



**Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires**

Av. San Martín 4453 - C1417DSE - Argentina - Tel. +54-11-4-524-8000 - www.agro.uba.ar

## **Trabajo de Intensificación Final**

# **CAMBIOS TEMPORALES Y ESPACIALES DE LA DISPONIBILIDAD DE POTASIO EN MOLISOLES DE LA REGIÓN PAMPEANA NORTE**

**Carrera:** *Ingeniero Agrónomo*

**Tesista:** *CORRENDO, ADRIÁN ALEJANDRO*

**Director:** *RUBIO, GERARDO* (FAUBA)

Ing. Agr.; Dr. en Ciencias Agropecuarias (FAUBA)

**Co-Director:** *CIAMPITTI, IGNACIO A.* (Purdue University)

Ing. Agr.; M. Sc. en Ciencia del Suelo (FAUBA)

**Consultor:** *CIARLO, ESTEBAN A.* (FAUBA)

Ing. Agr.; Dr. en Ciencias Agropecuarias (FAUBA)

***ABRIL 2011***

### 9.1.1. RESUMEN

El objetivo del presente trabajo ha sido evaluar los cambios en la disponibilidad de potasio (K) en suelos Molisoles y su relación con el balance del nutriente bajo diferentes situaciones de producción de cultivos. Para ello se analizaron 4 suelos de la Región Pampeana Norte pertenecientes a la red de ensayos de la región CREA Sur de Santa Fe (Sur de Santa Fe y Sudeste de Córdoba). Se evaluaron tres situaciones contrastantes de producción: *i*) lote de producción testigo (sin aplicación de nutrientes), *ii*) lote de producción con aplicaciones continuas de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S); y *iii*) situaciones no agrícolas, “quasi-prístinas” o “de referencia”, representativas de cada sitio en evaluación. Los análisis relacionados a la disponibilidad de K fueron referidos al primer metro de profundidad, mediante el método de extracción con  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1N en pH 7. Para los primeros 20 cm, en todos los sitios evaluados se observaron diferencias en Kd (K disponible) entre las situaciones de referencia y los niveles iniciales al año 2000 y finales (con y sin fertilización). Solo en 2 de los 4 sitios se manifestaron cambios significativos en Kd respecto de los niveles cuantificados al inicio de la red de ensayos, tras 9 campañas agrícolas sin reposición del nutriente. Sin embargo, en todos los sitios se observó una tendencia de disminución en el Kd, a medida que los balances fueron más negativos. En las capas más profundas, comparando las situaciones de referencia con las situaciones agrícolas con y sin fertilización NPS, tanto las concentraciones como el patrón de distribución vertical de Kd, mostraron comportamientos variables inherentes al sitio y al tipo de suelo analizado.

**Palabras clave:** *potasio, balance de nutrientes, fertilidad del suelo, distribución vertical, intensificación agrícola.*

## **9.1.2. INTRODUCCIÓN**

### **9.1.2.1 Planteo del problema y revisión de antecedentes**

#### **Problema**

En nuestro país el K ha tenido una importancia secundaria en el estudio de los principales nutrientes, tales como N, P y S. La principal causa es que, en general, se considera a los suelos de la Región Pampeana como grandes reservorios del nutriente, situación que asegura una provisión suficiente de K para largo plazo (Melgar *et al.*, 2001). Hay pocas investigaciones que hayan llevado a cabo la dinámica del nutriente evaluando la disponibilidad en el mediano y largo plazo para los cultivos, generando interrogantes con respecto a la posibilidad de deficiencias durante los ciclos agrícolas, aunque no se presentan a la actualidad registros de deficiencias para la región central pampeana argentina (*com. pers.* F.García, 2010). Las reservas de K en el suelo son necesarias y deseables para obtener capacidad de “amortiguación”, relacionada a la disponibilidad y abastecimiento de K a los cultivos. Esto nos abre a cuestionar cuanto más podemos explotar dichas reservas sin estar perdiendo su potencial buffer (Johnston *et al.*, 2001; Krauss & Johnston, 2002,).

#### **El K en la planta**

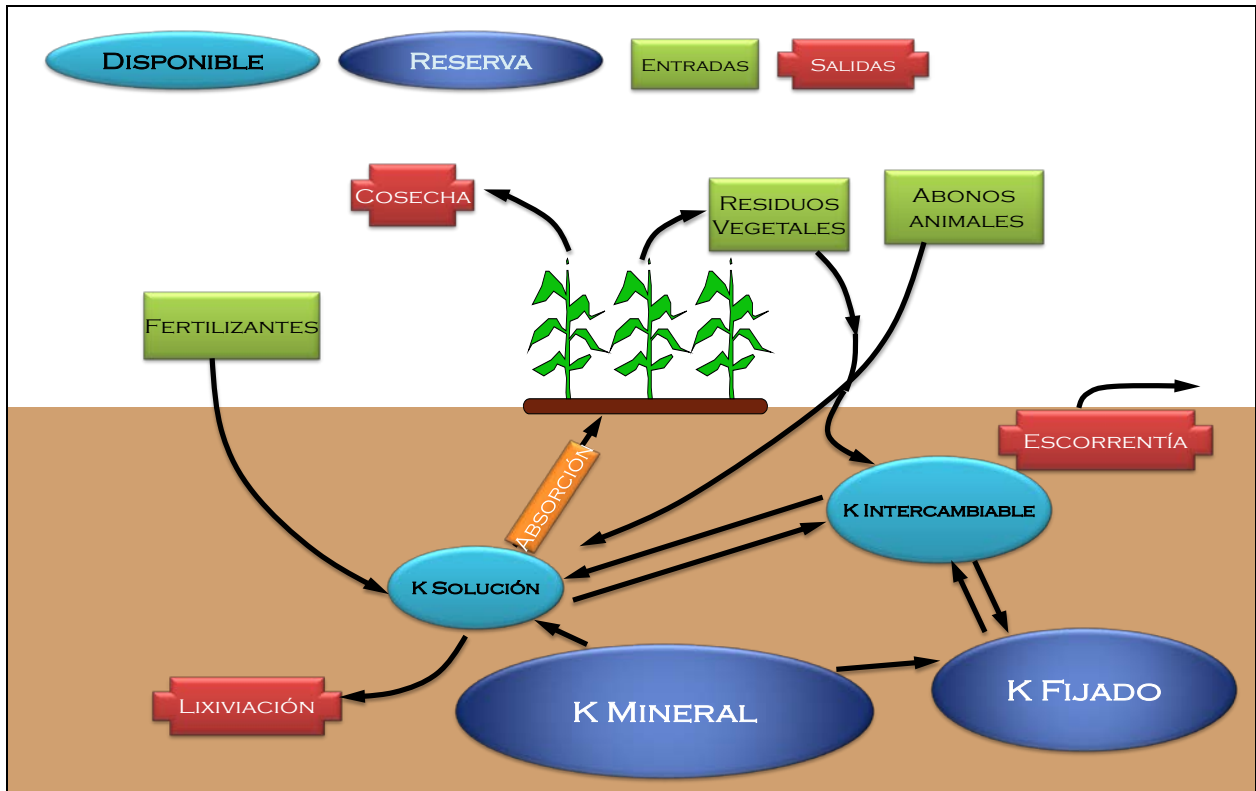
El K, junto con el nitrógeno (N) y el fósforo (P), son los minerales más requeridos por las plantas superiores (Marschner, 1995; Öborn *et al.*, 2005). A pesar de no formar parte de compuestos ni estructuras orgánicas, es el catión más importante en la fisiología de las plantas, ya que se encuentra involucrado en numerosas funciones fisiológicas y bioquímicas (Mullins & Burmester, 1999; Hinsinger, 2002; Johnston, 2007). Entre ellas se pueden destacar: *i*) regulador de más de 60 sistemas enzimáticos y procesos como la fotosíntesis, respiración, traslocación de asimilados y transpiración (Imas, 2002; Pettigrew, 2007; Imas & Magen, 2008); *ii*) rol en la

apertura y cierre de estomas y, por tanto, en el intercambio neto de carbono; *iii*) incremento en la resistencia al quebrado y vuelco de los tallos (Melis & Farina, 1984; Welch & Flannery, 1985; Datta & Mikkelsen, 1985); *iv*) intervención en procesos relacionados a la resistencia y de tolerancia al ataque de patógenos e insectos (Krauss & Johnston, 2002; Amtmann *et al.*, 2007); *v*) incremento la eficiencia de uso de otros nutrientes en los cultivos, especialmente el N (Johnston *et al.*, 2001; Krauss & Johnston, 2002; Milford & Johnston, 2007) y *vi*) mejora en la calidad comercial y nutricional de los productos cosechados (Marschner, 1995; Yuying, 2003; Lavado, 2007; Pettigrew, 2007). Su función en la regulación del potencial osmótico de las células, lo convierte en un elemento importante en el balance de aniones como  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  (metabolismo de nutrientes); y en la respuesta de los cultivos ante adversidades climáticas o referidas a condiciones de suelo como sequía, heladas o salinidad (Cakmak, 2007).

## **El K en el suelo**

### **Fracciones del K en el suelo**

La química del K del suelo es relativamente simple si la comparamos con nutrientes como el N o el P, ya que el K no forma compuestos orgánicos: solo existe en el suelo en formas inorgánicas (Johnston *et al.*, 2001). El contenido de K en solución ( $K_s$ ), intercambiable ( $K_i$ ), fijado ( $K_f$ ) y mineral ( $K_m$ ) son fracciones: *inmediatamente*, *rápidamente*, *lentamente* y *muy lentamente* disponibles, para la absorción de las plantas, respectivamente. Estas fracciones se mantienen interrelacionadas, de manera de complementarse y mantener un equilibrio (Sparks & Huang, 1985; Helmke & Sparks, 1996; Johnston, 2007) (Fig. 1 y 2). Cabe aclarar, que son solo una representación general del K en el suelo, no existiendo límites rígidos entre las mismas (Johnston *et al.*, 2001).



**Figura 1.** Representación del ciclo del K del suelo. Adaptado Sparks & Huang, 1985.

La sumatoria de las fracciones  $K_s$  y  $K_i$  (de la solución más el intercambiable), es comúnmente denominada **K "disponible"** ( $K_d$ ) y medido en los análisis convencionales para evaluar la fertilidad del suelo en la mayoría de los cultivos anuales y perennes (Sparks, 1987; Helmke & Sparks, 1996; Conti, 2001; Johnston *et al.*, 2001; Krauss & Johnston, 2002). El  $K_s$  representa el *inmediatamente disponible* para la absorción de los cultivos (Johnston, 2007), pero solo una muy pequeña proporción del  $K_{total}$  del suelo ( $K_t$ ) se encuentra bajo esta forma (Pratt, 1965; Johnston, 2007; Barbagelata, 2008), oscilando en concentraciones en horizontes superiores de 1 a 70 ppm (Havlin *et al.*, 2005). El  $K_i$  es correspondiente al K en forma de ión ( $K^+$ ) unido electrostáticamente a los materiales que componen la fase sólida coloidal mineral y orgánica (Goulding, 1987; Conti, 2000; Johnston, 2007). Operacionalmente  $K_i$  es definido como la cantidad extraíble con un exceso

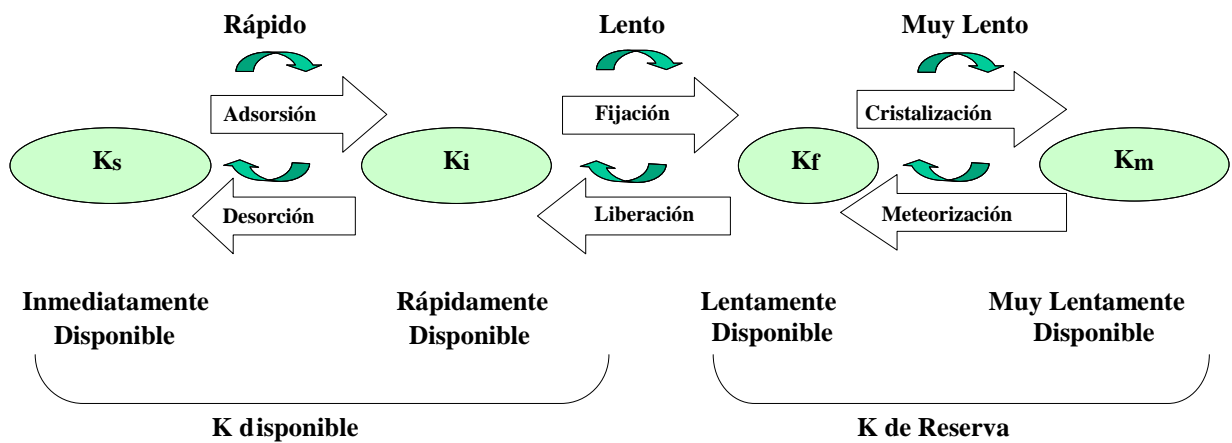
de iones amonio, incluyendo dicha determinación al  $K_s$ , por tanto igual a  $K_d$  (Johnston *et al.*, 2001). Por tal motivo el  $K_d$  es muchas veces denominado en la bibliografía también como  $K_i$ .

Existen formas de K que están fuertemente unidas a la fase sólida mineral, las cuales se denominan "K fijado" y "K estructural". Ambas formas son denominadas no-intercambiables (Richard & Bates, 1989; Conti, 2001; Johnston *et al.*, 2001; Krauss & Johnston, 2002). El  $K_f$  es aquel ubicado en el espacio hexagonal de las láminas de silicio (Sparks & Huang, 1985; Zubillaga & Conti, 1994; Conti & García, 2005; Johnston, 2007). El  $K_m$  es la fracción que está químicamente combinada con los elementos en la estructura de los minerales del suelo (Conti & García, 2005; Johnston, 2007).

Los suelos de la Región Pampeana Argentina son considerados unos de los más ricos en K del mundo, debido a la composición del material original (Melgar *et al.*, 2001; Morrás & Cruzate, 2001). Los sedimentos originarios de los suelos pampeanos contienen diversos componentes ricos en K (Moscatelli *et al.*, 2001), siendo la *illita* el principal mineral portador de K en la fracción arcilla de nuestros suelos (Zubillaga & Conti, 1996; Conti & García, 2005).

