

2. Crecimiento de cebada modificado por urea estabilizada y dosis de nitrógeno



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.299.02>

GASPAR ESTRADA CAMPUZANO*§
CARLOS GUSTAVO MARTÍNEZ RUEDA**
MARTÍN RUBÍ ARRIAGA***
FRANCISCO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ****

Resumen

Con el objetivo de medir y comparar el impacto de diferentes dosis de nitrógeno utilizando dos fuentes de urea (convencional y estabilizada) sobre el crecimiento y rendimiento de cebada, se establecieron dos experimentos uno en el ciclo agrícola invierno-primavera (IP) 2010-2011 y otro en verano-otoño (VO) del 2011, en los cuales cuatro dosis de nitrógeno (00, 50, 100 y 160 kg de N ha⁻¹) fueron consideradas ambientes específicos y dentro de cada dosis dos genotipos de cebada (Esmeralda y Josefa) fueron aleatorizados en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se determinó la biomasa en antesis (BIO_{Ant}) y madurez fisiológica (BIO_{MF}), el rendimiento de grano (REND), índice de cosecha (IC), la radiación interceptada acumulada en antesis (RIA_{Ant}) y en madurez fisiológica (RIA_{MF}), la eficiencia de uso de la radiación en antesis (EUR_{Ant}) y en madurez fisiológica

§ Autor para correspondencia: gestradac@uaemex.mx

* Doctor en Ciencias Agropecuarias, Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1189-0470>

** Doctor en Ciencias. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9644-5757>

*** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7547-5017>

**** Doctor en Filosofía y Ciencias Técnicas. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-0976>

(EUR_{MF}), el número de granos y el peso individual de grano. Los resultados revelaron diferencias significativas en ambos ciclos de cultivo para rendimiento de grano. Una mayor disponibilidad de nitrógeno afectó positivamente todos los caracteres estudiados, de manera similar al efecto observado por el uso de urea estabilizada. En términos de componentes numéricos del rendimiento; el número de granos fue el componente que mejor explicó los cambios en el rendimiento debidos a las dosis de nitrógeno. La aplicación de urea estabilizada generó cambios en todos los caracteres de crecimiento estudiados en cebada y al aplicar todo el fertilizante al momento de la siembra se logra reducir la pérdida de nitrógeno e incrementa la eficiencia de uso de este elemento, contribuyendo a reducir el impacto al medio ambiente.

Palabras clave: *hordeum vulgare*, nitrógeno, rendimiento.

Introducción

En la actualidad, los cereales de grano pequeño tienen un lugar importante, ya que estos cultivos ocupan la mayor parte de superficie sembrada en el mundo. La importancia de los cereales no se limita a su participación en la dieta humana, también son valiosos por sus aplicaciones industriales y el papel que tienen en la producción ganadera. Su uso para alimento de animales se ha extendido en las últimas décadas bajo diferentes formas como pasto, heno, forraje y ensilaje. En este sentido, los cereales tienen muchas características que los hacen especialmente útiles, por su alto rendimiento, además de ser ricos en proteínas, vitaminas y carbohidratos digestibles. El cultivo de cebada es de importancia socioeconómica, representa una alternativa viable en zonas donde el clima y el suelo presentan restricciones para el establecimiento de otros cultivos. Esta especie tiene repercusión en los sectores agrícola, comercial, industrial y de servicios. A nivel mundial se siembran 47 900 millones de hectáreas, con una producción de 141 400 millones de toneladas de grano y un rendimiento promedio de 2.9 t ha^{-1} , mientras que, en México, se cultiva una superficie mayor a las 350 000 ha, de las cuales 25% corresponde a la siembra bajo riego en invierno-primavera y 75% restante corresponde a siembras de temporal en verano (Base de datos

estadísticos corporativos de la Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura [FAOSTAT, por sus siglas en inglés], 2020).

La producción de cebada en México no satisface las necesidades de la industria nacional, por lo que se ha tenido que importar cantidades crecientes de grano pasando de 21 000 t en 2002 a 147 000 t en 2016 (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [Sader], 2019). En México, 67% de la producción total de cebada corresponde a siembras de temporal (verano-otoño) y 33% restante corresponde a la modalidad de riego (invierno-primavera). Las principales zonas donde se cultiva la cebada maltera de temporal son los Valles Altos de los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México. Además, se siembra en otras regiones como son: norte de Guanajuato, sur de San Luis Potosí, noreste de Jalisco y Durango y norte de Zacatecas (Islas et al., 2008).

El nitrógeno (N) es el principal nutriente que limita la producción de cultivos no leguminosos y es aplicado en grandes cantidades (Malhi et al., 2001; Grant et al., 2012; Maheswari et al., 2017). El N forma parte estructural de las proteínas, protoplasma y clorofila, de tal forma que tiene influencia sobre el tamaño del área foliar y capacidad fotosintética (Alam y Haider, 2006). Un manejo eficiente de este nutriente está relacionado con el uso de dosis y fuentes de N adecuadas, momento y forma aplicación, logrando con esto una mejor sincronización con la demanda del cultivo y así reducir la pérdida del N del sistema. El efecto del nitrógeno depende de la cantidad aplicada y de las condiciones climáticas prevalecientes durante la temporada de crecimiento (Popovic et al., 2011).

