

PRODUCCIÓN DE CEBADA (*Hordeum vulgare* L.) CON UREA NORMAL Y POLIMERIZADA EN PINTAG, QUITO, ECUADOR¹

Andrea C. Lema-Aguirre², Emilio R. Basantes-Morales², José L. Pantoja-Guamán³

RESUMEN

Producción de cebada (*Hordeum vulgare* L.) con urea normal y polimerizada en Pintag, Quito, Ecuador. El objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta de la producción de cebada a la fertilización nitrogenada (FN) y el impacto de esta en el contenido proteico del grano y la disponibilidad de nutrientes del suelo. El estudio se llevó a cabo en dos sitios de la Hacienda Valencia, en la localidad de Pintag, Quito, Ecuador, entre marzo 2014 y febrero 2015. Se utilizó la variedad INIAP Cañicapa 2003, y la FN se efectuó con urea normal y polimerizada (urea + tioposfato de N-n-butiltriamida). Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones en un arreglo de parcelas divididas [la urea (normal o polimerizada) fue la parcela principal y la FN (0, 30, 60, 90, 120, y 150 kg N/ha) la sub-parcela]. Se utilizó 110 kg/ha de semilla; 50% de la FN se aplicó tres semanas después de la siembra (al voleo) y 50% a las ocho semanas. El tipo de urea no afectó la producción ($p>0,10$), aunque el promedio fue diferente entre los dos sitios (4,33 y 2,08 t/ha para los sitios 1 y 2, respectivamente). El exceso de lluvia pudo limitar el efecto del tipo de urea. En promedio se obtuvo una respuesta cuadrática a la FN, con una dosis óptima de N (DON) de 90 kg N/ha y una producción de 3,41 t/ha. Esta DON fue similar a las dosis de N recomendadas para cebada en Ecuador. La FN aumentó el contenido de proteína en el grano hasta 14,50% ($p<0,01$) y acidificó el suelo, porque la nitrificación de urea produce H⁺.

Palabras clave: fertilización nitrogenada, contenido de proteína, cereales, compuesto orgánico del nitrógeno.

ABSTRACT

Barley (*Hordeum vulgare* L.) yield with normal and coated urea in Pintag, Quito, Ecuador. The objective of this investigation was to evaluate the response of barley production to nitrogenized fertilization (NF) and its impact on the protein content of the grain and the availability of nutrients on the soil. The study was carried out in two sites in Hacienda Valencia, in Pintag, Quito, Ecuador, between March 2014 and February 2015. A variety of INIAP Cañicapa 2003 was used, and the NF was done with normal urea and polymerized (urea + tiophosphate of N-n-butyltriamide). An experimental design of randomized full blocks in four repetitions of divided lots [the urea (normal and polymerized) was used in the main lot and the NF (0, 30, 60, 90, 120, y 150 kg N/ha) in the sub-lot]. 110 kg/ha of seed was used; 50% of the NF was applied three weeks after planting (broadcast) and 50% eight weeks after. The type of urea did not affect the production ($p>0,10$), although the average was different between two sites (4,33 y 2,08 t/ha for sites 1 and 2, respectively). Excess of rain could have limit the effect on the urea type. On average a quadratic response to NF was obtained, with an optimum dose of N (DON) of 90 kg N/ha and a production of 3,41 t/ha. This DON was similar to the dose of N recommended for barley in Ecuador. The NF augmented the protein content up to 14,50% ($p<0,01$) and acidified the ground, because the urea nitrification produces H⁺.

Keywords: coated urea, nitrogen fertilization, protein content, cereals, organic nitrogen compound.

¹ Recibido: 31 de marzo, 2016. Aceptado: 22 de junio, 2016. Este trabajo formó parte del proyecto de investigación realizado con el financiamiento del proyecto PROMETEO del Gobierno de la República del Ecuador, que se ejecuta a través de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), Ecuador.

² Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura. Edificio académico, Bloque A, 4to piso. Av. General Rumiñahui, S/N, y Unidad Nacional. Código postal: 1715231B. Sangolquí, Ecuador. aclema@espe.edu.ec, erbasantes@espe.edu.ec

³ Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT). Ecuador. joseluispantoja@outlook.com (autor para correspondencia).



INTRODUCCIÓN

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) es el quinto cereal de mayor producción a nivel mundial (INEC, 2010); con el 50% del área y 63% del volumen de producción concentrados en Europa, donde se produce noventa millones de t/año (Abbassian, 2010), con una productividad promedio de 4,00 t/ha (INEC, 2010). A pesar de que hay una tendencia leve en la reducción de la demanda mundial de este cereal (Abbassian, 2010), ya sea por limitaciones agronómicas y económicas que controlan el mercado o por el repunte en la demanda de arroz (*Oryza sativa* L.) y maíz (*Zea mays* L.) (Castro et al., 2011), se mantiene como un insumo importante para la industria alimentaria, en especial para la industria cervecera.

En Ecuador, las condiciones agroclimáticas para la producción de cebada incluyen zonas de 2400 - 3300 msnm, precipitaciones de 400 - 600 mm durante el ciclo de cultivo, suelos franco arenoso y profundos con buen drenaje, y con un pH de 6,5 - 7,5 (Coronel y Jiménez, 2011). El 40% de la producción ecuatoriana se usa para producir cerveza, mientras que los excedentes se comercializan en mercados locales y sirven para generar subproductos para la alimentación animal y humana (Garófalo et al., 2010). A pesar de la importancia de la cebada para la economía agrícola, en Ecuador se producen solo 24 000 t/año, con una productividad promedio de 0,60 t/ha, y con costos de producción de hasta US\$ 700 por hectárea (INEC, 2010). Es por ello que el país importa hasta 40 000 t/año, por un valor superior a US\$ 10 millones, para suplir la demanda de la industria cervecera (BCE, 2014).

El N es el elemento más limitante para la producción de cereales (Arnall et al., 2009; Scharf, 2015), porque contribuye a la acumulación de biomasa, forma la molécula de clorofila y participa del balance nutricional de la planta al facilitar la absorción y asimilación de otros nutrientes como el K⁺ (López et al., 2009). En la cebada, la disponibilidad de N es importante, sobre todo en las etapas de mayor demanda que son el ahijado y el encañado (López-Bellido, 2013). Una adecuada disponibilidad de N puede incrementar no solo la calidad del grano, en especial el contenido de proteína, sino también el nivel de producción hasta un 45% (Reussi-Calvo et al., 2006; Ferraris et al., 2008; Blackshaw et al., 2011; Morojele y Kilian, 2015). Aunque para la industria cervecera se prefieren variedades de cebada

con contenidos de proteína menores al 14,00% y alto contenido de almidón (CN y MAGAP, s.f.).

La cebada requiere 25 kg N/t de grano producido (García-Serrano et al., 2009), pero Mahler y Guy (2005) reportaron requerimientos de hasta 35 kg N/t de grano. Sin embargo, con un manejo intensivo y alta producción, la cebada absorbe 35 kg/ha solo después de la floración (HGCA y SEERAD, 2006), por lo que el requerimiento total puede ser mayor a este valor. Moreno et al. (2003) indicaron que una producción óptima de cebada requiere 120 kg N/ha como fertilizante, y que aplicaciones superiores a 150 kg N/ha resultan en excesivo costo de producción y disminución en la productividad. En cambio, si se desea maximizar la rentabilidad del cultivo, Jankovic et al. (2011) sugirieron fertilizaciones entre 50 y 110 kg N/ha, y Hajighasemi et al. (2016) indicaron que solo se debe aplicar 100 kg N/ha.

Debido a que la mayoría de suelos de Ecuador no proporcionan todo el N que el cultivo requiere, debido a la lenta liberación de N a partir de la materia orgánica, se necesita una adecuada fertilización nitrogenada (FN) para corregir y completar la nutrición del cultivo (López et al., 2009). Para una producción de 3,00 - 4,00 t/ha de grano de cebada se deberían aplicar entre 45 - 60 kg N/ha (Falconfi et al., 2010), aunque las compañías cerveceras que conforman el consorcio de Cervecería Nacional y el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) recomiendan aplicaciones que varían de 0 (cuando se rota con el cultivo de leguminosas) a 90 kg N/ha (en suelos con bajo contenido de materia orgánica) (CN y MAGAP, s.f.). Las variaciones con respecto a la dosis de FN, se deben a que la extracción de N por parte del cultivo depende de la rotación de cultivos, tipo de suelo y contenido de materia orgánica, y a la humedad disponible para transportar el N en el sistema suelo-planta (Garófalo y Calvache, 2012; Stevens et al., 2015). Sin embargo, aún con una adecuada fertilización, el país no alcanza la productividad de latitudes templadas donde se reporta producciones de 4,00 - 7,00 t/ha (Moreno et al., 2003; Halvorson y Reule, 2007; Malecka y Blechareczyk, 2008; Alley et al., 2009; Blackshaw et al., 2011).

