

BALANCE DE MASA DE NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE PAPA EN VILLA DOLORES, CÓRDOBA

SILVANA WALTER^{1*}; CLAUDIA MARCELA GILETTO² & HERNÁN EDUARDO ECHEVERRÍA²

Recibido: 31-08-15

Recibido con revisiones: 30-11-15

Aceptado: 11-12-15

RESUMEN

La utilización de elevadas dosis de nitrógeno (N) en cultivos de papa bajo riego puede incrementar el riesgo de pérdida al ambiente. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la dosis (0, 100, 150 y 250 kg N ha⁻¹), la fuente (urea y urea tratada con nBTPT) y el momento de aplicación (plantación e inicio de tuberización) de N sobre el balance de masa de N en el cultivo de papa en Villa Dolores, Córdoba. Se estimaron las pérdidas de N cuantificando la entrada (N inicial, mineralizado del suelo y en el fertilizante) y la salida de N (N acumulado en tubérculo, en rastrojo y residual en el suelo), en dos lotes de producción. No se determinaron ventajas del nBTPT respecto a la urea convencional en ninguna de las variables evaluadas. El rendimiento de tubérculo fue mayor con la dosis de 250 kg N ha⁻¹, o con 150 y 100 kg N ha⁻¹ en inicio de tuberización. La fertilización con 100 kg N ha⁻¹ fraccionada presentó menor rendimiento respecto a esta dosis aplicada en IT sin fraccionar. El balance de N permitió estimar pérdidas de 29 a 235 kg N ha⁻¹, las que fueron de relevancia inclusive en el tratamiento testigo. La mayor parte de ellas se adjudicó al lavado de nitrato en etapas iniciales del ciclo.

Palabras clave. Pérdida de nitrógeno, nitrógeno residual, nBTPT.

NITROGEN MASS BALANCE OF POTATO CROP IN VILLA DOLORES, CORDOBA

ABSTRACT

The use of high rates of nitrogen (N) fertilizers in irrigated potato crops may increase the risk of N losses to the environment. The aim of this study was to evaluate the effect of N rate (250, 150, 100 and 0 kg N ha⁻¹), source (urea and treated urea nBTPT), and timing (at planting and tuber initiation) on the N mass balance in potato crop of Villa Dolores, Córdoba. Nitrogen losses were estimated by quantifying N inputs (initial N, mineralized soil N and N fertilizer) and N outputs (N accumulated in tubers, in straw and residual soil N) in two production plots. No differences were determined between nBTPT and urea for any of the evaluated variables. Tuber yield was greater using 250 kg N ha⁻¹ or with 150 and 100 kg N ha⁻¹ at the start of tuberization. The tuber yield obtained by fractional fertilization of 100 kg N ha⁻¹ was lower compared to this same rate applied at the start of tuberization. Estimated N losses ranged from 29 to 235 kg ha⁻¹, and were significant even in the control treatment. Most of these losses were caused by nitrate leaching in the early stages of the season.

Key words. Nitrogen loss, residual nitrogen, nBTPT.

1 AER INTA Villa Dolores, Córdoba, Argentina

2 UI Facultad Ciencias Agrarias-INTA Balcarce. Buenos Aires, Argentina

*Autor de contacto: walter.silvana@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

La producción de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la zona de Villa Dolores, Pcia de Córdoba, constituye uno de los cultivos más importantes que cubre aproximadamente 15.000 ha al año, en dos épocas de plantación, la semitemprana (agosto-noviembre) y la tardía (febrero-junio). El destino de la producción es mayormente para consumo fresco y el rendimiento promedio se encuentra entre las 20-30 Mg ha⁻¹. Los productores aplican riego suplementario y elevadas dosis de fertilizantes nitrogenados con el objetivo de lograr un rápido crecimiento de la biomasa aérea (Westermann & Kleinkopf, 1985). La aplicación del fertilizante en algunos casos se divide entre la plantación y el aporque del cultivo.

Si bien el nitrógeno (N) juega un rol clave en el rendimiento del cultivo, la aplicación en exceso también resulta perjudicial, no sólo porque puede disminuir el rendimiento debido a un retraso en el inicio de la tuberización (Saluzzo *et al.*, 1999) sino también debido al riesgo de pérdida de N. El lavado de nitrato generalmente constituye el principal mecanismo de pérdida de N (Gasser *et al.*, 2002; Zebarth & Rosen, 2007; Giletto & Echeverría, 2013) y varía de acuerdo al tipo de suelo, condiciones climáticas y prácticas de manejo de la fertilización nitrogenada. Las estimaciones de las pérdidas de N en cultivos de papa se encuentran en el rango de 10 a 200 kg N ha⁻¹ (Errehbi *et al.*, 1998; Gasser *et al.*, 2002; Cambouris *et al.*, 2008; Giletto & Echeverría, 2013).

La urea constituye la fuente de fertilizantes nitrogenado más empleada en la agricultura y representa el 50% del total utilizado en el mundo (Sanz Cobena *et al.*, 2008). La eficiencia de la urea puede ser reducida debido a las pérdidas de N, causadas por la volatilización de amoníaco (Bremner, 1995). El N-(n-butyl) triamida tiofosfórica (n-BTPT) es un inhibidor de la actividad ureasa (Watson, 2000) y es considerado el producto más efectivo para controlar la hidrólisis de la urea (Bremner & Chai, 1986). En nuestro país se ha evaluado este compuesto principalmente en cultivos de maíz (*Zea mays* L.), considerando que la aplicación de urea al voleo durante los periodos estivales es susceptible a grandes pérdidas por volatilización. En varios trabajos se obtuvieron menores pérdidas por volatilización, sin embargo no se tradujeron en mejoras en el rendimiento (Gambaudo & Lopez, 2005; Ferraris *et al.*, 2009; Barbieri *et al.*, 2010). La respuesta del cultivo de papa a la utilización de fertilizantes de liberación controlada ha sido variable, con incrementos en el rendimiento y eficiencia de uso del N (Zvomuya & Rosen, 2001; Ziadi *et al.*, 2011) y sin mejoras en otros (Waddell *et al.*, 1999).