### **Dinámica y disponibilidad de K en el suelo**

La disponibilidad de K para las plantas es controlada por la dinámica de las interacciones entre los diferentes pools o fracciones de K en el suelo (Fig. 2) (Johnston & Mitchell, 1974; Sparks, 1987; Cox *et al.*, 1996 y 1999; Johnston *et al.*, 2001; Wang, *et al.*, 2004; Fernández, 2006). Existen reacciones de equilibrio dinámico entre los diferentes pools de K del suelo, y todo los factores que afecten (directa o indirectamente) dichas reacciones, modifican el tamaño de las diferentes formas de K en el suelo (Öborn *et al.*, 2005, Johnston, 2007).



**Figura 2.** Ecuación de equilibrio entre las fracciones de K del suelo. Adaptado de Johnston, 2007.

El K en el suelo se mueve por *difusión*, mecanismo que participa en la llegada de los nutrientes desde el suelo hacia las raíces de las plantas. Este proceso es generalmente lento y de distancias relativamente cortas comparado con el *flujo masal* (Marschner, 1995). Entre el 88 y el 96% del K absorbido por las plantas llega a las raíces por *difusión*, y solo entre el 4 y el 12% a través de *flujo masal* o *intercepción radicular* (Barber, 1974). Por otra parte, la velocidad de movilización de K en el suelo, además de estar influenciada por las cantidades de K presentes en cada fracción, depende de propiedades del suelo como: *capacidad de intercambio catiónico (CIC)* (Vitosh *et al.*, 1996), *pH* (Marschner, 1995; Darwich, 1998; Voogt, 2001; Barbagelata, 2009), *poder buffer* (Beckett, 1964; Tabatabai & Hanway, 1968), *capacidad de fijación de K* (Shaviv *et al.*, 1985; Johnston, 1986; Quémener, 1986; Goulding, 1987; Zubillaga & Conti, 1994; Malla, 2002; Singh *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2004; Öborn *et al.*, 2005; Fernández *et al.*, 2008); y de las condiciones ambientales como la temperatura, la aireación y, especialmente, de la humedad siendo más alta la movilización en suelos húmedos (Ching & Barber, 1979; Mengel & Kirkby, 1987; Doberman, 2001).

## Distribución de K en el perfil

El K presenta cierta movilidad en el suelo pudiendo ser redistribuido en el perfil por el flujo de agua, por absorción y reciclaje por las plantas. Estudios recientes han demostrado el importante rol de la vegetación en la redistribución vertical (como estratificación) de nutrientes menos móviles en el suelo y más demandados para la nutrición vegetal como los son el P y el K (Jobbagy & Jackson, 2001). Así mismo, la variabilidad vertical y horizontal de los tenores de K, normalmente, es menor que la del P (Amado *et al.*, 2006). Por otra parte, es factible que, bajo sistemas de labranza conservacionistas o siembra directa, se produzca un movimiento ascendente del K más profundo hacia el horizonte superior del perfil. La continua deposición de residuos en la superficie, sumado a las reducciones de pérdidas por erosión y lixiviación, inducen a una mayor concentración de K próximo a la superficie. Varios investigadores han reportado estratificaciones en el perfil del suelo como resultado de manejos en sistemas conservacionistas (Robbins & Voss, 1991; Bordoli & Mallarino, 1998; Amado *et al.*, 2006; Mallarino & Borges, 2006; Fernández *et al.*, 2008; Fernández, 2009).

En Argentina, datos correspondientes a las cartas de suelos de la Región Pampeana norte (relevamientos realizados en la década de los'60), disponibles en la web de INTA, muestran los valores de K (NH<sub>4</sub>OAc) y su distribución vertical en el perfil (Tabla 1).

**Tabla 1.** Distribución vertical de K en un perfil típico de suelo representativo de la Región Pampeana centro norte. INTA, 2010.

### **SERIE HUGHES. Argiudol típico**

Horizontes	A	BAt	Bts1	Bts2	BC	C	Ck
Profundidad (cm)	5-15	21-33	35-50	53-65	85-95	145-165	220-240
K m.eq./100gr	2,4	1,8	2,0	2,0	2,3	2,4	2,3



## **Salidas de K**

Las salidas más importantes del sistema corresponden a la cosecha por parte de los cultivos y a las posibles pérdidas por lixiviación. Estas últimas varían con: *i*) la textura del suelo, siendo un potencial problema en suelos arenosos con baja CIC (Munson & Nelson, 1963), *ii*) con el nivel de  $K_i$  (Askegaard *et al.*, 2003) y con el drenaje, observándose valores promedio de 1 kg K por cada 100 mm de lámina de drenaje en suelos arcillosos y para texturas arenosas y *iii*) dependiendo ampliamente de la economía del agua y el manejo de la fertilización, pueden superar los 50 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en regiones templadas (Johnston & Goulding, 1992; Öborn *et al.*, 2005).

### **Extracción por los cultivos**

Los requerimientos de K por parte de los cultivos, son usualmente de la misma magnitud que N, incluso a veces superior (Krauss & Johnston, 2002). El rango normal de *absorción* es entre 40 y 300 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, dependiendo del cultivo (Mullins & Burmester, 1999). En cuanto a la *extracción*, cereales como el trigo y el maíz, presentan requerimientos similares de alrededor de 20 kg ton<sup>-1</sup> y bajos índices de cosecha (IC) de K – en promedio un valor de 0.21 - resultando que gran parte del K absorbido retorne al suelo en los residuos de cosecha. Sin embargo, en cultivos como la soja, los requerimientos de absorción se incrementan a casi 40 kg ton<sup>-1</sup> y el 50% del K absorbido se extrae en los granos (Tabla 2) (Ciampitti y García, 2009).

**Tabla 2.** Requerimientos e índices de cosecha de K para trigo, cebada, maíz, sorgo, soja, girasol y colza. Adaptado de Ciampitti y García, 2009.

Cultivo	Humedad	IC	Requerimiento	Extracción
	Grano		(BS)	(BH)
	(%)		(kg ton <sup>-1</sup> )	
Soja	13,0	0,49	39	<b>16,9</b>
Maíz	14,5	0,21	19	<b>3,48</b>
Trigo	13,5	0,21	19	<b>3,52</b>
Cebada	14,0	0,25	20	<b>4,00</b>
Sorgo	15,0	0,19	21	<b>3,00</b>
Girasol	13,0	0,19	29	<b>5,00</b>
Colza	8,5	0,43	65	<b>25,8</b>

### Diagnóstico de la fertilidad potásica

En la determinación del K disponible para cultivos anuales y pasturas, el método más utilizado y recomendado a nivel nacional e internacional para realizar recomendaciones de fertilización potásica es el de la percolación de los suelos con acetato de amonio (NH<sub>4</sub>OAc) 1 N en pH 7 (Sparks, 1987; Helmke & Sparks, 1996; Warncke & Brown, 1998; Cox *et al.*, 1999; Conti *et al.*, 2001; Mallarino *et al.*, 2003; Conti & García, 2005; Barbagelata, 2006). En nuestro país también se estudió la extracción de Kd con el método Bray 1 (Bray & Kurtz, 1945), con el fin de unir las determinaciones de K a las de P, observándose una correlación positiva y significativa con la metodología del NH<sub>4</sub>OAc tradicional para la extracción de Ki (De la Horra *et al.*, 1993).

Los modelos de respuesta son específicos de cada cultivo, tipo de suelos y condiciones ambientales definidas, y permiten determinar *niveles críticos o de suficiencia* (Krauss y Johnston, 2002; Conti & García, 2005). En situaciones productivas y ambientales similares a la Región Pampeana argentina, en Iowa (EE.UU.), para maíz y soja se establecieron diferentes rangos de disponibilidad del nutriente, en base a mediciones de Kd mediante NH<sub>4</sub>OAc y Mehlich 3 (M3),

en 0-18 cm del perfil de suelo (Tabla 3), valores similares a los reportados en Illinois (Hoefl & Peck, 2001). Por otra parte, se han desarrollado y evaluado otros modelos alternativos para realizar recomendaciones de fertilización potásica basados en otras fracciones de K (Cox *et al.*, 1996; Cox *et al.*, 1999; Schindler *et al.*, 2002; Fernández *et al.*, 2008) y parámetros del suelo tales como la textura, la CIC, y la saturación de bases (Graham, 1959; Olson *et al.*, 1982; Eckert, 1987; Rehm, 1994; Vitosh *et al.*, 1996; Vázquez, 2006).

**Tabla 3.** Interpretaciones de análisis de suelo (K NH<sub>4</sub>OAc o M3 en muestras tomadas de 0-18 cm) para los cultivos de maíz y soja en series de suelo del estado de Iowa (EE.UU.) (Adaptado de Sawyer *et al.*, 2002, Mallarino *et al.*, 2002, 2003; Mallarino, 2005).

<b>Categoría (según contenido de Kd)</b>				
<i>Muy Baja</i>	<i>Baja</i>	<i>Optima</i>	<i>Alta</i>	<i>Muy Alta</i>
----- K mg kg <sup>-1</sup> (ppm) -----				
0-90	91-130	131-170	171-200	201+

### **Balance y cambios de K en el suelo**

La extracción continua promovida por la producción de cultivos agrícolas en sistemas de altos rendimientos, genera una extracción continua de K de los suelos, que consecuentemente se vería expresado en un balance negativo, en situaciones donde no se realizan aplicaciones de reposición de K al sistema. En un experimento de 7 años de duración, con pasturas de Ryegrass en Rothamsted, Inglaterra, se ha observado que, en ausencia de fertilización potásica, en 5 de 6 ensayos el contenido de Kd (0-18 cm) se incrementó, y en la restante disminuyó levemente (Johnston *et al.*, 2001). Las dinámicas de intercambio entre las diferentes fracciones de K en el suelo obviamente fueron suficientes para ocultar los verdaderos cambios en los niveles de Kd. El mismo grupo de investigadores reportaron que con un balance positivo *-diferencia entre aplicación vía fertilización y la extracción en cosecha-* de 1667 kg ha<sup>-1</sup> de K en un período de 10

años, observaron incrementos en el contenido de Kd (0-18 cm) de  $690 \text{ kg ha}^{-1}$  (41% del balance). En contraparte, con un balance negativo de  $1494 \text{ kg K ha}^{-1}$ , observaron una reducción en el contenido de Kd de  $563 \text{ kg ha}^{-1}$ , reflejando un 38% del balance (asumiéndose como despreciables las pérdidas por lixiviación y erosión). En experimentos en la India, tras 27 años de agricultura continua (soja-trigo-maíz-arroz) en Molisoles, se observaron disminuciones de alrededor del 30% en la disponibilidad de K, cuantificada con el método  $\text{NH}_4\text{OAc}$ , con balances negativos de más de  $3000 \text{ kg ha}^{-1}$ . La disminución fue similar para los tratamientos testigo (sin fertilización alguna) y fertilizado con N y P. Con fertilización NPK no se observaron diferencias significativas entre las disponibilidades inicial y final de K (Samra & Swarup, 2001). En la Región Pampeana Argentina, prácticamente no existen antecedentes en este tipo de experimentos. Lossino y Conti (2005) analizaron la evolución temporal del contenido de Kd en Argiudoles típicos del NE de Buenos Aires con un historial productivo de 30 años bajo agricultura continua. En ese estudio se observaron descensos de hasta un 46% en los valores de Kd en los suelos con un valor inicial mayor (de  $2.6$  a  $1.18 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$ ), y del orden del 7.5% en aquellos con menor dotación inicial de Kd (de  $1.6$  a  $1.48 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$ ). Por otra parte, recientemente Cruzate & Casas (2009) realizaron un mapeo de las tasas de extracción de los principales nutrientes (N, P, K, S, entre otros) en la agricultura argentina, donde se pueden observar tasas de pérdida de más de  $60 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , en los departamentos con mayor historia agrícola e intensidad de producción del país, como lo son los del Sur de Santa Fe y Sudeste de Córdoba.

### 9.1.2.2. JUSTIFICACIÓN

Uno de los principales objetivos perseguidos por la intensificación de la agricultura es incrementar la productividad en forma sustentable y, por tanto, la exportación de productos del sistema. La fertilización constituye una herramienta para cumplir con dicho objetivo. Su utilización genera cambios sustanciales en la dinámica y el balance de nutrientes, representando tanto un incremento en los ingresos, como en los egresos (productos cosechados). La continua extracción de nutrientes de los cultivos puede determinar que los nutrientes que históricamente han sido suficientes para la producción agrícola puedan ser potencialmente deficientes en los próximos años de rotaciones agrícolas no sustentables, sin reposición de nutrientes.

Los Molisoles pampeanos, originalmente bien provistos de K, son considerados uno de los más ricos del mundo en este nutriente (Melgar *et al.*, 2001; Morrás & Cruzate, 2001). Así, en la Región Pampeana, no se han observado respuestas a la fertilización con este elemento (Prystupa *et al.*, 2004) y, por tal motivo, se le prestó históricamente poca atención. Actualmente, en los cultivos extensivos, la fertilización potásica es prácticamente nula, reponiendo menos del 1% de la extracción de K por cosecha (García & González San Juan, 2010). La intensificación agrícola de la mano del incremento de la producción y participación de la soja (el cultivo que más K extrae por su elevado índice de cosecha), genera cada vez mayor desbalance del nutriente en los suelos. De acuerdo a las características naturales del ciclo, la sensibilidad y velocidad de cambio de K en sistemas agrícolas hacen que su agotamiento no se manifieste hasta llegar a valores mínimos muy extremos (Lossino & Conti, 2005). Por tanto, sin una reposición de las reservas de K, vía fertilización, los suelos de la región pueden tornarse deficientes con el tiempo.

### 9.1.2.3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO

#### Objetivos

- Evaluar los cambios producidos tras 9 años de campañas agrícolas en los niveles de Kd (0-20cm) en Molisoles de la Región Pampeana bajo agricultura con y sin fertilización para N, P y S.
- Analizar la distribución vertical de Kd bajo diferentes situaciones productivas: situación no agrícola, agricultura sin fertilización y agricultura con fertilización balanceada para N, P y S.