Los fertilizantes nitrogenados de uso convencional en la agricultura son: la urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio, fosfato monoamónico (MAP) y fosfato di amónico (DAP), destacándose la urea cuyo consumo supera a todos los demás juntos (Boaretto et al., 2007). La urea convencional es la fuente de N más usada y económica de alta concentración (46%), variedad de usos y aplicaciones (Asociación Internacional de Fertilización [IFA, por sus siglas en inglés], 2018). Es un componente indispensable para producir formulas balanceadas de fertilización. Se puede aplicar al suelo directamente como mono producto, se puede incorporar a mezclas físicas balanceadas, y por su alta solubilidad en agua, puede funcionar como aporte de nitrógeno en formulas NPK (Boaretto et al., 2007). Sin embargo, su alta solubilidad

provoca que gran parte del nitrógeno que contiene se pierda por volatilización, escurrimientos o por lixiviación antes de que pueda ser absorbido por los cultivos (Mullen, 2011; Huang et al., 2017), lo cual contribuye a incrementar las emisiones de gases de invernadero y contaminación grave del ambiente (Serrano-Silva et al., 2011; Nascimento et al., 2013). Reducir el tiempo que el N inorgánico está en el suelo antes de la absorción del cultivo puede aminorar el riesgo de pérdidas de nitrógeno y aumentar el uso eficiente del mismo. La fertilización nitrogenada dosificada en diferentes momentos puede ser una alternativa para minimizar dichas pérdidas (Malhi et al., 2001).

Otra alternativa para reducir pérdidas de N es el uso de la aplicación de fertilizantes nitrogenados de liberación controlada, los cuales están diseñados para liberar nitrógeno en la solución del suelo a una velocidad lenta que es más compatible con la absorción de nutrientes por el cultivo, lo que reduce la acumulación de nitrógeno inorgánico en la solución del suelo y el riesgo de pérdidas (Shoji et al., 2001). La urea estabilizada o de lenta liberación se presenta en forma de gránulos envueltos en una membrana semipermeable que está constituida por una sustancia insoluble o de baja solubilidad en agua. La membrana se va rompiendo, debido al gradiente de presión osmótica, liberando los nutrientes de forma progresiva (Mikkelsen, 2007).

El uso de fertilizantes de liberación controlada se ha considerado para una amplia gama de sistemas de producción de cereales y oleaginosas (Chen, 2008; Grant y Wu, 2008; Nelson et al., 2008). Entre los beneficios de este tipo de fertilizantes están las mejoras en el rendimiento de grano y la acumulación de N en el grano cosechado. En los ensayos realizados en la región de pastos mixtos, el uso de la urea recubierta en trigo de invierno mejora la producción, pero no mostraron ventajas sobre la urea convencional (McKenzie et al., 2007).

De acuerdo con lo anterior, los objetivos del presente trabajo fueron: (a) estudiar los cambios en la producción de biomasa y sus determinantes fisiológicos en el cultivo de cebada, cuando se cambia la disponibilidad de nitrógeno y la fuente de urea y (b) definir si las condiciones ambientales (ciclo de crecimiento) se asocian con una mejora en la utilización del nitrógeno por el cultivo.

Materiales y métodos

Ubicación de los experimentos

Los experimentos se establecieron durante los ciclos invierno-primavera (IP) de 2010 y verano-otoño (VO) de 2011, en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México ubicada en el Campus Universitario el Cerrillo Piedras Blancas, Toluca México, localizada a 18 km al norte de la ciudad de Toluca, con coordenadas geográficas de 19°42'30" de latitud norte y 99°41'30" de longitud oeste, y una altitud de 2 640 msnm. De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1988) el clima predominante es del tipo $C(w2)(w)b(i)$ que corresponde a un clima templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano y escasa precipitación pluvial en invierno (5%), poca oscilación térmica, temperatura media anual de 12.8°C y precipitación promedio anual de 900 mm.

Factores de estudio y diseño experimental

Se evaluaron dos fuentes de urea (convencional y estabilizada), dos genotipos de cebada (Esmeralda y Josefa) y cinco dosis de nitrógeno (00, 50, 100 y 160 kg de N ha⁻¹), en ambos ciclos agrícolas y en cada tipo de urea los tratamientos de nitrógeno (N) fueron distribuidos en franjas representando cada uno de ellos un ambiente y dentro de cada dosis de nitrógeno los dos cultivares fueron aleatorizados con base a un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Manejo de los experimentos

En los tratamientos con urea convencional el N fue fraccionado en tres momentos: siembra, máximo número de primordios (MNP) y hoja bandera expandida (HB); de tal forma que la dosis de 50 kg de N ha⁻¹, fue aplicada