El riego y la fertilización nitrogenada constituyen dos factores claves en la determinación del rendimiento del cultivo de papa, sin embargo, no hay referencias respecto al momento y la dosis de N recomendable para aplicar con el objetivo de maximizar la rentabilidad del cultivo y minimizar posibles consecuencias ambientales en Villa Dolores. El objetivo de este trabajo fue realizar un balance de masa de N para estimar las pérdidas de N mediante una combinación de dosis, fuente y momento de aplicación del fertilizante nitrogenado. Esto podría contribuir a un manejo más racional de este nutriente, sin afectar el rendimiento del cultivo y minimizando las pérdidas de N al ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron dos ensayos en la campaña semitemprana del año 2012 (julio-noviembre) en la localidad de San Vicente (31°51'2" S, 65°25'50" O, 399 m snm) (departamento San Alberto), a 35 km hacia el noroeste de Villa Dolores, Provincia de Córdoba. El suelo de ambos ensayos fue Haplustol torriorthéntico, familia franca gruesa, algo excesivamente drenado, profundo (> 100 cm), moderadamente provisto de materia orgánica, con baja capacidad de retención de humedad (Jarsún *et al.*, 2003). Los ensayos se llevaron a cabo en los establecimientos La Blanca Rosa (LBR) y La Portada (LP) y ambos fueron regados por aspersión con pivote central. La variedad empleada fue Spunta y el cultivo antecesor en ambos lotes fue maíz para semilla. Las labores de preparación de suelo fueron una pasada con rastra picadora, una labranza profunda con paratril, dos pasadas de cincel y una rastra de disco con rolo. Se realizó una fertilización de base con 400 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico (11-23-00). Luego se realizó el surcado previo a la plantación, el 8 y 15 de julio en LBR y LP, respectivamente. Previo a la emergencia del cultivo se conformó el bordo. Con la finalidad de evitar el escurrimiento superficial del agua de riego y favorecer la infiltración del agua en estos lotes se utilizó una herramienta que produce pozos cada 0,40 m en el fondo del surco de 500 cm³, aproximadamente. La distancia entre surcos fue de 0,85 m y se plantaron 4 cortes por metro. La emergencia del cultivo se produjo el 10 y 15 de agosto para la LBR y LP, respectivamente.

El control de malezas de hoja ancha se realizó con 1,0 L ha⁻¹ de Metribuzin (suspensión concentrada, 48g kg⁻¹, Sencorex). El control de insectos se realizó con dos aplicaciones de 0,1L ha⁻¹ de Deltametrina (concentrado emulsionable, 10 g L⁻¹, Decis Forte 10EC). Para prevenir el desarrollo de enfermedades fúngicas, se realizaron aplicaciones cada 10 días de 2,0 kg ha⁻¹ de Mancozeb (polvo mojable, 80g kg⁻¹, Dithane NT) y de 2 kg ha⁻¹ de Fosetil Aluminio (polvo mojable, 80 g kg⁻¹, WP, Aliette). A los 40 días después de la emergencia (DDE) se aplicó 200 L ha⁻¹ de tiosulfato

de potasio con el agua de riego (0-0-25 + 17% S, SolKS), y dos aplicaciones foliares de magnesio (30-45 DDE) (4g L^{-1} Magnesio, 2g L^{-1} Azufre, Stoller Magnesio) en dosis de 2 L ha^{-1} .

Los datos meteorológicos fueron obtenidos de la estación del Servicio Meteorológico Nacional de Villa Dolores. Las precipitaciones fueron registradas en pluviómetros cercanos a los círculos de riego. Se realizaron riegos periódicos desde el 15 de julio en LBR y el 20 de julio en LP, con láminas de 8 mm. La frecuencia de riegos fue en promedio, cada 5, 3 y 2 días durante el mes de julio, agosto y septiembre y octubre, respectivamente. El 14 de octubre una tormenta de viento afectó la zona causando grandes daños en el follaje del cultivo, tanto en LBR como en LP, y el 21 de octubre se produjo una tormenta de lluvia acompañada de granizo que afectó severamente el lote de LBR, los daños en LP fueron menores.

Se realizó balance hídrico de acuerdo al método propuesto por Della Maggiora *et al.* (1998, 2003) con los datos de precipitación, riego y ETP en intervalos de 10 días, desde el mes de julio al 10 de noviembre. La evapotranspiración real (ETR) fue determinada como el producto entre ETP y el kc determinado por Della Maggiora *et al.* (1996) para el cultivo de papa. Los valores de capacidad de campo (L_{max}) y punto de marchitez permanente (L_{min}), fueron calculados considerando 40 cm de profundidad de suelo y 11 mm de agua útil cada 10 cm. La humedad de suelo a capacidad de campo fue de 82 mm y el punto de marchitez permanente 41 mm. El umbral fisiológico para el cultivo de papa fue el 50 % del agua disponible, si la humedad del suelo está por debajo de este umbral disminuye el rendimiento (Caldiz, 2006). El exceso de agua en el suelo se determinó cuando la precipitación y/o el riego superó la ETR y la capacidad de almacenaje de agua del suelo.

El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados, con tres repeticiones y ocho tratamientos por bloque. Cada

unidad experimental constó de 8 surcos de 10 metros de longitud. Los tratamientos surgieron de algunas combinaciones de dosis de N (0, 100 150 y 250 kg N ha^{-1}); momentos de fertilización (plantación e inicio de tuberización (IT)) y fuentes de N, urea (46-0-0) y urea tratada con el inhibidor de la ureasa nBTPT (46-0-0, eNeTOTAL-PROFERTIL) (Tabla 1). La fertilización en IT se realizó a los 53 DDE en LBR y a los 48 DDE en LP. La aplicación del fertilizante en IT se realizó al voleo, sin incorporación con el fin de evaluar el efecto del inhibidor de la ureasa.

A la senescencia del cultivo se cosechó la biomasa aérea y de tubérculos de 1 m lineal en cada unidad experimental. Las muestras fueron separadas en rastrojo y tubérculo. El rastrojo fue pesado en fresco, se tomó una alícuota que fue pesada y secada en estufa ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta peso constante para determinar la MS del rastrojo. Se determinó la concentración de N mediante el método de Dumas por combustión seca a $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ y posterior determinación por conductividad térmica usando un analizador TruSpec C-N (LECO, 2008). El N acumulado en el rastrojo (N_{ra}) se calculó como el producto entre la concentración y la materia seca del rastrojo. Las muestras de tubérculos, también fueron pesadas y secadas en estufa ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta peso constante para determinar la materia seca. La concentración de N en los tubérculos se determinó de la misma manera que en el rastrojo. El N acumulado en los tubérculos (N_{tub}) se calculó como el producto entre la concentración de N y la materia seca. Tanto N_{ra} como N_{tub} fueron expresados en peso seco. Para determinar el rendimiento se cosecharon 4 m lineales de los surcos centrales de cada unidad experimental, el 4 y el 15 de noviembre en LBR y en LP, respectivamente.

El N disponible en el suelo a la plantación (N_i) fue extraído de muestras de suelo con K_2SO_4 (0,5 M) y determinado mediante el método del ácido fenol disulfónico (Keeney & Nelson, 1982) en muestras tomadas previo a la plantación a una profundidad

Tabla 1. Tratamientos de fertilización nitrogenada: dosis, momento y fuente de N. (IT) Inicio de tuberización.

Table 1. Nitrogen fertilization treatments: dose, timing and source of N. (IT) tuber initiation.

