

UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES



EFFECTO DE EPOCAS DE APLICACION DE POTASIO EN TRIGO ALTERNATIVO (*Triticum aestivum* L.), CULTIVAR BAKAN BAER, EN EL POTASIO INTERCAMBIABLE, EFICIENCIA DE RECUPERACION DE FERTILIZANTE Y RENDIMIENTO DE GRANO, EN UN ANDISOL DE LA REGION DE LA ARAUCANIA.

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de La Frontera como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo.

PAZ ESTEFANIA VALLEJOS VALLEJOS
TEMUCO – CHILE

2014

UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES



EFFECTO DE EPOCAS DE APLICACION DE POTASIO EN TRIGO ALTERNATIVO (*Triticum aestivum* L.), CULTIVAR BAKAN BAER, EN EL POTASIO INTERCAMBIABLE, EFICIENCIA DE RECUPERACION DE FERTILIZANTE Y RENDIMIENTO DE GRANO, EN UN ANDISOL DE LA REGION DE LA ARAUCANIA.

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de La Frontera como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo.

PAZ ESTEFANIA VALLEJOS VALLEJOS
PROFESOR GUIA: HERNAN PINILLA QUEZADA
TEMUCO – CHILE

2014

“EFECTO DE EPOCAS DE APLICACION DE POTASIO EN TRIGO ALTERNATIVO (*Triticum aestivum* L.), CULTIVAR BAKAN BAER, EN EL POTASIO INTERCAMBIABLE, EFICIENCIA DE RECUPERACION DE FERTILIZANTE Y RENDIMIENTO DE GRANO, EN UN ANDISOL DE LA REGION DE LA ARAUCANIA”

Profesor guía

: HERNAN PINILLA QUEZADA

Ingeniero Agrónomo

Magister en Fertilidad de Suelos

Depto. de Producción Agropecuaria

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales

Universidad de La Frontera

Profesor consejero

: HECTOR SANHUEZA ROA

Ingeniero Ejecución Agrícola.

Depto. de Producción Agropecuaria

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales.

Universidad de La Frontera.

Calificación

:

“A JOSEFA, MI MADRE,
POR SU AMOR INFINITO E INCONDICIONALIDAD,
POR ESTAR PRESENTE EN TODO MOMENTO.
TE AMO.”

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores Hernán Pinilla y Héctor Sanhuesa que dedicaron tiempo y paciencia en compartir sus conocimientos y amistad.

A mi familia por la confianza y el apoyo durante esta etapa e influir cada uno a su manera en mi formación. Josefa, Constantino, Alicia y Anselmo.

A mis amigos, que siempre tuvieron una palabra de aliento para motivarme a continuar, todos personas maravillosas que quiero conservar en mi vida. Por estar presentes justamente en este proceso culmine en mi carrera universitaria:

Cesia, Ricardo, Jaime, Giselle, Mario, Gabo y Claudio.

INDICE

Capitulo		Pagina
1	INTRODUCCION	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Formas y contenido de potasio del suelo	3
2.2	Lixiviación del potasio	5
2.3	Absorción de potasio y efecto en el rendimiento	8
2.4	Eficiencia de recuperación de fertilizante potásico por trigo	13
3	MATERIALES Y METODOS	14
3.1	Ubicación del ensayo	14
3.2	Antecedentes climáticos	15
3.3	Diseño experimental	15
3.4	Manejo agronómico	15
3.5	Evaluaciones	16
3.5.1	Potasio intercambiable	16
3.5.2	Absorción y eficiencia de recuperación de fertilizante	16
3.5.3	Rendimiento de grano	17
3.6	Análisis estadístico	17
4	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	18
4.1	Contenido de potasio intercambiable en el suelo	18
4.2	Absorción de potasio y eficiencia de recuperación del fertilizante	20
4.3	Rendimiento	23
5	CONCLUSIONES	24
6	RESUMEN	25
7	SUMMARY	26
8	LITERATURA CITADA	27
9	ANEXOS	32

1. INTRODUCCIÓN

El trigo es el cultivo anual más importante en Chile, alcanzando en la temporada 2012-2013 las 253.627 hectáreas, de las cuales un 41,6% son sembradas en la Región de La Araucanía (INE, 2013). La obtención de variedades de alto potencial de rendimiento, el uso de agroquímicos e incorporación de maquinaria de precisión, permiten lograr cada temporada aumentos en la producción, alcanzando a nivel nacional un rendimiento medio de 58.1 qqm ha⁻¹ (INE, 2013).

La elección de una fuente correcta de nutrientes, aplicados en dosis, forma y momento adecuados, es clave para optimizar los recursos tanto económicos como medioambientales. Luego del nitrógeno, el potasio es el nutriente que más consume el trigo (Rodríguez *et al.*, 2001). Es un macronutriente esencial, que participa en la activación enzimática, procesos metabólicos como fotosíntesis y síntesis proteica, tiene incidencia en el balance hídrico y crecimiento meristemático de las plantas. La deficiencia de este elemento aumenta la vulnerabilidad a plagas, enfermedades, las cañas son débiles y reduce la resistencia a condiciones de estrés como heladas y sequías (Roy *et al.*, 2006).

En el país, los cultivos anuales comúnmente se han establecido en suelos con aporte suficiente de potasio (Rodríguez *et al.*, 2001), pero la extracción continua por los cultivos sin una adecuada reposición, las pérdidas por lixiviación y la acidificación de los suelos, puede ocasionar que la disponibilidad de este nutriente sea limitada. Particularmente en épocas del año que presentan mayores niveles pluviométricos, que acentúan las pérdidas por lixiviación, especialmente en suelos con bajos contenidos de arcillas (Rhem y Schmitt, 2002).

Considerando que la mayor superficie de trigo se siembra en los meses de mayores precipitaciones y la absorción de potasio en trigo se produce principalmente a partir de Zadoks 30, las aplicaciones tradicionales de fertilizantes potásicos a la siembra estarían

sujetas a pérdidas por lixiviación y arrastre superficial, con bajo aprovechamiento por parte del cultivo (Conti *et al.*, 2001).

En base a lo anterior, se establece como hipótesis de trabajo que la aplicación de potasio en épocas más avanzadas de desarrollo del trigo, como Zadoks 21 y Zadoks 31, favorece el contenido de potasio intercambiable y la absorción por la planta, aumentando la eficiencia de absorción de este nutriente y el rendimiento del cultivo.

Como objetivo general se plantea evaluar el efecto de épocas de aplicación de potasio en un trigo alternativo (*Triticum aestivum* L.), en el potasio intercambiable, eficiencia de recuperación de fertilizante y rendimiento de grano, en dos suelos andisoles con diferente disponibilidad inicial de este nutriente.

Para cumplir con el objetivo general, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar el contenido de potasio intercambiable del suelo, en diferentes etapas fenológicas del cultivo.
2. Determinar el efecto de la época de aplicación del potasio, en la eficiencia de recuperación de este nutriente en un trigo alternativo.
3. Evaluar el efecto de la época de aplicación de potasio en el rendimiento de grano, en dos suelos de diferente nivel de potasio intercambiable.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Formas y contenido de potasio del suelo.

Según Rhem y Schmitt (2002), entre un 90 a 98% del potasio del suelo se encuentra en formas no aprovechables por las plantas, formado parte de la redes cristalinas de los minerales primarios, como los feldespatos y micas. Esta porción se conoce como potasio no intercambiable o de reserva y depende fundamentalmente de la cantidad y calidad de las arcillas presentes en el suelo. Las arcillas son las partículas minerales más pequeñas del suelo, menores a dos micrones de diámetro y formadas en el proceso de edafogénesis a partir las alteraciones químicas en los minerales de las rocas que originan los suelos (Conti *et al.*, 2001).

Entre el 1 a 10% del potasio total, corresponde a formas lentamente asimilables o de intercambio, las cuales se encontrarían formando parte de los minerales secundarios; mientras que entre 1 a 2% corresponde a formas rápidamente asimilable o en solución (Rhem y Schmitt, 2002). Los mismos autores señalan que existen tres formas de potasio presentes en el suelo: no disponible, intercambiable y potasio en solución.

De acuerdo a lo señalado por Conti *et al.* (2001), el potasio de la solución del suelo está inmediatamente disponible y puede ser absorbido por las plantas en forma instantánea, pero las cantidades presentes son apenas una mínima porción del potasio total del suelo. A medida que el potasio es absorbido y extraído, su concentración es restituida rápidamente por las formas de potasio intercambiables, ubicadas en las zonas de adsorción de los coloides minerales y orgánicos del suelo (Aguado *et al.*, 2002).