en la siembra, mientras que, en la dosis de 100, la mitad fue aplicada a la siembra y la otra en MNP, finalmente la dosis de 160 kg de N ha⁻¹, una tercera parte fue aplicada a la siembra, la otra en MNP y la última en HB. Contrariamente las dosis de N con urea estabilizada fueron aplicadas en su totalidad al momento de la siembra. Cabe señalar, que en todas las dosis de N evaluadas se agregaron 60 y 30 kg ha⁻¹, de fósforo y potasio, respectivamente; usando como fuente de superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio. Los experimentos en ambos ciclos agrícolas fueron sembrados a una densidad de 333 semillas por m², en parcelas de 6 hileras de 3.0 m de largo y 0.20 m de separación. La parcela útil estuvo constituida por los cuatro surcos centrales. Para garantizar la densidad antes mencionada, la semilla fue colocada en cintas de papel biodegradable (*maskingtape*) a una distancia entre sí de 1.5 cm y de una longitud correspondiente a lo largo de las hileras. Los experimentos establecidos en el ciclo agrícola IP se desarrollaron bajo riego, el cual fue suministrado por medio de cintas de goteo con goteros separados cada 15 cm. El control de malezas en todos los experimentos se realizó mediante deshierbes manuales periódicamente y se aplicaron agroquímicos para controlar plagas y enfermedades cuando fue necesario. Los datos climáticos fueron registrados mediante una estación climática (Davis, Inn) colocada a 150 m de los experimentos.

Variables evaluadas

Variables fenológicas

Durante el desarrollo de los experimentos se registraron el número de días transcurridos desde la siembra hasta que se observen cada una de las siguientes etapas: (a) Emergencia (E): se registró el número de días transcurridos desde la siembra hasta que se observó el 50% de plantas emergidas. (b) Máximo número de primordios (MNP): esta se determinó cuando el cultivo presentaba entre 5 y 6 hojas, mediante la observación de ápices en un microscopio estereoscópico, para ello se disectaron dos plantas al azar de cada parcela dos veces por semana y se registró la fecha de ocurrencia de la etapa de acuerdo con la escala de Kirby y Appleyard (1984). (c) Hoja

bandera expandida (HB): esta variable se registró cuando el 50 % de las plantas mostraban hoja bandera totalmente expandida. (d) Antesis (AT): esta se registró cuando 50 % de las plantas presentaban anteras con polen visible y el estigma bífido, mediante disecciones en un microscopio estereoscópico de cinco espigas de vástagos principales. (e) Madurez fisiológica (MF): se marcaron 20 espigas al azar de cada parcela en la etapa de antesis y se registró el peso seco de cinco granos centrales dos veces por semana hasta que se estabilizó el máximo peso. Posterior a esto la MF fue estimada mediante una regresión bilineal entre el peso seco del grano y el tiempo térmico desde antesis (Miralles y Slafer, 1995), utilizando la siguiente ecuación:

$$Y = a + bx \quad (x \leq c) + bc \quad (x \geq c)$$

Variables de crecimiento

La producción de biomasa aérea se determinó muestreando periódicamente en cuatro etapas fenológicas del cultivo (máximo número de primordios, hoja bandera, antesis dos surcos de 30 cm y en madurez fisiológica dos surcos de 100 cm). Las muestras se dividieron en vástagos principales y macollos. El peso seco de hojas (verdes o muertas), tallos y espigas (cuando estuvieron presentes) de cada muestra se registró después de secar las muestras en la estufa a 70°C durante 72 horas. El índice de área foliar (IAF), fue determinado en cada uno de los muestreos de biomasa antes mencionados, para ello se tomaron al azar 10 plantas y se les midió el área foliar mediante un integrador de área foliar marca Licor (LI-3000C) y el IAF fue obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$IAF = ((NT \times AF10 t) / 10) (1 / 0.24)$$

La radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RIA) se determinó midiendo la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo dos veces por semana durante el desarrollo del cultivo, utilizando un ceptómetro lineal. Las mediciones se realizaron en días totalmente despejados cuando el sol se encontraba en su zenit. El ceptómetro fue colocado

en los surcos centrales de cada parcela, midiendo la radiación transmitida (IT) en tres diferentes posiciones (izquierda, centro y derecha) y siguiendo el nivel de hojas senescidas, el valor promedio de dichas mediciones fue usado como la IT por el dosel del cultivo (Slafer et al., 1990). La radiación incidente (IO) se midió colocando el sensor por arriba del dosel del cultivo y la proporción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (%RFAi) por el cultivo se calculó como $(IO-IT)/IO$. Con los datos de %RFAi determinado en diferentes momentos, se realizaron análisis de regresión con el número de días desde emergencia y los datos fueron ajustados mediante una función sigmoidea, descrita por la siguiente ecuación:

$$\%RFAi = \frac{a + b}{1 - \exp\left(-\left(\frac{x - c}{d}\right)\right)}$$

Dónde:

x = es el número de días desde de la emergencia del cultivo (a , b , c y d) = son constantes del modelo.

La eficiencia en el uso de la radiación en antesis (EUR_{Ant}) y en madurez fisiológica (EUR_{MF}) fueron determinadas como el cociente entre la RIA_{Ant} y la biomasa en antesis ($BIOM_{Ant}$) y el cociente entre la RIA_{MF} y la biomasa en madurez fisiológica ($BIOM_{MF}$), respectivamente.

Análisis estadístico

Las variables evaluadas fueron sometidas a análisis de varianza (ANDEVA) de acuerdo al modelo lineal utilizado. Cuando la prueba de F de los análisis ANDEVA resultó significativa, se procedió a realizar la prueba de medias utilizando la diferencia mínima significativa honesta (DMSH) de la prueba de Tukey a un nivel de significancia de 5%. Las relaciones entre variables se analizaron mediante análisis de regresión y se ajustaron modelos lineales, bolinéales o sigmoideos.