#### Hipótesis

- Los cambios de Kd (0-20cm) en suelos bajo agricultura sin reposición de K, no guardan relación clara con el balance acumulado del nutriente (calculado como la extracción en grano) debido a factores que reponen al pool disponible, como otras fracciones de K del suelo y la retraslocación del nutriente desde capas más profundas por parte de los cultivos.
- El patrón de distribución vertical de Kd es afectado por la actividad agrícola *per se* y por la intensidad de extracción del nutriente. Siendo mayor la estratificación en superficie y las disminuciones en profundidad, con el incremento de la intensidad de extracción de K (agricultura con fertilización balanceada para N, P y S).

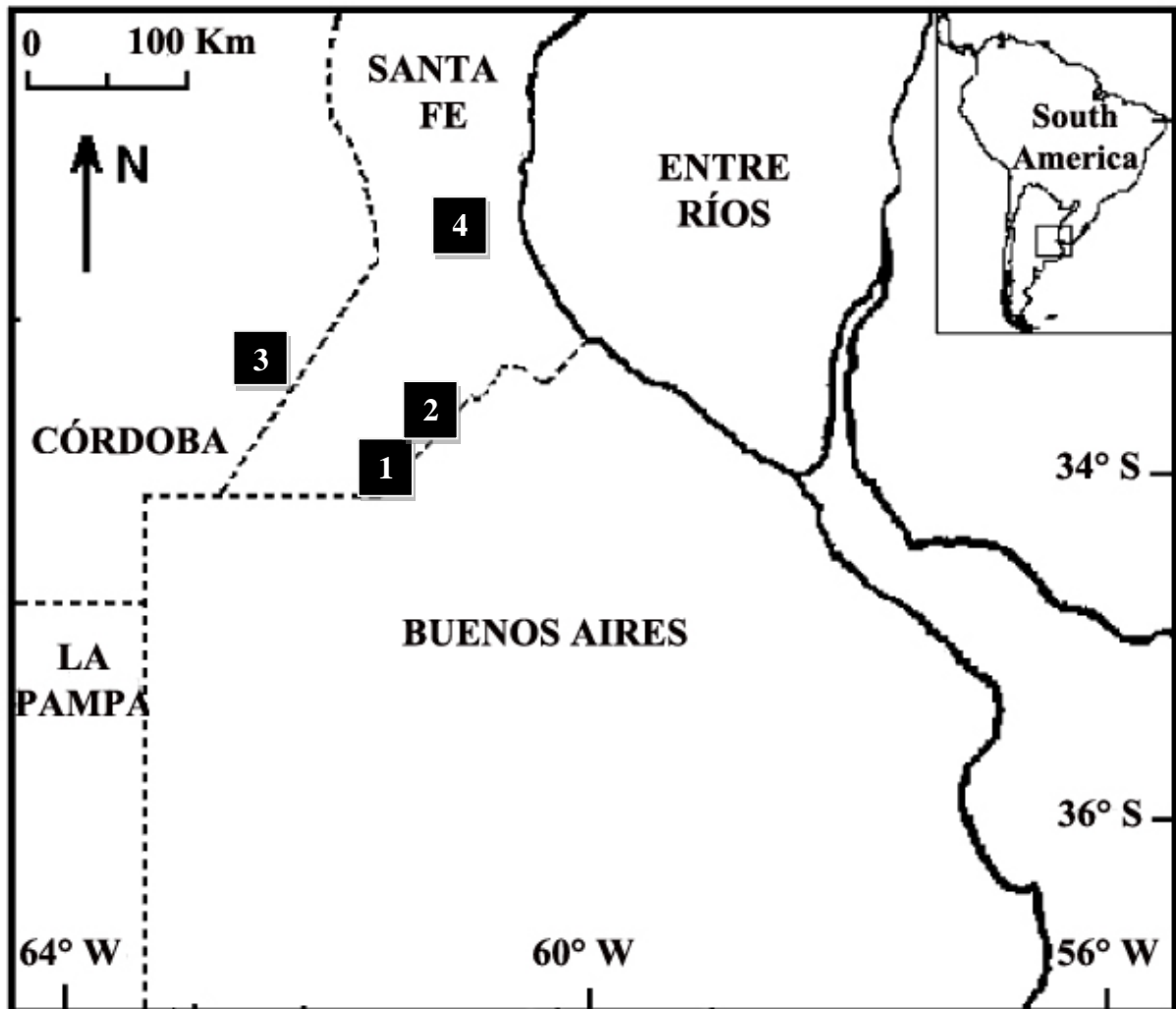
### 9.1.3. METODOLOGÍA

#### Materiales y Métodos

En campos de la Región CREA Sur de Santa Fe (Sur de Santa Fe y Sudeste de Córdoba) se realizan estudios de los efectos de la fertilización de largo plazo desde la campaña agrícola 2000/01 (García *et al.*, 2010). Esta red experimental se estableció con once ensayos en campos de agricultores bajo sistemas de siembra directa estabilizados: cinco sitios bajo rotación maíz-trigo/soja (M-T/S), tres cultivos en dos años, y seis sitios bajo rotación maíz-soja-trigo/soja (M-S-T/S), cuatro cultivos en tres años. En este trabajo, el período evaluado estuvo comprendido entre las campañas agrícolas 2000/01 y 2009/10. Los sitios seleccionados para el análisis de los niveles de K fueron 4 ensayos/localidades (Figura 3), con diferentes suelos e historia agrícola (Tabla 4). En cada uno de ellos se tomaron muestras de situaciones no agrícolas consideradas “quasi-prístinas” o “de referencia” en las proximidades de los ensayos.

**Tabla 4.** Descripción de los sitios experimentales pertenecientes a la Red de Nutrición IPNI-CREA Sur de Santa Fe.

Rotación M-T/S				Rotación M-S-T/S			
Balducchi		San Alfredo		La Blanca		La Hansa	
S 34°09'28'' W 61°36'28''		S 33°53'14'' W 61°27'29''		S 33°29'55'' W 62°37'57''		S 32°38'24'' W 61°19'58''	
Teodelina, Santa Fe		Hughes, Santa Fe		Alejo Ledesma, Córdoba		Cañada de Gómez, Santa Fe	
Serie Santa Isabel (Hapludol típico)		Serie Hughes (Argiudol típico)		Serie La Bélgica (Hapludol típico)		Serie Bustinza (Argiudol ácuico)	
Prof (cm)	Horizontes	Prof (cm)	Horizontes	Prof (cm)	Horizontes	Prof (cm)	Horizontes
0-20	Ap	5-15	A	0-19	Ap	5-18	Ap
20-36	AB	21-33	BAt	19-44	B2	18-25	A1
36-67	Bw	35-50	Bts1	44-80	B3	25-33	B1
67-98	BC	53-65	Bts2	80-123	C1	33-45	B21t
98-145	C	95-95	BC	>123	C2 ca	45-70	B22t
		145-165	C			80-90	B23t
		220-240	Ck			110-125	B3
						135-145	C1
						>200	C2



**Figura 3.** Ubicación geográfica de los sitios experimentales pertenecientes a la Red de Nutrición IPNI-CREA Sur de Santa Fé: 1 – Balducchi (Teodelina, Santa Fe), 2 – San Alfredo (Hughes, Santa Fe), 3 – La Blanca (Alejo Ledesma, Córdoba), 4 – La Hansa (Cañada de Gómez, Santa Fe).

### Tratamientos

En todos los sitios de la red se llevan a cabo seis tratamientos de fertilización en un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA), con tres repeticiones. El tamaño de las parcelas es de 25-30 m de ancho y 65-70 m de largo. Los tratamientos se realizan anualmente siempre sobre



las mismas parcelas. Aquellos seleccionados para evaluar el balance de K del suelo y los niveles de disponibilidad de K fueron: *i*) “aplicación continua de N, P y S (NPS)”, *ii*) su “testigo”, sin fertilización alguna, y *iii*) una situación no agrícola, “quasi-prístina o de referencia” de cada sitio. Los últimos sitios se escogieron en sectores ocupados por cascos o puestos de estancia, nunca sometidos a actividad agrícola.

Los fertilizantes se aplicaron en pre-siembra o siembra en mezclas físicas, en los cultivos de maíz, trigo y soja de primera, incorporándose a la profundidad de siembra distanciados al menos 5 cm de las semillas para evitar efectos de fitotoxicidad (Ciampitti *et al.*, 2006). En el caso de N, la fuente utilizada fue la urea (46-0-0). Para P la fuente utilizada fue el fosfato monoamónico (12-52-0) durante la totalidad de los años evaluados de esta red de ensayos y para el S se utilizó como fuente el sulfato de calcio (19 % S elemento).

La no inclusión de la variable rotación dentro de cada sitio no permitió realizar comparaciones estadísticas entre las dos rotaciones evaluadas. Por tanto, eventuales comparaciones entre ambas rotaciones deben considerarse solamente como descriptivas (Ciampitti, 2009).

### **Determinaciones en suelo**

#### ***Iniciales – Campaña 2000/01***

Al establecer la red en, el año 2000, se llevó a cabo un análisis de suelos completo (0-20 cm). Se extrajeron muestras de cada bloque y las mismas fueron sometidas a los pre-tratamientos de secado al aire, tamizado por una malla de 2 mm para el análisis de pH; mientras que para carbono orgánico total (COT) y P Bray-1 se emplearon muestras secas al aire y tamizadas por una malla de 0,5 mm. Las muestras fueron sometidas a las siguientes determinaciones básicas: *pH suelo:agua 1:2,5* (Thomas, 1996), *carbono orgánico total* (Nelson & Sommers, 1982), *P*

*Bray-1* (Bray & Kurtz, 1945), *micronutrientes* (DTPA; Gaines & Mitchell, 1979), *B* (extracción con H<sub>2</sub>O caliente; Gupta, 1967) y *determinación de cationes* (K, Ca, Mg) por el método NH<sub>4</sub>OAc 1N a pH 7 (Warncke & Brown, 1998) por espectrofotometría de absorción atómica.

### ***Campaña 2009/10***

A inicios de la campaña de grano grueso 2009/10, se tomaron muestras de suelo de cada bloque en los tratamientos “Testigo” y “NPS” y de “situaciones no agrícolas” cercanas a los ensayos, en cinco rangos de profundidad (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm, 80-100 cm) y las mismas fueron sometidas a los pretratamientos de secado al aire y tamizado (2 mm), y posterior determinación de K<sub>d</sub> siguiendo la metodología de extracción NH<sub>4</sub>OAc 1N a pH 7, descrita por Warncke & Brown (1998), y lectura mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Considerando que no existen tratamientos que incluyan fertilización potásica, el balance acumulado de K en el suelo fue calculado directamente como la extracción del nutriente por cosecha. Para tal objetivo, se tomaron los datos de rendimientos de los cultivos (maíz, soja y trigo desde la campaña 2000/01 a 2008/09, inclusive) en cada parcela y se utilizaron requerimientos e índices de cosecha (IC) estimados de K (Tabla 2; Ciampitti & García, 2009). Dichos valores de requerimientos (base seca) fueron ajustados por la humedad de grano de cada cultivo con la que se expresó el rendimiento en los ensayos.

### **Análisis estadísticos**

Para el estudio del balance de K del suelo, de la evolución de la concentración K<sub>d</sub> y la evaluación de los patrones de distribución vertical de K<sub>d</sub> hasta el metro de profundidad, se utilizó el Paquete Estadístico SAS, aplicando el procedimiento PROC MIXED incorporando para el

último análisis la correlación entre las capas de suelo evaluadas (SAS Institute, 1991; Littell *et al.*, 2000). Se realizaron previamente pruebas de normalidad mediante el test de Shapiro-Wilk modificado (Shapiro & Wilk, 1965; Mahibbur & Govindarajulu, 1997) y homogeneidad de varianzas mediante la comparación de los cuadrados medios del error con la prueba de F. Si este último supuesto resultó rechazado, se procedió a la homogeneización mediante la transformación más conveniente de los datos. Las variables sitio experimental, situación y profundidad de muestreo fueron considerados como los efectos fijos en el modelo, mientras que los bloques y su interacción los aleatorios. Si algún componente de la variancia resultó cero, este era removido para alcanzar un modelo más parsimonioso. Las medias y las interacciones significativas de los factores evaluados fueron obtenidas utilizando el procedimiento LSMEAN/PDIFF. El mejor ajuste de la estructura de covarianza se hizo con AR (1). Los criterios de información utilizados para elegir las estructuras de covarianza para cada modelo fueron el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC). Los balances estimados de K (como extracción en grano) se analizaron para cada rotación mediante un test de comparaciones múltiples (LSD), con el objetivo de detectar diferencias entre sitios y tratamientos de fertilización. La evaluación estadística de los resultados obtenidos luego de las determinaciones de laboratorio de K<sub>d</sub>, se llevó a cabo mediante análisis de varianza (ANVA), utilizando el paquete estadístico SAS. Para evaluar la evolución de la disponibilidad de K en los primeros 20 cm, el factor situación incluyó además de los niveles quasi-pristino, testigo y fertilizado, el nivel “inicial 2000” (K<sub>d</sub> al inicio de los ensayos). Para la evaluación en profundidad, el nivel “inicial 2000” no se incluyó dentro del factor situación en los análisis estadísticos correspondientes. En esta evaluación se consideraron las 5 capas de suelo evaluadas hasta el metro de profundidad (20 cm de espesor cada una) en 4 sitios (dos en cada rotación), bajo 3 situaciones contrastantes: suelo

quasi-pristino o de referencia, y agricultura sin fertilización y con fertilización NPS durante las últimas 9 campañas agrícolas.

#### **9.1.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

##### **9.1.4.1. *Balance de K***

Los rendimientos de los cultivos y la extracción de K expresados en  $\text{kg ha}^{-1}$ , en ambas rotaciones, se pueden observar en la Tablas 6 y 7, respectivamente.

En la rotación M-T/S (Balducchi y San Alfredo), se observaron efectos significativos ( $p < 0.05$ ) de sitio, situación e interacción sitio\*situación. Para la rotación M-S-T/S (La Blanca y La Hansa), se observaron efectos significativos ( $p < 0.05$ ) de sitio y situación, no detectando interacción entre los mismos (Tabla 8).