Tratamientos	Dosis plantación (kg N ha^{-1})	Dosis IT (kg N ha^{-1})	Dosis total (kg N ha^{-1})
0 (Testigo)	0	0	0
50-50	50	50	100
50-50L ¹	50	50 L	100
0-100	0	100	100
0-100L	0	100 L	100
50-100	50	100	150
50-100L	50	100 L	150
100-150 ²	100	150	250

¹La letra L simboliza la utilización de urea tratada con nBTPT

²El tratamiento 100-150 representa la dosis de fertilización generalmente utilizada por los productores de la región.

de 0-20; 20-40 y 40-60 cm en cada uno de los bloques en LP y LBR. El valor de Ni incluye el N que fue aportado por el fosfato monoamónico. El N residual (Nr) se determinó mediante la misma metodología y a las mismas profundidades en cada uno de las unidades experimentales para ambos lotes luego de la cosecha. Se determinó el N mineralizado (Nmin) mediante un balance simplificado de N a partir del N acumulado en tubérculo y rastrojo del tratamiento testigo, el N residual a cosecha (0-60 cm) y el 50% del Ni del suelo, tal como propone Meisinger (1984). En la Tabla 2 se presentan las características de los lotes donde se llevaron a cabo los ensayos.

El balance de masa de N se realizó considerando las entradas y salidas del sistema suelo-cultivo en cada uno de los tratamientos según Errebhi *et al.* (1998); Meisinger *et al.* (2008), Giletto & Echeverría (2013). Mediante este balance se estimaron las pérdidas de N por diferencia entre las entradas y salidas. El trabajo se basó en cuatro supuestos: a) que el N aportado por la lluvia y las pérdidas por desnitrificación son despreciables y que se compensan, b) que el N del rastrojo a la plantación y N remanente en raíces en los testigos y tratamientos tratados con N fueron de escasa magnitud, c) que no hay efecto del N mineral a la plantación y del fertilizante nitrogenado sobre la mineralización de la MO, y d) que no hay inmovilización significativa del N aplicado del fertilizante (Errebhi *et al.*, 1998). El Nra y Nr se consideraron como componentes de la salida de N del sistema suelo-cultivo hasta 60 cm de profundidad, ya que no fueron utilizados por el cultivo de papa durante el ciclo; pero pueden ser utilizados por el cultivo siguiente en la rotación si eventos de lluvia posteriores a la cosecha de la papa no afectan su disponibilidad.

$$N \text{ entrada} = N \text{ salida}$$

$$N \text{ entrada} = N_i + N_{\text{min}} + N_f$$

$$N \text{ salida} = N_{\text{ra}} + N_{\text{tub}} + N_r + N_{\text{vol}} + N_{\text{lav}}$$

$$N_{\text{vol}} + N_{\text{lav}} = N_i + N_{\text{min}} + N_f - N_{\text{ra}} - N_{\text{tub}} - N_r$$

Siendo:

Nf: N del fertilizante

Nvol: N perdido por volatilización

Nlav: N perdido por lavado

Los efectos de los tratamientos fueron evaluados utilizando el PROC MIXED incluido en el programa Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 2001). Primero se realizó un ANOVA de las variables rendimiento, Ntub, Nra y Nr mediante un modelo mixto considerando los sitios como factor aleatorio y los tratamientos como efectos fijos (Kuehl, 2001). Luego se evaluaron las variables dentro de cada sitio considerando a los tratamientos como efecto fijo y los bloques como efecto aleatorio. Se realizaron contrastes ortogonales para evaluar diferencias entre dosis (0-100 vs 100-150; 50-100 vs 100-150); momento (50-50 vs 0-100) y fuente de N (50-50 vs 50-50L; 0-100 vs 0-100L; 50-100 vs 50-100L). Además, se utilizó el test de Diferencia Mínima Significativa (DMS) de Fisher ($p < 0,05$) para realizar comparaciones de pares de medias. Se estableció la relación entre la dosis de N y las variables evaluadas (rendimiento, Nperdido, Nra, Ntub y Nr) y se ajustaron regresiones lineales y cuadráticas utilizando el PROC REG incluido en el SAS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones ambientales y balance hídrico

Durante el ciclo del cultivo la temperatura estuvo dentro de los valores históricos, no siendo limitante para el desarrollo del cultivo. Las precipitaciones acumuladas entre plantación y cosecha fueron 143 y 110 mm en LP y LBR y se aplicaron 320 y 328 mm en LP y LBR de agua de riego, totalizando 463 y 438 mm en LP y LBR, respectivamente. El 21 de Octubre se produjo una tormenta intensa de lluvia acompañada de granizo que afectó severamente el lote de LBR, los daños en LP fueron proporcionalmente menores y no afectaron mayormente el desarrollo del cultivo en este lote.

Tabla 2. Características del suelo en La Portada y La Blanca Rosa al momento de la plantación.
Table 2. Soil characteristics in La Portada and La Blanca Rosa at planting.

	La Portada	La Blanca Rosa
pH (suelo:agua 1:2,5)	6,9 ± 0,04	7,9 ± 0,01
Materia Orgánica (g 100g ⁻¹) (0-20 cm)	1,3 ± 0,10	1,7 ± 0,19
P disponible (mg kg ⁻¹) (0-20 cm)	279 ± 18,5	186 ± 16,7
S-SO ₄ ⁻ (mg kg ⁻¹) (0-20 cm)	149 ± 15,3	221 ± 13,9
NO ₃ ⁻ -N (kg ha ⁻¹) (0-60 cm)	153 ± 2,6	203 ± 27,6
N mineralizado (kg ha ⁻¹) (0-20 cm)	95 ± 3,5	41 ± 12,4

La Figura 1 muestra el balance de agua para ambos lotes, determinándose excesos de agua de 49 y 61 mm en LP y LBR, respectivamente durante la implantación del cultivo y la etapa de crecimiento vegetativo. Mientras que, durante la etapa de tuberización y llenado de tubérculo el contenido de agua, en general estuvo por encima del umbral fisiológico (50% del agua útil) (Caldiz, 2006). El cultivo de papa es sensible al estrés hídrico, fundamentalmente

durante el periodo de inicio de tuberización y llenado de tubérculo (King *et al.*, 2004). Por lo que, el cultivo durante la etapa crítica en general, no tuvo déficit hídrico.

Interacción sitio-tratamiento

Se determinó interacción significativa entre los ensayos y los tratamientos para las variables rendimiento, N tubérculo, N residual (Tabla 3). Las condiciones edáficas