El potasio intercambiable se encuentra retenido electrostáticamente en la superficie con carga negativa de las arcillas y corresponde al potasio extractable con acetato de amonio 1 M a pH 7. Mediante el proceso de adsorción-desorción existe un flujo dinámico entre el potasio de la solución y el intercambiable. Para Rodríguez *et al.* (2001), el potasio intercambiable se correlaciona con el potasio absorbido por los cultivos y es un índice de la

disponibilidad existente en el suelo. Otro componente de la fracción activa es el potasio no intercambiable, extractable con ácido nítrico 1 M, se encuentra retenido con mayor intensidad al interior de las estructuras de las arcillas y en un equilibrio más lento con el potasio intercambiable del suelo. Al reducirse el potasio intercambiable debido a la absorción de los cultivos, parte del potasio no intercambiable pasa lentamente a formas intercambiables (Rodríguez *et al.*, 2001).

La tasa anual estimada de meteorización del potasio desde los minerales primarios, de algunos suelos de textura gruesa en el norte de Europa, es de 3-5 kg ha⁻¹ y en suelos jóvenes ricos en arcilla es de 65 a 80 kg de K ha⁻¹ (Holmqvist *et al.*, 2003). Por lo anterior los autores mencionan que los suelos arenosos a largo plazo dependen por completo del aporte de potasio vía fertilización. Los fertilizantes potásicos son altamente solubles y se incorporan rápidamente al ciclo de potasio en el suelo, aumentando en primera instancia la concentración en la solución, para luego redistribuirse en las demás formas presentes (Barbagelata, 2009).

La extracción continua de los residuos de cosecha desde el campo, acelera el agotamiento de potasio del suelo ya que la paja del trigo es rica en este nutriente. Mellado (2007), señala que un 78% del potasio se acumula en la paja, por lo tanto cuando ésta se deja descomponer en el campo una parte considerable regresa al suelo, no así con la quema de rastrojos en lugares donde el viento puede desplazar las cenizas que contienen alrededor de un 15% de K₂O.

En Almora, India, en un estudio realizado por treinta años, Bhattacharyya *et al.* (2006), indican que el potasio intercambiable y no intercambiable disminuyó sustancialmente en suelos de secano a pesar de los tratamientos aplicando potasio orgánico e inorgánico. Dobermann (2007), menciona que a pesar del aumento en el uso de potasio en las tierras agrícolas en China durante los últimos veinte años, el balance total anual sigue siendo muy negativo presentando una disminución de 60 kg ha⁻¹ año⁻¹. Estimaciones similares para la India e Indonesia sugieren pérdidas anuales de 20 y 40 kg ha⁻¹, acrecentándose constantemente durante los últimos cuarenta años (Dobermann, 2007). Una pérdida por

potasio anual promedio de casi 20 kg ha⁻¹, fue estimada para el conjunto de África subsahariana (Stoorvogel *et al.*, 1993).

Para Marschner *et al.* (1996) y Gaj (2010), la deficiencia de potasio impide la absorción de nitrógeno, reduciendo la superficie fotosintética y con ello la absorción y transporte de nitratos en la planta. Las variedades de alto rendimiento, demandan mayores dosis de nutrientes, especialmente de nitrógeno y de potasio (Taube *et al.*, 1995; Wilkinson *et al.*, 2000).

2.2 Lixiviación del potasio.

A pesar de que el potasio se encuentra relativamente en cantidades suficientes, en la mayoría de los suelos chilenos (Novoa *et al.*, 2002) y que las deficiencias de potasio son menores (Rodríguez *et al.*, 2001); es posible observar limitaciones de este nutriente en suelos arenosos y en suelos ácidos (Mellado, 2007). Las pérdidas de potasio por lixiviación pueden originar deficiencias, al no complementar la producción con una adecuada fertilización de los cultivos, puntualmente en la zona sur de Chile que presenta precipitaciones durante la mayor parte del año y en suelos donde se establecen cultivos intensivos.

Según indican Nissen y García (1997), la lixiviación es dependiente de los niveles pluviométricos, ya que excesos de humedad en el suelo generan reducción del contenido de potasio. Suelos arenosos y con años de abundantes precipitaciones, son propensos a deficiencias de este nutriente. Así también el tipo de suelo, las prácticas de manejo, el desarrollo de las plantas, la época y dosis de fertilización, influyen en las pérdidas por lixiviación, debido a que éstas dependen de la cantidad de potasio disponible en el suelo (Malavolta, 1985; Kayser, 2003; Alfaro *et al.*, 2004).

El potasio es removido a capas más profundas, por su baja fuerza de retención en los coloides, quedando fuera del alcance de las raíces. Para Mellado (2007), la época de

aplicación de potasio no es tan determinante como la del nitrógeno, pues indica que éste último nutriente tiene una mayor tasa de lixiviación; aun así sugiere que su aplicación se parcialice en siembra y macolla. No obstante varias investigaciones revelan una relación directa entre la absorción de nitrógeno y potasio (Taube *et al.*, 1995; Wilkinson *et al.*, 2000), por lo que sería congruente aplicarlo parcializado en los cultivos invernales, tal como el nitrógeno.

Uslar (1992), determina que la lixiviación del potasio presenta una tendencia similar a la del nitrógeno y ésta disminuiría con aplicaciones de nitrógeno y la presencia de cubierta vegetal en el suelo. En un estudio en Valdivia, el mismo autor señala pérdidas de potasio de $29,8 \text{ kg ha}^{-1}$ cuando la fertilización nitrogenada fue aplicada a la siembra y las pérdidas disminuyeron un 50% cuando ésta fue parcializada.

En la figura 1, se observa que la lixiviación es mayor en los primeros estadios de desarrollo del cultivo, cuando éste tiene baja capacidad de extracción (Uslar, 1992).

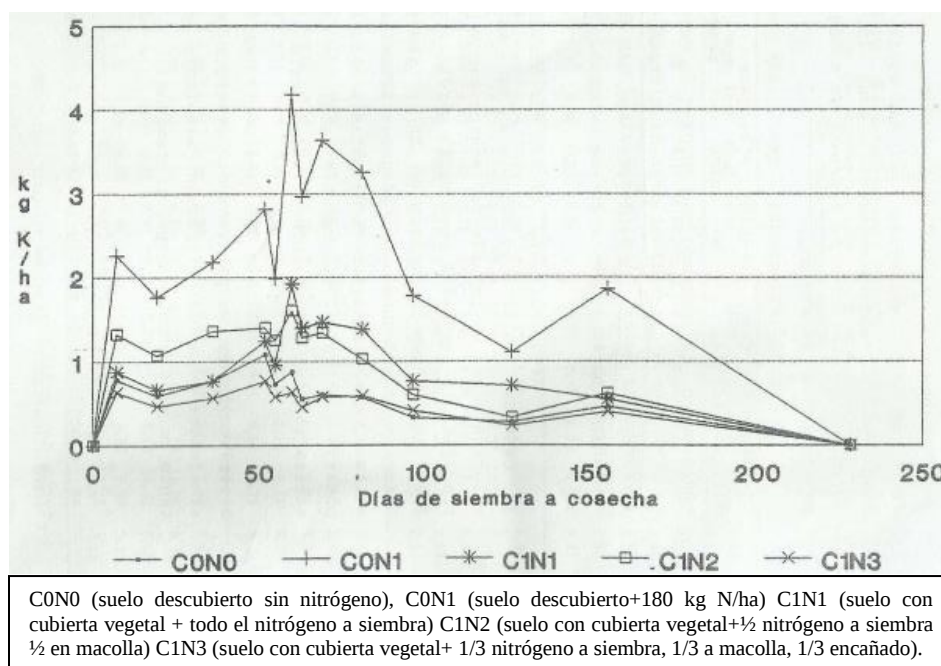


Figura 1: Lixiviación de potasio por tratamiento (kg K ha^{-1}).

En determinadas circunstancias el potasio presente en el suelo puede lixivarse, como al aplicar cantidades altas del fertilizante en suelos de texturas gruesa, que tienen muy poca arcilla que lo retengan (Rehm y Schmitt, 2002). Jalali *et al.* (2008), señalan pérdidas por potasio lixiviado de 7-19 kg ha⁻¹, en un estudio de laboratorio en Irán, donde los cultivos se riegan con 632 a 902 mm de agua con concentraciones significativas de iones. Para Johnston y Goulding (1992), por cada 100 mm de agua lluvia existe una pérdida de un kilo de K ha⁻¹.

Alfaro *et al.* (2004) registran 19 y 39 kg ha⁻¹ de potasio lixiviado utilizando suelos de origen arcilloso y arenoso respectivamente; señalan también que la lixiviación es mayor cuando la cantidad de potasio disponible en el suelo es alta y que el suelo arenoso lixivia con mayor rapidez.