La urea es el fertilizante nitrogenado de mayor uso a nivel mundial (Aguar y Herrera, 2011; Frame et al., 2014), y en Ecuador es la fuente de N más utilizada para la producción de cebada; sin embargo, no hay una industria productora de urea que pueda abastecer el

mercado local, por lo que este fertilizante se importa por un valor cercano a los US\$ 200 millones al año (BCE, 2015).

Cuando la urea entra en contacto con el suelo, su humedad se hidroliza (amonifica) para convertirse en NH_4^+ ; luego el NH_4^+ se transforma en NO_2^- y NO_3^- (nitrificación) (Tenuta y Beauchamp, 2000; Frame et al., 2014). Sin embargo, se ha reportado una baja eficiencia en el uso del N por parte de los cereales cuando se utiliza urea como fertilizante (Muurinen et al., 2007; Manlla et al., 2012). La eficiencia se reduce por la volatilización del NH_3 (Frame et al., 2012), desnitrificación (que genera N_2 , NO , y N_2O) (Wilson et al., 2015), lixiviación y escorrentía de NO_2^- y NO_3^- , fijación de NH_4^+ , e inmovilización (Arregui et al., 2005; García-Serrano et al., 2009; Gao et al., 2015; Thapa et al., 2015). Además, la aplicación excesiva y frecuente de N resulta en menor disponibilidad natural del N del suelo en el largo plazo, porque se acelera la descomposición de la materia orgánica, lo que puede resultar en mayor requerimiento de FN (Mulvaney et al., 2009).

En Ecuador la fertilización de la cebada es deficiente porque muchos agricultores no aplican fertilizante, mientras que otros aplican sin hacer un manejo adecuado del suelo y el cultivo, por lo que, se exceden en los requerimientos de fertilización. Esto resulta en baja eficiencia en el uso del fertilizante e incrementa la contaminación ambiental (Brinkman, 1999; Moreno et al., 2003; Prasad y Shivay, 2015). De hecho, en la mayoría de países en vías de desarrollo, como Ecuador, hay una tendencia creciente en el uso de fertilizantes nitrogenados para incrementar la producción de cereales, aunque poco se conoce sobre la eficiencia en el uso del fertilizante y sobre la magnitud de las pérdidas de N por procesos naturales (Prasad y Shivay, 2015).

Una de las alternativas para reducir la pérdida del N proveniente de la urea y mejorar la eficiencia en el uso de N, es el uso de fertilizantes nitrogenados de lenta liberación (IDEA, 2007; Prasad y Shivay, 2015) como la urea polimerizada, que es la urea normal revestida con un polímero (Bierman et al., 2015; Gao et al., 2015). La urea polimerizada que se comercializa en Ecuador está revestida con tiofosfato de N-n-butiltriamida (NBPT) (Garzón y Cárdenas, 2013). Esta cobertura retrasa la hidrólisis, lo que resulta en una liberación más lenta de N al sistema suelo-planta, mejora la eficiencia en el uso de N, y reduce las aplicaciones de fertilizante (Hauck, 1985). Al usar urea

polimerizada, la dosis óptima de N (DON), desde un punto de vista económico, puede bajar hasta un 50% (Patil et al., 2010), y por eso el 20% de la urea que se importa es del tipo polimerizada (BCE, 2015). Además, el uso de urea polimerizada puede incrementar la producción en un 53% en comparación con la urea normal (Fontanetto et al., 2011), y en algunas casos se observa incluso un aumento en el contenido de proteína en el grano (Blackshaw et al., 2011).

A pesar de las ventajas que se reportan con el uso de urea polimerizada, en el país todavía hay escepticismo en su uso por parte de los agricultores, porque no creen que el costo adicional en el que se incurre para comprar la urea polimerizada se compense con una mayor producción y mejor eficiencia en el uso de N. Además, su precio es 20% más alto que el de la urea normal (SINAGAP, 2015), no hay suficientes investigaciones de FN en cebada, y las existentes se han limitado a la evaluación de resultados mediante un análisis de varianza (ANDEVA). Aunque esta metodología es útil, no permite identificar de forma clara la respuesta del cultivo a la fertilización (ej., lineal, lineal platea, cuadrática, cuadrática platea, exponencial, o la ausencia de respuesta).

El uso de modelos matemáticos (regresiones) puede ser una mejor alternativa para explicar la respuesta de los cultivos a la fertilización (Cerrato y Blackmer, 1990). A partir de esta metodología se puede determinar la dosis óptima de fertilización (DOF) y la producción que se alcanza con la DOF (PDOF). Esto es importante si se desea conocer la DON y la producción que se puede alcanzar con la DON (PDON) para aumentar la eficiencia de la FN. El uso de regresiones también permite incluir otros tratamientos (e.g., tipo de fertilizante, tipo de labranza, cultivar o variedad, otro nutriente). Al usar una metodología que permite determinar la dosis que maximiza la producción y reduce los problemas ambientales, también se optimiza la rentabilidad del cultivo (Pagani et al., 2009). Al determinar la DON en la cebada se puede mejorar la producción, reducir los costos de esta al incrementar la eficiencia en el uso del N, mejorar el valor nutricional del grano y mitigar el impacto ambiental por el uso de fertilizantes nitrogenados. Por eso, esta investigación tuvo como objetivo evaluar la respuesta de la producción de cebada a la fertilización nitrogenada (FN) y el impacto de esta en el contenido proteico del grano y la disponibilidad de nutrientes del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de la investigación

Esta investigación se desarrolló en dos sitios experimentales de la Hacienda Valencia, que administra la carrera de Ingeniería Agropecuaria de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE). Esta hacienda se encuentra en la parroquia Pintag, cantón Quito, provincia de Pichincha, Ecuador. Los sitios se localizaron en 0°22'36"S y 78°23'34"O (sitio 1), y 0°23'29"S y 78°23'14"O (sitio 2). Estos sitios estaban separados entre sí a una distancia aproximada de 2 km. El sitio 1 estaba a 2820 msnm y el sitio 2 a 2940 msnm. En el sitio 1 el cultivo se sembró el 10 de marzo de 2014 y se cosechó el 31 de agosto de 2014 (desde finales de la época lluviosa hasta mediados de la época seca), y en el sitio 2 la siembra se hizo el 16 de septiembre de 2014 y la cosecha se hizo el 21 de febrero de 2015 (desde finales de la época seca hasta mediados de la época lluviosa). De acuerdo con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la zona se caracteriza por tener un clima de tipo templado frío, con una temperatura media de 14 °C y una precipitación promedio anual de 1300 mm. La mayor parte de las precipitaciones ocurren entre octubre y mayo.

Manejo del cultivo

Para esta investigación se seleccionó la variedad INIAP Cañicapa 2003, debido a que cubre cerca del 60% de la demanda para la producción de cerveza en Ecuador (Grey, 2013). El cultivo antecesor fue papa (*Solanum tuberosum*), con producción de tipo convencional. La siembra de la cebada se realizó dos semanas después de la cosecha de la papa en cada sitio; durante ese periodo el crecimiento de malezas fue bajo y cubrió menos del 5% del suelo. Por esa razón, no se aplicaron herbicidas previo a la siembra, y la preparación presiembra del suelo fue suficiente con dos pases de rastra pesada a una profundidad media de 0,20 m. La siembra se realizó después de la labranza, al voleo, con una densidad de 110 kg semilla/ha. Luego se necesitó un pase de rastra liviana, a una profundidad media de 0,05 m, para cubrir la semilla. Por prevención, y con base en antecedentes históricos de la zona de cultivo, dos meses después de la

siembra, en los dos sitios, se fumigó con el fungicida oxicarboxin con una dosis de 300 g/100 l de agua para el control de roya (*Puccinia hordei*) de la cebada, y 2, 4-D éster en dosis de 400 ml/ha para el control de malezas de hoja ancha.

Los datos de precipitación y temperatura se recopilaban en la estación meteorológica de la carrera de Ingeniería Agropecuaria de la ESPE, que se localiza a 3 km de cada sitio experimental, y que es monitoreada por el INAMHI. La variedad INIAP Cañicapa 2003 requiere precipitaciones de 400 mm durante el ciclo del cultivo (Rivadeneira et al., 2003). Con respecto a la temperatura, durante la germinación la cebada requiere una temperatura mínima de 6 °C, mientras que la floración y maduración requieren una temperatura de 15 - 20 °C (Castañeda-Saucedo et al., 2009). Con temperaturas mayores a 20 °C disminuye la germinación, y si no hay suficiente humedad en el suelo también disminuye la producción (Rivadeneira et al., 2003).