**Tabla 6.** Rendimientos de los cultivos y extracción estimada de K en grano para los tratamientos con y sin fertilización continua de N, P y S durante las 9 campañas agrícolas 2000/01 a 2008/09 en los ensayos con rotación M-T/S.

Cultivo/Año	Tratamiento	Rendimiento en grano (kg ha <sup>-1</sup> )		Extracción de K en grano (kg ha <sup>-1</sup> )		
		Balducchi	San Alfredo	Balducchi	San Alfredo	
Maíz 2000	T	5628	8277	19,6	28,8	
	NPS	8399	11462	29,3	39,9	
Trigo 2001	T	1878	2670	6,6	9,4	
	NPS	3648	3231	12,8	11,4	
Soja II 2001	T	2910	3131	49,2	52,9	
	NPS	3278	3445	55,4	58,3	
Maíz 2002	T	6498	7053	22,6	24,6	
	NPS	11924	10064	41,6	35,1	
Trigo 2003	T	1894	3377	6,7	11,9	
	NPS	5160	5328	18,1	18,7	
Soja II 2003	T	1963	3183	33,2	53,8	
	NPS	3351	3566	56,7	60,3	
Maíz 2004	T	3787	7653	13,2	26,7	
	NPS	9886	10395	34,4	36,2	
Trigo 2005	T	1980	3423	7,0	12,0	
	NPS	5476	4355	19,3	15,3	
Soja II 2005	T	1743	2424	29,5	41,0	
	NPS	2951	4053	49,9	68,5	
Maíz 2006	T	5455	9720	19,0	33,9	
	NPS	14199	14737	49,5	51,4	
Trigo 2007	T	1678	1414	5,9	5,0	
	NPS	5619	5640	19,8	19,8	
Soja II 2007	T	1316	2751	22,3	46,5	
	NPS	3130	3901	52,9	66,0	
Maíz 2008	T	4597	9241	16,0	32,2	
	NPS	11077	12356	38,6	43,1	
				<b>TOTAL (kg ha<sup>-1</sup> K)</b>		
				T	251 b <sup>(*)</sup>	379 b
				NPS	478 a	524 a

\*Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para un mismo sitio (LSD  $\alpha=0.05$ )

**Tabla 7.** Rendimientos de los cultivos y extracción estimada de K en grano para los tratamientos con y sin fertilización continua de N, P y S durante las 9 campañas agrícolas 2000/01 a 2008/09 en los ensayos con rotación M-S-T/S.

Cultivo/Año	Tratamiento	Rendimiento en grano (kg ha <sup>-1</sup> )		Extracción de K en grano (kg ha <sup>-1</sup> )		
		La Blanca	La Hansa	La Blanca	La Hansa	
Maíz 2000	Testigo	7074	-	24,7	-	
	NPS	9362	-	32,6	-	
Soja I 2001	Testigo	3432	3828	58,0	64,7	
	NPS	3953	4232	66,9	71,6	
Trigo 2002	Testigo	1749	1180	6,1	4,1	
	NPS	2909	1741	10,2	6,1	
Soja II 2002	Testigo	3631	3132	61,4	53,0	
	NPS	4052	4037	68,5	68,3	
Maíz 2003	Testigo	7729	4625	26,9	16,1	
	NPS	11478	11921	40,0	41,5	
Soja I 2004	Testigo	4482	3244	75,8	54,9	
	NPS	5600	3948	94,7	66,8	
Trigo 2005	Testigo	2290	1483	8,1	5,2	
	NPS	3762	4051	13,2	14,2	
Soja II 2005	Testigo	1866	1856	31,6	31,4	
	NPS	2655	3170	44,9	53,6	
Maíz 2006	Testigo	10131	5731	35,3	20,0	
	NPS	16090	11425	56,1	39,8	
Soja I 2007	Testigo	3551	3406	60,1	57,6	
	NPS	5028	4250	85,0	71,9	
Trigo 2008	Testigo	1724	1449	6,1	5,1	
	NPS	3682	1834	12,9	6,4	
Soja II 2008	Testigo	1899	2394	32,1	40,5	
	NPS	3682	2633	62,3	44,5	
<b>TOTAL (kg ha<sup>-1</sup> K)</b>						
				T	426 b <sup>(*)</sup>	353 b
				NPS	587 a	485 a

*\*Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para un mismo sitio (LSD  $\alpha=0.05$ )*

**Tabla 8.** Análisis de la varianza del balance K como extracción en grano, grados de libertad, valor F y valor P, utilizando un modelo factorial, para las dos rotaciones evaluadas.

<b>Variables</b>	<b>gl</b>	<b>F</b>	<b>Valor P</b>
<i>Rotación M-T/S</i>			
Sitio	1	51,50	<0,0001
Situación	1	267,70	<0,0001
Sitio*Situación	8	16,13	0,0039
<i>Rotación M-S-T/S</i>			
Sitio	1	55,07	<0,0001
Situación	1	14,81	0,0049
Sitio*Situación	8	0,15	0,7123

Para la rotación M-T/S, en el sitio Balducchi la extracción anual promedio fue de 28 y 53 kg K ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para los tratamientos con y sin fertilización NPS, respectivamente. En el sitio San Alfredo, por su parte, se observó una extracción anual promedio de 42 y 58 kg K ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para los mismos tratamientos, respectivamente. En la rotación M-S-T/S, las extracciones anuales promedio para los tratamientos testigo y NPS fueron de 47 y 65 kg K ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para el sitio la Blanca, y de 39 y 54 kg K ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para el sitio La Hansa.

#### **9.1.4.2. Cambios en la disponibilidad de K en el suelo (0-20 cm)**

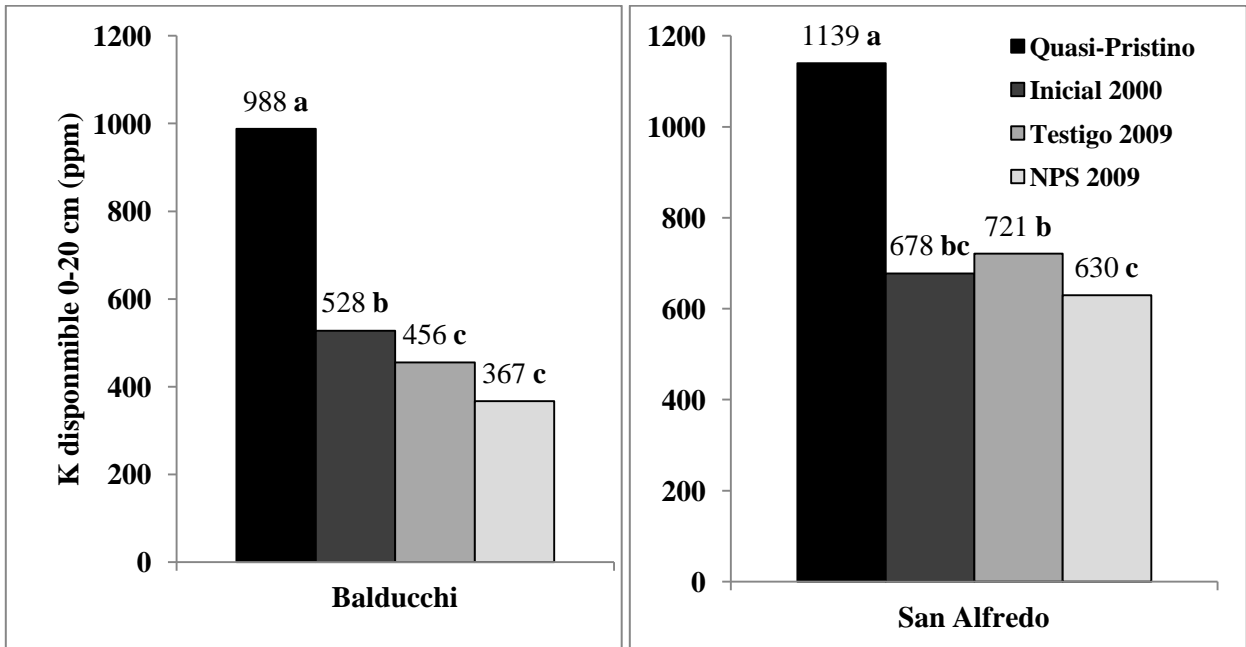
En ambas rotaciones se observaron efectos significativos ( $p < 0.05$ ) de sitio, situación e interacción de ambos factores (Tabla 9). Por otra parte, en todos los sitios evaluados se detectaron diferencias significativas entre la situación “quasi-prístina” o “de referencia” y: *i*) el momento inicial de los ensayos (año 2000) y, *ii*) las situaciones agrícolas con y sin fertilización NPS (año 2009) (Figuras 8 y 9).

**Tabla 9.** Análisis de la varianza de Kd en los primeros 20 cm, grados de libertad, valor F y valor P, utilizando un modelo factorial, para las dos rotaciones evaluadas.

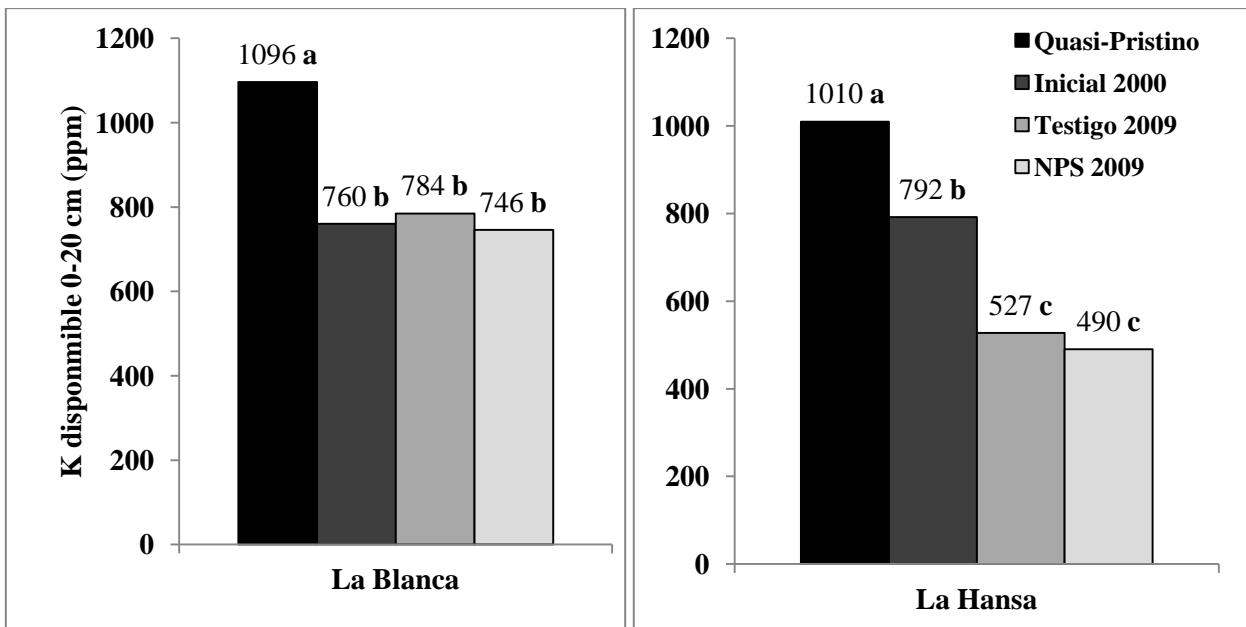
<b>VARIABLES</b>	<b>gl</b>	<b>F</b>	<b>Valor P</b>
<i>Rotación M-T/S</i>			
Sitio	1	109,5	<0,0001
Situación	3	76,58	<0,0001
Sitio*Situación	3	5,93	0,0064
<i>Rotación M-S-T/S</i>			
Sitio	1	49,74	<0,0001
Situación	3	95,56	<0,0001
Sitio*Situación	3	12,22	0,0002

Analizando la evolución del Kd luego de 9 campañas agrícolas, se puede observar que: en el sitio Balducchi (Teodelina, Santa Fe), la evolución temporal durante los ensayos de nutrición, manifestó disminuciones significativas para las situaciones con fertilización NPS (con balance =  $-478 \text{ kg K ha}^{-1}$  -extracción en grano-) y su testigo (balance =  $-263 \text{ kg K ha}^{-1}$ ), respecto de los niveles iniciales, pero ambos tratamientos no fueron estadísticamente diferentes entre sí (Figura 8). En el establecimiento San Alfredo (Hughes, Santa Fe), el tratamiento NPS (balance =  $-517 \text{ kg K ha}^{-1}$ ) y su testigo (balance =  $-367 \text{ kg K ha}^{-1}$ ) no mostraron diferencias significativas respecto del nivel inicial, pero fueron diferentes entre sí, mostrando NPS menores valores de Kd (Figura 8). En el ensayo La Blanca (Alejo Ledesma, Córdoba), no se observaron disminuciones significativas para las situaciones con fertilización NPS (balance =  $-564 \text{ kg K ha}^{-1}$ ) y su testigo (balance =  $-418 \text{ kg K ha}^{-1}$ ) respecto de los niveles iniciales, ni tampoco fueron estadísticamente diferentes entre sí (Figura 9). En La Hansa (Cañada de Gómez, Santa Fe), se observaron disminuciones significativas para las situaciones con fertilización NPS (balance =  $-564 \text{ kg K ha}^{-1}$ ) y su testigo (balance =  $-418 \text{ kg K ha}^{-1}$ ) respecto de los niveles iniciales, pero ambas situaciones no se diferenciaron significativamente entre sí (Figura 9).