Por su parte, Nissen y García (1997), registraron pérdidas de 26 kg K₂O ha⁻¹ entre junio y agosto, meses con precipitaciones promedio de 433 mm, en un suelo volcánico de Valdivia. En un Andisol de la serie Osorno, con pradera permanente y precipitaciones anuales mayores a 1000 mm., se registraron pérdidas de potasio de 9 kg K ha⁻¹ año⁻¹ y 3 a 5 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Alfaro *et al.*, 2003; Alfaro *et al.*, 2008).

En la Región de Los Lagos, Alfaro *et al.* (2009), registran 13 a 17 kg de potasio lixiviado por hectárea en una pradera permanente, sin presentar variación significativa al aplicar potasio en otoño. El contenido de potasio del suelo inicial fue de 508,3 mg kg⁻¹ clasificado como alto en potasio y presenta 1260 mm año⁻¹ como precipitación promedio.

2.3 Absorción de potasio y efecto en el rendimiento.

En términos nutricionales el trigo se caracteriza por su alto requerimiento de nitrógeno y potasio, además de otros nutrientes (Hewstone, 1999). Según Hirzel (2011), ambos representan cerca del 80% del total de nutrientes en las plantas.

La extracción de potasio por el cultivo dependerá del rendimiento esperado, aumentando la demanda del nutriente debido a una mayor cantidad de materia seca formada (Beaton y Sekhon, 1985; Dobb y Thompson, 1985). Por su parte Rodríguez *et al.* (2001), indican que la absorción de nutrientes depende fundamentalmente del estado de desarrollo del cultivo.

La acumulación de nutrientes durante el ciclo de crecimiento de la planta de trigo, se relaciona con la producción de biomasa aérea, la cual se concentra entre elongación de tallo y antesis, alcanzando la tasa de absorción máxima durante el encañado (Hewstone, 1999). La temperatura del suelo también influye en el proceso de absorción de potasio, disminuyendo cuando éstas son bajas; un rango óptimo se ha identificado entre los 15,5 y 26,6 °C (Rehm y Schmitt, 2002).

Rose *et al.* (2007), señalan que el potasio es un elemento crítico en la fase vegetativa de crecimiento, ya que en plantas de trigo cultivadas en invernadero sin limitaciones de potasio, se logró una acumulación máxima de este nutriente en Zadoks 55, sin obtener absorción aparente posterior a Zadoks 59. Así también, Hocking (1994), indica que un 75% del potasio que absorben las plantas lo acumulan en antesis presentando mínima absorción después de Zadoks 60. De manera similar, Hirzel (2011), obtiene un 62,2% de absorción de potasio en inicio de hoja bandera, con un trigo alternativo cultivado en Vilcún.

En la figura 2, se presentan los niveles de absorción y distribución del potasio dentro de plantas de trigo, a medida que avanza su desarrollo en una localidad de la región de Jiménez, México. El contenido de potasio inicial del suelo fue 334 mg kg⁻¹ a 0-30 cm.

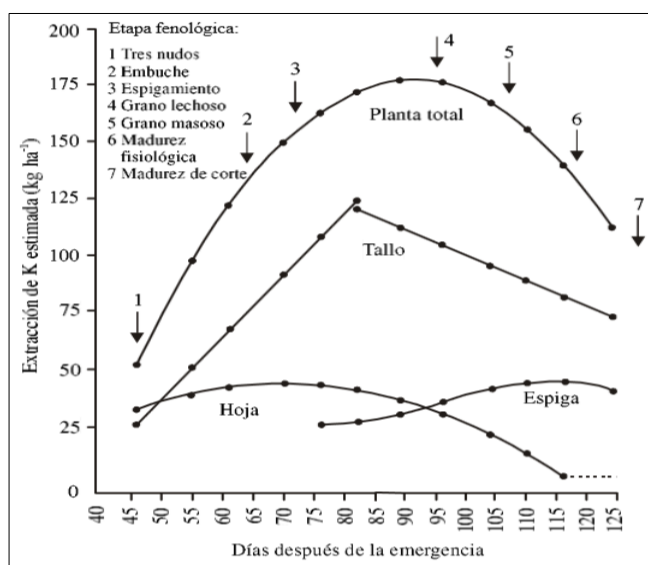


Figura 2: Relación entre la extracción de potasio y la edad de la planta de trigo, en cada órgano. (González *et al.*, 2000).

En un estudio realizado en Vilcún y evaluando trigos alternativos Hirzel (2011), señala que la extracción de potasio máxima ocurrió en espigadura, 167 días post-siembra. Por ello el mismo autor recomienda que las aplicaciones de este nutriente se completen antes del estado de inicio de bandera, en este tipo de trigos y sector. En este estudio realizado en la precordillera de Cautín, la temporada 2006-2007 la extracción de potasio fue de 244 kg ha^{-1} mientras que el rendimiento logrado fue de $12,1 \text{ ton ha}^{-1}$.

Varios autores señalan una relación directa entre la absorción de nitrógeno y potasio, incluso presentando requerimientos y contenidos similares en plantas de trigo (Marschner *et al.*, 1996; Gaj, 2010). En datos publicados por Mellado (2007), señala que la extracción de nitrógeno y potasio para producir 100 kg de grano es de 2,4 y 2,3 kg, con una concentración promedio de 1,4 y 1 % respectivamente (Benton, 1998; Hewstone, 1999). El requerimiento de potasio estimado por Hirzel (2011) fluctúa entre 2 y $2,2 \text{ kg K qqm}^{-1}$, dependiendo del hábito de desarrollo del trigo.

En la figura 3 se presenta el ritmo de absorción de nutrientes de un trigo alternativo, en la cual se aprecia que la máxima extracción de potasio ocurre en espigadura, manifestando

una tendencia muy similar a la absorción de nitrógeno. En inicio de hoja bandera un 62,2% del potasio estaba acumulado en la planta, lo cual corresponde a 152 kg K ha^{-1} , con un rendimiento de $12,1 \text{ ton ha}^{-1}$.

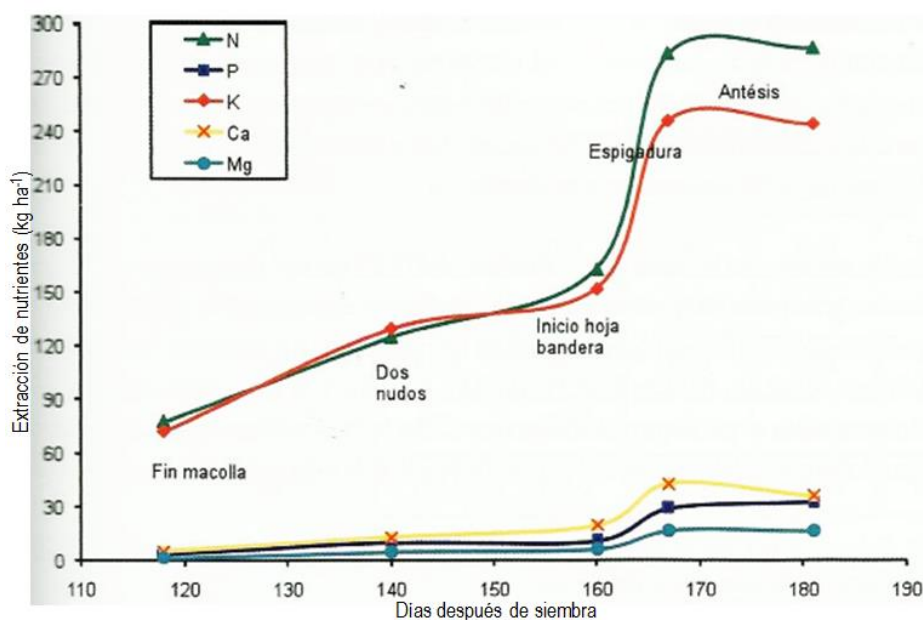


Figura 3: Evolución de la extracción de nutrientes en trigo cv. Dollinco-INIA en un Andisol. Vilcún, Región de la Araucanía, temporada 2006-2007. (Hirzel, 2011).

La extracción de potasio en trigo, puede variar desde 40 kg ha^{-1} a más de 200 kg ha^{-1} , dependiendo del nivel de rendimiento (Beaton y Sekhon, 1985). González *et al.* (2000), señalan $171,6 \text{ kg de K ha}^{-1}$ como acumulación máxima, en plantas de trigo cultivadas en suelos con 334 mg kg^{-1} de potasio de intercambio, donde la producción fue $51,1 \text{ qqm ha}^{-1}$.