Muestreo inicial de suelos

Se realizó un muestreo inicial del suelo para conocer sus condiciones nutricionales antes de establecer la investigación. Se recolectaron de forma aleatoria veinte submuestras de toda el área en cada sitio experimental, a una profundidad de 0,20 m. Se mezcló todo el suelo recolectado y 1 kg de esa mezcla se usó para análisis en el laboratorio de suelos de la Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD). Ahí la muestra se secó a 40 °C con circulación continua de aire por 48 h, luego se trituro y pasó por un tamiz de 2 mm para eliminar impurezas, raíces, y rocas. Los análisis se realizaron siguiendo la metodología descrita por Carrera (2008), estos incluyeron la determinación de la textura del suelo mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962); el pH se evaluó con el potenciómetro al utilizar una relación 1:2 suelo:agua; la materia orgánica y el N se evaluaron mediante titulación con el método volumétrico. Para determinar la disponibilidad del P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe, Mn, Cu, y Zn se realizó la extracción con el método Olsen modificado; luego el P se analizó mediante colorimetría y los demás nutrientes se analizaron con el equipo de absorción atómica.

Diseño experimental y aplicación de tratamientos

En cada sitio se utilizó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) en un arreglo de parcelas divididas con cuatro repeticiones. Los tratamientos incluyeron el tipo de urea (normal y polimerizada) como parcela principal y los seis niveles de FN (0, 30, 60, 90, 120, y 150 kg/ha) como subparcela. Cada subparcela fue de 64 m² (8×8 m), con un total de 48 parcelas por sitio. La FN se hizo al voleo, aplicando el 50% de cada dosis tres semanas después de la siembra, y el 50% restante se aplicó ocho semanas después de la siembra.

VARIABLES EVALUADAS

En cada sitio experimental se evaluaron tres variables: a) la producción de grano de cebada con respecto a la FN, b) el contenido de proteína en el grano, y c) el efecto de la FN sobre las propiedades químicas del suelo al final del ciclo de cultivo. El análisis del contenido de proteína en el grano y el análisis de suelo durante la cosecha del cultivo se realizaron solo para las subparcelas que recibieron 0, 90, y 150 kg N/ha.

Para evaluar la producción se recolectaron de forma manual tres submuestras de 1,00 m² en cada subparcela (3,00 m² en total). Para ello se colocó de forma aleatoria un marco de plástico de tipo PVC de 1 m² en tres lugares diferentes dentro de cada subparcela y se cortó la cebada a nivel del suelo. Las tres submuestras se juntaron para formar una muestra homogénea. Estas se secaron a temperatura ambiente por diez días, para luego separar el grano de la espiga con una trilladora. El grano recolectado se volvió a secar a temperatura ambiente hasta alcanzar una humedad promedio y estable de aproximadamente 10%. El peso del grano que se obtuvo de cada subparcela se corrigió para obtener la producción en t/ha.

Para el análisis del contenido de proteína se tomaron submuestras de 20 g de grano de las subparcelas seleccionadas, las cuales se enviaron para análisis al laboratorio de AGROCALIDAD. Las muestras se secaron a 60 °C por 48 h con circulación permanente de aire y luego se molieron (Shirin et al., 2008). En el análisis se determinó el contenido de N mediante el método Kjeldahl (García y Fernández, s.f.), el valor que se obtuvo, se multiplicó por el factor

de 6,25 para obtener el contenido de proteína (De García y Gallardo, 2011).

Para el muestreo del suelo al final del ciclo de cultivo, se recolectaron cuatro submuestras en forma aleatoria de cada subparcela a 0,20 m de profundidad. Estas se mezclaron para obtener una muestra homogénea, y 1,00 kg de esa mezcla se analizó en AGROCALIDAD con los mismos métodos que se utilizó para el análisis inicial, pero sin incluir el análisis de textura.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Análisis de varianza

En virtud de que la cebada se estableció en épocas diferentes para cada sitio, los ANDEVA para las variables evaluadas se hicieron por separado para cada sitio. Para ello, los tratamientos de tipo de urea y niveles de FN se consideraron factores fijos, mientras que los bloques se consideraron aleatorios. Para realizar los ANDEVA se utilizó el procedimiento PROC MIXED del programa estadístico SAS (SAS, 2009). Las diferencias entre los tratamientos se determinaron con la opción DIFF en PROC MIXED, con el uso del procedimiento de diferencia mínima significativa (DMS), y fueron consideradas significativas con un $p \leq 0,10$.

Respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada

Para evaluar la respuesta de la producción de grano de cebada a la FN (lineal, lineal platea, cuadrática, cuadrática platea, exponencial), se utilizaron los procedimientos PROC REG o PROC NLIN de SAS. Esta evaluación se hizo primero para cada sitio, y luego combinando los resultados de producción de los dos sitios para obtener la respuesta promedio y compararla con las recomendaciones de FN que se manejan en Ecuador. Las regresiones que se obtuvieron se consideraron significativas cuando $p \leq 0,10$, pero cuando varias regresiones fueron significativas, se seleccionó aquella con el coeficiente de determinación (r^2) más alto con base en la recomendación de Cerrato y Blackmer (1990). En los resultados, para el sitio 1 y para el promedio de los dos sitios, se identificó una respuesta de tipo cuadrática (ecuación 2), mientras que al haber una interacción significativa entre el tipo de urea y la FN con respecto a la producción de grano para el sitio 2 (ver

más adelante), se identificó una respuesta de tipo lineal (ecuación 1) para la urea normal y de tipo cuadrática platea (ecuaciones 2 y 3) para la urea polimerizada.

$$y = a + b \quad (1)$$

$$y = a + bx + cx^2 \quad (2)$$

$$y = a + bx + cx^2 \text{ si } x < x_o \quad (3)$$

$$y = a + bx_o + cx_o^2 \text{ si } x \geq x_o \quad (4)$$

En estas regresiones, y representa la respuesta de la producción de cebada (t/ha) a la FN, x la dosis de FN (kg N/ha), a (intercepto), b (coeficiente lineal), c (coeficiente cuadrático) y x_o (dosis de FN en el punto de unión) son las constantes de las regresiones. La dosis óptima de N (DON) y la producción que se puede alcanzar con esa DON (PDON), se determinaron al resolver para x la regresión correspondiente, utilizando una relación de 0,002706 que resulta al dividir el precio de 1 kg de N (en US\$) entre el precio de una tonelada de grano (Cerrato y Blackmer, 1990). Para ello se utilizaron precios referenciales de US\$ 30 por un saco de 50 kg de urea y US\$ 482 por tonelada de grano (US\$ 22 por un saco de 45 kg) (MAGAP, 2015).

Correlación entre producción y contenido de proteína

También se evaluó la relación entre el nivel de producción de grano y el contenido de proteína al calcular el coeficiente de correlación de Pearson con el procedimiento PROC CORR de SAS, y utilizando los datos de los dos sitios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis inicial de suelos

El análisis inicial de suelos mostró que el sitio 1 tenía una textura franca con una composición de 44, 44, y 12% de arena, limo y arcilla, respectivamente; mientras que el suelo del sitio 2 tenía una textura franco arenosa con una composición de 60, 32, y 8% de arena, limo y arcilla, respectivamente (Cuadro 1). Los suelos con textura franca y sin problemas de compactación, por lo general, tienen una alta capacidad para retener agua y nutrientes, pero altas precipitaciones durante el ciclo de cultivo pueden resultar en pérdidas de nutrientes por lixiviación; mientras que los suelos con textura franco arenosa retienen poca humedad, y por su naturaleza poseen fertilidad media, alta porosidad, y percolación considerable que puede resultar en lixiviación (Schjonning et al., 1994). El pH en los dos sitios fue ligeramente ácido, pero es considerado óptimo para el crecimiento y desarrollo de la cebada (Garófalo et al., 2010). La materia orgánica se encontró en niveles altos (> 5%), pero se considera que la liberación de N es lenta, debido a que la zona tiene un clima templado frío, por lo que las aplicaciones históricas de FN para producir cebada en los dos sitios han sido cercanas a los 90 kg N/ha, en una mezcla que incluye urea y el fertilizante 15-15-15. El contenido de elementos minerales reportó concentraciones óptimas o altas de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe, Mn, Zn y Cu, por lo que estos nutrientes no se consideraron en esta investigación y no se necesitó realizar fertilizaciones correctivas para suplirlos.

Cuadro 1. Análisis inicial de suelo previo al establecimiento de la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, en dos sitios de la Hacienda Valencia de la Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014.

Table 1. Initial soil's analysis before establishment of barley, variety INIAP Cañicapa 2003, in two sites of the Valencia Farm. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014.