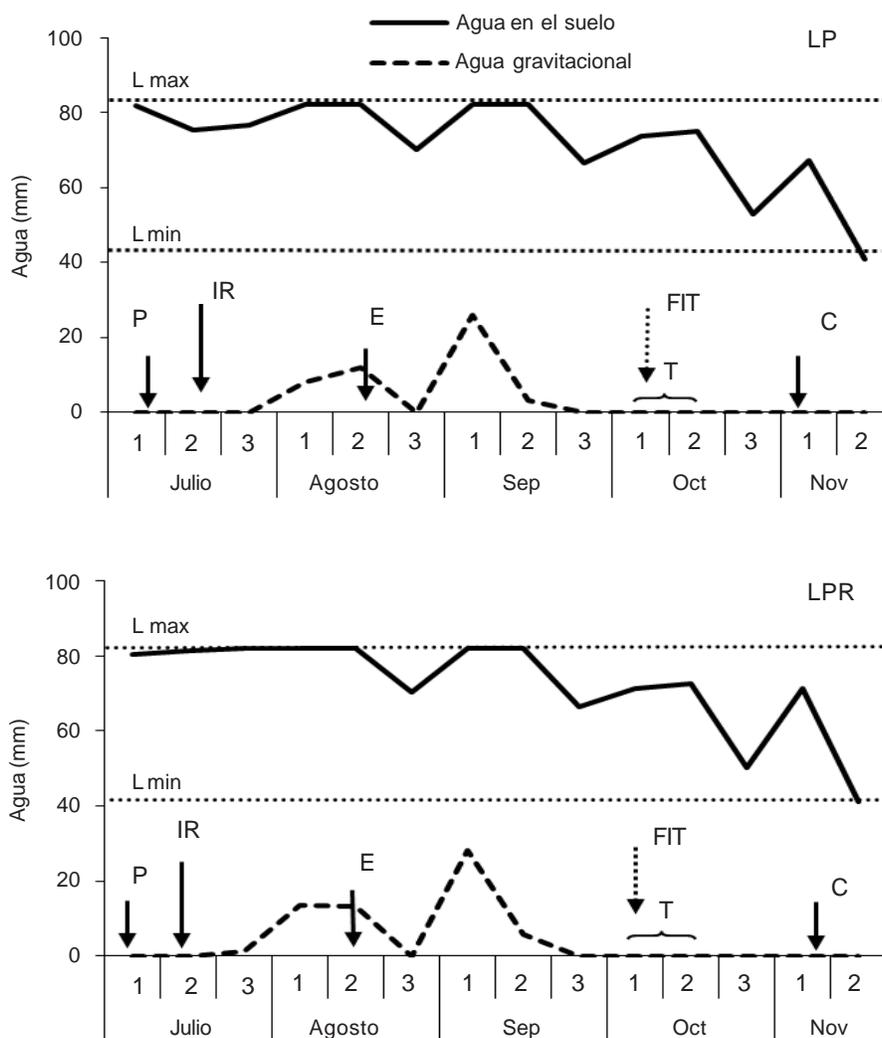


Figura 1. Balance hídrico en La Portada (LP) y La Blanca Rosa (LBR) en series decadales.

1-días 1 a 10; 2-11 a 20; 3-21 a 30/31. P: plantación; E: emergencia, T: tuberización; C: cosecha; FIT: fertilización a inicio de tuberización. IR: inicio del riego. Lmáx, máxima cantidad de agua que el suelo puede retener luego del drenaje del agua gravitacional (capacidad de campo). Lmin, contenido de agua del suelo en el que las plantas se marchitan y no pueden recuperar su turgencia (punto de marchitez permanente).

Figure 1. Water balance in La Portada (LP) and La Blanca Rosa (LBR) on decadal series. 1-day 1 to 10; 2-11 to 20; 3-21 to 30/31. P: planting; E: Emergency; T: tuber; C: harvest; FIT: fertilization beginning of tuberization. IR: Watering start. Lmax, maximum quantity of water that the soil can hold when gravitational water drained (field capacity). Lmin, soil water content at which plants wilt and can no longer recover turgidity (permanent wilting point).

Tabla 3. Análisis de varianza para rendimiento, N en tubérculo, N en rastrojo y N residual en dos ensayos y ocho tratamientos de fertilización nitrogenada en Villa Dolores.

Table 3. Analysis of variance for yield, tuber N, N stubble and residual N in two trials and eight treatments of nitrogen fertilization in Villa Dolores.

Fuente de variación	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	N tubérculo (kg N ha ⁻¹)	N rastrojo (kg N ha ⁻¹)	N residual (kg N ha ⁻¹)
Bloque	ns	ns	ns	ns
Sitio (S)	****	****	****	****
Tratamientos (T)	****	****	****	****
S*T	****	****	ns	*
CV (%)	3,69	6,56	8,53	15,39

Nivel de significación: '****' < 0,01 '***' 0,05 '**' 0,1; ns: no significativo.

y ambientales justifican estos resultados. Debido a la existencia de esta interacción, cada ensayo fue analizado en forma individual.

Rendimiento

En LP el rendimiento varió de 26,5 a 44,1 Mg ha⁻¹ (Tabla 4), determinándose los menores valores en el testigo y los mayores en los tratamientos fertilizados. Mientras que, en LBR, el rendimiento varió de 18,1 a 23,8 Mg ha⁻¹. Además, el modelo cuadrático determinado a partir de la relación entre el rendimiento y la dosis de N fue significativo sólo para LP (Fig. 2). El rendimiento promedio de la región para la campaña semitemprana es de 30 Mg ha⁻¹, alcanzado algunos productores rendimiento de 50 Mg ha⁻¹ (Caldiz *et*

al., 1997; Caldiz, 2006). En LP, el rendimiento del testigo sin fertilizar fue inferior al promedio regional, mientras que el rendimiento de los tratamientos fertilizados estuvo por encima del mismo. En LBR, el rendimiento fue inferior al promedio regional debido a que el granizo redujo el follaje del cultivo y afectó la partición de materia seca hacia los tubérculos durante la etapa de llenado. Al comparar las dosis de N, no se determinaron diferencias significativas en el rendimiento entre los tratamientos que recibieron 100 kg N ha⁻¹ en IT, 150 y 250 kg N ha⁻¹. Esto sugiere que la dosis de 100 kg N ha⁻¹ aplicada en IT cubrió los requerimientos del cultivo y que incrementos en la cantidad de N no se tradujeron en mayor rendimiento. Estos resultados coincidieron con los obtenidos por otros autores (Westerman

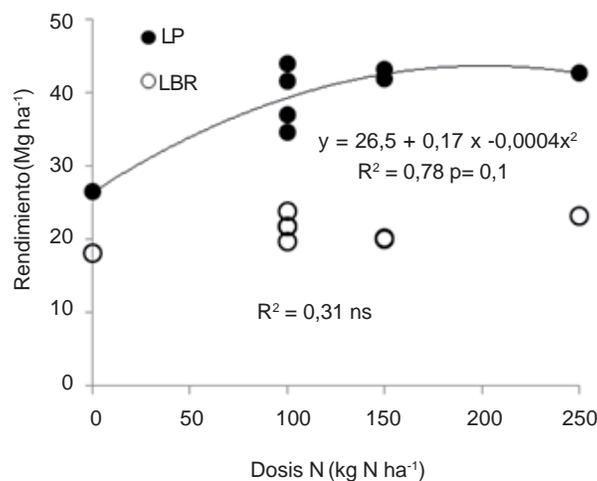


Figura 2. Relación entre el rendimiento de tubérculos y la dosis de N en La Portada (LP) y La Blanca Rosa (LBR).

Figure 2. Relationship between tuber yield and N rate in La Portada (LP) and La Blanca Rosa (LBR).