De acuerdo a Szczepaniak (2004), el efecto de la fertilización con este nutriente en el rendimiento, se puede observar en suelos con bajo contenido de potasio intercambiable y en condición de stress hídrico durante el crecimiento de las plantas. Resultados similares obtuvo Contanzo (1977), en un suelo andisol de la Región de La Araucanía, con 55 mg kg^{-1} de potasio intercambiable. Usando diferentes dosis de potasio en trigo, logró un incremento significativo en el rendimiento con la aplicación de $44 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$, superando al testigo sin aplicación en un 23,6 %.

Para la producción de trigo en suelos andisoles Rodríguez *et al.* (2001), señalan un nivel crítico de 110 mg kg^{-1} mientras que Mellado (2007), considera que un contenido inferior a 75 mg kg^{-1} sería incapaz de satisfacer las necesidades de los cereales en general. Por su parte Pinilla (2012), indica que para una producción de trigo de 90 qqm ha^{-1} el nivel crítico sería 145 mg kg^{-1} de K intercambiable. El nivel crítico corresponde al nivel de potasio intercambiable bajo el cual se ha observado un incremento de rendimiento en trigo debido a la fertilización potásica.

Grocholski *et al.* (2011), obtienen aumentos de rendimiento mientras mayores fueron las dosis de potasio aplicadas en suelos con alto y medio contenido de arcilla. Por su parte, Niu *et al.* (2013), registran un aumento de 19% en el rendimiento de grano, debido a la fertilización potásica, aplicando dosis de 0, 75 y $150 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$. Los rendimientos obtenidos en dicho ensayo fueron de 64.4, 72.4 y 76.5 qqm ha^{-1} , en suelos con potasio promedio de 77.4 mg kg^{-1} .

Pinilla (2012), no encuentra diferencia significativa en el rendimiento de trigo, por efecto de las dosis de potasio aplicada en ensayos de campo realizadas en suelos con medio a alto contenido de potasio de intercambio.

Tariq y Shah (2002), evaluaron la respuesta de la fertilización potásica en trigo en un suelo con 140 mg kg^{-1} de potasio intercambiable. Sus resultados indican que con $60 \text{ kg de K}_2\text{O}$ se produjo un incremento en el rendimiento de 5.5 qqm ha^{-1} respecto al testigo sin aplicación.

En un estudio realizado en Pakistán durante dos años consecutivos, Jabbar *et al.* (2009), evaluaron aplicaciones de 0, 25, 75, 100, 125 y 150 kg K ha^{-1} en un suelo con 130 mg kg^{-1} de potasio intercambiable. Las características agronómicas y rendimiento de grano mejoraron significativamente tras la adición de K_2O . El mayor rendimiento de grano se obtuvo con la aplicación de $75 \text{ kg de K}_2\text{O}$, alcanzando un rendimiento 8.6 % superior en comparación al control.

Por su parte, Zhang *et al.* (2011), señalan un aumento de 21% en rendimiento de trigo en suelos con 87,7 mg kg⁻¹ de potasio intercambiable, al aplicar 100 kg K₂O ha⁻¹. Así también, el uso de potasio en suelos de Siberia, ha aumentado los rendimientos de trigo en rangos de 6 a 28% (Yakimenko y Nosov, 2013).

Mojid *et al.* (2012), reportan no haber tenido diferencias significativas en el rendimiento de grano de trigo con diferentes dosis de potasio, en un suelo franco limoso de Bangladesh. Peyrelongue (1985), no obtuvo diferencias significativas en el rendimiento de trigo con aplicaciones de 0, 25 y 50 kg K₂O ha⁻¹, en un estudio realizado en un suelo rojo con disponibilidad baja y media de potasio intercambiable en Metrenco, Región de La Araucanía. Posteriormente, en un suelo trumao con 73 mg kg⁻¹ de K intercambiable, la misma autora obtiene un incremento en el rendimiento de 8, 13 y 11 qqm ha⁻¹ con la aplicación de 50, 100 y 150 kg de K₂O ha⁻¹.

Kolar y Grewal (1989), reportaron un aumento del rendimiento entre 200 y 250 kg ha⁻¹ en experimentos con arroz y trigo, realizando aplicaciones parcializadas de potasio. Del mismo modo, en un suelo franco arenoso, Singh y Bhandari (1995), en un estudio realizado en Gurgaon, India, informaron una ventaja de rendimiento de 440 a 490 kg de grano ha⁻¹ en trigo, por la aplicación dividida de potasio en comparación con una sola aplicación.

Por el contrario, evaluaciones de Grocholski *et al.* (2011), en un suelo de Polonia con alto y medio contenido de arcilla, no indicaron influencia de la época de aplicación de potasio en el rendimiento de grano de trigo. Cuando la disponibilidad de nutriente es lo suficientemente alta, la absorción puede continuar sin que aumente el rendimiento, manifestándose un consumo de lujo ya que el nutriente extra que se acumula no favorece el rendimiento (Keulen, 1982).

2.4 Eficiencia de recuperación de fertilizante potásico por trigo.

Blake *et al.* (1999), señalan que la tasa de recuperación de los fertilizantes minerales por los cultivos, está determinada por la capacidad de fijación de potasio de los suelos y por su capacidad de intercambio catiónico. Por ello, en suelos arenosos, con drenaje excesivo o baja capacidad de intercambio catiónico y en regiones con altas precipitaciones, se hace necesario un suministro parcializado de potasio hasta el fin del desarrollo vegetativo (Tandon y Sekhon, 1988; Conti y García, 2006).

La eficiencia de recuperación del fertilizante, se define como la relación entre el nutriente absorbido por el cultivo sin fertilizar, menos los kilos absorbidos en el cultivo fertilizado, todo esto dividido en los kilos por hectárea de nutriente aplicado como fertilizante. (Dobermann, 2007).

De acuerdo con Mortvet y Cox (1994) y Baligar *et al.* (2001), la tasa de recuperación por el cultivo, de los fertilizantes potásicos es de 40% aproximadamente. En estudios de campo a largo plazo realizados en tres países, se demostró que la eficiencia de recuperación de potasio desde fertilizantes minerales, fue más efectiva en suelos con mayor capacidad de intercambio catiónico. La eficiencia de recuperación en Alemania y Holanda fue de un 62 y 58% respectivamente y menos efectiva en suelos con mayor capacidad fijadora de potasio, con un 44% de eficiencia en Inglaterra (Blake *et al.*, 1999).

En Chile, Constanzo (1997), obtiene un 49% de eficiencia de recuperación de fertilizante, en un suelo Andisol limitado en potasio, al aplicar una dosis de 44 kg K₂O ha⁻¹. Liu *et al.* (2006) y Pathak *et al.* (2003), reportan entre 44 y 51% de eficiencia de recuperación de potasio en suelos de China e India respectivamente. En un suelo Vertisol de México, Castro *et al.* (2006), indican un 14.5% de eficiencia de recuperación de potasio. Según los resultados de Mojid *et al.* (2012), la eficiencias de recuperación de potasio disminuyó mientras mayor fue la dosis aplicada, obteniendo un 10, 8, 8 y 6% a usar dosis de 40, 60, 80 y 100 kg K₂O ha⁻¹ en un suelo franco limoso bajo riego, en Bangladesh.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del ensayo.

Los ensayos fueron realizados en las temporadas agrícolas 2010-2011 y 2011-2012, en el Campo Experimental Maquehue, de la Universidad de La Frontera, ubicado a 38° 50` Latitud sur, 72°41` Longitud oeste a 74 m.s.n.m.; en un suelo Andisol de la serie Freire, descritos por Mella y Kunhe (1985).

En el cuadro 1 se señalan las principales características químicas del suelo, según análisis químico de muestras, obtenidas de 0-20 cm previo al establecimiento del ensayo, en cada temporada evaluada.

Cuadro 1. Características químicas del suelo.

	2010-2011	2011-2012
Componente	Contenido	
pH al agua	5,76	5.8
Fósforo Olsen (mg kg ⁻¹)	14	10
K intercambiable (mg kg ⁻¹)	149	119
Ca intercambiable (cmol kg ⁻¹)	4,2	4.42
Mg intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,53	0.72
Na intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,15	0.18
Suma de bases (cmol kg ⁻¹)	5,26	5,62
Saturación de aluminio (%)	1.13	0,71
S (mg kg ⁻¹)	10	12
B (mg kg ⁻¹)	0,21	0.33
Zn (mg kg ⁻¹)	1,51	0.95

Fuente: Laboratorio de Análisis químico de suelos y plantas. Instituto de Agroindustrias, Universidad de La Frontera.