Localización	pH	M.O.*	N	K	Ca	Mg	P	Fe	Mn	Cu	Zn	Textura
sitio 1	5,90	5,06	0,25	433	1560	292	43	928	28	10	4	Franca
sitio 2	6,20	5,14	0,26	232	1827	298	28	588	21	18	5	Franco arenosa
Rango óptimo**	5,80-6,50	1,00-2,00	0,16-0,30	80-160	200-600	40-80	11-20	21-40	6-15	1-4	3-6	

* M.O.: material orgánica/ M.O.: organic matter.

** Rango óptimo que maneja la Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD), institución rectora de la Red de Laboratorios de Suelos del Ecuador (RELASE) / Optimum range according to the Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD), leading institution of the Red de Laboratorios de Suelos del Ecuador (RELASE).

Clima

En los dos sitios la precipitación fue mayor a los requerimientos del cultivo (600 y 650 mm durante el ciclo de cultivo para los sitios 1 y 2, respectivamente). En el sitio 1 se observó que en el mes de marzo (luego de la siembra) y en mayo las precipitaciones fueron altas, llegando a 260 mm/mes (Figura 1A), mientras que en el sitio 2 las precipitaciones fueron más frecuentes y abundantes hacia el final del ciclo de cultivo, en especial en los meses de diciembre y febrero (Figura 1C). Debido a que en los dos sitios el nivel de precipitación superó los requerimientos del cultivo, esto pudo afectar la respuesta del cultivo a la FN. Las excesivas precipitaciones provocan lixiviación (Perdomo et al., 2011) o desnitrificación (Wilson et al., 2015), lo que puede resultar en menor disponibilidad de N y menor producción del cultivo. Los suelos con cantidades considerables de arena tienden a ser

porosos y esto facilita la lixiviación de los nutrientes en cantidades mayores a los suelos donde predomina la arcilla (Mengel y Kirkby, 2001), algo que pudo influir en los resultados de producción del cultivo y la respuesta a la FN en el sitio 2 (ver más adelante).

La temperatura promedio en los dos sitios fue de 14 °C (Figuras 1B y 1D), excepto en octubre en el sitio 2, donde la temperatura promedio fue ½ °C inferior al resto del ciclo de cultivo. Esta temperatura es ligeramente menor a lo que se recomienda para el cultivo, en especial para la etapa de maduración (Castañeda-Saucedo et al., 2009), aunque no se espera un efecto significativo en la producción o contenido de proteína en el grano (CN y MAGAP, s.f.).

Producción

Se obtuvo una producción promedio de 4,33 t/ha en el sitio 1 y de 2,08 t/ha en el sitio 2 (Cuadro 2). En Ecuador la producción de cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, es por lo general de 3,00 t/ha bajo un sistema de tipo convencional, por lo que en el sitio 1 se obtuvo 45% más de esa producción y en el sitio 2 un 30% menos. La diferencia en producción entre los dos sitios pudo deberse a la excesiva precipitación que se tuvo durante la investigación. Esto pudo generar procesos temporales de desnitrificación en los meses más lluviosos (Wilson et al., 2015), en especial en el sitio 2, donde también la textura más arenosa pudo resultar en mayor lixiviación de N en la etapa de maduración del cultivo. Esto coincide con una investigación realizada con siete cultivares de cebada en Victoria, Australia, donde se reportó que con precipitaciones mayores a 170 mm/mes y bajas temperaturas la producción disminuyó hasta un 12% (Eagles et al., 1995).

El tipo de urea no aumentó la producción en ninguno de los dos sitios ($p = 0,48$ y $0,34$ para los sitios 1 y 2, respectivamente) (Cuadro 2). La limitada respuesta de la cebada al tipo de urea, podría atribuirse a que las altas precipitaciones provocaron lixiviación de N al inicio del ciclo de cultivo en el sitio 1 y al final del ciclo en el sitio 2. Similares resultados se observaron en una investigación realizada en Colorado, USA, donde la urea polimerizada resultó en menores pérdidas de N y mostró potencial para incrementar la eficiencia en el uso de este nutriente, pero no se reflejó en un aumento en la producción de cebada (Shoji et

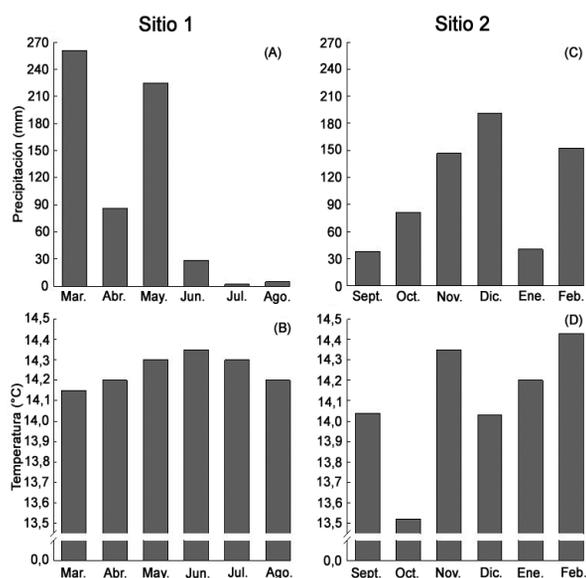


Figura 1. Datos climatológicos de la Hacienda Valencia del sitio 1 (A y B) y sitio 2 (C y D) donde se cultivó la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015.

Figure 1. Weather data of the Valencia Farm, site 1 (A y B) and site 2 (C y D), where barley, variety INIAP Cañicapa 2003, was grown. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015.

al., 2001). En cambio, en una investigación sobre FN en veinte sitios-ciclos diferentes de Canadá, solo se encontró mayor producción de cebada en tres sitios-ciclos con el uso de urea polimerizada (Blackshaw et al., 2011); en esta investigación se concluyó que si el suelo no se satura y la temperatura es relativamente baja, la liberación de N de la urea polimerizada es lenta y eso resulta en una baja disponibilidad de N en etapas tempranas del cultivo, lo que puede reflejarse en una baja producción de cebada (Blackshaw et al., 2011).

La FN aumentó la producción de cebada en el sitio 1 ($p < 0,01$), pero no lo hizo en el sitio 2 ($p = 0,33$) (Cuadro 2). Para Prystupa et al. (2008), una adecuada FN en las primeras etapas del cultivo que garantice la disponibilidad de 60 - 90 kg N/ha, puede mejorar el crecimiento y desarrollo de la planta, lo que resulta en mayores producciones. Pero esta respuesta puede verse afectada por el exceso de precipitación o riego

que ocasiona pérdidas de N (Thapa et al., 2015). Para Stevens et al. (2015), quienes realizaron investigaciones de FN en cebada en doce sitios desde el año 2005 hasta el 2011 en North Dakota, USA, el nivel de producción no solo resulta de la FN, sino también del manejo del riego, la labranza, y la rotación de cultivos. Según estos autores, la rotación con leguminosas reduce la FN y mejora la producción de grano.

Respuesta a la fertilización nitrogenada

En el sitio 1 no hubo interacción entre el tipo de urea y la FN ($p = 0,16$), por lo que al promediar los resultados entre las dos ureas se obtuvo una respuesta de tipo cuadrática a la FN ($p = 0,03$; $r^2 = 0,91$), con la que se pudo determinar una DON de 90 kg N/ha y una PDON de 4,57 t/ha (Figura 2). Aunque la producción es más alta que la reportada para la

Cuadro 2. Producción de cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, en dos sitios de la Hacienda Valencia. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015.

Table 2. Yield of barley, variety INIAP Cañicapa 2003, in two sites of the Valencia Farm. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014 - 2015.

Dosis de N	sitio 1		sitio 2	
	Urea normal	Urea polimerizada	Urea normal	Urea polimerizada
kg/ha	----- t/ha -----			
0	3,76 d*	3,81 d	1,74 cdef	1,52 ef
30	4,05 cd	4,21 bc	1,53 def	2,48 abcd
60	4,44 b	4,35 bc	1,65 cdef	2,36 abcde
90	4,44 b	4,50 b	2,01 bcdef	3,08 a
120	5,06 a	4,49 b	2,71 ab	1,30 f
150	4,43 b	4,42 b	2,01 bcdef	2,55 abc
Promedio de tipo de urea	4,36	4,30	1,94	2,21
Promedio de sitio		4,33		2,08
Fuente	----- p > F** -----			
Tipo urea (U)		0,48		0,34
Nitrógeno (N)		< 0,01		0,33
U × N		0,16		0,03

* Valores con la misma letra y dentro de un mismo sitio (urea normal y polimerizada) no fueron diferentes / Values with the same letter within a site (normal and coated urea) were not different.