Resultados y discusión

Análisis de varianza

Se observaron efectos altamente significativos ($P < 0.01$) para ciclos o estaciones de crecimiento en todos los caracteres estudiados, mientras que para tipo de urea no hubo significancia para el índice de área foliar en antesis. Las dosis de nitrógeno mostraron efectos altamente significativos en todas las variables evaluadas. De igual manera, el efecto genotípico resultó significativo para la mayoría de las variables consideradas con excepción del índice de área foliar en antesis, rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la radiación en antesis. La interacción ciclo por tipo de urea utilizada resultó significativa para el índice de cosecha, radiación interceptada acumulada en antesis y en madurez fisiológica, y para la eficiencia en el uso de la radiación en antesis y en madurez, para el resto de las variables los efectos de esta interacción no fueron significativos (tabla 2.1). Por otro lado, la interacción ciclo \times nitrógeno resultó significativa para todos los caracteres estudiados con excepción del IAF_{Ant} y RIA_{Ant} , mientras que la interacción tipo de urea \times nitrógeno no fue significativa para el IAF_{Ant} y $REND$ (tabla 2.1). Los efectos de la interacción ciclo \times genotipo fueron significativos para la mayoría de las variables estudiadas con excepción del IAF_{Ant} y $BIOM_{MF}$ en las cuales no se observaron efectos significativos. Para el caso de la interacción tipo de urea \times genotipo los análisis de varianza mostraron la existencia de interacción significativa para todos los caracteres estudiados con excepción del IAF_{Ant} , $REND$, RIA_{Ant} y RIA_{MF} . Por otro lado, la interacción nitrógeno \times genotipo fue significativa para la mayoría de los caracteres estudiados con excepción del IAF_{Ant} , IC y RIA_{Ant} .

La interacción ciclo \times tipo de urea \times genotipo estuvo presente en forma significativa para $BIOM_{Ant}$, RIA_{MP} , EUR_{Ant} y EUR_{MP} , para el resto de las variables no se observó interacción significativa, mientras que la interacción ciclo \times nitrógeno \times genotipo sólo resultó significativa para $BIOM_{MP}$, $REND$, IC , RIA_{Ant} y RIA_{MF} . Los coeficientes de variación oscilaron entre 4.5 y 20.8%, los cuales correspondieron a $BIOM_{MF}$ e IAF_{Ant} , respectivamente (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Significancia de los valores de F para el índice de área folia en antesis

FV	g.l	IAFAnt	BiomAnt	BiomMF	Rend	IC	RIAAnt	RIAMF	EURAnt	EURMF
Ciclo (C)	1	0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Tipo Urea (TU)	1	0.236	0.001	0.003	0.001	0.011	0.006	0.044	0.001	0.001
C × TU	1	0.474	0.134	0.176	0.573	0.010	0.001	0.005	0.001	0.014
Rep (C × TU)	8	0.736	0.463	0.412	0.829	0.662			0.999	0.881
Nitrógeno (N)	3	0.001	0.001	0.001		0.001			0.005	0.001
C × N	3	0.288	0.050	0.001		0.045			0.001	0.001
TU × N	3	0.869	0.001	0.001		0.019			0.030	0.001
Genotipo (G)	1	0.419	0.012	0.001		0.001			0.088	0.001
C × G	1	0.196	0.002	0.525		0.001			0.020	0.004
TU × G	1	0.597	0.001	0.005		0.004			0.001	0.002
N × G	3	0.969	0.041	0.001		0.251			0.017	0.008
C × TU × G	1	0.597	0.002	0.508		0.138			0.002	0.001
C × N × G	3	0.388	0.547	0.001	865	0.001			0.367	0.112
C × TU × N × G	9	0.760	0.001	0.334	0.71	0.001			0.002	0.001
Error (CME)	56	0.083	1043	1386	8.7	0.0005			0.063	0.71
CV (%)		20.8	7.5	4.5	8.7	6.6	14.0	14.2	11.1	12.2

Significancia de los valores de F para el índice de área folia en antesis (IAF_{Ant}), biomasa en antesis ($Biom_{Ant}$), biomasa en madurez fisiológica ($Biom_{MF}$), rendimiento de grano (Rend), índice de cosecha (IC), radiación solar interceptada acumulada en antesis (RIA_{Ant}) y en madurez fisiológica (RIA_{MF}), eficiencia de usos de la radiación en antesis (EUR_{Ant}) y en madurez (EUR_{MF}) para dos genotipos de cebada evaluados en cuatro dosis de nitrógeno con dos tipos de urea (convencional y estabilizada) en dos ciclos agrícolas (invierno-primavera) y verano-otoño) en Toluca, México.

Fuente: Experimentos 2010 y 2011.

Comparación de medias para los factores principales

La comparación de medias para ciclos o estaciones de crecimiento reveló que las siembras en el ciclo invierno-primavera (IP) incrementaron significativamente el IAF_{Ant} , la RIA_{Ant} y RIA_{MF} respecto de los experimentos sembrados en el ciclo verano-otoño (VO), en mayor IAF logrado en antesis en IP favoreció la capacidad de intercepción por el cultivo logrando una mayor

radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (Loss et al., 1997; O'Connell et al., 2004). En estos últimos existió incremento significativo de la $BIOM_{Ant}$, $BIOM_{MF}$, $REND$, IC , EUR_{Ant} y EUR_{MF} respecto del ciclo IP (tabla 2.2). Aplicaciones de urea estabilizada tuvieron un efecto positivo en todos los caracteres estudiados, con excepción del IAF_{Ant} .