& Kleinkopf, 1985; Saluzzo *et al.*, 1999); quienes determinaron que elevadas dosis de N no incrementaron el rendimiento, probablemente debido a un retraso en el crecimiento de los tubérculos asociado a una mayor partición de N y MS hacia la biomasa aérea. La aplicación sin fraccionar de 100 kg N ha⁻¹ en IT aumentó el rendimiento respecto a la misma dosis fraccionada entre la plantación e IT. El menor rendimiento de los testigos (Tabla 4) respecto a los fertilizados sugiere que, a pesar del elevado contenido de N a la plantación este no estuvo disponible durante todo el ciclo del cultivo. Probablemente los eventos de drenaje que se produjeron durante los estadios iniciales del cultivo y el crecimiento vegetativo (Fig. 1) provocaron que los tratamientos testigos y los tratamientos que recibieron la dosis de 100 kg N ha⁻¹ fraccionada no cuenten con suficiente N al final del llenado de los tubérculos como para equiparar los rendimientos del resto de los tratamientos fertilizados.

Con respecto a la urea con el inhibidor de la ureasa, en ambos ensayos no se determinaron diferencias respecto a la urea convencional (Tabla 4). La falta de respuesta en el rendimiento debido a la utilización del inhibidor de la ureasa puede deberse a la aplicación de láminas de riego de bajo caudal (8 mm) pero con alta frecuencia (2 días). La

elevada disponibilidad de agua en el suelo probablemente originó una rápida incorporación del fertilizante minimizando las pérdidas por volatilización.

N residual, N en el rastrojo y en el tubérculo

En LP el contenido de N residual en el suelo (0-60 cm) varió entre 76-218 kg N ha⁻¹ (Tabla 4), determinándose el valor más elevado en el tratamiento que recibió 250 kg N ha⁻¹ y el más bajo en el testigo; en tanto que, la fertilización con 100 y 150 kg N ha⁻¹ presentaron valores intermedios. Mientras que, en LBR el N residual varió de 54 a 94 kg N ha⁻¹ entre el testigo y el tratamiento que recibió 250 kg N ha⁻¹; respectivamente (Tabla 4). En ambos ensayos, se estableció una relación lineal entre N residual y la dosis de N (Fig.3). Por otro lado, no se determinó efecto de la fuente de N en el contenido de N residual (Tabla 4). Si bien de acuerdo al método de balance propuesto se considera al N residual como una salida, este estaría disponible en el suelo para un próximo cultivo. El inconveniente es que este N es potencialmente sensible a pérdidas, fundamentalmente por lavado si se presentan elevadas precipitaciones luego de la madurez del cultivo.

Tabla 4. Rendimiento (peso fresco), N residual (0-60 cm), N acumulado en rastrojo y tubérculo (kg N ha⁻¹) en La Portada y La Blanca Rosa. Diferencia mínima significativa (DMS), ($p < 0,05$) y significancia de los contrastes ortogonales.

Table 4. Yield (fresh weight), residual N (0-60 cm), N accumulated in stubble and tuber (kg N ha⁻¹) in La Portada and La Blanca Rosa. Least significant difference (LSD), ($p < 0.05$) and significance of orthogonal contrasts.

	La Portada				La Blanca Rosa			
	Rendimiento Mg ha ⁻¹	N residual kg N ha ⁻¹	N rastrojo kg N ha ⁻¹	N tubérculo kg N ha ⁻¹	Rendimiento Mg ha ⁻¹	N residual kg N ha ⁻¹	N rastrojo kg N ha ⁻¹	N tubérculo kg N ha ⁻¹
0	26,5	75,5	49,5	46,4	18,1	53,9	52,9	35,7
50-50	37,1	107,0	69,1	74,0	21,8	64,4	91,7	34,6
50-50L	34,6	117,7	82,0	71,2	19,8	63,7	107,0	37,9
0-100	44,1	144,2	75,0	87,5	21,8	64,7	108,8	47,6
0-100L	41,6	151,2	75,2	91,9	23,8	74,3	107,1	46,0
50-100	43,3	175,0	84,3	97,4	20,1	86,9	119,7	40,2
50-100L	42,0	180,2	84,0	95,5	20,2	78,3	110,2	41,0
100-150	42,7	217,8	110,6	95,0	23,2	94,2	117,5	47,0
Valor p	***	***	***	***	**	0,30	***	**
R ²	0,93	0,74	0,73	0,90	0,69	0,47	0,78	0,67
DMS	3,45	59,34	22,56	12,41	2,91		24,52	8,05
50-50 vs 0-100	***	ns	ns	**	ns	ns	ns	***
50-50L vs 0-100L	***	ns	ns	***	**	ns	ns	*
50-50 vs 50-50L	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
0-100 vs 0-100L	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
50-100 vs 50-100L	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
0-100 vs 100-150	ns	**	***	ns	ns	*	ns	ns
50-100 vs 100-150	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	*

Nivel de significación: '***' < 0,01 '**' 0,05 '*' 0,1; ns: no significativo

El N acumulado en el rastrojo en LP varió entre 50 a 110 kg N ha⁻¹ (Tabla 4) y aumentó linealmente con el incremento en la dosis de N (Fig. 3). Esto coincide con lo mencionado por Saffigna *et al.* (1977) quienes determinaron mayor acumulación de N en la biomasa aérea en función de la disponibilidad de N. Sin embargo, esta mayor acumulación no se reflejó en diferencias de rendimiento en tubérculos y, por lo tanto sugiere un uso ineficiente de N. En LBR el N acumulado en el rastrojo varió entre 53 a

120 kg N ha⁻¹ (Tabla 4) y al relacionar esta variable con la dosis de N se determinó una función cuadrática (Fig. 3). La fertilización nitrogenada aumentó significativamente la cantidad de N acumulado en el rastrojo sólo en LP en los tratamientos que recibieron dosis de N por encima de los 100 kg N ha⁻¹ (Tabla 4). Al comparar los momentos de fertilización en ambos lotes no se determinaron diferencias entre la aplicación fraccionada de 100 kg N ha⁻¹ y una sola aplicación en el IT sobre la acumulación de N en el