** Los valores de $p \leq 0,10$ fueron significativos / Values of $p \leq 0,10$ were significant.

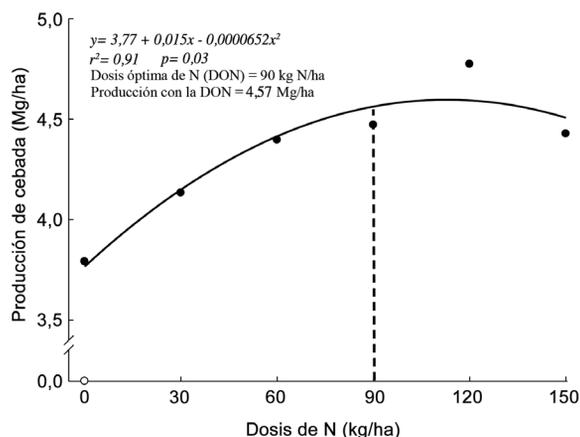


Figura 2. Respuesta de la producción de cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, a la fertilización nitrogenada en el sitio 1 de la Hacienda Valencia. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014 – 2015.

La línea entrecortada indica la dosis óptima de N y la producción que se obtiene con esa dosis.

Figure 2. Barley, variety INIAP Cañicapa 2003, yield response to N fertilization in site 1 of the Valencia Farm. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015. The discontinue line indicates the optimum N rate and the production obtained with that rate.

variedad INIAP Cañicapa 2003 (CN y MAGAP, s.f.), la DON fue similar a la dosis recomendada por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ente regulador del manejo de cultivos en Ecuador, y la dosis más alta recomendada por el consorcio de Cervecería Nacional (CN y MAGAP, s.f.), pero superior a las dosis de 45 - 60 kg N/ha que aplican muchos agricultores (Rivadeneira et al., 2003).

En el sitio 2 hubo una interacción significativa entre el tipo de urea y la FN ($p=0,03$), aunque las respuestas a la FN para cada tipo de urea no fueron significativas ($p>0,10$), pero mostraron tendencias diferentes entre sí (Figura 3). Para la urea normal se obtuvo una tendencia en la respuesta de tipo lineal creciente ($p=0,15$; $r^2=0,44$), misma que indicó que las dosis de FN utilizadas en este sitio fueron bajas con respecto a los requerimientos del cultivo, y no permitieron alcanzar la DON o calcular la PDON, resultado que refleja la alta pérdida de N, probablemente por la excesiva precipitación. Una

respuesta de tipo lineal en un estudio realizado en Karaj, Irán, la obtuvieron Hajjighasemi et al. (2016). En cambio, la urea polimerizada mostró una tendencia en la respuesta de tipo cuadrática platea con una DON de 25 kg N/ha y una PDON de 2,35 t/ha. Los resultados para la urea polimerizada en este sitio fueron inconsistentes con las recomendaciones de fertilización que maneja Cervecería Nacional. En algunos casos, la variabilidad climática y de manejo del cultivo tienen alta influencia en la producción del cultivo y esto puede resultar en respuestas no significativas a la FN (Hajjighasemi et al., 2016). La alta variabilidad en la respuesta a la FN en el sitio 2 fue un reflejo de la excesiva precipitación en este sitio durante la evaluación.

Diferentes respuestas de la cebada a la FN se han reportado en Montana, USA, en una evaluación que incluyó cuatro dosis de FN (0, 40, 80, y 120 kg N/ha), en cuatro sitios y con diferentes rotaciones de cultivos; en este caso, la DON varió de 75 a 130 kg N/ha según el sitio, y la PDON fue menor a 3,00 t/

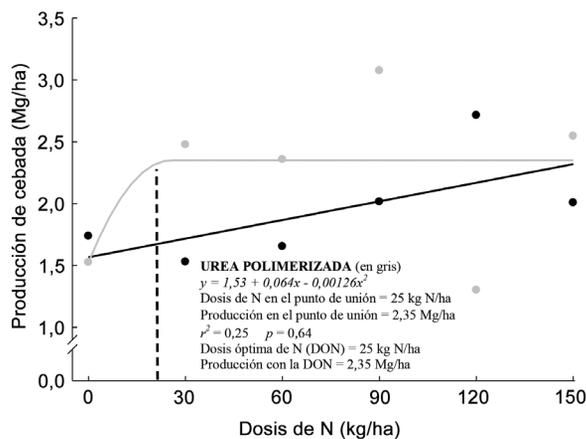


Figura 3. Respuesta de la producción de cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, a la fertilización nitrogenada en el sitio 2 de la Hacienda Valencia. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014 – 2015.

La línea entrecortada indica la dosis óptima de N y la producción que se obtiene con esa dosis.

Figure 3. Barley, variety INIAP Cañicapa 2003, yield response to N fertilization in site 2 of the Valencia Farm. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015. The discontinue line indicates the optimum N rate and the production obtained with that rate.

ha en todos los casos (Sainju et al., 2013). En este estudio, las diferencias climáticas y de textura del suelo, que afectan la disponibilidad de N en el corto y mediano plazo (Cárcova et al., 2004; Wilson et al., 2015), pudieron causar la diferencia en la respuesta de la producción de cebada a la FN entre los dos sitios, y entre los dos tipos de urea para el sitio 2.

A pesar de que cada sitio presenta una respuesta diferente de la producción de cebada a la FN, se promediaron los resultados para comparar la respuesta global de esta investigación con los resultados de otros trabajos. Este promedio dio como resultado una respuesta de tipo cuadrática ($p < 0,01$; $r^2 = 0,96$), con la que se determinó una DON de 90 kg N/ha y una PDON de 3,41 t/ha (Figura 4). Estas DON y PDON fueron similares a las reportadas por Rivadeneira et al. (2003) a través del INIAP en Ecuador. Alley et al. (2009) mencionaron que la FN debe ser mayor a 30 kg N/ha, pero no debe exceder los 100 kg N/ha, ya que podría resultar en una alta producción de biomasa que, bajo condiciones de alta precipitación y velocidad del viento,

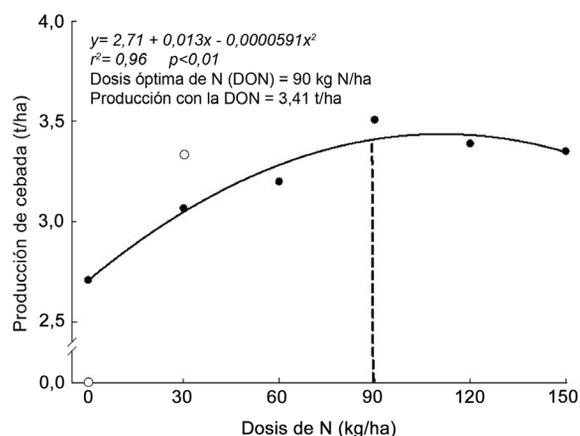


Figura 4. Respuesta promedio de la producción de cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, a la fertilización nitrogenada en la Hacienda Valencia. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015.

La línea entrecortada indica la dosis óptima de N y la producción que se obtiene con esa dosis.

Figure 4. Barley, variety INIAP Cañicapa 2003, average yield response to N fertilization in the Valencia Farm. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015.

The discontinue line indicates the optimum N rate and the production obtained with that rate.

puede ocasionar el acame de las plantas. Además, debido al alto impacto del fertilizante en el costo de producción, en los sistemas productivos de cereales como la cebada se deberían considerar rotaciones de cultivos con leguminosas para disminuir la DON (Mulvaney et al., 2009). Esto ayudaría a reducir los problemas ambientales que ocasiona la FN, en especial la que utiliza fertilizantes sintéticos como la urea.

Contenido de proteína en el grano

En Ecuador hay reportes que indican que la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, puede alcanzar hasta un 17,00% de contenido proteico, pero por lo general, esta variedad tiene entre 11,00 - 14,00% de proteína, con un promedio de 13,00% (Rivadeneira et al., 2003). En esta investigación el tipo de urea no afectó el contenido de proteína en el grano ($p = 0,65$ y $0,27$ para los sitios 1 y 2, respectivamente). Esto difiere de lo que encontraron otros investigadores (Blackshaw et al., 2011), quienes obtuvieron mayor contenido proteico con el uso de urea polimerizada en ocho de los veinte sitios que se evaluaron en Canadá. Sin embargo, en la actual investigación la FN resultó en mayor contenido proteico en los dos sitios ($p \leq 0,10$), llegando a 14,50% con la dosis de 150 kg N/ha (Figura 5). En el sitio 1 las dosis de 90 y 150 kg N/ha, resultaron en contenidos de proteína que no mostraron diferencia estadística, mientras que sí mostraron diferencia en el sitio 2. Las diferencias de clima, textura de suelo, y nivel de producción entre los dos sitios pudieron ocasionar estas variaciones del contenido de proteína. Sin embargo, los resultados de contenido proteico de esta investigación están dentro de los rangos presentados por Blackshaw et al. (2011) y de Stevens et al. (2015), quienes reportaron contenidos promedio de proteína de 11,00 - 17,00% con una FN entre 70 - 150 kg N/ha.