3.2 Antecedentes climáticos.

El área agroclimática del Llano Central de La región de la Araucanía se describe como mediterráneo frío (Rouanet, 1988). Su régimen térmico se caracteriza por temperaturas medias anuales de 10 °C., con una máxima de 21,5 °C. durante el mes de enero y una mínima de 2,3 °C. en el mes de Julio. El período con baja probabilidad de heladas promedio es de tres meses, desde Diciembre a Febrero. El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 1.394 mm., donde Mayo corresponde al mes más lluvioso con 23,6 mm. La evaporación de bandeja alcanza a 921 mm., siendo su máximo en el mes de Enero con 161 mm (Rouanet, 1983). Las estaciones invierno-primavera concentran gran parte de las lluvias anuales.

3.3 Diseño experimental.

Se implementó un diseño de bloques al azar, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Cada unidad experimental tuvo una superficie de 12 m² (2*6m) y en cada temporada se utilizó el cultivar de trigo alternativo Bakan-Baer.

Los tratamientos fueron 0 y 60 kg K ha⁻¹ a la siembra, 60 kg K ha⁻¹ a Z 21 y 60 kg K ha⁻¹ a Z 31.

3.4 Manejo agronómico.

La siembra se realizó el 12 de Julio del 2010 y el 24 de Junio del 2011. La dosis de semilla fue de 160 kilos ha⁻¹ con un sistema de siembra en surcos, en línea continua a una distancia entre hilera de 17 cm.

La fertilización base utilizada al surco de siembra fue de 160 kg de P₂O₅ y 2 kg de B ha⁻¹. El resto de la fertilización se complementó con 198 kg de N ha⁻¹ aplicándose 37, 74 y 87 kg a la siembra, inicio de macolla y primer nudo detectable, respectivamente.

El control químico de malezas se realizó con Bacará® Forte 0,8 L ha⁻¹, herbicida sistémico pre-emergente. El control químico de plagas y enfermedades se realizó con una mezcla de Prósaro 0,8 L ha⁻¹ y Pirimor 200 g ha⁻¹. Se aplicó además Juwel 0,8 L ha⁻¹, como fungicida preventivo en pre-emergencia floral.

3.5 Evaluaciones.

3.5.1 Potasio intercambiable. Se determinó a 0–20 cm, en cinco épocas de desarrollo del cultivo: primer nudo detectable (Z 31), tres nudos detectables (Z 33), primeras aristas visibles (Z 49), mitad de antesis (Z 65) y cariósipide duro (Z 92). Las muestras de suelo se obtuvieron de cinco submuestras en cada unidad experimental, formando una muestra compuesta por cada tratamiento, que se envió a análisis al Laboratorio de Análisis Químico de Suelos y Plantas del Instituto de Agroindustria de la Universidad de La Frontera.

3.5.2 Absorción y eficiencia de recuperación del fertilizante. Al estado de Zadoks 65 se evaluó la biomasa base peso seco de un metro lineal por cada unidad experimental. Estas muestras fueron secadas a 65 °C hasta peso constante, molidas y enviadas al Laboratorio de Análisis Químico de Suelos y Plantas, para determinar la concentración total de potasio.

Con la información de biomasa y concentración de potasio, se calculó el total de potasio absorbido, expresado en kilos de potasio por hectárea, se determinó la eficiencia de recuperación del fertilizante (ERF), que se refiere al aumento de la absorción de nutriente por la planta, por unidad de nutriente aplicado. Se utilizó la siguiente formula:

$$ERF = \frac{(\text{kg K absorbidos con aplicación de K} - \text{kg K absorbidos por testigo})}{\text{Dosis K aplicada.}}$$

3.5.3 Rendimiento de grano. Se determinó pesando la producción de seis hileras centrales de cada parcela, cosechadas manualmente y trilladas en una máquina estacionaria de ensayos. Se estandarizó la producción a un 14% humedad, expresando los datos en kg ha^{-1} .

3.6 Análisis estadístico. Para determinar el efecto de la época de aplicación de potasio en el rendimiento de grano, los resultados fueron sometidos a una prueba de análisis de varianza con el programa SPSS, versión 11.5, con un nivel de significancia $P \leq 0.05$.

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Contenido de potasio intercambiable del suelo.

En la figura 4, se presenta el efecto de la época de aplicación de potasio, durante dos temporadas, en la evolución de los niveles de potasio intercambiable del suelo, en cinco etapas fenológicas del trigo.

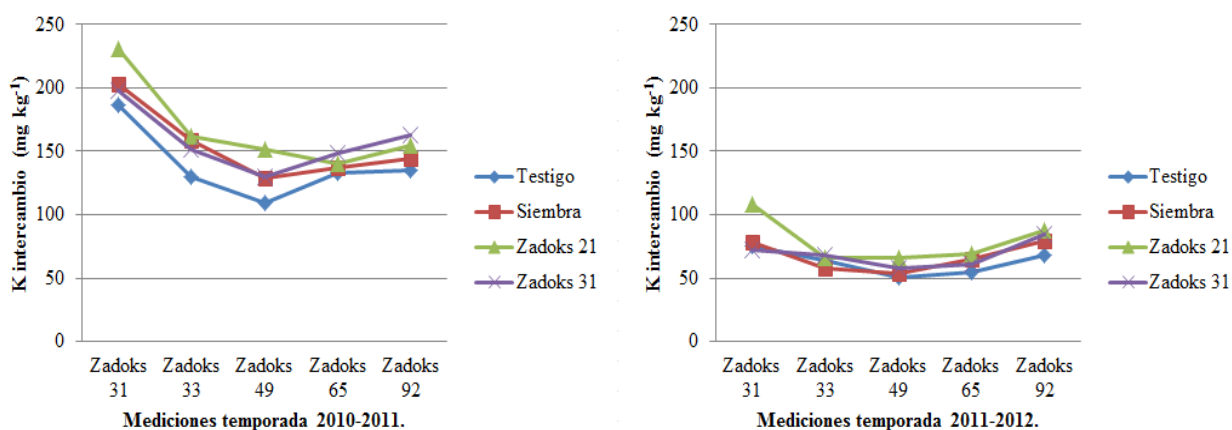


Figura 4: Efecto de épocas de aplicación de potasio en el contenido de potasio intercambiable, en las temporadas agrícolas 2010-11 y 2011-12.

La extracción continua y creciente de potasio por el cultivo originada por el rápido crecimiento de las plantas desde comienzo de primavera, genera una fuerte baja en el potasio intercambiable del suelo entre Zadoks 31 y 49. Este hecho ocurre en ambas temporadas y estaría determinado principalmente por la intensa extracción de potasio realizada por el cultivo durante este período de crecimiento del trigo.

Pinilla¹ (2014), señala que en evaluaciones de campo realizadas en un suelo Andisol, la extracción de potasio en trigos alternativos, se intensifica entre Z 31 y Z 57 representando un 54% del total acumulado en todo el período del cultivo. Es decir, en un lapso breve de tiempo el suelo debe ser capaz de abastecer la fuerte demanda de este nutriente, que según

¹ Pinilla, 2014. Comunicación personal.

datos de absorción registrados en el presente ensayo (Cuadro 2), correspondería a 94 kg ha^{-1} , en dicho período.

Hirzel (2011), indica que en un trigo alternativo cultivado en precordillera un 62,2% del potasio se encuentra acumulado en la planta a inicio de hoja bandera. Varios autores mencionan que el trigo absorbe la totalidad del potasio requerido previo a la etapa de antesis (Hocking, 1994; Hewstone, 1999; Rose *et al.*, 2007; Hirzel, 2011) lo cual explicaría la disminución del nivel del potasio intercambiable del suelo entre Z 31 a Z 49.

Otro factor que disminuye el contenido de potasio en las etapas indicadas, es la lixiviación de este nutriente. Diversos autores han determinado niveles de lixiviación de potasio entre 3 a 40 kg ha^{-1} en la zona sur del país (Uslar, 1992; Nissen y García, 1997; Alfaro *et al.*, 2003; Alfaro *et al.*, 2004; Alfaro *et al.*, 2008; Alfaro *et al.*, 2009).

A partir de Zadoks 49 el nivel de potasio del suelo comienza a recuperarse, siendo liberado desde formas no intercambiables a potasio disponible. Este proceso ocurre en forma lenta (Rodríguez *et al.*, 2001), y está influenciado por la mineralogía y nivel de humedad disponible del suelo. La absorción de potasio posterior a la etapa de antesis en trigo, es mínima (Hocking, 1994; Hewstone, 1999; Rose *et al.*, 2007; Hirzel, 2011) y también son menores las pérdidas de éste nutriente por lixiviación, permitiendo que el nivel de potasio del suelo aumente paulatinamente.