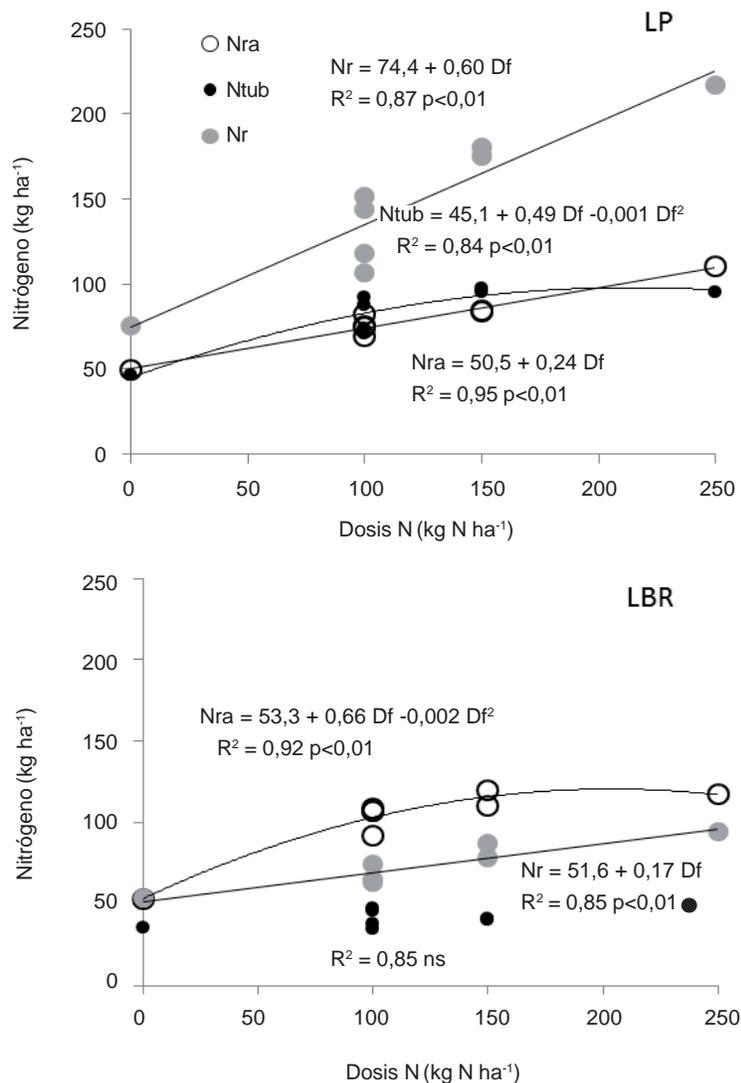


Figura 3. N acumulado en rastrojo (Nra), en tuberculo (Ntub) y N residual (Nr) expresado en kg N ha⁻¹ en La Portada (LP) y La Blanca Rosa (LBR) en función de la dosis de N aplicada (kg N ha⁻¹). Df: dosis fertilizante.

Figure 3. N accumulated in stubble (Nra) in tubers (Ntub) and N residual (Nr) in kg N ha⁻¹ in La Portada (LP) and La Blanca Rosa (LBR) as a function of the dose of N applied (kg N ha⁻¹). Df: fertilizer dose.

rastrajo (Tabla 4). Esto coincide con lo reportado por Zearth *et al.* (2004) quienes determinaron que el momento de aplicación del fertilizante nitrogenado no tuvo efecto sobre el N acumulado en rastrajo en la variedad Russet Burbank. Por otro lado, la urea con el inhibidor de la ureasa no afectó el N acumulado en el rastrajo (Tabla 4).

La fertilización nitrogenada incrementó la acumulación de N en tubérculo en LP (Tabla 4), estableciéndose una función cuadrática entre ambas variables (Fig. 3). La aplicación fraccionada de 100 kg N ha⁻¹ entre plantación y el IT redujo significativamente esta variable respecto a la misma dosis sin fraccionar. Los valores determinados (47-97 kg N ha⁻¹) estuvieron dentro de los rangos mencionados en la literatura (Hill, 1986; Errebhi *et al.*, 1998; Kuisma *et al.*, 2002). En LBR, el N acumulado en tubérculo fue menor (35 y 47 kg N ha⁻¹) (Tabla 4) al determinado en LP y esta variable no se asoció con la dosis de N (Fig. 3). Los bajos valores de N en tubérculo fueron debidos al menor rendimiento determinado en este lote por la influencia del granizo. En ambos ensayos, no se determinó efecto del nBTPPT sobre el N acumulado en tubérculo (Tabla 4).

Balance de N

En ambos ensayos, las entradas de N en los testigos (N_{min} + N_i) fueron elevadas (248 y 244 kg N ha⁻¹ en LP y LBR, respectivamente), fundamentalmente debido al elevado contenido de N_i. En los tratamientos en los que

se aplicó N, la disponibilidad aumentó en función de la dosis de fertilizante (Tabla 5).

En LP el N acumulado en el rastrajo y el residual representó, en promedio, entre el 50 y el 66% del N que ingresó al sistema. Los incrementos en la dosis de fertilizante se tradujeron en aumento de N acumulado en rastrajo y tubérculo y mayor N residual en el suelo; sin embargo esto no se tradujo en diferencias de rendimiento, sugiriendo consumo de lujo por parte del cultivo. La pérdida de N estimada mediante el balance (Tabla 5) fue entre 38-98 kg N ha⁻¹ y representó entre el 9-30% del N que ingresó al sistema. No se estableció relación entre la pérdida de N y la dosis de fertilizante (Fig. 4). Contrariamente a lo esperado, las mayores pérdidas se presentaron en el tratamiento testigo y la aplicación fraccionada de 100 kg N ha⁻¹, lo que en parte podría explicarse por los elevados contenidos de N_i. No se determinaron diferencias significativas en el N perdido en los tratamientos 100 kg N ha⁻¹ aplicados en el IT, 150 y 250 kg N ha⁻¹ (Tabla 5).

En LBR, el N acumulado en rastrajo y residual fue entre el 43 y 53% del N que ingreso al sistema. Las pérdidas estimadas a partir del balance de N fueron entre 101-235 kg N ha⁻¹ (Tabla 5), representando entre el 35-47% del N que ingresó en el sistema. Se determinó una relación lineal significativa entre la dosis y las pérdidas de N (Fig. 4). No se determinaron diferencias en las pérdidas de N con respecto

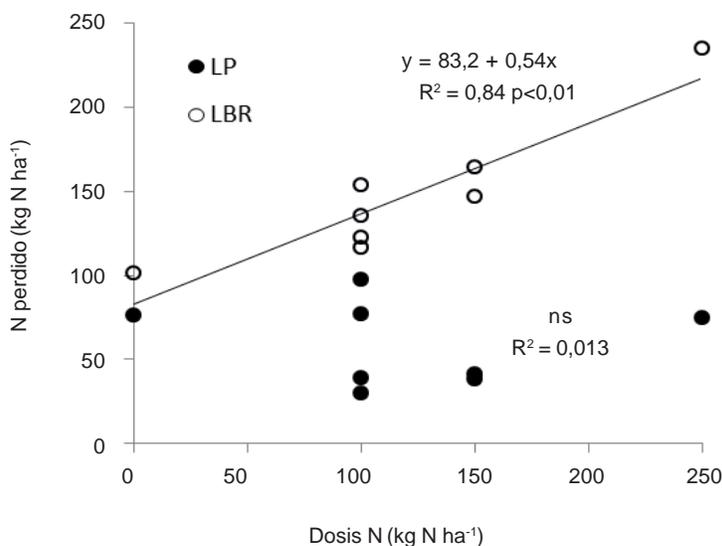


Figura 4. Relación entre la pérdida estimada de N (kg N ha⁻¹) y la dosis de N en La Blanca Rosa (LBR) y La Portada (LP).

Figure 4. Relationship between the estimated N loss (kg N ha⁻¹) and N rate in La Portada (LP) and La Blanca Rosa (LBR).

al momento de aplicación en los tratamientos fertilizados con 100 kg N ha⁻¹. La utilización del nBTPT no disminuyó las pérdidas en ninguna de las dosis evaluadas (Tabla 5).