Altos niveles de FN producen un grano con mayor contenido proteico, lo cual es deseable en la industria de procesamiento de alimentos para animales y humanos (López et al., 2007). Sin embargo, contenidos altos de proteína no son deseables en la industria cervecera, porque bajan el contenido de glúcidos, y la fracción insoluble (hordeína y glutelina) puede producir turbidez en la cerveza (Giménez et al., 2007). De hecho, la industria cervecera prefiere altos contenidos de almidón y bajos contenidos de proteína (menores al 14,00%, ideales entre el 10,00 - 12,00%) para asegurar

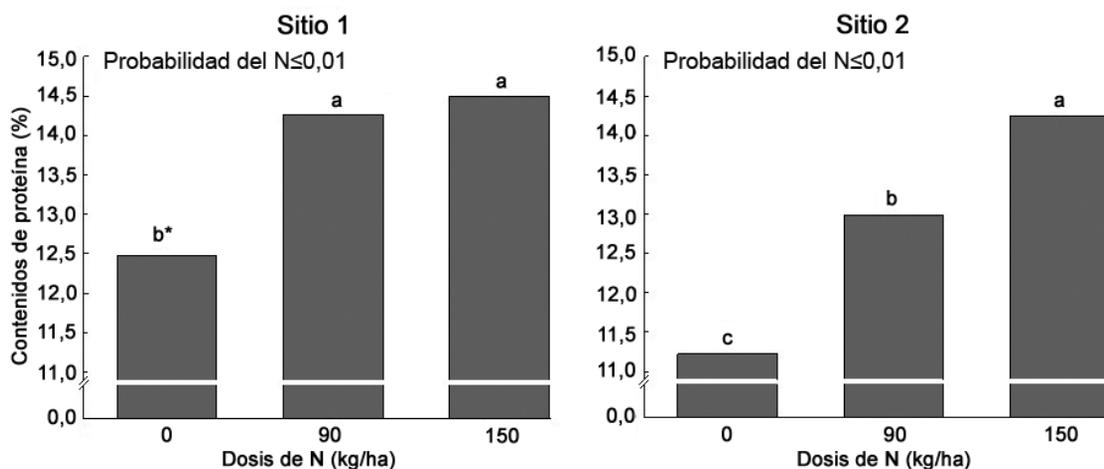


Figura 5. Contenido de proteína en el grano de cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, en dos sitios de la Hacienda Valencia. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015.

* Barras con la misma letra no son diferentes ($P \leq 0,10$).

Figure 5. Grain's protein content of barley, variety INIAP Cañicapa 2003, in two sites of the Valencia Farm. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014 – 2015.

* Bars with the same letter aren't different ($p \leq 0,10$).

la producción de espuma (CN y MAGAP, s.f.; Echagüe et al., 2001; Jankovic et al., 2011). Los resultados indican que si el destino de la cebada es la producción de cerveza, no se debería exceder la FN sobre el nivel de la DON, puesto que esto no solo resulta en el uso ineficiente del fertilizante, sino también en pérdidas económicas por el elevado contenido de proteína y menor contenido de almidón en el grano.

Al correlacionar el nivel de producción con el contenido de proteína en el grano, se encontró una relación positiva de tipo lineal ($p < 0,01$; $r^2 = 0,27$; coeficiente de Pearson = 0,52) (Figura 6). La relación fue baja, probablemente porque la cantidad de datos (48 en total) no fue lo suficientemente alta como para obtener una respuesta más significativa, y también por la variabilidad en la producción entre los sitios 1 y 2. Sin embargo, relaciones similares se han reportado en cebada y trigo (*Triticum aestivum*) en suelos deficientes en cuanto a la disponibilidad natural de N (Eagles et al., 1995; Jankovic et al., 2011; Hafeez, 2012; Sainju et al., 2013; Stevens et al., 2015). Pero esta respuesta contradice de lo expuesto por Blackshaw et al. (2011), quienes mencionaron que altos niveles de producción crean un efecto de dilución que resulta en menor contenido de N en el grano, lo que se refleja en menor contenido de proteína. Al parecer, cuando la disponibilidad natural de N en el suelo es baja, la FN

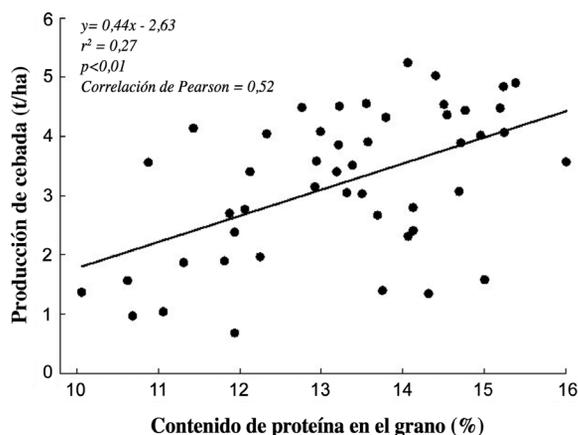


Figura 6. Correlación entre el contenido de proteína en el grano y la producción de cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, obtenida en la Hacienda Valencia. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015.

Figure 6. Correlation between grain's protein content and yield of barley, variety INIAP Cañicapa 2003, in the Valencia Farm. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015.

no solo promueve la producción de grano, sino que también incrementa su valor nutricional.

Análisis de suelo al final del ciclo del cultivo

Al final del ciclo del cultivo el tipo de urea no resultó en cambios significativos en el pH del suelo ($p=0,38$ en ambos sitios) (Cuadro 3). Esto es contradictorio con los resultados que reportan Bierman et al. (2015), quienes mencionaron que al haber una nitrificación más lenta de la urea polimerizada, los cambios de pH del suelo son menores en comparación con los que causa la urea normal. La leve, pero significativa disminución del pH del suelo con el aumento de la FN ($p<0,10$) en los dos sitios, pudo deberse a que los fertilizantes amoniacales como la urea generan acidez en el suelo, ya que en el proceso de nitrificación se libera H^+ (Bierman et al., 2015; Gao et al., 2015). Además, debido a su baja capacidad buffer, los suelos con texturas de tipo arenosa y franca tienden a acidificarse más rápido que los suelos arcillosos con la aplicación de fertilizantes (Perdomo et al., 2011), lo que explica el menor grado de acidificación en el suelo

del sitio 1 (suelo franco) en comparación con el sitio 2 (suelo franco arenoso), en el periodo de evaluación con la dosis más alta de FN (reducción de 0,10 en el sitio 1 y de 0,50 en el sitio 2). La acumulación de H^+ desplaza los cationes de las cargas del suelo, lo que intensifica la potencial pérdida por lixiviación de cationes básicos como el Ca^{2+} (Campillo y Sadzawka, 2010; Sierra, 2010). Sin embargo, la intensidad de la acidificación y su efecto sobre la disponibilidad de nutrientes dependen de factores como la cantidad de fertilizante que aplica el agricultor, el periodo de aplicación, el manejo del suelo, y el nivel de precipitación (Campillo y Sadzawka, 2010).

No se observó un efecto significativo del tipo de urea, o una interacción del tipo de urea con la FN en la mayoría de contenido de nutrientes del suelo, al final del ciclo del cultivo en ninguno de los dos sitios ($p>0,10$). Esto pudo deberse a que el periodo de evaluación fue relativamente corto (solo un ciclo de cultivo), y se necesitarían evaluaciones

Cuadro 3. Análisis final de suelo durante la cosecha de la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, en dos sitios de la Hacienda Valencia. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014-2015.

Table 3. Final soil's analysis during harvest of barley, variety INIAP Cañicapa 2003, in two sites of the Valencia Farm. Universidad de las Fuerzas Armadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2014 – 2015.

Dosis de N kg/ha	pH	M.O.*	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
		--- % ---									
sitio 1											
0	5,92 a**	5,54	0,28	35	336	1802	280	634	28	11	5,6
90	5,90 a	5,56	0,28	35	363	1780	277	645	31	13	5,2
150	5,80 b	5,53	0,28	37	334	1794	279	636	30	12	5,8
Promedio	5,87	5,55	0,28	35	344	1792	279	638	30	12	5,5
Fuente	p > F***										
Tipo urea (U)	0,38	0,85	0,81	0,62	0,75	0,53	0,86	0,26	0,99	0,16	0,69
Nitrógeno (N)	< 0,01	0,99	0,91	0,90	0,35	0,96	0,85	0,77	0,43	0,89	0,38
U x N	0,61	0,64	0,76	0,29	0,36	< 0,01	0,06	0,75	0,30	0,93	0,77
sitio 2											
0	5,83 a	6,62	0,33	32	263	2295	409 a	557	27	15	6,3
90	5,74 a	6,84	0,34	33	283	2173	393 ab	567	29	14	6,5
150	5,63 b	6,95	0,35	32	298	2167	374 b	578	33	14	6,2
Promedio	5,73	6,80	0,34	32	281	2211	392	567	30	14	6,3
Fuente	p > F										
Tipo urea (U)	0,38	0,82	0,85	0,58	0,72	0,32	0,41	1,00	0,93	0,28	0,85
Nitrógeno (N)	0,02	0,27	0,30	0,80	0,51	0,18	0,07	0,17	0,26	0,47	0,70
U x N	0,61	0,50	0,55	0,55	0,83	0,96	0,72	0,30	0,37	0,14	0,11

* M.O.: materia orgánica/ M.O.: organic matter.