4.2 Absorción de potasio y eficiencia de recuperación del fertilizante.

En el cuadro 2, se presentan los resultados de absorción total de potasio para las diferentes épocas de aplicación de este nutriente.

Cuadro 2. Efecto de la época de aplicación de potasio, en la absorción de este nutriente en Zadoks 65, por un trigo alternativo cultivado en dos temporadas agrícolas.

Temporada	Potasio absorbido (kg ha⁻¹).			
	Testigo	Siembra	Zadoks 21	Zadoks 31
2010-11	150	165	181	188
2011-12	157	173	190	188
Promedio	153	169	186	188

En ambas temporadas se observa un incremento en la absorción, al aplicar el potasio a Zadoks 21 y 31. En promedio, la mayor absorción se produjo con aplicaciones a Z 31. Esta mayor absorción total de K estaría relacionada con la época más oportuna de aplicación, que coincide con la mayor tasa de absorción del cultivo y la menor lixiviación, respecto a aplicaciones a la siembra.

La absorción de potasio en el tratamiento testigo, presenta un nivel inferior a lo reportado por González *et al.* (2000), quienes indican 171,6 kg ha⁻¹ como acumulación máxima de potasio en plantas de trigo cultivadas sin fertilizar, en un suelo con 334 mg kg⁻¹ de potasio intercambio. Esta diferencia podría estar relacionada en el menor aporte inicial de potasio del suelo de la presente investigación, correspondiente a 149 y 119 mg kg⁻¹ en cada temporada evaluada.

Hirzel (2011), señala una absorción total de potasio en trigos invernales y alternativos de 245 kg ha⁻¹, con un rendimiento en ensayos de campo de 120 qqm ha⁻¹.

Con los datos de absorción y el rendimiento obtenido por hectárea (Cuadros 2 y 4), se determinó un requerimiento de potasio entre 1,7 y 2,1 kg qqm⁻¹. Los mayores requerimientos los presentaron los tratamientos con aplicaciones en Z 21 y Z 31, debido probablemente al consumo de lujo de potasio por el cultivo. Hirzel (2011), determinó un requerimiento de 2,04 y 2,25 kg K qqm⁻¹ y Mellado (2007), de 2,3 kg K qqm⁻¹.

En el cuadro 3 se presenta el porcentaje de eficiencia de recuperación de fertilizante potásico, según la época de aplicación de este nutriente durante las dos temporadas. Las aplicaciones realizadas a inicio de macolla y a inicio de encañado, optimizaron el nivel de eficiencia de recuperación del fertilizante en ambas temporadas.

Cuadro 3. Efecto de la época de aplicación de potasio en la eficiencia de recuperación de éste nutriente por un trigo alternativo.

Época de aplicación	Eficiencia de recuperación de fertilizante (%)	
	2010-11	2011-12
Siembra	31	32
Zadoks 21	63	67
Zadoks 31	76	63

La aplicación de potasio a la siembra, presenta los menores niveles de eficiencia de recuperación del fertilizante en ambas temporadas, lo cual indica que gran parte del nutriente aplicado no fue absorbido por el cultivo. La reducida capacidad extractiva de las raíces poco desarrolladas y las bajas temperaturas del suelo limitan el proceso de absorción, permitiendo una mayor lixiviación durante el invierno.

El cloruro de potasio es el fertilizante comúnmente utilizado para suplir las deficiencias de este nutriente en el suelo. Es una sal soluble que queda rápidamente disponible para las plantas y las altas precipitaciones mensuales registradas en invierno, que sobrepasan los 100 mm. mensuales, desplazan este nutriente a estratas profundas del suelo, lejos del alcance de las raíces del cultivo.

Los valores de recuperación del potasio aplicado a la siembra, son menores a lo reportado por diversos autores, que indican una tasa de recuperación cercana al 40% (Mortvet y Cox, 1994 y Baligar *et al.*, 2001). Otros datos obtenidos en el país, indican un 49% de eficiencia de recuperación del fertilizante, en un suelo Andisol limitado en potasio (Constanzo, 1997).

En China e India, se han reportado niveles de eficiencia de absorción de 44 y 51% (Pathak *et al.*, 2003, Liu *et al.*, 2006;) mientras que en Inglaterra, en suelos con alta capacidad fijadora de potasio, la eficiencia fue de un 44% (Blake, 1999).

Los resultados de la presente investigación señalan que aplicaciones de potasio en inicio de macolla, aumenta en forma importante la eficiencia de recuperación y que ésta es máxima cuando se fertiliza en Zadoks 31. Posiblemente este aumento en la eficiencia está originado en que el fertilizante aplicado, no se ve sometido a las altas precipitaciones invernales características de la zona y a que se aplica justamente en el período de máxima absorción de potasio del cultivo.

Con esta práctica de manejo, sería posible optimizar la eficiencia de recuperación de potasio, en particular en suelos de texturas arenosas y en trumaos de lomajes en sectores de alta pluviometría.

4.3 Rendimiento.

En el cuadro 4, se presenta el efecto de la época de aplicación de potasio, en la producción de grano de trigo durante dos temporadas agrícolas.

Cuadro 4. Efecto de la época de aplicación de potasio en el rendimiento de trigo.

Tratamiento	Rendimiento (qqm ha ⁻¹).		
	2010-11	2011-12	Promedio
Testigo	96,6	81,1	88,9
Siembra	100,5	82,2	91,4
Zadoks 21	100,2	83,0	91,6
Zadoks 31	97,9	82,2	90,1

De acuerdo al análisis de varianza (Anexo 1), no se observa diferencia significativa en el rendimiento del trigo, por la época de aplicación del nutriente, en ninguna de las dos temporadas. Esto se debería al suficiente aporte inicial de potasio del suelo que permitió lograr una alta producción, pues según Rodríguez *et al.* (2001), los suelos con aporte superior a 110, mg kg⁻¹ sería adecuado para lograr una buena producción de trigo.

Considerando un requerimiento promedio de 2.0 kg de K qqm⁻¹ (Hirzel, 2011; Pinilla, 2012) y una eficiencia de absorción de potasio por trigo es de 1,3 kg de K por cada mg kg⁻¹ de potasio intercambiable (Pinilla, 2012); el valor crítico de potasio de intercambio para una producción de 80 qqm ha⁻¹, sería de 123 mg kg⁻¹ y de 153 mg kg⁻¹ para una producción de 100 qqm ha⁻¹ (Anexo 2). Esto explicaría porque no hubo respuesta a la aplicación de potasio en un suelo con 119 y 149 mg de potasio de intercambio al inicio de los experimentos.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados presentados y bajo las condiciones en que se desarrolló la investigación, es posible concluir que:

- El potasio intercambiable del suelo varía notoriamente, dependiendo del estado fenológico del cultivo en el cual se realizó la medición. Los menores valores se obtuvieron en ambas temporadas en Zadoks 49. Posterior a esta etapa se produjo un leve incremento del potasio de intercambio del suelo.
- La eficiencia de recuperación promedio del fertilizante potásico es notoriamente mayor al aplicar este nutriente a Z 21 y Z 31, respecto a su aplicación a la siembra.
- No se produjeron diferencias significativas en el rendimiento de grano, por efecto de las épocas de aplicación de este nutriente.

6. RESUMEN

Con el propósito de evaluar el efecto de las épocas de aplicación de potasio en trigo alternativo (*Triticum aestivum* L.), se realizó un ensayo de campo en un suelo Andisol de la serie Freire durante dos temporadas agrícolas en el Campo Experimental Maquehue, de la Universidad de La Frontera. Los valores iniciales de potasio de intercambio fueron de 119 y 149 mg kg⁻¹. En ambas temporadas se realizó un diseño de bloques al azar, con cuatro tratamientos: 0 kg K, 60 kg K a la siembra, 60 kg K a Z 21 y 60 kg K a Z 31, con cuatro repeticiones.

En el estudio se determinó potasio de intercambio en diferentes etapas fenológicas, eficiencia de recuperación de fertilizante y rendimiento de grano. El potasio intercambiable del suelo varió dependiendo del estado fenológico del cultivo en el cual se realizó la medición. Los menores valores se obtuvieron en ambas temporadas en Zadoks 49 y posterior a esta etapa se produjo un leve incremento del potasio de intercambio del suelo. La eficiencia de recuperación promedio del fertilizante potásico es notoriamente mayor al aplicar este nutriente a Z 21 y Z 31, respecto a su aplicación a la siembra. No se produjeron diferencias significativas en el rendimiento de grano, por efecto de las épocas de aplicación de este nutriente.