Mediante el balance de masa se estimó la magnitud de las pérdidas de N, pero no es posible establecer cuál es el mecanismo por el cual se producen estas pérdidas. Dentro de estos mecanismos se encuentran la volatilización de amoníaco, la desnitrificación y el lavado de nitrato (Haverkort & MacKerron, 2000). En ensayos realizados en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*) en siembra directa y con aplicaciones de urea en superficie (Sainz Rozas *et al.*, 1997; Ferraris *et al.*, 2009; Barbieri *et al.*, 2010), se determinó una reducción de las pérdidas de N por volatilización cuando la urea se trataba con nBTPT. Sin embargo, la magnitud de las pérdidas fue como máximo el 10% del N aplicado. En estos ensayos no se determinaron las pérdidas por volatilización, pero el no haber determinado efecto del inhibidor en ninguna de las variables del cultivo y el corto período entre riegos luego de la aplicación de los fertilizantes, permite suponer que la magnitud de este proceso no fue de relevancia. Por

otra parte, son limitados los estudios respecto a la pérdida de N por desnitrificación en el cultivo de papa (Zebarth & Rosen, 2007; Giletto & Echeverría, 2013). Según Postma & Van Loon (1996), las pérdidas por desnitrificación variaron entre 0 y 8 kg N ha⁻¹. Considerando que no se presentaron condiciones predisponentes para la desnitrificación, se supone que la magnitud de estas pérdidas fue de escasa.

De acuerdo al balance hídrico (Fig. 1) en ambos ensayos durante el período entre plantación-emergencia y el crecimiento vegetativo los riegos superaron la capacidad de almacenaje de agua del suelo, registrándose eventos de drenaje. Esto coincidió con elevada disponibilidad de N en el suelo, y bajos requerimientos del cultivo en los estadios iniciales; ya que entre la plantación y emergencia, los nutrientes son aportados por el tubérculo semilla (Alva, 2004). Además, las bajas tasas de crecimiento debido a la temperatura que se registraron durante agosto y la escasa capacidad de las raíces de explorar a mayor profundidad el perfil (Tanner *et al.*, 1982), no favorecen el consumo de agua y N. Durante la etapa de desarrollo vegetativo, solo

Tabla 5. Entrada, salida y pérdida estimada de N (kg N ha⁻¹) en La Portada y La Blanca Rosa. Diferencia mínima significativa (DMS) ($p < 0,05$) y significancia de los contrastes ortogonales de tratamientos

Table 5. Input, output and estimated N loss (kg N ha⁻¹) in La Portada and La Blanca Rosa. Least significant difference (LSD) ($p < 0.05$) and significance of orthogonal contrasts treatments.

	La Portada			La Blanca Rosa		
	Entrada kg N ha ⁻¹	Salida kg N ha ⁻¹	Pérdida kg N ha ⁻¹	Entrada kg N ha ⁻¹	Salida kg N ha ⁻¹	Pérdida kg N ha ⁻¹
0	248	171	76	244	142	101
50-50	348	250	98	344	191	153
50-50L	348	271	77	344	209	135
0-100	348	307	39	344	221	123
0-100L	348	318	29	344	227	117
50-100	398	357	41	394	247	147
50-100L	398	360	38	394	229	164
100-150	498	423	74	494	259	235
Valor p		***	*	***	***	***
R ²		0,89	0,58	0,84	0,87	
DMS		57,06	46,91	34,8	34,95	
50-50 vs 0-100		**	**	*	*	
50-50L vs 0-100L		*	ns	ns	ns	
50-50 vs 50-50L		ns	ns	ns	ns	
0-100 vs 0-100L		ns	ns	ns	ns	
50-100 vs 50-100L		ns	ns	ns	ns	
0-100 vs 100-150		***	ns	**	***	
50-100 vs 100-150		**	ns	ns	***	

Nivel de significación: '****' < 0,01 '***' 0,05 '**' 0,1; ns: no significativo.

se absorbe el 20% del N total requerido por el cultivo. Por lo tanto, la elevada disponibilidad de N en esta etapa puede incrementar el riesgo de lavado de nitrato (Zebarth & Rosen, 2007). Errebhi *et al.* (1998) determinaron que en años en los que ocurrían eventos de lavado en los estadios tempranos del cultivo la pérdida de N se incrementaba en función de las dosis aplicadas a la plantación, tal como se determinó en LBR. En años donde no se producían estos eventos de drenaje, no encontraron diferencias significativas en el lavado en función del momento de aplicación.

De acuerdo a los resultados obtenidos en estos ensayos, y en lotes con elevada disponibilidad de N a la plantación, la fertilización nitrogenada a la plantación no se traduce en incrementos de rendimiento, sobre todo en aquellas situaciones donde se pueden producir eventos de drenaje. Otro factor importante a tener en cuenta es el período transcurrido entre plantación-emergencia, que en las condiciones de producción de Villa Dolores, en general es prolongado. La combinación de estos factores, elevada disponibilidad inicial de N, eventos de drenaje y escasa absorción del nutriente por parte del cultivo, sugieren que el mecanismo de pérdida de N más relevante sería el lavado de nitrato a una profundidad superior a la que puede ser absorbido por el cultivo.

CONCLUSIONES

Bajo las condiciones que se realizó esta experiencia, se puede concluir que el tratamiento que recibió la dosis de N similar a la utilizada por los productores (250 kg N ha^{-1}) en Córdoba, tuvo similar rendimiento que los tratamientos que recibieron menor dosis de N (100 y 150 kg N ha^{-1}). Esto implica, una importante disminución en los costos de producción y la conveniencia de evitar el consumo de lujo de N por parte del cultivo. El empleo de dosis inferiores a las que utilizan los productores dan menores pérdidas de N durante el ciclo del cultivo y menor contenido de N residual en el suelo luego de la cosecha. Esto implica menor riesgo ambiental debido a posibles pérdidas luego de la cosecha del cultivo.

La aplicación de 100 kg N ha^{-1} al IT incrementó el rendimiento respecto a esta misma dosis aplicada en forma fraccionada. Esto sugiere una mayor sincronía entre la demanda del cultivo y la oferta de N, disminuyendo de esta forma la pérdida de N en los estadios tempranos de desarrollo del cultivo.

En cuanto a la fuente de N, la utilización de la urea con el inhibidor de la actividad ureásica no produjo diferencias

en las variables evaluadas respecto a la urea convencional. Las condiciones en las que se realizaron estos ensayos (riegos de bajo caudal con alta frecuencia) probablemente expliquen la falta de diferencias entre tratamientos. Estos resultados permiten concluir que, en similares condiciones, no presenta ventajas dicho inhibidor.