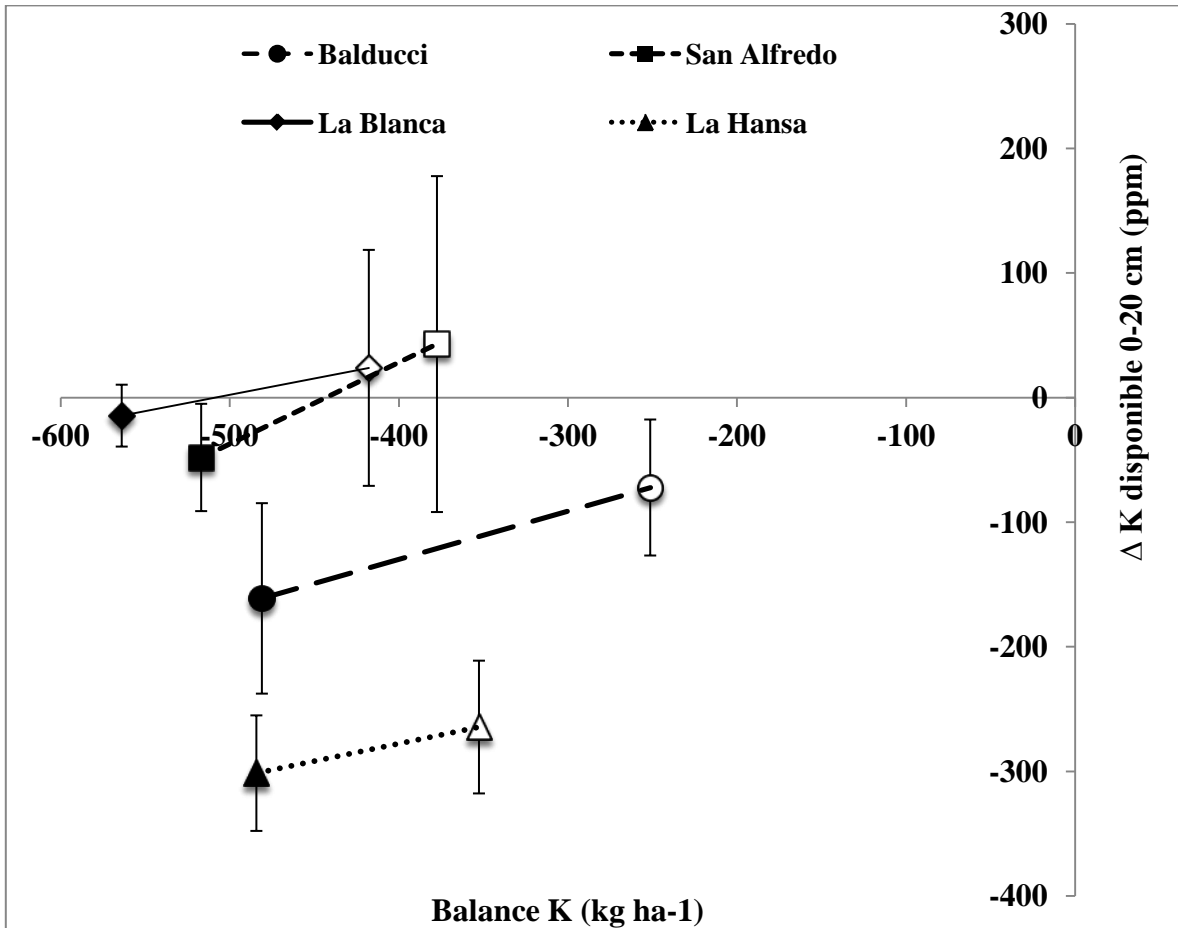
**Figura 8.** Niveles de Kd (NH<sub>4</sub>OAc) en los primeros 20 cm de suelo para las diferentes situaciones evaluadas, en los sitios con rotación M-T/S en 9 campañas consecutivas desde 2000/01 a 2008/09. \* Los valores numéricos indican la media de cada situación. Letras distintas junto a las medias indican diferencias significativas entre situaciones (LSD  $\alpha=0.05$ ).



**Figura 9.** Niveles de Kd (NH<sub>4</sub>OAc) en los primeros 20 cm de suelo para las diferentes situaciones evaluadas, en los sitios con rotación M-S-T/S en 9 campañas consecutivas desde 2000/01 a 2008/09. \* Los valores numéricos indican la media de cada situación. Letras distintas junto a las medias indican diferencias significativas entre situaciones (LSD  $\alpha=0.05$ ).

Analizando la caída de Kd en el transcurso 2000 a 2009, en los sitios con disminuciones significativas respecto de los valores iniciales (Balducchi y La Hansa), si bien ambos tratamientos no se diferenciaron estadísticamente, se observó una tendencia de disminución mayor en los tratamientos con fertilización NPS respecto de su testigo. En promedio, Balducchi mostró tasas de disminución anuales de 8 y 18 ppm Kd año<sup>-1</sup> para los tratamientos testigo y NPS, respectivamente; mientras que, en La Hansa se observaron las mayores tendencias de disminución, con tasas medias de caída de 33 y 38 ppm Kd año<sup>-1</sup>, para los tratamientos testigo y NPS, en ese orden.

Por otra parte, si bien la tendencia en todos los sitios, fue observar mayor extracción por cosecha de K (kg ha<sup>-1</sup>) en las situaciones con fertilización NPS, el balance acumulado del nutriente no mostró una asociación significativa con los cambios en la disponibilidad de K en ninguno de los casos en evaluación. Sin embargo, la tendencia observada, es a presentar mayores disminuciones en el Kd en la medida que los balances fueron más negativos (Figura 10).



**Figura 10.** Variación de Kd (0-20 cm) en función del balance acumulado de K (extracción en grano) para los cuatro ensayos experimentales, considerando 9 campañas agrícolas desde 2000/01 a 2008/09. Símbolos vacíos y llenos representan tratamientos Testigo y NPS, respectivamente, para cada sitio. Las barras verticales indican desvío estándar.

Estos resultados y tendencias observadas nos indican que la dinámica del Kd en los primeros 20 cm, no dependió fuertemente del balance acumulado de K, entrando en juego variables propias de cada sitio. Esta información es consistente con lo reportado por Johnston *et al.*, (2001) quienes observaron que, en ensayos de producción de forrajes sin fertilización potásica, luego de 6 años la disponibilidad en los primeros cm del suelo (0-18) no solo no disminuyó sino que incluso se incrementó en 5 de los 6 ensayos evaluados. Esto hace suponer que existe interacción con otras propiedades del suelo, como las dinámicas de intercambio entre

las fracciones de K (Shaviv *et al.*, 1985; Goulding, 1987; Zubillaga & Conti, 1994; Cox *et al.*, 1996; Cox *et al.*, 1999;; Johnston *et al.*, 2001; Malla, 2002; Schindler *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2004; Öborn *et al.*, 2005; ; Johnston, 2007; Fernández *et al.*, 2008) y/o la interacción con las capas más profundas del perfil y procesos de estratificación superficial de K (Bordoli & Mallarino, 1998; Jobbagy & Jackson, 2001; Amado *et al.*, 2006; Mallarino & Borges, 2006).

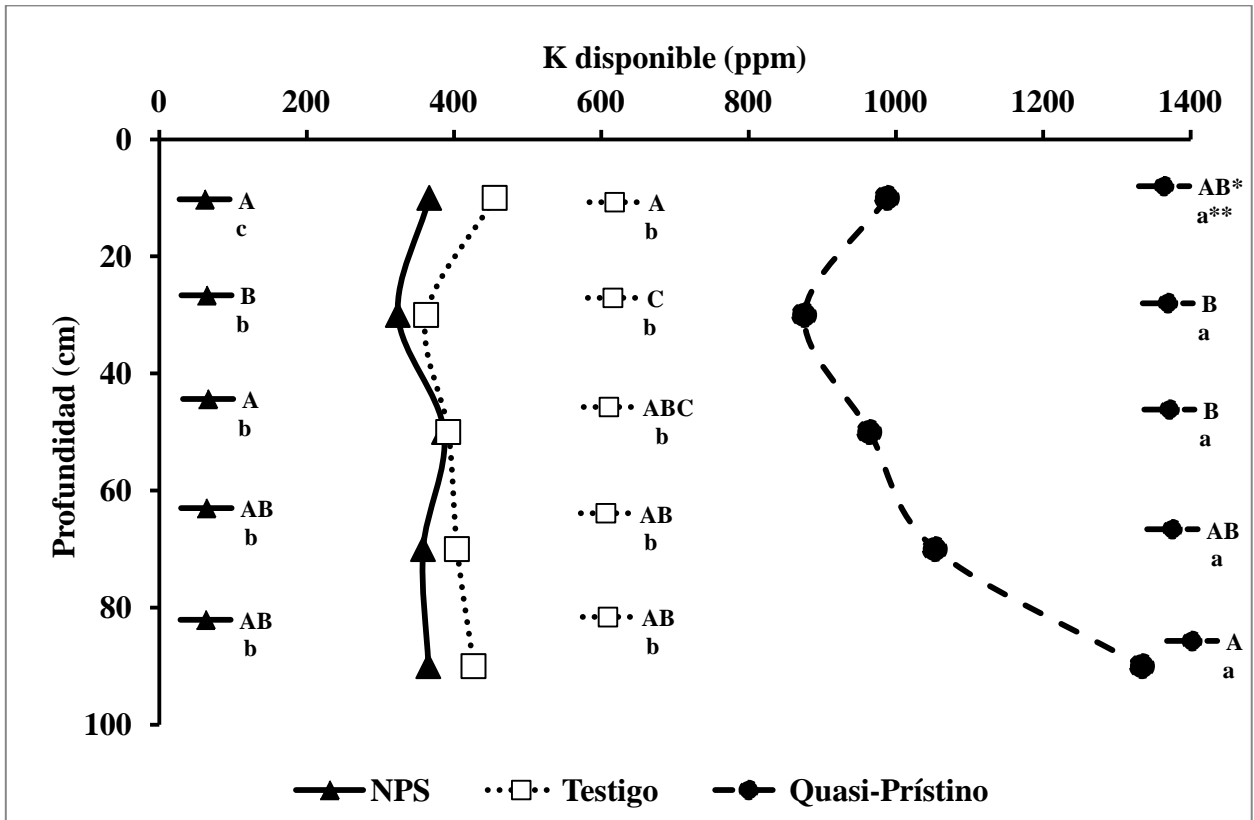
#### **9.1.4.2. Distribución vertical de la disponibilidad de K en el suelo (0-100 cm)**

Para la rotación M-T/S se observaron efectos significativos ( $p < 0.05$ ) de sitio, situación, profundidad, interacción sitio\*situación, sitio\*profundidad y situación\*profundidad. La triple interacción sitio\*situación\*profundidad resultó no significativa ( $p > 0.05$ ). Para los ensayos en rotación M-S-T/S, se observaron efectos significativos ( $p < 0.05$ ) de sitio, situación, profundidad, interacción sitio\*profundidad, situación\*profundidad y triple interacción sitio\*situación\*profundidad (Tabla 10).

**Tabla 10.** Análisis de la varianza de K disponible hasta el metro de profundidad, grados de libertad, valor F y valor P, utilizando un modelo factorial mixto con medidas correlacionadas en el espacio, para las dos rotaciones evaluadas.

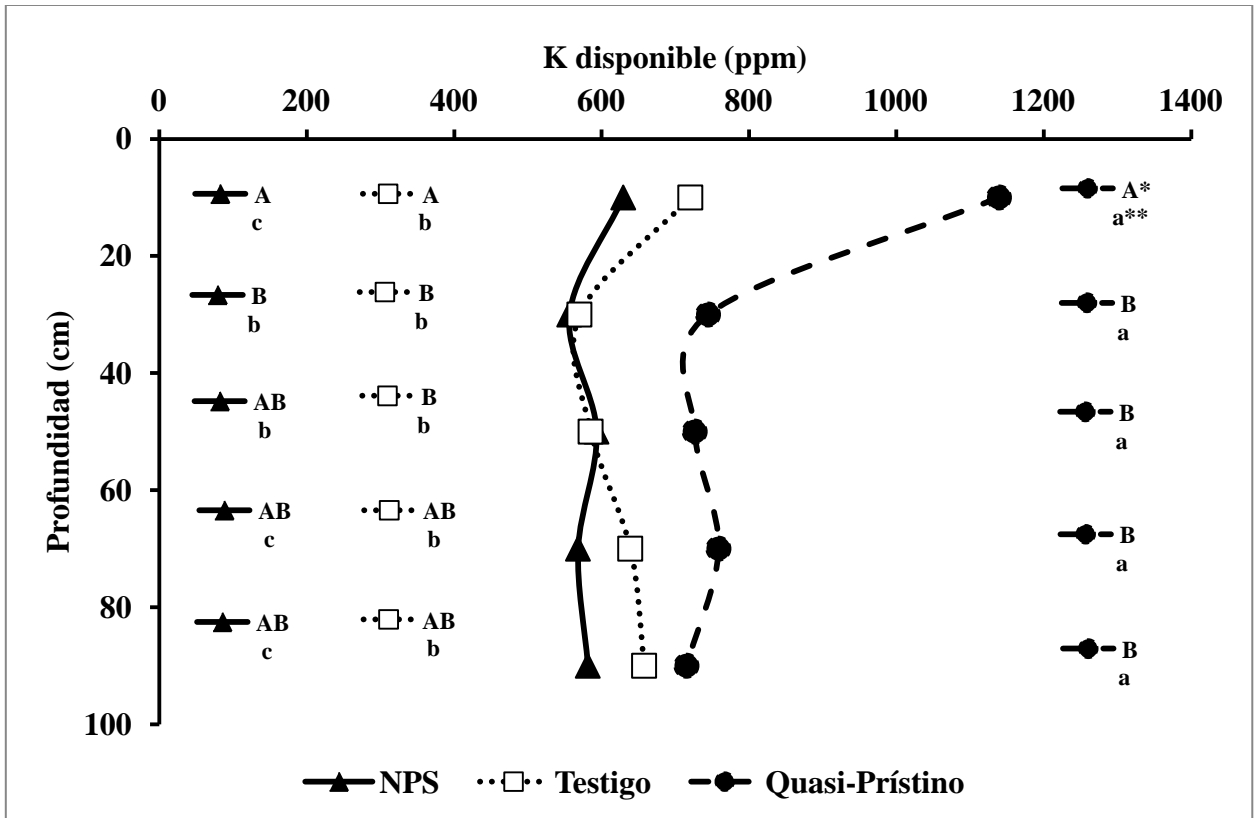
<b>Variab</b> les	<b>gl</b>	<b>F</b>	<b>Valor P</b>
<i>Rotación M-T/S</i>			
Sitio	1	33,57	0,0041
Situación	2	254,06	<0,0001
Profundidad	4	18,55	<0,0001
Sitio*Situación	2	50,20	<0,0001
Sitio*Profundidad	4	2,80	0,0392
Situación*Profundidad	8	2,65	0,0201
Sitio*Situación*Profundidad	8	1,64	0,1462
<i>Rotación M-S-T/S</i>			
Sitio	1	4,52	0,0476
Situación	2	66,27	<0,0001
Profundidad	4	3,36	0,0001
Sitio*Situación	2	1,41	0,2693
Sitio*Profundidad	4	16,54	<0,0001
Situación*Profundidad	8	5,42	<0,0001
Sitio*Situación*Profundidad	8	3,86	0,0016

Analizando las comparaciones dentro de cada sitio, en Balducchi (Hapludol típico) se observaron diferencias significativas entre la situación “quasi-prístina” y las situaciones agrícolas (con y sin fertilización) en las concentraciones de Kd en todas las profundidades evaluadas. Las situaciones con y sin fertilización solo se diferenciaron entre sí en la profundidad 0-20 cm. En cuanto a la distribución vertical del nutriente, la situación “quasi-prístina” presentó mayores niveles de Kd en profundidad, mientras que las situaciones agrícolas (con y sin fertilización NPS) presentaron un patrón de distribución más uniforme en el perfil analizado (Figura 11).



