroz Irrigado. Recomendacoes técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. III Congreso brasileiro de arroz Irrigado. XXV Reuniao da cultura do arroz irrigado. 2003. Balneário Camboriú, Santa Catarina, Brasil.
- Barbazán MM, Bautes C, Beux L, Bordoli J, Califra A, Cano J, del Pino A, Ernst O, García A, García F, Mazzilli S, Quincke A. 2012. Soil Potassium in Uruguay: Current Situation and Future Prospects. Better Crops. Vol 96.
- Barbazán MM.; del Pino A.; Bordoli J.; Califra A.; Mazzilli S.; Ernst O. 2011. Situación de potasio en Uruguay: perspectivas de corto y largo plazo. En Ribeiro A. (Ed.) II Simposio Nacional de Agricultura. Editorial Hemisferio Sur, Montevideo. Vol. 1, 21-33.
- Barbazán M, Fiorelli J, Rodríguez J, Del Pino A, Mazzilli S, Ernst O. 2011. Liberación de potasio desde rastrojos de maíz y soja y variación en el suelo. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Barbazán MM, Bautes C, Beux L. 2010. Respuesta a Potasio en cultivos extensivos en suelos de Soriano. Serie Actividades de Difusión N°605. Jornada Técnica. El efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos. Mercedes, Uruguay.
- Bautes C, Barbazán M, Beux L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre Areniscas Cretácicas y transicionales. IPNI N° 41.
- Black C. 1975. Relaciones suelo-planta. Tomo II. Páginas 717-848. Editorial Hemisferio Sur.
- Bordoli JM, Barbazán MM, Rocha L. 2012. Soil nutritional survey for soybean production in Uruguay. Agrociencia (Uruguay). Special Issue Striving for

- sustainable high productivity through improved soil and crop management. Setiembre 2012. p. 76-83.
- Cakmak I. 2011. Impactos de los nutrientes minerales en la producción de cultivos. Sabanci University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Istanbul, Turkey. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Cano J, Ernst O, García F. 2007. Respuesta a la fertilización potásica en maíz para grano en suelos del noroeste de Uruguay. Facultad de Agronomía e IPNI Cono Sur. EEMAC, Paysandú, Uruguay.
- Carmona M, Sautua F. 2011. Impacto de la nutrición y de fosfitos en el manejo de enfermedades en cultivos extensivos de la Región Pampeana. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Chebataroff N. 2013. Arroz uruguayo. Editorial Hemisferio Sur 2013. Montevideo, Uruguay.
- Correndo, A.A., y F.O. García. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. Archivo Agronómico No. 14. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica No. 5. IPNI Cono Sur. Buenos Aires. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1155>.
- Correndo A, Rubio G, Ciampitti I, García F. 2011. Dinámica del Potasio en Molisoles de la Región Pampeana Norte. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Deambrosi E, Méndez R, Ávila S. 2001. Respuesta a las aplicaciones de fósforo y potasio. In: Arroz: resultados experimentales 2000-2001. INIA Treinta y Tres. Cap. 5, p. 1-11. (Serie Actividades de Difusión 257).
- Deambrosi E, Méndez R, Ávila S. 2000. Respuesta a las aplicaciones de fósforo y potasio. En: Arroz: resultados experimentales 1999-2000. INIA Treinta y Tres. Cap. 5, p. 14-21. (Serie Actividades de Difusión 224).
- Deambrosi E, Méndez R. 1999. Respuesta a las aplicaciones de fósforo y potasio. En: Arroz: resultados experimentales 1998-1999. INIA Treinta y Tres. Cap. 6, p. 11-13. (Serie Actividades de Difusión 194).
- De Datta S, Mikkelsen D. 1985. Potassium nutrition in rice. In: Munson, R.D. Potassium in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.

- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2013. Producción [En línea]. En: Anuario estadístico agropecuario 2013. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado 4 diciembre 2014. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2013>.
- Dobermann A, Fairhurst T. 2000. Rice: Nutrient Disorders & Nutrient Management. Handbook Series. Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute (IRRI) Philippines.
- Durán A, García F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, Clasificación, Manejo y Conservación. Montevideo: Hemisferio Sur. v.1, 334 p.
- Evangelou VP. 1998. Environmental Soil and Water Chemistry: Principles and Applications. John Wiley & Sons, New York.
- Fontanetto H, Gambaudo S, Keller O, Albrecht J. 2011. Las mejores prácticas de manejo para los cultivos y sistemas de producción. Avances en la fertilización con calcio, magnesio y potasio en la Argentina. EEA INTA Rafaela. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Gamarra G. 1996. Arroz: manual de producción. Editorial Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay.
- García F, Correndo A. 2013. Cálculo de requerimientos nutricionales de cultivos extensivos. [En línea] 6 de diciembre de 2014. IPNI Cono Sur. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>.
- García A, Quinke A, Pereira S, Días M. 2009. Respuesta a cloruro de potasio (KCl) en trigo y cebada. In: Jornada Cultivos de Invierno (2009, Mercedes, Soriano, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 13-18. (Actividades de Difusión no. 566).
- Hernández J, Casanova O, Zamalvide J. 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía. Montevideo. Uruguay. Boletín de Investigación No. 1 Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay.
- Hernández J. 1983. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agrónomo, Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay.

- Lavecchia A, Marchesi C, Méndez J. 2004. Respuesta a potasio y respuesta a nitrógeno. En: Arroz: resultados experimentales 2003-2004. INIA Tacuarembó. Cap. 5, p. 1-4. (Serie Actividades de Difusión 375).
- Lavecchia A, Marchesi C. 2011. Respuesta a la aplicación de potasio. Cinco Sauces - Tacuarembó. En: Presentación resultados experimentales de arroz zafra 2010-2011. INIA Tacuarembó. Cap. 2, p. 5. (Serie Actividades de Difusión 652). Tacuarembó, Uruguay.
- Machado M. 1985. Caracterização e adubação do solo. In: EMBRAPA-CPATB. Fundamentos para a cultura do arroz irrigado. Campinas: Fundação Cargill, p.129-179.
<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoBrasil/referencias.htm>
- Mallarino A. 2013. Factores que determinan incertidumbre en los análisis de suelos para potasio y opciones de mejora. En Simposio “Potasio en sistemas agrícolas de Uruguay”. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Mercedes, Uruguay.
- MAP/DSF. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Tomo II. Clasificación de suelos. Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo, Uruguay.
- Marschner H. 1986. Mineral Nutrition of Higher Plants. Second Edition, Academic Press. USA. p: 299.
- Monza J, Márquez A. 2004. El metabolismo del nitrógeno en las plantas. Editorial Almuzara. Córdoba, España.
- Oudri N, Castro J, Doti R, Secondi de Carbonell A. 1976. Guía para fertilización de cultivos. Ministerio de Agricultura y Pesca, Centro de Investigaciones Agrícolas “Alberto Boerger”. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo, Uruguay.
- Reuter D, Edwards D, Wilhelm N. 1997. Temperate and tropical crops. En: Plant analysis, an interpretation manual. 2ª ed. D. J. Reuter, J. B. Robinson (ed.). Collingwood: CSIRO, Australia. pp 83-284.

- SAS INSTITUTE. 2008. SAS/STAT Guide for personal computer. Version 6 Edition. SAS Inst., Cary, NC.
- Solórzano P. 2003. Crecimiento y nutrición del arroz (*Oryza sativa* L.) en Venezuela. Informaciones Agronómicas N°51. Instituto de la Potasa y el Fósforo. Quito, Ecuador.
- Taiz L, Zeiger E. 2006. Plant Physiology. 4th edition, Sinauer Associates, Inc., Sunderland.
- Tisdale SL, Nelson WL, Beaton JD, Havlin JL. 1993. Soil fertility and fertilizers. Macmillan, New York, pp. 176-229.
- Uraga R, Gonnet D, Hill M, Roel A, Cantau G, Martínez, Pippolo D. 2013. Guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay. Asociación de cultivadores de arroz. 2013. Web: www.aca.com.uy. Montevideo, Uruguay.