



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS



ATRIBUTOS ECOFISIOLÓGICOS DEL RENDIMIENTO EN TRIGO
(*Triticum aestivum* L.) MODIFICADOS POR LA
FERTILIZACIÓN NITROGENADA

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO FITOTECNISTA

PRESENTA:

OSWALDO GIL GARDUÑO

Director de Tesis: Dr. GASPAR ESTRADA CAMPUZANO

Asesor: Dr. CARLOS MARTÍNEZ RUEDA

CAMPUS UNIVERSITARIO “EL CERRILLO PIEDRAS BLANCAS”
TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

ENERO 2020

AGRADECIMIENTOS

Que un trabajo de investigación de esta dimensión y trascendencia se haya llevado a cabo, se debe en gran medida a las aportaciones que han hecho a mi vida un número extraordinario de personas con quienes hasta ahora he coincidido y con quienes he compartido tiempo y espacio. Tales aportaciones, algunas veces casuales y otras más causales, han hecho una contribución sustancial y que han sido determinantes para mi formación personal y profesional.

De manera muy especial agradezco al Dr. Gaspar Estrada Campuzano quien me brindó valiosos y convenientes comentarios y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo y que le dieron vida a este proyecto.

DEDICATORIAS

A mi familia (Ignacia, Eva, Aida, José Manuel, Isidro, Jorge) que han estado, pero también que han sido parte trascendental en mi formación tanto personal como profesional.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIAS.....	II
ÍNDICE	III
ÍNDICE DE CUADROS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
I.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos Particulares	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Importancia del trigo.....	3
2.1.1 Mundial	3
2.1.2 Nacional	4
2.1.3 Estatal.....	5
2.2 Variedades de trigo en función de su uso final	6
2.3 Importancia de la fertilización nitrogenada en trigo	7
2.4 Etapas de desarrollo en trigo y su importancia en el rendimiento	9
2.5 Componentes fisiológicos del rendimiento	11
2.6 Componentes numéricos del rendimiento	12
III. MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1 Localización del área de estudio.....	17
3.2 Tratamientos y diseño experimental.....	18
3.3 Mediciones	18

3.3.1 Variables fenológicas	18
3.3.2 Determinación de la biomasa aérea.....	19
3.3.3 Rendimiento de grano y sus componentes	19
3.3.4 Análisis estadístico de los datos	20
IV. RESULTADOS	21
4.1 Análisis de varianza para las variables de desarrollo	21
4.2 Prueba de medias para las variables de desarrollo	23
4.3 Análisis de varianza para rendimiento y sus principales componentes fisiológicos y numéricos.....	33
4.4 Comparación de medias.....	34
V. DISCUSIÓN	41
VI CONCLUSIONES	46
VII. BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDICE DE CUADROS

pág

Cuadro 1. Valores de F y su significancia estadística para la duración de las etapas de desarrollo doble lomo (DL), espiguilla terminal (ET), hoja bandera expandida (HBE), antesis (ANT) y madurez fisiológica (MF) expresadas en tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$), para 9 variedades de trigo establecidas en 4 dosis de nitrógeno.....22

Cuadro 2. Valores de F y su significancia estadística para los periodos de desarrollo doble lomo a espiguilla terminal (DL-ET), espiguilla terminal a hoja bandera (ET-HB), hoja bandera a antesis (HB-ANT), y desde antesis a madurez fisiológica (ANT-MF) expresados en grados día desarrollo para 9 variedades de trigo crecidas en 4 dosis de nitrógeno.....23

Cuadro 3. Valores medios de tiempo térmico para la duración de las etapas fenológicas desde la emergencia a doble lomo (DL), espiguilla terminal (ET), hoja bandera (HB), antesis (ANT) y madurez fisiológica (MF), para cuatro dosis de fertilización nitrogenada 0, 100, 200, 300 kg ha^{-1} , evaluadas en 9 variedades de trigo.....25

Cuadro 4. Valores medios de tiempo térmico para la duración de los periodos de desarrollo desde emergencia a doble lomo (EME-DL) desde doble lomo a espiguilla terminal (DL-ET), de espiguilla terminal a hoja bandera (ET-HB), desde hoja bandera a antesis (HB-ANT) y desde antesis a madurez fisiológica (ANT-MF), para cuatro dosis de fertilización nitrogenada, evaluadas en 9 variedades de trigo.....26