AGRADECIMIENTOS

Al Sr M Pasman, propietario del establecimiento donde se realizaron los ensayos y a su equipo de trabajo, especialmente los Ingenieros L Pletch y P Colombres por su muy buena predisposición y colaboración en la realización de los ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alva, A. 2004. Potato nitrogen management. *J. Veg. Crop Prod.* 10: 97-130.
- Barbieri, PA; HE Echeverría; HR Sainz Rozas & M Maringolo. 2010. Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ci. Suelo* 28: 57-66.
- Bremner, JM & HS Chai. 1986. Evaluation of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide for retardation of urea hydrolysis in soil. *Commun Soil Sci. Plan.* 17: 337-351.
- Bremner, JM. 1995. Recent research on problems in the use of urea as a nitrogen fertilizer. *Fert. Res.* 42: 321-329.
- Caldiz, DO. 2006. Producción, cosecha y almacenamiento de papa en la Argentina. Buenos Aires, Argentina, 226 p.
- Caldiz, DO; LV Fernandez; F Marco & A Clúa. 1997. Efectos de la hidrazida maleica sobre el rendimiento, contenido de materia seca y brotación en papa (*Solanum tuberosum* L. cv. Spunta) destinada al consumo fresco. *Rev. Fac. Agron. La Plata* 102: 163-173.
- Cambouris, AN; BJ Zebarth; MC Nolin & MR Laverdière. 2008. Apparent fertilizer nitrogen recovery and residual soil nitrate under continuous potato cropping: Effect of N fertilization rate and timing. *Can. J. Soil Sci.* 88: 813-825.
- Della Maggiora, AI; AI Irigoyen; JM Gardiol; O Caviglia & L Echarte. 2003. Evaluation of a soil water model for the corn crop. *Rev. Agric. Agrometeor.* 2: 167-176.
- Della Maggiora, AI; L Echarte; EE Suero & AI Irigoyen. 1998. Disminución del rendimiento en los cultivos de maíz, girasol, soja y trigo en la localidad de Balcarce. Actas X Congreso Brasileiro de Meteorología y VIII Congreso de la Federación Latinoamericana e Ibérica de Sociedades de Meteorología. Brasilia, Brasil. Octubre 1998. En CD.
- Errebhi, M; C Rosen; S Gupta & D Birong. 1998. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. *Agron. J.* 90: 10-15.
- Ferraris, GN; LA Couretot & M Toribio. 2009. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz: efecto de fuente, dosis y uso de inhibidores. IPNI. *Informaciones Agronómicas del cono Sur.* 43: 19-22.
- Gambaudo, S & O Lopez. 2005. Eficiencia en el uso de los fertilizantes: efecto del inhibidor de la enzima ureasa. Información técnica cultivos de verano. EEA INTA Rafaela. Publicación Miscelánea N° 104: 14-17.

- Gasser, MO; MR Laverdière; R Lagacé & J Caron. 2002. Impact of potato-cereal rotations and slurry applications on nitrate leaching and nitrogen balance in sandy soils. *Can. J. Soil Sci.* 82: 469-479.
- Giletto, CM & HE Echeverría. 2013. Nitrogen balance for potato crops in the southeast pampas region, Argentina. *Nutr. Cycl. Agroecosys* 95: 73-86.
- Haverkort, AJ & DK Mackerron. 2000. Management of nitrogen and water in potato production. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands. 353 p.
- Hill, AR. 1986. Nitrate and chloride distribution and balance under continuous potato cropping. *Agr. Ecosyst. Environ.* 15: 267-280.
- Jarsún, B; JA Gorgas; E Zamora; E Bosnero; E Lovera; A Ravelo & JL Tassile. 2003. Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Los Suelos. Agencia Córdoba D.A.C. y T.S.E.M., EEA INTA Manfredi, Argentina. 569 p.
- Keeney, DR & DW Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. *En: AL Page; RH Miller; DR Keeney (eds.) Methods of soil analysis.* 2° ed. American Society Agronomy, Madison. pp 643-698.
- King, BA; JC Stark & SL Love. 2004. Potato production with limited water supply. Idaho Agricultural Experiment Station. University of Idaho Extensio. 8 p.
- Kuehl, RO. 2001. Diseño de experimentos. 2° Edición. Thomson Learning. México, DF. 666 p.
- Kuisma, P. 2002. Efficiency of split nitrogen fertilization with adjusted irrigation on potato. *Sci. Food Agr. Finland.* 11:59-74.
- Leco 2008. Organic application notes. [en línea] <<http://www.leco.com/products/analytical-sciences/carbon-nitrogen-analyzers/truspec>> Consulta 10 Diciembre 2012.
- Meisinger, JJ. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. *In: RD Hauck (ed). Nitrogen in crop production.* Am. Soc. Agron. Madison, Wisconsin. Pp. 391-416.
- Meisinger, JJ; JS Schepers & WR Raun. 2008. Crop nitrogen requirement and fertilization. *In: JS Schepers; WR Raun (eds). Nitrogen in Agricultural Systems.* Agronomy. Monograph 49. ASA-CSSA-SSSAJ. Madison. Pp. 563-612.
- Penman, HL. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proc. Roy. Soc. London* 193:120-146.
- Postma, R & CD Van Loon. 1996. Nitrogen losses by denitrification during the growth of potatoes. *En: Transactions of the 9th nitrogen workshop.* Braunschweig, Germany, September. pp. 535-538.
- Saffigna, PG; DR Keeney & CB Tanner. 1977. Nitrogen, chloride, and water balance with irrigated Russet Burbank potatoes in sandy soil. *Agron. J.* 69: 251-257.
- Sainz Rozas, H; HE Echeverría; GA Studdert & FH Andrade. 1997. Volatilización de amoníaco desde urea aplicado al cultivo de maíz bajo siembra directa. *Ci. Suelo* 15: 12-16.
- Saluzzo, JA; HE Echeverría; F Andrade & M Huarte. 1999. Nitrogen nutrition of potato cultivars differing in maturity. *J. Agron. Crop Sci.* 183: 157-165.
- Sanz-Cobena, A; TH Misselbrook; A Arce; J Mingot; J Diez & A Vallejo. 2008. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. *Agr. Ecosyst. Environ.* 126: 243-249.
- SAS Institute. 2001. Sistema SAS para Windows Versión liberada 6.12. SAS Inst. Cary, NC.
- Tanner, CB; GG Weis & D Curwen. 1982. Russet Burbank rooting in sandy soils with pans following deep plowing. *Am. J. Potato.* 59: 107-112.
- Waddell, JT; SC Gupta; JF Moncrief; CJ Rosen & DD Steele. 1999. Irrigation and nitrogen management effects on potato yield, tuber quality, and nitrogen uptake. *Agron. J.* 91: 991-997.
- Watson, CJ. 2000. Urease activity and inhibition-principle and practice. *In: Proceedings 454 of the International Fertiliser Society.* York. UK. 40p.
- Westermann, DT & GE Kleinkopf. 1985. Nitrogen requirements of potatoes. *Agron. J.* 77: 616-621.
- Zebarth, BJ & CJ Rosen. 2007. Research perspective on nitrogen BMP development for potato. *Am. J. Potato Res.* 84:3-18.
- Zebarth, BJ; Y Leclerc & G Moreau. 2004. Rate and timing of nitrogen fertilization of Russet Burbank potato: Nitrogen use efficiency. *Can. J. Plant Sci.* 84: 845-854.
- Ziadi, N; C Grant; N Samson; J Nyiraneza; G Bélanger & LE Parent. 2011. Efficiency of controlled-release urea for a potato production system in Qubec, Canada. *Agron. J.* 103: 60-66.
- Zvomuya, F & CJ Rosen. 2001. Evaluation of polyolefin-coated urea for potato production on a sandy soil. *HortScience* 36: 1057-1060.