Estos resultados concuerdan con aquellos obtenidos por Ye et al. (2013) quienes encontraron efectos positivos de la urea de lenta liberación sobre la producción de biomasa de arroz, mientras que Abalos et al. (2014) y Scheer et al. (2014) encontraron efectos positivos en rendimiento de grano y sus componentes en brócoli.

Si bien el uso de urea de lenta liberación mejoró significativamente todos los caracteres estudiados, sin duda la mayor ventaja representa la reducción de los costos de aplicación con otros tipos de urea y aquellos relacionados con la disminución de la contaminación del ambiente (Jat et al., 2012; Geng et al., 2016; Costa et al., 2019). La respuesta a las dosis de N depende fuertemente del genotipo utilizado (Alam y Haider, 2006). Nuestros resultados mostraron que la variedad de cebada Esmeralda superó a la variedad Josefa en $BIOM_{Ant}$, $REND$, IC , RIA_{Ant} y RIA_{MF} mientras que Josefa fue superior en $BIOM_{MF}$ y EUR_{MF} en IAF_{Ant} y EUR_{Ant} ambos genotipos se comportaron estadísticamente iguales. En índice de área foliar en antesis se incrementó de manera significativa al incrementar las dosis de nitrógeno. La $BIOM_{Ant}$ pasó de 303 g m^{-2} sin nitrógeno a 540 g m^{-2} con $160 \text{ kg de N ha}^{-1}$, un incremento de 44% respecto del cultivo no fertilizado, similar incremento (42%) fue observado en la $BIOM_{MF}$ mientras que, el rendimiento de grano se incrementó en 58% respecto del cultivo no fertilizado. El índice de cosecha solo se incrementó 19% al pasar de 0.30 sin nitrógeno a 0.37 con la máxima dosis de este elemento. Resultados similares fueron encontrados en cebada (Alam y Haider, 2006; Arisnabarreta y Miralles, 2006) y en otros granos como trigo, maíz y canola (Grant et al., 2012). Las diferencias entre las dosis de N observadas para el índice de cosecha en antesis estuvieron en línea con una mayor capacidad de intercepción de radiación en esa misma etapa (RIA_{Ant}) y aquella acumulada en madurez fisiológica (RIA_{MF}). La eficiencia en el uso de la radiación en antesis paso de 2.1 a 2.4 g MJ^{-1} , sin aplicación de N y con $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$, respectiva-

mente, de igual manera en la EUR_{MF} se observó el mismo incremento (13%) con 100 kg de N ha^{-1} respecto a la dosis más baja (tabla 2.2).

Tabla 2.2. Valores medios para el índice de área folia en antesis

Ciclo	IAF_{Ant}	$Biom_{Ant}$ ($g\ m^{-2}$)	$Biom_{MF}$ ($g\ m^{-2}$)	$Rend$ ($g\ m^{-2}$)	IC	$RIAAnt$ ($MJ\ m^{-2}$)	$RIAMF$ ($MJ\ m^{-2}$)	$EURAnt$ ($g\ MJ^{-1}$)	$EURMF$ ($g\ MJ^{-1}$)
Ciclo									
I-P	1.4a	362b	557b	255b	0.28b	243a	612a	1.5b	1.5b
V-O	1.3a	489a	1073a	418a	0.38a	166b	399b	2.9a	2.8a
Tipo Urea									
Convencional	1.3a	410b	799b	322b	0.33b	210a	517a	2.1b	2.0b
Estabilizada	1.4a	441a	831a	351a	0.34a	199a	493a	2.3a	2.2a
Genotipo									
Esmeralda	1.3a	434a	788b	340a	0.35a	218a	534a	2.3a	2.0b
Josefa	1.4a	417b	842a	334b	0.33b	191b	477b	2.2a	2.3a
Dosis N (kg ha^{-1})									
00	1.0c	303d	601d	201d	0.30c	151d	382c	2.1b	2.0b
50	1.2c	360c	724c	299c	0.33b	177c	430c	2.2b	2.3a
100	1.4b	500b	901b	358b	0.33b	227b	542b	2.4a	2.3a
160	1.8a	540a	1035a	487a	0.37a	262a	669a	2.1b	2.0b

Valores medios para el índice de área folia en antesis (IAF_{Ant}), biomasa en antesis ($Biom_{Ant}$), biomasa en madurez fisiológica ($Biom_{MF}$), rendimiento de grano ($Rend$), índice de cosecha (IC) radiación solar interceptada acumulada en antesis (RIA_{Ant}) y en madurez fisiológica (RIA_{MF}), eficiencia de usos de la radiación en antesis (EUR_{Ant}) y en madurez (EUR_{MF}) para dos ciclos agrícolas (invierno-primavera y verano-otoño) donde se evaluaron dos genotipos de cebada con urea convencional y estabilizada, en 4 dosis de nitrógeno en Toluca, México.

Nota. Letras unidas con la misma letra no difieren significativamente entre si al 0.05 de la prueba de Tukey.