**Figura 11.** Distribución vertical de Kd para las tres situaciones evaluadas en el sitio experimental Balducchi, Teodelina, Santa fe. Suelo Hapludol típico (serie Santa Isabel). \**Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre profundidades para una misma situación (LSD  $\alpha=0.05$ )*. \*\**Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre situaciones para una misma profundidad (LSD  $\alpha=0.05$ )*.

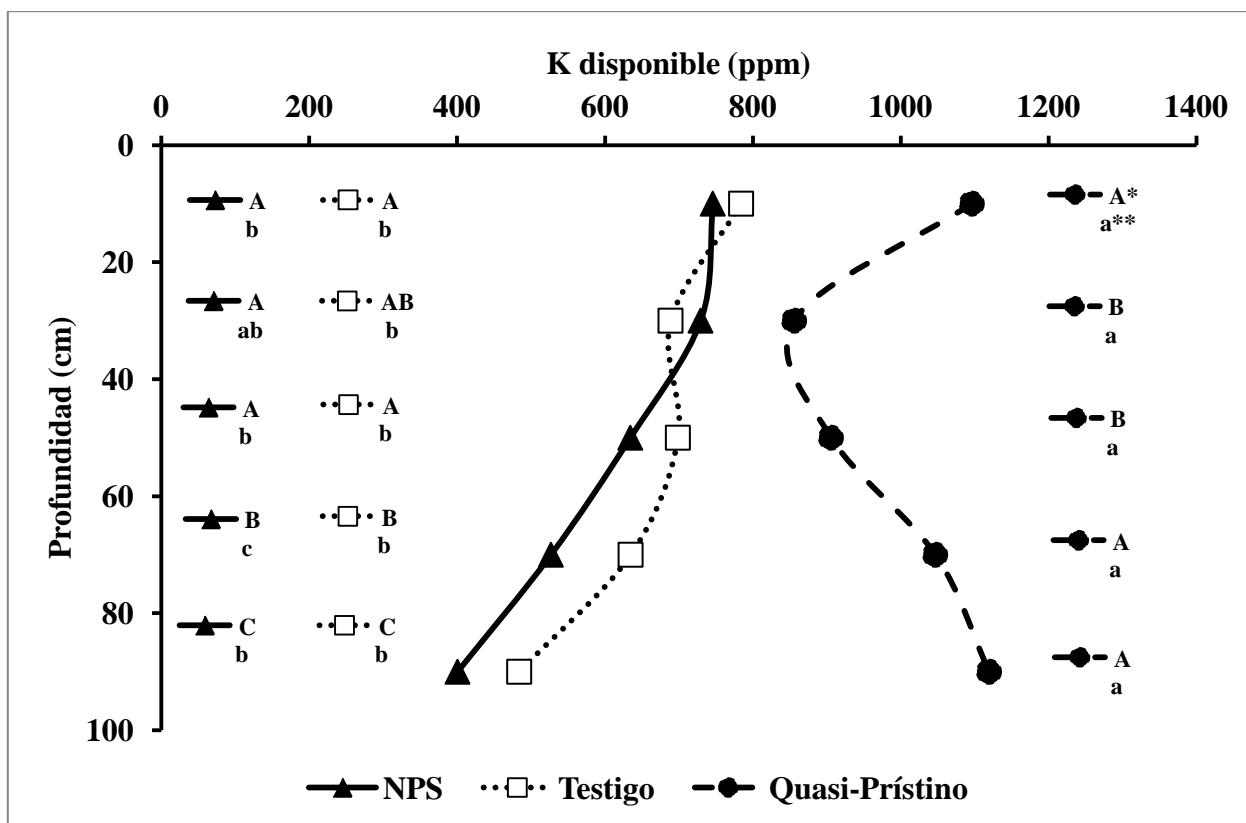
En San Alfredo (Argiudol típico), se observaron disminuciones significativas en ambas situaciones agrícolas respecto de la situación quasi-prístina, en todas las capas evaluadas, diferenciándose entre sí las situaciones de fertilización, solo en las profundidades 0-20, 60-80 y 80-100 cm. En cuanto a la distribución vertical, la situación de referencia presentó mayores valores de Kd en los primeros 20 cm, mostrando concentraciones menores y uniformes en el resto del perfil analizado. Al pasar a las situaciones agrícolas, se observa un patrón similar, pero más uniforme entre profundidades, relacionado principalmente al agotamiento más pronunciado en los primeros 40 cm del perfil (Figura 12).



**Figura 12.** Distribución vertical de Kd para las tres situaciones evaluadas en el sitio experimental San Alfredo, Hughes, Santa fe. Suelo Argiudol típico (serie Hughes). \*Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre profundidades para una misma situación (LSD  $\alpha=0.05$ ). \*\*Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre situaciones para una misma profundidad (LSD  $\alpha=0.05$ ).

En La Blanca (Hapludol típico), en todas las profundidades analizadas, se observaron disminuciones significativas en el Kd entre la situación quasi-prístina y las situaciones agrícolas. Las situaciones agrícolas con y sin fertilización, solo se diferenciaron entre sí en la capa 60-80 cm, mostrando la situación NPS los menores valores de Kd. Respecto del patrón de distribución, en la situación quasi-prístina éste mostró mayores concentraciones en las capas 0-20, 60-80 y 80-100 cm, respecto de 20-40 y 40-60 cm que no se diferenciaron entre si. Al pasar a las situaciones agrícolas, este patrón cambia, mostrando mayor tendencia a presentar mayores concentraciones

en los primeros 20 cm para la situación sin fertilización, y en los primeros 40 cm para la situación fertilizada NPS. En estos cambios se observa una tendencia al agotamiento en las capas más profundas del suelo respecto de las capas superficiales (Figura 13).

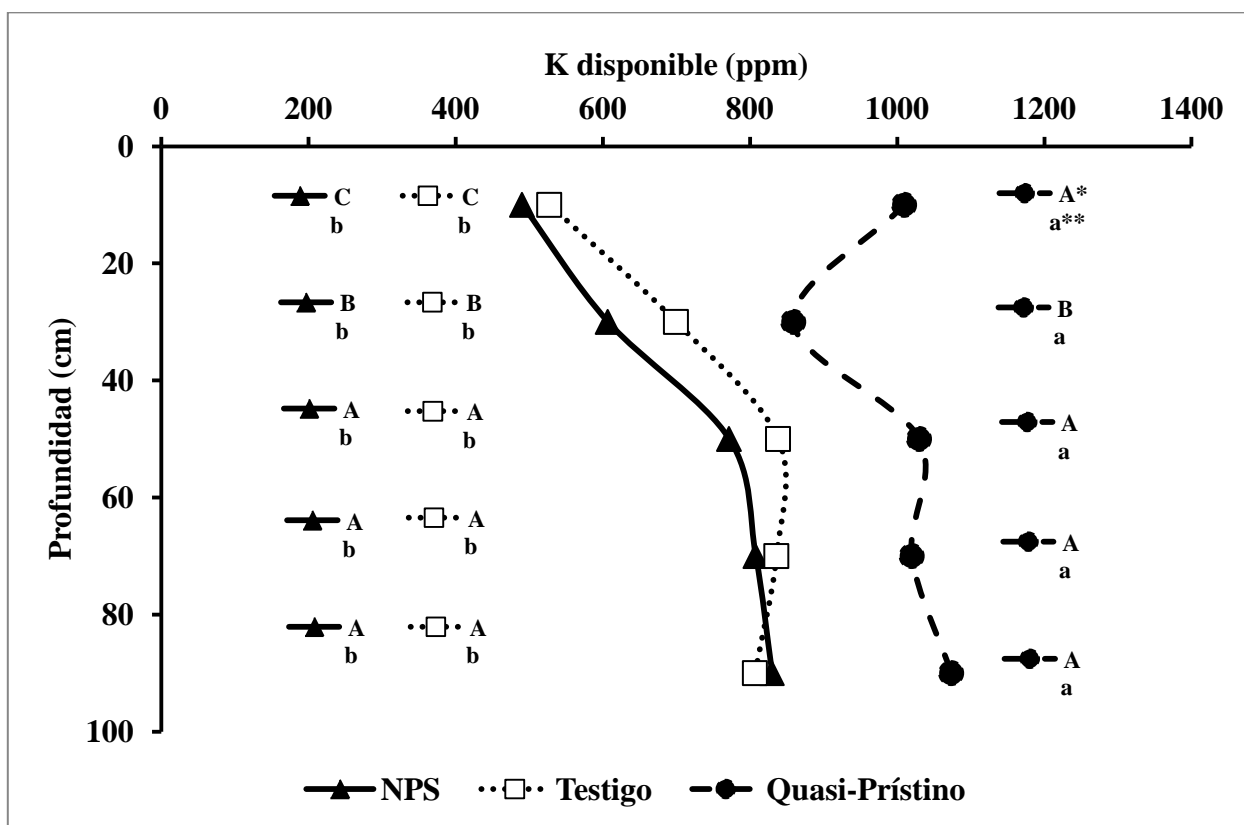


**Figura 13.** Distribución vertical de Kd para las tres situaciones evaluadas en el sitio experimental La Blanca, Alejo Ledesma, Córdoba. Suelo Hapludol Típico (serie La Bélgica). \*Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre profundidades para una misma situación (LSD  $\alpha=0.05$ ). \*\*Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre situaciones para una misma profundidad (LSD  $\alpha=0.05$ ).

En La Hansa (Argiudol ácuico) se observaron diferencias significativas entre la situación “quasi-prístina” y las situaciones agrícolas (con y sin fertilización NPS) en las concentraciones de Kd en todas las profundidades evaluadas, no diferenciándose entre sí ambas situaciones de fertilización. Respecto del patrón de distribución en profundidad, la situación de referencia presentó un patrón en el cual se observan mayores valores de KD en los primeros 20cm y a partir



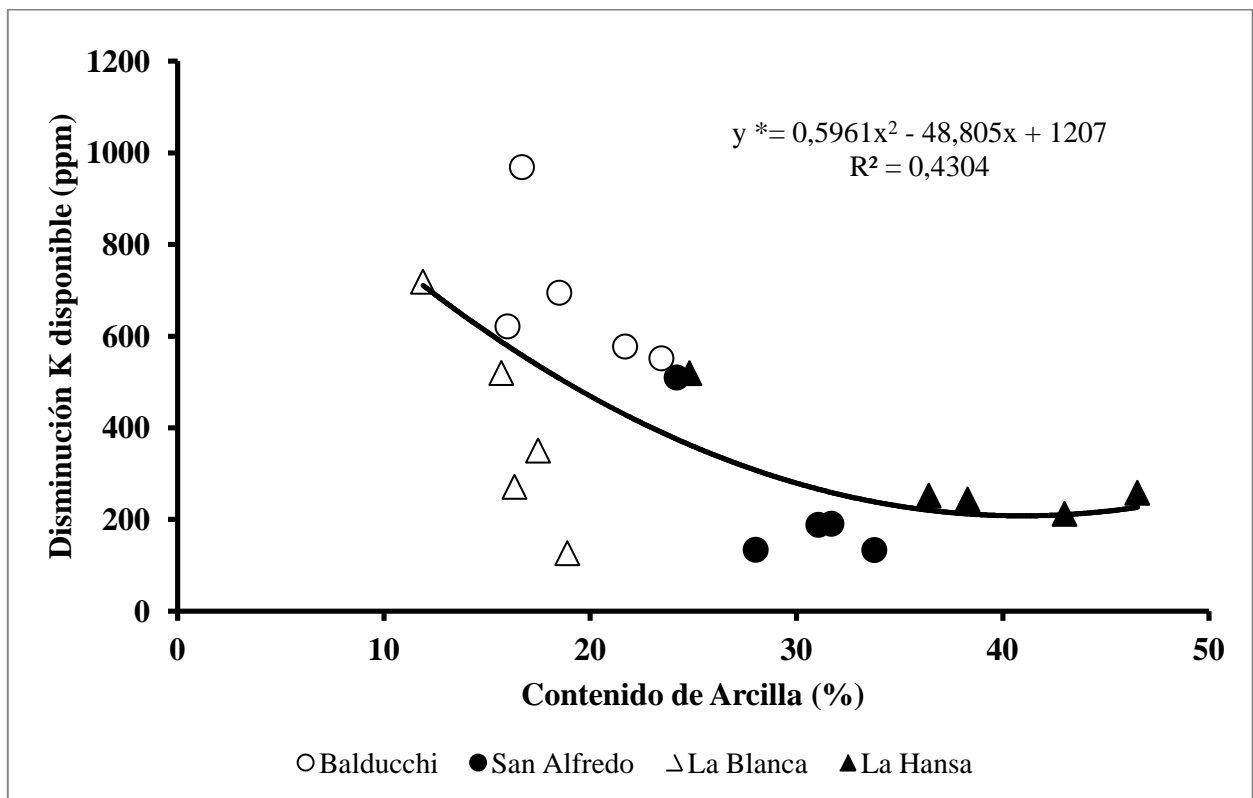
de los 40cm hasta el metro de profundidad. Así, la capa 20-40 cm mostró las menores concentraciones de Kd, respecto de las demás capas. Al pasar a las situaciones agrícolas (y observando los valores absolutos en cada profundidad) el patrón muestra claras evidencias del agotamiento en las primeras capas del perfil, 0-20 y 20-40 cm, respecto de las capas más profundas (Figura 14).