7. SUMMARY

The aim of this study was to evaluate the effect of the timing of potassium application on alternative wheat (*Triticum aestivum* L.). A field trial was conducted in the Andisoil ground of the Freire series for two growing seasons, in the Maquehue Experimental Field of La Frontera University. The initial potassium exchange values were 119 and 149 mg kg⁻¹. In both seasons a random block design with four treatments was conducted: 0 kg K, 60 kg K at sowing, 60 kg K at Z 21 and Z 60 kg K at 31, with four repetitions.

The study determined potassium exchange in different phenological stages, the efficiency of fertilizer recovery and grain yield. The exchangeable potassium in the soil varied depending on the wheat growth stage in which the measurement was made. The lowest measured values in both seasons were obtained at Zadoks 49. After this stage, there was a slight increase in soil potassium exchange. The average efficiency of potassium fertilizer recovery is significantly greater when applying this nutrient to Z 21 and Z 31, regarding application to the seedtime. There were no significant differences in grain yield, due to the effect of the timing of potassium application.

8. LITERATURA CITADA

- Aguado, G., Etchevers, J., Hidalgo, C., Galvis, A., y Aguirre, A.** 2002. Dinámica del potasio en suelos agrícolas. *Agrociencia*. (México). 36: 11-21.
- Alfaro, M., Gregory, P. and Jarvis, S.** 2004. Dynamics of potassium leaching on a hillslope grassland soil. *Journal of Environmental Quality*. 33 (1): 192-200.
- Alfaro., M. Jarvis, S. and Gregory P.** 2003. Potassium budgets in grassland systems as affected by nitrogen and drainage. *Soil Use and Management*. 19: 89-95.
- Alfaro, M., Salazar, F., Iraira, S., Teuber, N., Villarroel, D. and Ramirez, L.** 2008. Nitrogen phosphorus and potassium losses in a grazing system with different stocking rates in a volcanic soil. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 68:146-155.
- Alfaro, M., Salazar, F. y Ramírez, L.** 2009. Efecto de la dosis de potasio sobre sus pérdidas por lixiviación en un suelo volcánico del sur de Chile. *Resumenes XXXIV Congreso anual Sociedad Chilena de Producción Animal*. (Pucón). 44-45.
- Baligar, V., Fageria, N., and He, Z.** 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32(7-8): 921-950.
- Barbagelata, P.** 2009. Mejores prácticas de manejo para la fertilización potásica. *Simposio Fertilidad 2009*. 78:81.
- Beaton, J. and Sekhon, G.** 1985. Potassium nutrition of wheat and other small grains. Munson (ed.) *Potassium in Agriculture*. ASA, Madison, WI. 701-752.
- Benton, J.** 1998. *Plant Nutrition Manual*. CRC Press LLC. (United States of American). 149 p.
- Bhattacharyya, R., Prakash, V., Kundu, S., Ghosh, B., Srivastva, A. and Gupta, H.** 2006. Potassium balance as influenced by farmyard manure application under continuous soybean-wheat cropping system in a Typic Haplaquept. *Geoderma*. 137: 155-160.
- Blake, L., Mercik, S., Koerschens, M., Goulding, K., Stempen, S., Weigel, A., Poulton, P., and Powlson, D.** 1999. Potassium content in soil, uptake in plants and the potassium balance in tree European long-term field experiments. *Plant and Soil*. (Netherland) 216: 1-14.
- Castro, I., Gavi, F., Peña, J., Núñez, R. y Etchevers, J.** 2006. Eficiencia de recuperación de N y K de tres fertilizantes de lenta liberación. *Terra Latinoamericana* (México). 24(2): 277-282.

- Contanzo, A.** 1997. Efecto de diferentes dosis y épocas de aplicación de potasio en trigo en un suelo Andisol con baja disponibilidad de potasio de intercambio. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de La Frontera. Temuco, Chile. 58p.
- Conti, M., De la Horra, A. y Marchi A.** 2001. Disponibilidad de potasio y aspectos relacionados a la dinámica de liberación y renovación de la solución del suelo. Publicación Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires.
- Conti, M. y García, F.** 2006. Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. En: H.E. Echeverría y F.O. García (ed) Editorial INTA. (Argentina). 123-137.
- Dibb, D. and Thompson, W.** 1985. Interaction of potassium with other nutrients. In: R. Munson (ed). Potassium in agriculture. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. 4 (3): 32-56.
- Dobermann, A.** 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management. Fertilizer best management practices general principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. Papers presented at the IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices (Belgium). 7-9.
- Gaj, R.** 2010. Influence of different potassium fertilization level on nutritional status of winter wheat and on yield during critical growth stage. J. Elementol (Polonia). 15(4): 129-637.
- González, D., Alcalde, S., Ortiz, J. and Castillo, A.** 2000. Potassium accumulation dynamics in wheat plants growing in different environments. Agrociencia. 34: 1-11.
- Grocholski, J., Spiak, Z. and Wlodarczyk, W.** 2011. The effect of potassium fertilization on its content and uptake in winter wheat. Zesz. Nauk. UP Wroc. (Polonia). Rol. XCVIII, 581: 27-36.
- Hewstone, C.** 1999. Producción de materia seca y absorción de macro y micronutrientes en trigo cultivado en el sur de Chile. Agricultura Técnica. (Chile) 59: 271-282.
- Hirzel, J.** 2011. Fertilización de cultivos en Chile. Colección Libros INIA N°28. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillan, Chile. 434p.
- Hocking, P.** 1994. Dry-matter production, mineral nutrient concentrations, and nutrient distribution and redistribution in irrigated spring wheat. J. Plant Nut. 17: 1289-1308.
- Holmqvist, J., Ogaard, A., Oborn, I., Edwards, A., Mattsson, L. and Sverdrup, H.** 2003. Application of the profile model to estimate potassium release from mineral weathering in Northern European agricultural soils. European Journal of Agronomy. 20: 149–163.

- INE. 2013.** Agropecuarias: informe anual 2012. Instituto Nacional de Estadísticas, por Eugenio Neumann Carmine. 3 de julio de 2014. http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario_de_publicaciones/pdf/agropecuarias_informe_anual_2012.pdf.
- Jabbar, T. Aziz, R. and Bhatti, D.** 2009. Effect of potassium application on yield and protein contents of late sown wheat (*Triticum aestivum* L.) under field conditions. Institute of Soil & Environmental Sciences, University of Agriculture, Faisalabad. Pakistán. 28 (2): 193-196.
- Johnston, A. and Goulding, K.** 1992. Potassium concentration in surface and groundwater and the loss of potassium in relation to land use. Proceedings of the 23th colloquium of the international potash Institute, Prague. 135-158.
- Jalali, M., Merikhpour, H., Kaledhonkar, J. and Van Der Zee, S.** 2008. Effects of wastewater irrigation on soil sodicity and nutrient leaching in calcareous soils. *Agric Water Manag* 95: 143–153
- Kayser, M.** 2003. Nitrogen and potassium leaching from grassland: the effect of fertilizer regime and application of cattle urine. Ph.D thesis, Georg-August-University Göttingen, Germany.
- Keulen, H.** 1982. Graphical analysis of annual crops response to fertilizer application. *Agric. Sys.* 9: 113-126.
- Kolar, J. and Grewal, H.** 1989. Response of rice to potassium. *International Rice Research Newsletter* 14: 33.
- Liu, M., Yu, Z., Liu, Y., and Konijn, N.** 2006. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 74, 245-258.
- Lobell, D.B.** 2007. The cost of uncertainty for nitrogen fertilizer management: a sensitivity analysis. *Field Crops Res.* 100: 210-217
- Malavolta, E.** 1985. Potassium status of tropical and subtropical region soils. In: Potassium in agriculture, ed R Munson, ASA CSSA & SSSA Madison WI pp 163±200.
- Marschner, H., Schmidt, L. and Wittenmayer, L.** 1996. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photo assimilates and cycling of mineral nutrients. *J. Exp. Botany.* 47: 1255-1263.
- Mella, A. y Kuhne, G.** 1985. Sistema de descripción de las familias, asociaciones y series de suelos derivados de materiales piroclásticos de la zona central-sur de Chile. En: J.Tosso (ed). *Suelos Volcánicos de Chile*. INIA. Ministerio de Agricultura. Santiago. Chile. 1: 25-95.