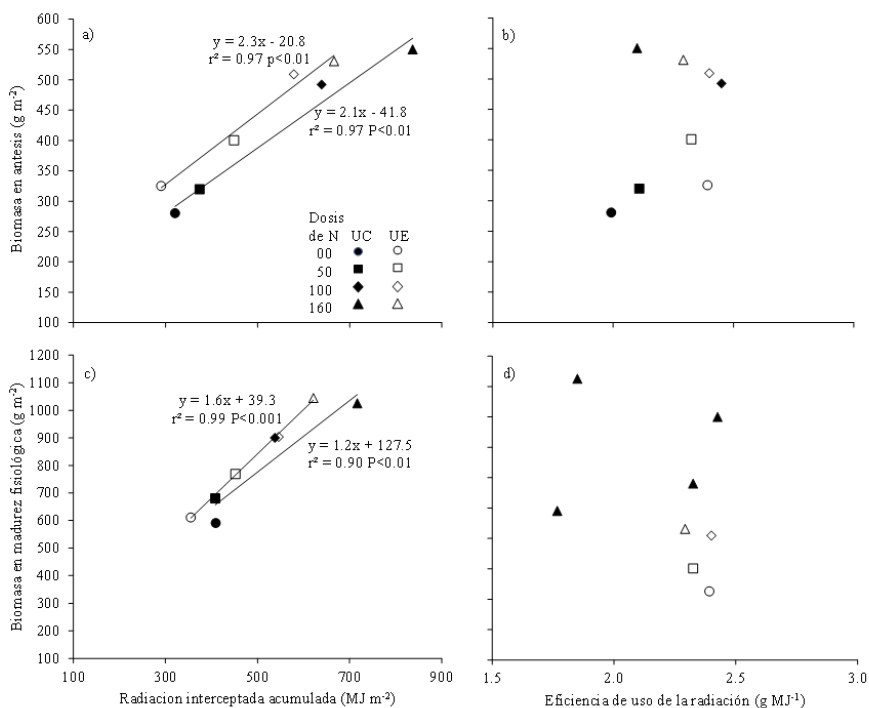
Fuente: Datos experimentos 2010 y 2011.

La producción de biomasa en los cultivos de grano sin ningún tipo de estrés es explicada tanto por la radiación fotosintéticamente activa interceptada por las hojas y la eficiencia de uso de la radiación (Monteith, 1977; Lindquist et al., 2005). Nuestros resultados mostraron que la biomasa producida en antesis y en madurez fisiológica fue explicada principalmente por la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada en ambos periodos, mientras que la eficiencia de uso de la radiación no explicó los cambios en la biomasa (gráfica 2.1).

Observándose un efecto positivo de las dosis de nitrógeno sobre la radiación interceptada acumulada tanto en antesis como en madurez. La

eficiencia en el uso de la radiación (pendiente de la relación entre la producción de biomasa y la radiación interceptada acumulada) fue mayor cuando se usó urea estabilizada (2.3 g MJ⁻¹ en antesis y 1.6 g MJ⁻¹ en madurez) respecto de la urea convencional (1.6 g MJ⁻¹ en antesis y 1.2 g MJ⁻¹ en madurez) resultados similares fueron encontrados en maíz (Yuan et al., 2017).

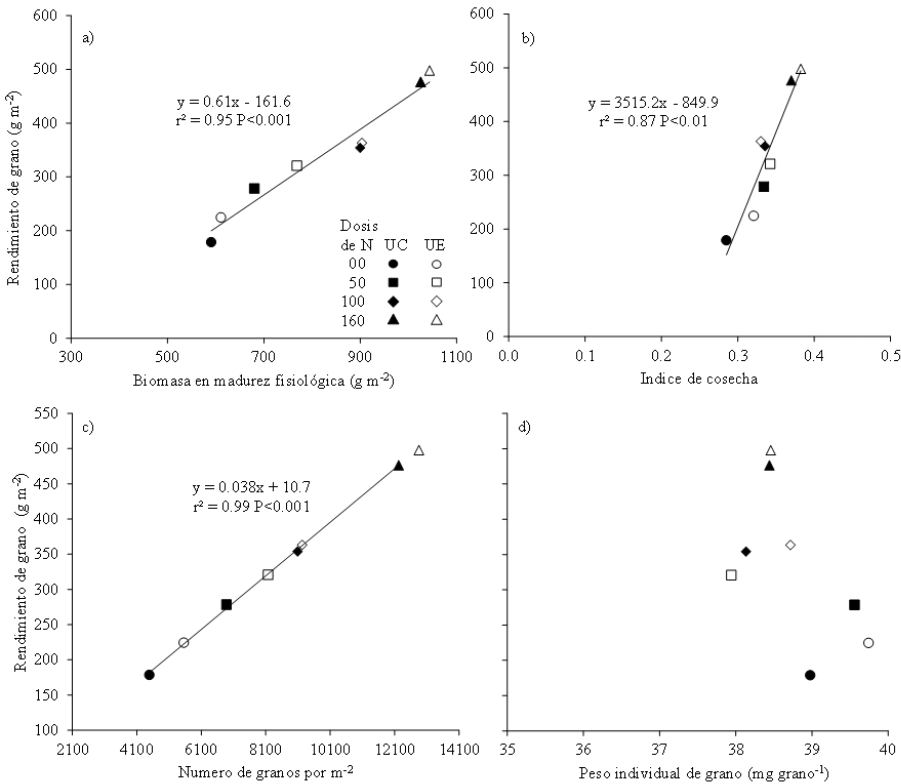
Gráfica 2.1. Relaciones entre biomasa a antesis y radiación interceptada acumulada en antesis