** Valores seguidos de la misma letra en una misma columna no fueron diferentes / Values with the same letter within a column were not different.

*** Los valores de $p \leq 0,10$ fueron significativos / Values of $p \leq 0,10$ were significant.

a largo plazo con continuas aplicaciones de FN para encontrar diferencias significativas (Pantoja et al., 2015). Sin embargo, se observó una leve disminución en la disponibilidad de Mg^{2+} en el sitio 2 al aumentar la FN ($p=0,07$), pero no ocurrió lo mismo con otros nutrientes. Al no haber un efecto significativo de la FN en la producción de cebada para este sitio, se puede inferir que este resultado refleja cierta variabilidad espacial de la concentración de Mg^{2+} en el sitio 2 (Pantoja et al., 2015).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al patrocinio del Proyecto PROMETEO de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), de la República del Ecuador. Este agradecimiento se extiende al personal de campo de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), por apoyar con la preparación del suelo y manejo del cultivo en esta investigación. Para finalizar, se agradece a Santiago Taipe, estudiante de la carrera de Ingeniería Agropecuaria de la ESPE, por su apoyo en la recolección de datos del sitio 1.

LITERATURA CITADA

- Abbassian, A. 2010. Perspectivas alimentarias. FAO, Roma, ITA.
- Aguir, J., y P. Herrera. 2011. Adopción de la tecnología APBU por parte de tres pequeños agricultores de la asociación de agricultores de Baba, en las zonas Chontal-Guare, cantón Baba en sistemas de producción de arroz provincia de Los Ríos. Tesis de Bach., Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, ECU.
- Alley, M.M., T.H. Pridgen, D.E. Brann, J.L. Hammons, and R.L. Mulford. 2009. Nitrogen fertilization of winter barley: principles and recommendations. Virginia Polytechnic Institute and State University, VA, USA.
- Arnall, D., B. Tubaña, S. Holtz, K. Girma, and W. Raun. 2009. Relationship between nitrogen use efficiency and response index in winter wheat. *J. Plant Nutr.* 32:502-515.
- Arregui, L., I. Maeztu, y M. Quemada. 2005. Estimación del drenaje y lavado de nitratos en un sistema de cultivo de cereal de invierno en condiciones de secano y clima mediterráneo húmedo. *Estud. Zona No Saturada Suelo* 7:137-143.
- BCE (Banco Central del Ecuador). 2014. Importaciones de cebada. <http://www.bce.fin.ec/> (consultado 11 oct. 2015).
- BCE (Banco Central del Ecuador). 2015. Valores de importación de fertilizantes. <http://www.bce.fin.ec/> (consultado 12 dic. 2015).
- Bierman, P.M., J.E. Crants, and C.J. Rosen. 2015. Evaluation of a quick test to assess polymer-coated urea prill damage. *Agron. J.* 107:2381-2390.
- Blackshaw, R.E., X. Hao, K.N. Harker, J.T. O'Donovan, E.N. Johnson, and C.L. Vera. 2011. Barley productivity response to polymer-coated urea in a no-till production system. *Agron. J.* 103:1100-1105.
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54:464-465.
- Brinkman, R. 1999. Guía para el manejo eficiente de la nutrición de las plantas. FAO, Roma, ITA.
- Campillo, R., y A. Sadzawka. 2010. La acidificación de los suelos: origen y mecanismos involucrados. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, CHI.
- Cárcova, J., L.G. Abeledo, y M. López-Pereira. 2004. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En: E.H. Satorre et al., editores, Producción de cultivos de granos: bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, ARG. p. 73-98.
- Carrera, G. 2008. Avances de los resultados de la estandarización metodológica en la red de laboratorios de análisis de suelos del Ecuador. En: XI Congreso Ecuatoriano de las Ciencias del Suelo. 29-31 de oct. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Quito, ECU.
- Castañeda-Saucedo, M.C., C. López-Castañeda, M.T.B. Colinas de León, J.C. Molina-Moreno, y A. Hernández-Leiva. 2009. Rendimiento y calidad de la semilla de cebada y trigo en campo e invernadero. *INTERCIENCIA* 34:286-292.
- Castro, A., E. Hoffman, y L. Viega (eds.). 2011. Limitaciones para la productividad de trigo y cebada. Cooperación Iberoamericana de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Montevideo, URU.
- Cerrato, M.E., and A.M. Blackmer. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82:138-143.
- CN (Cervecería Nacional), y MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca). s.f. Guía del cultivo de cebada. CN-MAGAP, Quito, ECU.

- Coronel, J., y C. Jiménez. 2011. Guía práctica para los productores de cebada de la Sierra Sur. Boletín N° 404. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Quito, ECU.
- De García, M.S., y A. Gallardo. 2011. Guía para el análisis bromatológico de muestras de forrajes. Universidad de Panamá, PAN.
- Eagles, H.A., A.G. Bedggood, J.F. Panozzo, and P.J. Martin. 1995. Cultivar and environmental effects on malting quality in barley. *Aust. J. Agri. Res.* 46:831-844.
- Echagüe, M., M.R. Landiscini, S. Venanzi, y A. Lázari. 2001. Fertilización nitrogenada en cebada cervecera. *Info. Agron. Cono Sur* 10:1-9.
- Falconí, E., J. Garófalo, P. Llangari, y M. Espinoza. 2010. El cultivo de cebada: guía para la producción artesanal de semilla de calidad. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Quito, ECU.
- Ferraris, G.N., P. Prystupa, F.H. Gutiérrez-Boem, y L. Couretot. 2008. Fertilización en cebada cervecera. Pautas de manejo para la obtención de altos rendimientos con calidad. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, ARG.
- Fontanetto, H., S. Gambaudo, O. Keller, J. Albrecht, E. Weder, M. Sillón, G. Gianinetto, G. Meroi, G. Berrone, M. Meyer, C. Cánepa, y P. Ruffino. 2011. Formas de aplicación, dosis y fuentes nitrogenadas en cebada. En: Instituto Nacional de Tecnologías Agropecuarias (INTA), editor, Información técnica de trigo y otros cultivos de invierno, campaña 2011, publicación N°. 119. INTA, Buenos Aires, ARG. p. 93-99.
- Frame, W.H., M.M. Alley, W. Thomason, G. Whitehurst, B. Whitehurst, and R. Campbell. 2014. Agronomic evaluation of coated urea to reduce ammonia volatilization from side-dress applications to corn. *Crop Manag.* 12:1-13.
- Frame, W.H., M.M. Alley, G. Whitehurst, B. Whitehurst, and R. Campbell. 2012. *In vitro* evaluation of coatings to control ammonia volatilization from surface-applied urea. *Agron. J.* 104:1201-1207.
- Gao, X., H. Asgedom, M. Tenuta, and D. Flaten. 2015. Enhanced efficiency urea sources and placement effects on nitrous oxide emissions. *Agron. J.* 107:265-277.
- Garófalo, J., y M. Calvache. 2012. Extracción de nutrientes por el cultivo de cebada. Tesis M.Sc., Universidad Central, Quito, ECU.
- Garófalo, J., E. Falconí, P. Llangari, y M. Espinoza. 2010. El cultivo de cebada: guía para la producción artesanal de semilla de calidad. Boletín N° 390. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Quito, ECU.
- García, E., e I. Fernández. s.f. Determinación de proteínas de un alimento por el método Kjeldahl: valoración con un ácido fuerte. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, ESP.
- García-Serrano, P., J.J. Lucena, S. Ruano, y M. Nogales. 2009. Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. Parte I - El suelo, los nutrientes, los fertilizantes y la fertilización. 2^{da} ed. Editorial V.A. Impresores S.A., Madrid, ESP.
- Garzón, J.E., y E.A. Cárdenas. 2013. Emisiones antropogénicas de amoníaco, nitratos y óxido nítrico: compuestos nitrogenados que afectan el medio ambiente en el sector agropecuario colombiano. *Rev. Med. Vet. Zoot.* 60:121-138.
- Giménez, F., V. Conti, F. Moreyra, y J.C. Tomaso. 2007. Efecto de la época de siembra sobre los caracteres económicos en genotipos de cebada cervecera. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Bordenave, ARG.
- Grey, D. 2013. A fines de agosto se cosechará la primera producción de cebada maltera en Ecuador. El financiero digital. Quito, ECU. http://www.elfinanciero.com/produccion/tema_02_2013/produccion_09_2013.pdf (consultado 27 set. 2015).
- Hafeez, A. 2012. Governing grain protein concentration and composition in wheat and barley: use of genetic and environmental factors. Doc. thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, SWE.
- Hajjighasemi, S., R. Keshavarz-Afshar, and M.R. Chaichi. 2016. Nitrogen fertilizer and seeding rate influence on grain and forage yield of dual-purpose barley. *Agron. J.* 108:1-9.
- Halvorson, A.D., and C.A. Reule. 2007. Irrigated, no-till corn and barley response to nitrogen in Corthern Colorado. *Agron. J.* 99:1521-1529.
- Hauck, R. 1985. Slow-release and bioinhibitor amended nitrogen fertilizers. In: O.P. Engelstand, editor, Fertilizer technology and use. 3rd ed. SSSA, Madison, WI, USA. p. 293-322.
- HGCA (Home Grown Cereals Authority), and SEERAD (Scottish Executive Environment and Rural Affairs Department). 2006. The barley growth guide. Research and Development, London, GBR.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2010. Sistema agroalimentario de la cebada. Quito, ECU. www.inec.gob.ec (consultado 16 abr. 2016).
- IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). 2007. Ahorro y eficiencia energética en la agricultura: fertilización nitrogenada. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid, ESP.