**Figura 14.** Distribución vertical de Kd para las tres situaciones evaluadas en el sitio experimental La Hansa, Cañada de Gómez, Santa fe. Suelo Argiudol ácuico. \*Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre profundidades para una misma situación (LSD  $\alpha=0.05$ ). \*\*Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre situaciones para una misma profundidad (LSD  $\alpha=0.05$ ).

Estos patrones de agotamiento de Kd observados muestran una tendencia diferente según el tipo de suelo en cuestión y características a lo largo de la profundidad en cada perfil de suelo. Una de esas posibles características es la textura, más específicamente el contenido de arcilla

(%), variable entre suelos y entre capas analizadas. A modo descriptivo, se tomaron como referencia los valores de % de arcilla de cada serie de suelo, correspondiente a los diferentes perfiles típicos, y se asumió a esta variable como representativa de las situaciones analizadas. De tal manera, se observó que la disminución de Kd (en todas las profundidades), calculada como la diferencia promedio entre la situación “de referencia” y la situación agrícola con “fertilización NPS”, se asoció significativamente al contenido de arcilla (Figura 15). El mejor ajuste se logró mediante una función polinómica de segundo grado.



**Figura 15.** Disminución de Kd (Quasi-pristino vs Agricultura con fertilización NPS en los últimos 9 años) en función del contenido de arcilla (considerando 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm), para los perfiles típicos de cada suelo en evaluación. Círculos (Maíz-Trigo/Soja2da de 2000/01 a 2008/09), triángulos (Maíz-Soja-Trigo/Soja2da, de 2000/01 a 2008/09). Símbolos vacíos y llenos representan Hapludoles y Argiudoles, respectivamente. \* Regresión significativa ( $p < 0.01$ ).

De tal manera, el contenido de arcillas parece jugar un rol importante en la atenuación de la caída en los niveles de Kd, ya sea representando una mayor capacidad buffer de K -*cantidad y naturaleza de las arcillas*- (Tabatabai & Hanway, 1968; Goulding, 1987; Beckett, 1964; Zubillaga & Conti, 1994; Vitosh *et al.*, 1996; Johnston *et al.*, 2001; Malla, 2002; Öborn *et al.*, 2005; Johnston, 2007) o bien, una impedancia mecánica a la exploración radical mediante la presencia de horizontes argílicos y por ende, permitir una menor absorción del nutriente respecto de las capas superiores a estos horizontes arcillosos.

En este sentido, en el cinturón maicero de EE.UU. Mallarino (2006) muestra una recategorización de los niveles de Kd (0-18cm) para cultivos de maíz y soja, debido a una tendencia a observar respuestas en suelos considerados bien provistos del nutriente. Las dos razones principales fueron la disminución del Kd en capas más profundas del suelo o la existencia de impedimentos físicos para el crecimiento de las raíces. Así, aquellos suelos con menor provisión de K en el subsuelo o con malas condiciones de hospedaje para las raíces presentan, actualmente, mayores valores críticos de Kd en los primeros cm del perfil.

#### **9.1.5. Conclusiones**

En nuestra primera hipótesis planteada sosteníamos que “*Los cambios de Kd (0-20cm) en suelos bajo agricultura sin reposición de K, no guardan relación clara con el balance acumulado del nutriente*”. Los resultados indican que esta hipótesis puede ser aceptada en forma parcial. La variación en los niveles de Kd (ppm) en 0-20 cm luego de 9 años de campañas agrícolas, bajo las situaciones con y sin fertilización NPS, no mostró una asociación unívoca con los balances acumulados del nutriente en ninguna de las situaciones evaluadas. Solo en dos de los sitios evaluados, con balances acumulados de entre -250 a casi -600 kg K ha<sup>-1</sup>, se observaron disminuciones significativas respecto de los niveles iniciales de Kd. En los otros dos sitios, no

solo no disminuyó el Kd sino que en algunos casos particulares se observaron cambios positivos respecto de la situación al inicio de los ensayos. La posible explicación de este comportamiento del Kd por interacción con las capas más profundas, mostró estar influenciada por el sitio y tipo de suelo en cuestión. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, con balances negativos de K, se observaron disminuciones en la disponibilidad del nutriente en 0-20 cm. Por otra parte, las tendencias observadas dentro de cada sitio, muestran que las disminuciones en la disponibilidad fueron mayores a medida que el balance acumulado de K fue más negativo. Probablemente, en evaluaciones de este tipo, la inclusión de situaciones con balances más contrastantes como tratamientos fertilización potásica y balances neutrales del nutriente, permita observar de manera más precisa la relación entre las variaciones en la disponibilidad en los primeros 20 cm y el balance acumulado de K.

La segunda hipótesis planteada sostenía que *“El patrón de distribución vertical de Kd es afectado por la actividad agrícola per se y por la intensidad de extracción del nutriente”*. Con los resultados observados, podemos corroborar parcialmente dicha hipótesis. Los patrones de distribución de Kd, mostraron cambios influenciados por el sitio y el manejo agrícola. En los Argiudoles (San Alfredo y La Hansa), el patrón de agotamiento indicó que las mayores disminuciones ocurrieron en las capas más superficiales del suelo. En los Hapludoles, en cambio, (Balducchi y La Blanca), el patrón de agotamiento marcó importantes disminuciones en profundidad. De tal forma, los suelos con horizontes enriquecidos en arcilla mostraron una tendencia de agotamiento de Kd mayor en las capas superiores a estos horizontes, y aquellos suelos sin presencia de los mismos mostraron, por el contrario, una tendencia de agotamiento de Kd mayor en las capas más profundas del suelo.

A futuro, sería interesante desarrollar modelos predictivos de disminución de la disponibilidad de K en función del balance del nutriente, y así, poder realizar perspectivas de tasas de agotamiento y necesidades de fertilización potásica en los suelos pampeanos. Por otra parte, el estudio conjunto de la evolución de las fracciones disponibles y de reserva de K en el suelo, sería una importante contribución a mejorar el entendimiento de la dinámica del nutriente.

#### **9.1.6. BIBLIOGRAFÍA**

Amado, T.J.C.; M. Cubilla; J.A., Schleindwein; L..A. Santi & E. Cubilla Ramos. Manejo del suelo para la obtención de altos rendimientos en soja en el sistema de siembra directa en Paraguay y en el sur de Brasil. 2006, Mercosoja 2006: Rosario, Santa Fe. p. 99-103

Amtmann, A.; S. Troufflard; & P. Armengoad, 2007 Effect of potassium nutrion on pest and disease resistance in plants, in The International Fertiliser Society. 2007, Proceedings n° 610 IFS: York, United Kingdom. p. 1-20

Andreoli, C.Y.; & N. Peineman. 1984. Fracciones de potasio y condiciones de equilibrio en suelos de la llanura pampeana, Ciencia del Suelo, Vol. N°2, p. 159-166

Askegaard, M.; J. Eriksen& J.E. Olesen. 2003. Exchangeable potassium and potassium balances in organic crop rotations on a coarse sand. Soil Use and Management 19. p. 96-103

Barbagelata, P.A. 2006. Evaluation of Potassium Soil Tests and Methods for Mapping Soil Fertility Properties in Iowa Corn and Soybean Fields. Ph.D. Dissertation. Department of Agronomy. College of Agriculture. Iowa State University. 111 pp. Consultada en: [http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/37270eea1c31d1f90325726c006c86ee/\\$FILE/Tesis\\_PhD\\_PedroBarbagelata.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/37270eea1c31d1f90325726c006c86ee/$FILE/Tesis_PhD_PedroBarbagelata.pdf)

- Barbagelata, P.A. 2008. Manejo del potasio en sistemas de producción de granos. En: Seminario de Nutrición vegetal: Criterios para la fertilización con fósforo y potasio en sistemas agrícolas. UDELAR, EE M.A. Cassinoni, IPNI Cono Sur. 24 de Julio de 2008. Paysandú, Uruguay
- Barbagelata, P.A. 2009. Mejores prácticas de manejo para la fertilización potásica. En: Ciampitti, I.A. y F.O. García (eds.) Mejores prácticas de Manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de Cultivos. Actas Simposio de fertilidad 2009 del IPNI Cono Sur, 12 y 13 de Mayo de 2009, Rosario, Santa Fe, Argentina. p. 78-81
- Barber, S.A. 1974. Influence of the plant root and ion movement in soil. *The Plant Root and Its Environment*. Carson, E.W. Ed. University of Virginia, Charlottesville, USA. p. 525-564
- Beckett, P.H.T. 1964. Studies on soil potassium II: The “Immediate” Q/I Relation of labile potassium in the soil. *J. Soil Sci.* 15:9-23
- Bertsch, P.M. & G.W. Thomas. 1985. Potassium status of temperate region soils. p 131-162. *In*: R.D. Munson (ed.) Potassium in agriculture. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Bordoli, J.M. & A.P. Mallarino. 1998. Deep and shallow banding phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agron. J.* 90:27-33.
- Bray, R.H. & L. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 59:360-361
- Cakmak, I. 2007. Role of potassium in alleviating abiotic stresses, in *The International Fertiliser Society. 2007, Proceedings nº 611 IFS: York, United Kingdom.* p. 1-20
- Ching, P.C. & S.A. Barber. 1979. Evaluation of temperature effects on K uptake by corn. *Agron. J.* 71:1040-1044

- Ciampitti, I.A.; H. Fontanetto; F. Micucci & F.O. García. 2006. Manejo y ubicación del fertilizante junto a la semilla. *Informaciones Agronómicas* N° 31, *Archivo Agronómico* N° 10. IPNI Cono Sur. Acassuso, Bs. As., Argentina.
- Ciampitti, I.A. & F.O. García. 2009. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I Cereales, Oleaginosos e Industriales. IPNI Cono Sur. Acassuso, Bs. As., Argentina. Consulta web en: <http://www.ipni.net/lasc>
- Ciampitti, I.A. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. M.S. tesis. Univ. of Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Conti, M.E. 2000. Potasio del suelo. En: M.E. Conti (ed.). *Principios de Edafología con énfasis en suelos argentinos*. p. 313-321
- Conti, M.E. 2001. Disponibilidad de Potasio. Aspectos relacionados a la dinámica de liberación y renovación de la solución del suelo. *Actas Simposio "El Potasio en Sistemas Agrícolas Argentinos"*. FAUBA-IPI-Fertilizar-INTA, 20-21 Noviembre Buenos Aires, Argentina. p. 21-34
- Conti, M.E.; A.M. De la Horra; M.G. González; N. Arrigo & F.O. García. 2001. Monitoreo de los cambios en la fertilidad potásica de hapludoles típicos de la Región Pampeana fertilizados para agricultura de alto rendimiento. *Actas Simposio "El Potasio en Sistemas Agrícolas Argentinos"*. FAUBA-IPI-Fertilizar-INTA, 20-21 Noviembre Buenos Aires, Argentina. p. 57-60
- Conti, M.E. & F.O. García. 2006. Potasio. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds) *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 123-137
- Cox, A.E.; B.C. Joern & C.B. Roth. 1996. Non-exchangeable ammonium and potassium determination in soils with a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:114–120

- Cox, A.E.; B.C. Joern; S.M. Brouder & D. Gao. 1999. Plant-available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:902–911
- Cruzate, G. & R.A. Casas. 2009. Extracción de Nutrientes en la Agricultura Argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur N° 46*. IPNI Cono Sur. Acassuso, Bs. As., Argentina. p. 21-26
- Darwich, N.A. 1998. Cap. Potasio. *Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes*. 2° ed. 1998, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. p. 121-130.
- Datta, S.K. & D.S. Mikkelsen 1985. Potassium nutrition of rice. In: Munson, R.D. (ed.). *Potassium in Agriculture*. ASA. Madison, WI.
- De la Horra, A.M.; M. Conti, & R. Defrieri. 1993. Potasio disponible, utilización de los extractantes acetato de amonio y Bray-Kurtz. *Ciencia del Suelo* 10-11:107-112.
- Doberman, A. 2001. Requerimientos de potasio en sistemas intensivos de producción de maíz. *Actas Simposio "El Potasio en Sistemas Agrícolas Argentinos"*. FAUBA-IPI-Fertilizar-INTA, 20-21 Noviembre Buenos Aires, Argentina. p. 99-121
- Eckert, D. 1987. Soil test interpretations: Basic cation saturation ratios and sufficiency levels. p. 53-64. Brown, J.R. (ed) *Soil testing: Sampling, correlation, calibration and interpretation*. Spec. Pub. 21. SSSA. Madison, WI, USA.
- Fernández, F.G. 2009. Mejores prácticas de la nutrición de cultivos en el cinturón maicero norteamericano. En: Ciampitti, I.A. y F.O. García (eds.) *Mejores prácticas de Manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de Cultivos*. *Actas Simposio de fertilidad 2009 del IPNI Cono Sur*, 12 y 13 de Mayo de 2009, Rosario, Santa Fe, Argentina. p. 119-123
- Fernández, F.G.; S.M. Brouder; C.A. Beyrouthy; J.J. Volenec & R. Hoyum. 2008. Assessment of Plant-Available Potassium for No-Till, Rainfed Soybean. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1085–1095.