Nota: Relaciones entre biomasa a antesis y radiación interceptada acumulada en antesis (a) y la eficiencia en el uso de la radiación (b), biomasa a madurez y radiación interceptada acumulada en madurez (c) y la eficiencia en el uso de la radiación (d) en cebada, creciendo en 4 dosis de nitrógeno y dos tipos de urea (UC: urea convencional, UE: urea estabilizada) en Toluca, México. Datos promedio de dos ciclos agrícolas y dos genotipos.

Fuente: Datos experimentos 2010 y 2011.

Figura 2.2. Relaciones entre rendimiento de grano con la biomasa a madurez fisiológica



Nota: Relaciones entre rendimiento de grano con la biomasa a madurez fisiológica (a) y con el índice de cosecha (b), rendimiento de grano con el número de granos por m² (c) y con el peso individual de grano (d) en cebada, creciendo en 4 dosis de nitrógeno y dos tipos de urea (UC: urea convencional, UE: urea estabilizada) en Toluca, México. Datos promedio de dos ciclos agrícolas y dos genotipos.

Fuente: Datos experimentos 2010 y 2011.

Es sabido que el rendimiento de grano en los cereales es fuertemente explicado por los cambios en la biomasa producida en madurez fisiológica y en el índice de cosecha (proporción de la biomasa producida que representa el rendimiento económico) (Carcova et al., 2015). Los resultados del presente trabajo reflejaron que los cambios en el rendimiento de grano debidos a dosis de nitrógeno estuvieron asociados principalmente a la producción de biomasa en madurez fisiológica ($r^2 = 0.95$ $P < 0.001$) y al índice de cosecha ($r^2 = 0.87$ $P < 0.01$) (gráfica 2.2a y 2.2b), lo anterior resalta la importancia que tiene el nitrógeno en promover el crecimiento (producción de biomasa) de los cultivos (Porto et al., 2014; Maheswari et al., 2017). Por otro lado, el nú-

mero de granos por unidad de superficie por si solo explicó los cambios observados en el rendimiento de grano a través de las dosis de nitrógeno evaluadas, existiendo en la mayoría de los casos un efecto positivo sobre el rendimiento de grano al aplicar urea estabilizada. La aplicación de la urea estabilizada en el presente trabajo se realizó en su totalidad al momento de la siembra y el efecto positivo observado sobre la producción de biomasa y el rendimiento de grano mismo, indica que el nitrógeno contenido en esta fuente estuvo presente durante todo el ciclo de crecimiento de cultivo evitando pérdidas a través del perfil del suelo o hacia la atmósfera (Shoji et al., 2001; McKenzie et al., 2007).

Conclusiones

Los resultados revelaron diferencias significativas en ambos ciclos de cultivo para rendimiento de grano, asociado principalmente a una mayor producción de biomasa y eficiencia en el uso de la radiación en anthesis y en madurez fisiológica. Una mayor disponibilidad de nitrógeno afectó positivamente todos los caracteres estudiados, de manera similar al efecto observado por el uso de urea estabilizada. Una mayor producción de biomasa por efecto de las dosis de nitrógeno estuvo asociada principalmente por una mayor capacidad de intercepción de radiación por el cultivo, mientras que los cambios en el rendimiento de grano estuvieron fuertemente asociados a la producción de biomasa y el índice de cosecha, mientras que en términos de los componentes numéricos del rendimiento, el número de granos fue el componente que mejor explicó los cambios en el rendimiento debidos a las dosis de nitrógeno. La aplicación de urea estabilizada generó cambios en todos los caracteres de crecimiento estudiados en cebada.

Referencias

Abalos, D., Jeffery, S., Sanz-Cobena, A., Guardia, G., y Vallejo, A. (2014). Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agricultural Ecosystem Environment*, 189, 136-144.