- Jankovic, S., D. Glamoclija, R. Maletic, S. Rakic, N. Hristov, and J. Ikanovic. 2011. Effects of nitrogen fertilization on yield and grain quality in malting barley. *African J. Biotech.* 10:19534-19541.
- López-Bellido, L. 2013. Abonado de los cereales trigo y cebada. ETSIA, Universidad de Córdoba, ARG. <http://www.tecnicoagricola.es/abonado-de-los-cereales-trigo-y-cebada/> (consultado 29 ago. 2015).
- López, L., J. Beltrán, A. Ramos, H. López, P. López, J. Bermejo, P. Urbano, J. Piñeiro, J. Castro, R. Blázquez, C. Ramos, F. Pomares, A. Quiñonez, B. Martínez, E. Primo-Millo, F. Legaz, J. Espada, E. García-Escudero, C. García, y J. Pérez. 2009. Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España: Parte II - Abonado de los principales cultivos en España. 2^{da} ed. Editorial V.A. Impresores, S.A., Madrid, ESP.
- López, P., F. Prieto, M. Gaytán, y A.D. Román. 2007. Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de cebada cultivadas en la región centro de México. *Rev. Chil. Nutr.* 34:71-77.
- Mahler, R., and S. Guy. 2005. Northern Idaho fertilizer guide: spring barley. University of Idaho, ID, USA.
- Malecka, I., and A. Blechareczyk. 2008. Effect of tillage systems, mulches and nitrogen fertilization on spring barley (*Hordeum vulgare* L.). *Agron. Res.* 6:517-529.
- Manilla, A., F. Salvagiotti, y F. Ferraguti. 2012. Respuesta a la fertilización y eficiencia en el uso del nitrógeno en maíz de siembra tardía sobre diferentes antecesores utilizando inhibidores de ureasa. International Plant Nutrition Institute, Brasilia, BRA.
- Mengel, K., and E.A. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. 5th ed. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, USA.
- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca). 2015. Servicio de información del productor: precio de la cebada. MAGAP, Quito, ECU. http://sinagap.magap.gob.ec/Sina/paginasInfoCentros/Precios_Mercados.aspx (consultado 15 set. 2015).
- Morojele, M.E., and W.K.H. Kilian. 2015. Optimization of nitrogen application under irrigated barley production. *European J. Agric. Forestry Res.* 3:8-14.
- Moreno, A., M.M. Moreno, F. Ribas, and M.J. Cabello. 2003. Influence of nitrogen fertilizer on grain yield of barley (*Hordeum vulgare* L.) under irrigated conditions. *Spanish J. Agric. Res.* 1:91-100.
- Mulvaney, R.L., S.A. Khan, and T.R. Ellsworth. 2009. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: a global dilemma for sustainable cereal production. *J. Environ. Qual.* 38:2295-2314.
- Muurinen, S., J. Kleemola, and P. Peltonen-Sainio. 2007. Accumulation and translocation of nitrogen in spring cereal cultivars differing in nitrogen use efficiency. *Agron. J.* 99:441-449.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, P.A. Babieri, y H.R. Sainz-Rozas. 2009. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste Bonaerense. *Info. Agron. Cono Sur* 39:14-19.
- Pantoja, J.L., K.P. Woli, J.E. Sawyer, and D.W. Barker. 2015. Corn nitrogen fertilization requirement and corn-soybean productivity with a rye cover crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79:1482-1495. doi:10.2136/sssaj2015.02.0084.
- Patil, M.D., B.S. Das, E. Barak, P.B.S. Bhadoria, and A. Polak. 2010. Performance of polymer-coated urea in transplanted rice: effect of mixing ratio and water input on nitrogen use efficiency. *Paddy Water Environ.* 8:189-198.
- Perdomo, C., M. Barbazán, y J.M. Durán. 2011. Nitrógeno. Universidad de la República, Montevideo, URU.
- Prasad, R., and Y.S. Shivay. 2015. Fertilizer nitrogen for the life, agriculture and the environment. *Indian J. Fert.* 11:47-53.
- Prystupa, P., R. Bergh, G. Ferraris, T. Loewy, L. Ventimiglia, F.H. Gutiérrez-Boem, y L. Couretot. 2008. Fertilización nitrogenada y azufrada en cebada cervecera cv. Scarlett. *Info. Agron. Cono Sur* 38:5-11.
- Reussi-Calvo, N., H. Echeverría, P. Barbieri, y H. Sainz-Rozas. 2006. Nitrógeno y azufre en trigo: ¿Rendimiento y proteína?. En: XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 19-22 set. Salta, Jujuy, ARG.
- Rivadeneira, M., L. Ponce, A. Segundo, y J. Coronel. 2003. INIAP Cañicapa 2003: la primera cebada con alto contenido de proteína. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Cañar, ECU.
- Sainju, U.M., A.W. Lenssen, and J.L. Barsotti. 2013. Dryland malt barley yield and quality affected by tillage, cropping sequence, and nitrogen fertilization. *Agron. J.* 105:329-340.
- SAS. 2009. SAS System for Windows release 9.3.1. SAS Inst., Cary, NC, USA.
- Scharf, P.C. 2015. Managing nitrogen in crop production. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, USA. doi:10.2134/2015.managing-nitrogen.c2.
- Schjonning, P., B. Christensen, and B. Carstensen. 1994. Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years. *Eur. J. Soil Sci.* 45:257-268.
- Shirin, K., S. Naseem, E. Bashir, S. Imad, and S. Shafiq. 2008. A comparison of digestion methods for the estimation of

- elements in *Dodonaea viscosa*: a native flora of Wadh, Balochistan, Pakistan. *J. Chem. Soc. Pak.* 30:90-95.
- Shoji, S., J. Delgado, A. Mosier, and Y. Miura. 2001. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 32:1051-1070.
- SINAGAP (Sistema de Información Nacional de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca). 2015. Precios de agroquímicos. Ministerio de Agricultura Ganadería Acuicultura y Pesca, Quito, ECU. <http://sinagap.agricultura.gob.ec/productos/precios-agroquimicos> (consultado 21 jun. 2016).
- Sierra, C. 2010. La urea: características, ventajas y desventajas de esta fuente nitrogenada. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Intihuasi, CHI.
- Stevens, W.B., U.M. Sainju, T. Caesar-TonThat, and W.M. Iversen. 2015. Malt barley yield and quality affected by irrigation, tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization. *Agron. J.* 107:2107-2119.
- Tenuta, M., and E. Beauchamp. 2000. Nitrous oxide production from urea granules of different sizes. *J. Environ. Qual.* 29:1408-1413.
- Thapa, R., A. Chatterjee, J.M.F. Johnson, and R. Awale. 2015. Stabilized nitrogen fertilizers and application rate influence nitrogen losses under rainfed spring wheat. *Agron. J.* 107:1885-1894.
- Wilson, T.M., B. McGowen, J. Mullock, D.B. Arnall, and J.G. Warren. 2015. Nitrous oxide emissions from continuous winter wheat in the Southern Great Plains. *Agron. J.* 107:1878-1884.