- Gaines, T.P. & J.A. Mitchel. 1979. Chemical methods for soil and plant analysis. Tifton, University of Georgia. Agronomy Handbook N° 1. 105 pp.
- García, F.O.; M. Boxler; J. Minteguiaga; R. Pozzi; L. Firpo; I. Ciampitti; A. Correndo; F. Bauschen; A. Berardo & N. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe - Resultados y Conclusiones de los primeros 10 años 2000-2009. 1a Ed., Buenos, AACREA, 2010. 64 p.
- García, F.O. & M.F. González San Juan. 2010. Balance de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos?. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. N°48. Diciembre 2010. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires Argentina. p.1-5.
- Goulding, K.W.T. 1987. Potassium fixation and release. Proceedings of the 20th Colloquium of the International Potash Institute. Baden Bei Wien, Austria. p. 137-154.
- Graham, E.R. 1959. An explanation of the theory and methods of soil testing. Missouri Agric. Exp. Stn. Bull. 734.
- Havlin, J.L.; J.D. Beaton; S.L. Tisdale & W.L. Nelson. 2005. Soil Fertility and Fertilizers. 7th Edition. Pearson Education Inc. NJ, USA. 515 p.
- Helmke, P.A.; & D.L. Sparks. 1996. Lithium, sodium, potassium, cesium, and rubidium. p. 551-574. In: D.L. Sparks (ed). Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods and processes. Soil Sci. Soc. Am. Book Series 5, SSSA, Madison, WI.
- Hinsinger, P. 2002. Potassium. p. 1035-1039. In: R. Lal (Ed.). Encyclopedia of Soil Science. Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- Hoefl, R. & T. Peck. 2001. Chapter 11: Soil Testing and Fertility. [Online]. In: Hoefl, R. y E. Nafziger (eds) Illinois Agronomy Handbook. Univ. of Illinois. Urbana, Illinois, USA. Disponible en: <http://web.aces.uiuc.edu/iah/>

Imas, P. 2002. Fertilización Potásica en Cultivos. Seminario INTA-Fertilizar, Avances y nuevas posibilidades en fertilización de cultivos intensivos del NOA. 6 de Agosto de 2002. Tucumán, Argentina.

Imas, P. & H. Magen. 2008. Role of Potassium Nutrition in Balanced Fertilization for Soybean Yield and Quality - Global Perspective, pp 1-20, 2008 in: Proceedings of the Regional Seminar on Recent Advances in Potassium Nutrition Management for Soybean Based Cropping Systems. September 28-29, 2007.

INTA. 2010. Consulta on-line de Cartas de suelos de la República Argentina. Consulta web en: <http://geointa.gov.ar/mapoteca>

Jobbagy, E.G. & R.B. Jackson. 2001. The distribution of soil nutrient with depth: Global patterns and imprint of plants. Biogeochemistry, 2001, Vol. 53, pp. 51-77

Johnston, A.E. 1986. Potassium fertilization to maintain a K-Balance under various farming systems. Nutrient Balances and the Need for Potassium. Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Potash Institute-Congress. August 1986. Reims, France. p. 199-226

Johnston, A.E. 2007. Potassium, Magnesium and soil fertility: Long term experimental evidence, in The International Fertiliser Society. 2007, Proceedings n° 613 IFS: York, United Kingdom. p. 1-40.

Johnston, A.E. & J.D.D. Mitchel. 1974. The behaviour of K remaining in soils from the Agdell experiment Rothamsted, the results of intensive cropping in pot experiments and their relation to soil analysis and the results of field experiments. Rothamsted Experimental Station Report for 1973, Part 2, p. 74-97.

Johnston, A.E. & K.W.T. Goulding. 1992. Potassium concentrations in surface and ground waters and the loss of potassium in relation to land use. Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Colloquium of

the International Potash Institute (IPI), Prague. IPI, Schneidergasse 27, PO Box 1609, CH-4001 Basel Switzerland. p. 135-158.

Johnston, A.E.; P.R. Poulton & J.K. Syers. 2001. Phosphorus, potassium and sulphur cycles in agricultural soils, in The International Fertiliser Society. 2001, Proceedings n° 465 IFS: York, United Kingdom. p. 1-36

Krauss, A. & A.E. Johnston. 2002. Assessing soil potassium, can we do better? 9<sup>th</sup> International Congress of Soil Science. Faisalabad, Pakistán. 18-20 March 2002

Littell, R.; J. Pendergast & R. Natarajan. 2000. Modeling covariance structure in the analysis of repeated measures data. *Statistic in Medicine* 19: 1793-1819.

Lossino, B. y M.E. Conti. 2005. Evolución espacial y temporal de potasio en 30 años de agricultura en el NE de la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* n°26. Jun 2005. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. p. 23-24

Mahibbur, R.M.; Govindarajulu, Z. (1997). A modification of the test of Shapiro and Wilks for normality. *Journal of Applied Statistics*, 24(2): 219-235.

Mallarino, A.P. 2005. Revision of Potassium Soil-Test Interpretations and Fertilizer recommendations. Indiana CCA 2005 Conference. Indianapolis, IN. December 14-16, 2005.

Mallarino, A.P.; D.J. Wittry & P.A. Barbagelata. 2002. Iowa Soil-Test field calibration research update: Potassium and the Mehlich-3 ICP Phosphorus test. North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference. 2002. Vol. 18. Des Moines, IA. En: [http://www.ppippic.org/far/farguide.nsf/926048f0196c9d4285256983005c64de/a8f9a16696ed572886256ccc006ea7c1/\\$FILE/NC%25202002%2520Mallarino%2520p29.pdf](http://www.ppippic.org/far/farguide.nsf/926048f0196c9d4285256983005c64de/a8f9a16696ed572886256ccc006ea7c1/$FILE/NC%25202002%2520Mallarino%2520p29.pdf)

Mallarino, A.P.; D.J. Wittry & P.A. Barbagelata. 2003. Iowa: New soil test interpretation classes for Potassium. *Better Crops with Plant Food*. Vol. 87 (n°4). p. 12-14

- Mallarino, A.P. & R. Borges. 2006. Phosphorus and Potassium Distribution in Soil Following Long-Term Deep-Band Fertilization in Different Tillage Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:702–707.
- Mallarino, A.P. 2006. Changing potassium recommendations in Iowa and the Cornbelt. Presentado en: The Fluid Fertilizer Foundation Forum. Feb. 12-14, 2006. Scottsdale, AZ. en: [http://extension.agron.iastate.edu/faculty/mallarino/ext\\_pdf/PotassiumRecs-FluidForum-2006.pdf](http://extension.agron.iastate.edu/faculty/mallarino/ext_pdf/PotassiumRecs-FluidForum-2006.pdf)
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: Modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15:1409-1416.
- Melgar, R.; H. Hillel Magen; M.E. Camozzi & J. Lavandera. 2001. Respuesta del trigo a la aplicación de KCl en molisoles con alto contenido de potasio. Actas Simposio "El Potasio en Sistemas Agrícolas Argentinos". FAUBA-IPI-Fertilizar-INTA, 20-21 Noviembre Buenos Aires, Argentina. p. 73-84
- Melis, M. & M.P.W. Farina. 1984. Potassium effects on stalk strength, premature death and lodging of maize (*Zea mays L.*). *South African Journal of Plant Soil* 1 (4): 122-124.
- Mengel, K. & E.A. Kirkby. 1987. Chapter: Potassium. p. 377-399. Principles of plant nutrition. 4<sup>th</sup> Edition. International Potash Institute, IPI, Bern, Switzerland. 685 p.
- Mikkelsen, R. 2006. A check-up on nutrients in the West. *Better Crops with Plant Food*. Vol. 90 (n°1) p. 22-24
- Milford, G.F.J. & A.E. Johnston, 2007 Potassium and nitrogen interactions in crop production, in The International Fertiliser Society. 2007, IFS: York, United Kingdom. Proceedings n° 615 p. 1-24.

- Morrás, H. & G. Cruzate. 2001. Origen y distribución del potasio en suelos de la región Chaco-pampeana. Actas Simposio "El Potasio en Sistemas Agrícolas Argentinos", 20-21 Noviembre. FAUBA-Fertilizar INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Moscatelli, G. ; J.A. Lutens & L.A. Gómez. 2001. Niveles de disponibilidad y reservas de potasio en Argentina. Actas Simposio "El Potasio en Sistemas Agrícolas Argentinos". FAUBA-IPI-Fertilizar-INTA, 20-21 Noviembre Buenos Aires, Argentina. p. 13-19
- Mullins, G. & C. Burmester. 1999. Potassium uptake by crops during the season. *In*: Oosterhuis, D. y G. Berkowitz (Eds) *Frontiers in plant nutrition*. PPI-PPIC. Norcross, Georgia, EE.UU. p. 123-132.
- Munson, R.D. & W.L. Nelson. 1963. Movement of applied potassium in soils. *Agricultural and Food Chemistry* 11, p. 193-201. *In*: Öborn, I.; Y. Andrist-Rangel; M. Askegaard; C.A. Grant; C.A. Watson & A.C. Edwards. 2005. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use and Management* 21: 102-112
- Öborn, I.; Y. Andrist-Rangel; M. Askegaard; C.A. Grant; C.A. Watson & A.C. Edwards. 2005. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use and Management* 21: 102-112
- Olson, R.A.; K.D. Frank; P.H. Grabouski & G.W. Rehm. 1982. Economic and agronomic impacts of varied philosophies of soil testing. *Agron. J.* 74:492-499.
- Pettigrew, W.T. 2007, Potassium influence on crop yield and quality, in *The International Fertiliser Society*. 2007, IFS: York, United Kingdom. Proceedings n° 614 p. 1-20
- Pratt, P.F. 1965. Chapter 71: Potassium. p. 1022-1030. *In*: C.A. Black (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 2 Chemical and Microbiological Properties*. ASA Inc. Madison, WI, USA.

Prystupa, P.; F. Salvagiotti; G.N. Ferraris; F.H. Gutiérrez Boem; J. Elisei & L. Couretot. 2004. Fertilización con P, S y K en cultivos de maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* n°23. Ago 2004. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. p. 1-4.

Rehm, G. 1994. Soil cation ratios for crop production. North Central Regional Extension Publication 533. Univ. of Minnesota Ext. Serv. Consultado en: <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC6437.html>

Richards, J.E. & T. Bates. 1989. Studies on the potassium supplying capacities of southern Ontario soils. III. Measurement of available K. *Can J. Soil Sci.* 69:597–610. *En*: Conti M.E. y F.O. García. 2006. Potasio. *En*: H.E. Echeverría y F.O. García (eds) *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 123-137

Robbins, S.G.; & R. Voss. 1991. Phosphorus and potassium stratification in conservation tillage systems. *J. Soil Water Conserv.* 46:298-300.

Samra, J.S. & A. Swarup. 2001. Impact of Long-Term Intensive Cropping on Soil Potassium and Sustainability of Crop Production. p. 167-183. *In*: Pasricha, N.S. y S.K. Bansal (eds.). 2002. *Potassium for Sustainable Crop Production. Proceedings of International Symposium on Role of Potassium in Nutrient Management for Sustainable Crop Production in India*. PRII-IPI. Dec 3-5, 2001. New Delhi

SAS Institute Inc. 1991. *SAS/STAT Guide for personal computers, Version 8*. Edition Cary NC: SAS Institute Inc.

Sawyer, J.; A.P. Mallarino; R. Killorn & S. Barnhart. 2002. A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa. PM 1688. Univ. Ext. Iowa State University, Ames, Iowa, USA.

- Shapiro, S.S. & M.B. Wilk. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52: 591-611.
- Shaviv, A.; S.V. Mattigod; P.P. Pratt & H. Joseph. 1985. Potassium exchange in five southern California soils with potassium fixation capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1128-1133.
- Singh, M.; V.P. Singh & D. D. Reddy. 2002. Potassium balance and release kinetics under continuous rice-wheat cropping system in Vertisol. *Field Crops Research* 77: 81-91
- Sparks, D.L.; & P.M. Huang. 1985. Physical chemistry of soil potassium. p. 201-276. *In: R.D Munson (ed.) Potassium in agriculture. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.*
- Sparks, D.L. 1987. Potassium dynamics in soils. *In: Advances in Soil Science. B.A. Stewart (ed), Springer-Verlag, New York. p. 1-63.*
- Tabatabai, M.A. & J.J. Hanway. 1968. Potassium Supplying Power of Iowa Soils at their "Minimal" Levels of Exchangeable Potassium. Paper no. 5957 of Iowa Agr. & Home Econ. Exp. Sta., Ames, Project no. 1190.
- Vázquez, M.E. 2006. Calcio y Magnesio. Acidez y Alcalinidad de Suelos. *En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 161-188*
- Vitosh, M.; J. Johnson & D. Mengel (eds). 1996. Tri-state fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat and alfalfa. *Ext. Bull. E-2567. Michigan State Univ. USA.*
- Voogt, W. 2001. Potassium management of vegetables under intensive growth conditions. p. 347-381. *In: Pasricha, N.S. y S.K. Bansal (eds.). 2002. Potassium for Sustainable Crop Production. Proceedings of International Symposium on Role of Potassium in Nutrient Management for Sustainable Crop Production in India. PRII-IPI. Dec 3-5, 2001. New Delhi*

- Wang, J.J.; D.L. Harrell & P.F. Bell. 2004. Potassium Buffering Characteristics of Three Soils Low in Exchangeable Potassium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 654–661.
- Warncke, D. & J.R. Brown. 1998. Chapter 7: Potassium and Other Basic Cations. p. 31-33. *In: Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region*. North Central Regional Research Publication No. 221. Missouri Agric. Exp. St. SB 1001, Columbia. 72 p
- Welch, L.F. & R.L. Flannery. 1985. Potassium nutrition on corn. *In: R.D. Munson (ed.). Potassium in Agriculture*. ASA, CSSA, SSSA. Madison, WI.
- Yuying, L. 2003. Corn response to potassium fertilization on black soil in Heilongjiang. *Better Crops International*. November 2003. Vol. 17 (2): 3-5
- Zubillaga, M.M. & M.E. Conti. 1994. Importance of the textural fraction and its mineralogical characteristics in potassium content of argentine soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25:479-487.
- Zubillaga, M.M. & M.E. Conti, M. 1996. Availability of exchangeable and non-exchangeable K in Argentine soils with different mineralogy. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 159: 149-153.