- Mellado, M.** 2007. El Trigo en Chile. Colección de Libros INIA N° 21. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillan, Chile. 684p.
- Mojid, M., Wyseure, G. and Biswas, S.** 2012. Requirement of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers for wheat cultivation under irrigation by municipal wastewater. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 2012. 12 (4): 655-665
- Mortvedt, J. and Cox, F.** 1994. Micronutrients in Agriculture. 3th Edition . Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Nissen, J. y García, R.** 1997. Efecto del uso de una poliacrilamida en la lixiviación de nitrógeno y de potasio sobre trigo (*Triticum sp.*), en un suelo volcánico. *Agro sur*. 25(2): 196-202.
- Niu, J., Zhang, W., Ru, S., Chen, X., Xiao, K., Zhang, X., Assaraf, M., Imas, P. and Magen, Hillel., Zhang, F.** 2013. Effects of potassium fertilization on winter wheat under different production practices in the North China Plain. *Field Crop Research*. (China) 140: 69-76.
- Novoa, S., González, M. y Opazo, S.** 2002. Buenas prácticas de manejo de fertilizantes. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación La Platina. Series Actas N°5. (Chile) p. 129-158
- Pathak, H., Aggarwal, P., Roetter R., Kalra, N., Bandyopadhyaya, S., Prasad S. and Van Keulen, H.** 2003. Modelling the quantitative evaluation of soil nutrient supply, nutrient use efficiency and fertilizer requirements of wheat in India. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 65: 105-113.
- Peyrelongue A.** 1985. Disponibilidad de potasio y respuesta a sus aplicaciones en cereales en suelos de la IX Región, II Respuesta en trigo, avena y cebada para malta a la fertilización potásica. *Investigacion INIA Carillanca (Chile)* 4 (1): 5-11.
- Pinilla, H. y Sanhueza, H.** 2012. Requerimiento de potasio y eficiencia de absorción de K en diferentes cultivares de trigo en suelos trumaos. Resúmenes 63° Congreso Agronómico 2012. Contribuyendo a la sustentabilidad alimentaria. 99.
- Rehm, G. and Schmitt, M.** 2002. Potassium for crop production University of Minnesota Extension. *Agronomy Journal* (2) 6: 21-33.
- Rodríguez, J., Pinochet, D. y Matus, F.** 2001. Fertilización de los cultivos. LOM Ediciones, Santiago, Chile. 117.
- Rose, T., Rengel, Z., Ma, Q., and Bowden, J.** 2007. Differential accumulation patterns of phosphorus and potassium by canola cultivars compared to wheat. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170: 404-411.

- Rouanet, J., Romero, O. y Demanet, R.** 1988. Áreas agroecológicas en la IX Región: Descripción, investigación y Progreso agropecuario. Estación experimental Carillanca. Temuco, Chile. 7(1): 18-23.
- Roy, R., Finck, A., Blair, G. and Tandon, H.** 2006. Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin No.16. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Singh, B. and Bhandari, A.** 1995. Response of cereals to applied potassium. Potash and Phosphate Institute of Canada – India Programme, Gurgaon, India. 2 (2): 24-39.
- Skegaard, M., Eriksen, J. and Olesen, J.** 2003. Exchangeable potassium and potassium balances in organic crop rotations on a coarse sand. Soil Use and Management. 19: 96–103.
- Stoorvogel, J., Smaling, E. and Janssen, B.** 1993. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. 1. Supra-national scale. Fert. Res. 35, 227-235.
- Szczepaniak, W.** 2004. The response of crop to potassium fertilization. J Elementol. 9(4): 57-66.
- Tandon, H. and Sekhon, G.** 1988. Potassium research and agricultural production. Fertilizer Development and Consultation Organization, New Delhi Journal of agriculture Research 11: 356-367.
- Tariq, M., Shah, M.** 2002. Response of wheat to applied soil potassium. Asian journal of plant sciences volume 1 N°4: 470-471.
- Taube, F., Wulfes, R. and Südekum, K.** 1995. Impact of nitrogen fertilization and growing period on the concentration of mineral element during growth of permanent grass swards. Das Wirtschaftseigene Futter. 41: 219–237.
- Uslar, H.** 1992. Evaluación de las pérdidas de nitrógeno y bases de intercambio por lixiviación en el rendimiento de un cultivo de trigo de invierno en Valdivia. Tesis Licenciado en Agronomía. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Wilkinson, S., Grunes D. and Sumner M.** 2000. Nutrient interactions in soil and plant nutrition. Sumner M.E. Handbook of Soil Science. Boca Raton. (USA). 89-112.
- Yakimenko, V. and Nosov, V.** 2013. The Efficiency of Potassium Fertilizer Use in Western Siberia. Better Crops. 97(2).
- Zhang, H., Yang, X., He, X., Xu, M., Huang, S., Liu, H. and Wang, B.** 2011. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China. Pedosphere. (China). 21(2): 154-163.

9. ANEXOS

Anexo 1: Análisis de varianza rendimiento trigo Bakan Baer, temporadas 2010-2011 y 2011-2012.

Temporada 2010-2011.

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	Gl	Media cuadrática	F	Significación	
TRAT	Hipótesis	41,793	3	13,931	0,989	0,441
	Error	126,793	9	14,088(a)		
REPET	Hipótesis	27,792	3	9,264	0,658	0,598
	Error	126,793	9	14,088(a)		

Test de comparación múltiple de Tukey

TRAT		Subconjunto
	N	1
0 K	4	96,6250
60 K Z 31	4	97,9000
60 K Z 21	4	100,2500
60 K MEZ	4	100,4750
Significación		0,502

Temporada 2010-2011.

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	Gl	Media cuadrática	F	Significación	
TRAT	Hipótesis	7,055	3	2,352	0,089	0,964
	Error	238,670	9	26,519(a)		
REPET	Hipótesis	37,805	3	12,602	0,475	0,707
	Error	238,670	9	26,519(a)		

Test de comparación múltiple de Tukey

TRAT	N	Subconjunto
		1
0 K	4	81,1500
60 K MEZ	4	82,1500
60 K Z 31	4	82,1750
60 K Z 21	4	83,0250
Significación		0,953

Anexo 2: Descripción cálculo de valor crítico de potasio del suelo (mg kg^{-1}), según rendimiento de trigo esperado.

$$80 \text{ qqm} * 2 \text{ kg de K qqm}^{-1} = 160 \text{ kg de K} \div 1.3 \text{ kg de K absorbibles por cada } \text{mg kg}^{-1} \text{ de K int.} = 123 \text{ mg kg}^{-1}$$

Anexo 3. Efecto de la época de aplicación de potasio en diferentes etapas fenológicas de trigo alternativo, en el contenido de potasio intercambiable mg kg^{-1} del suelo.

Temporada 2010-2011.

Nivel de potasio intercambiable del suelo mg kg^{-1} .					
Tratamientos	Zadoks 31	Zadoks 33	Zadoks 49	Zadoks 65	Zadoks 92
Testigo	186,3	130,3	109,7	132,7	135,3
Siembra	203,3	159,0	129,0	136,7	144,7
Zadoks 21	230,7	161,3	151,0	139,7	155,0
Zadoks 31	198,3	151,7	130,3	148,7	163,0
Promedio	204,7	150,6	130,0	139,5	149,5

Temporada 2011-2012.

Nivel de potasio intercambiable del suelo mg kg^{-1} .					
Tratamientos	Zadoks 31	Zadoks 33	Zadoks 49	Zadoks 65	Zadoks 92
Testigo	75,3	63,7	51,0	55,0	68,0
Siembra	78,0	57,7	53,7	65,3	79,3
Zadoks 21	108,3	66,3	66,3	68,7	87,3
Zadoks 31	71,7	67,7	57,7	61,3	84,7
Promedio	83,3	63,8	57,2	62,6	79,8

Anexo 4. Temperaturas y precipitaciones mensuales, desde mayo del 2010 a febrero del 2012.

Mes/año	Precipitación mensual acumulada mm	Temperatura media °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
may-10	38,61	7,6	15,3	3,0
jun-10	170,44	8,8	13,3	5,6
jul-10	170,18	6,5	12,2	2,2
ago-10	119,38	7,5	13,9	2,7
sep-10	11,43	8,8	15,1	4,0
oct-10	35,56	10,7	18,2	5,5
nov-10	46,23	12,2	19,3	7,1
dic-10	37,58	13,5	21,2	7,6
ene-11	43,70	16,4	26,0	9,3
feb-11	28,95	16,3	26,4	8,9
mar-11	39,37	13,9	23,0	7,7
abr-11	104,88	11,3	18,1	6,4
may-11	117,09	8,5	14,3	4,8
jun-11	127,26	8,0	13,3	4,3
jul-11	116,09	6,6	12,0	2,9
ago-11	166,39	7,7	13,4	3,6
sep-11	112,52	9,8	16,1	5,4
oct-11	44,18	10,6	18,2	4,5
nov-11	45,48	13,1	20,8	7,1
dic-11	8,38	16,2	25,9	8,8
ene-12	18,80	17,9	28,1	11,0
feb-12	80,26	16,4	25,8	9,7

Fuente: Clima histórico Temuco <http://www.tutiempo.net/clima/Temuco/857430.htm>