- Alam, M. Z., y Haider, A. (2006). Growth attributes of barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in relation to different doses of nitrogen fertilizer. *Journal of life and Earth Science*, 1, 77-82.
- Arisnabarreta, S., y Miralles, D. J. (2006). Yield responsiveness in two- and six-rowed Barley grown in contrasting nitrogen environments. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 192, 178-185.
- Boaretto, A., Muraoka, T., y Trevelin, P. (2007). Uso eficiente del nitrógeno de los fertilizantes convencionales. *Informaciones Agronómicas, IPNI*, (68), 13-14.
- Da Costa, T., Westphalen, P. G., Dalla Nora, F. B., Silva, B. de Z., y Da Rosa, G. S. (2019). Technical and environmental assessment of coated urea production with a natural polymeric suspension in spouted bed to reduce nitrogen losses. *Journal of Cleaner Production*, 222, 324-334.
- Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020). *Estadísticas de producción mundial y nacional de cebada*. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Consultado 24/04/2020)
- Geng, J., Ma, Q., Chen, J., Zhang, M., Li, C., Yang, Y., Yang, X., Zhang, W., y Liu, Z. (2016). Effects of polymer coated urea and sulfur fertilization on yield, nitrogen use efficiency and leaf senescence of cotton. *Field Crops Research*, 187, 87-95.
- Grant, C. A., Wub, R., Selles, F., Harker, K. N., Clayton, G. W., Bittman, S., Zebarth, B. J., y Lupwayi, N. Z. (2012). Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding. *Field Crops Research*, 127, 170-180.
- Huang, J., Xu, C.-C., Ridoutt, B. G., Wang, X.-C., y Ren, P.-A. (2017). Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. *Journal of Cleaner Production*, 159, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.008>
- International Fertilizer Association (2018). *Fertilizer Outlook 2018-2020*.
- Islas, G. J., Zamora, D. M., Gámez, V. F. P., y Solano, H. S. (2008). Rentabilidad de la cebada de riego en El Bajío. En *III Reunión Nacional de Innovación Agrícola y Forestal. Yucatán, México. Memoria*.
- Jat, R. A., Wani, S. P., Sahrawat, K. L., Singh, P., Dhaka, S. R., y Dhaka, B. L. (2012). Recent approaches in nitrogen management for sustainable agricultural production and eco-safety. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58, 1033-1060.
- Lindquist, J. L., Arkebauer, T. J., Walters, D. T., Cassman, K. G., y Dobermann, A. (2005). Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agronomy Journal*, 97, 72-78.
- Loss, S. P., Siddique, K. H. M., y Martin, L. D. (1997). Adaptation of faba bean (*Vicia faba* L.) to dryland Mediterranean-type environments II. Phenology, canopy development, radiation absorption and biomass partitioning. *Field Crops Research*, 52, 29-41.
- Maheswari, M., Murthy, A. N. G., y Shanker, A. K. (2017). Nitrogen nutrition in crops and its importance in crop quality. *Indian Nitrogen Assess*, 12, 175-182.
- Malhi, S. S., Grant, C. A., Johnston, A. M., y Gill, K. (2001). Nitrogen fertilization manage-

- ment for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. *Soil Tillage Research*, 60, 101-122.
- McKenzie, R. H., Bremer, E., Middleton, A. B., Pfiffner, P. G., y Dowbenko, R. E. (2007). Controlled release urea for winter wheat in southern Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 87, 85-91.
- Mikkelsen, R. L., Williams, H. M., y Behel, Jr. D. (1994). Nitrogen leaching and plant uptake from controlled-release fertilizers. *Fertilizer Research*, 37, 43-50.
- Miralles, J. D., y Slafer G. A. (1995). Individual grain weight responses to genetic reduction in culm length in wheat as affected by source-sink manipulations. *Field Crops Research*, 43, 55-66.
- Monteith, J. L. (1977). Climate and efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 281, 277-294.
- Mullen, R. W. (2011). Nutrient cycling in soils: nitrogen. En J. L. Hatfield y T. J. Sauer (Eds.), *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture* (pp. 67-78). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
- Nascimento, C. A. C., Vitti, G. C., Faria, L. de A., Luz, P. H. C., y Mendes, F. L. (2013). Ammonia volatilization from coated urea forms. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 37, 1515-1525.
- O'Connell, M. G., O'Leary, G. J., Whitfield, D. M., y Connor, D. J. (2004). Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. *Field Crops Research*, 84, 111-124.
- Popovic, V., Glamoclija, D., Malešević, M., Ikanovic, J., Dražić, G., Spasic, M., y Stankovic, S. (2011). Genotype specificity in nitrogen nutrition of malting barley. *GENETIKA*, 43, 197-204.
- Porto, R. D. A., Koetz, M., Bonfim-Silva, E. M., Polizel, A. C., y Silva, T. J. A. D. (2014). Effects of water replacement levels and nitrogen fertilization on growth and production of gladiolus in a greenhouse. *Agricultural Water Manage*, 131, 50-56.
- Sader (2019). *Reporte del mercado de cebada*. Gobierno de México.
- Scheer, C., Rowlings, D. W., Firrel, M., Deuter, P., Morris, S., y Grace, P. R. (2014). Impact of nitrification inhibitor (DMPP) on soil nitrous oxide emissions from an intensive broccoli production system in sub-tropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry*, 77, 243-251.
- Serrano-Silva, N., Luna-Guido, M., Fernandez-Luqueño, F., Marsch, R., y Dendooven, L. (2011). Emission of greenhouse gases from an agricultural soil amended with urea: a laboratory study. *Applied Soil Ecology*, 47, 92-97.
- Shoji, S., Delgado, J., Mosier, A., y Miura, Y. (2001). Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality. *Communications Soil Science and Plant Analysis*, 32, 1051-1070.
- Slafer, G. A., Andradem, F. H., y Satorre, E. H. (1990). Genotypic improvement effects on pre-anthesis physiological attributes related to wheat grain-yield. *Field Crops Research*, 23, 255-263.
- Ye, Y. S., Liang, X. Q., Chen, Y. X., Liu, J., Gu, J. T., Guo, R., y Li, L. (2013). Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice.

Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. *Field Crop Research*, 144, 212-224.

Yuan, M., Ruark, M. D., y Bland, W. L. (2017). Adaption of the AmaizeN model for nitrogen management in sweet corn (*Zea mays* L.). *Field Crops Research* 209, 27-38.