Cuadro 5. Valores medios de tiempo térmico para la duración de las etapas fenológicas desde la emergencia a doble lomo (DL), espiguilla terminal (ET), hoja bandera (HB), antesis (ANT) y madurez fisiológica (MF), para cuatro dosis de fertilización nitrogenada 0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ , evaluadas en 9 variedades de trigo.....	29
Cuadro 6. Valores medios de tiempo térmico para la duración de los periodos de desarrollo desde emergencia a doble lomo (EME-DL) desde doble lomo a espiguilla terminal (DL-ET), de espiguilla terminal a hoja bandera (ET-HB), desde hoja bandera a antesis (HB-ANT) y desde antesis a madurez fisiológica (ANT-MF), para 9 variedades de trigo evaluadas en cuatro dosis de fertilización nitrogenada, en Toluca, México. Datos correspondientes al promedio de las 4 dosis de nitrógeno.....	31
Cuadro 7. Valores de F y su significancia estadística para las variables rendimiento de grano (Rend), número de granos por unidad de superficie (NG), peso individual de grano (PIG), biomasa a madurez (Biom _{MF}) e índice de cosecha (IC), para nueve variedades de trigo sembradas en 4 dosis de nitrógeno.....	34
Cuadro 8. Valores medios para las variables rendimiento de grano (Rend), número de granos por unidad de superficie (NG), peso individual de grano (PG), biomasa total a madurez fisiológica (Biom _{MF}) e índice de cosecha (IC), para cuatro dosis de fertilización nitrogenada evaluadas en 9 variedades de trigo en Toluca, México.....	35
Cuadro 9. Valores medios para las variables rendimiento de grano (Rend), número de granos por unidad de superficie (NG), peso individual de grano (PIG), biomasa a madurez fisiológica (Biom _{MF}) e índice de cosecha (IC), para nueve variedades de trigo evaluadas en 4 dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales estados productores de trigo en México.....	5
Figura 2. Superficie cultivada (a) y volúmenes de producción (b) de trigo, en los principales distritos productores en el estado de México.....	6
Figura 3. Diagrama de la generación del rendimiento y sus componentes en trigo.....	13
Figura 4. Tiempo térmico para los periodos de desarrollo doble lomo a espiguilla terminal (DL-ET), espiguilla terminal a hoja bandera expandida (ET-HB), desde hoja bandera a antesis (HB-ANT) y desde antesis a madurez fisiológica (ANT-MF) respecto a 4 dosis de nitrógeno evaluadas en 9 variedades de trigo.....	27
Figura 5. Tiempo térmico para los diferentes periodos que comprenden la duración total a antesis y aquella desde antesis a madurez fisiológica para 9 cultivares de trigo evaluados en 4 dosis de fertilización nitrogenada en Toluca, México. Datos correspondientes al promedio de las 4 dosis de nitrógeno.....	32
Figura 6. Relaciones entre el rendimiento de grano y la producción de biomasa a madurez fisiológica (a) y con el índice de cosecha (b) para nueve cultivares de trigo cultivados en cuatro dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	38
Figura 7. Interacción genotipo x nitrógeno para la producción de biomasa (a) y el rendimiento de grano (b) para nueve cultivares de trigo cultivados en cuatro dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	39
Figura 8. Interacción genotipo x nitrógeno para en número de granos por unidad de superficie (a) y el peso individual de grano (b) para nueve cultivares de trigo cultivados en cuatro dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	40

RESUMEN

El trigo en los Valles Altos de México se considera como un cultivo alternativo cuando las condiciones climáticas no son las adecuadas para la siembra de maíz. Sin embargo, el rendimiento que se obtiene bajo estas condiciones es muy bajo en comparación con el rendimiento a nivel nacional. El objetivo de este trabajo fue identificar los atributos ecofisiológicos que determinan el rendimiento de nueve cultivares de trigo bajo cuatro diferentes dosis de fertilización. Los nueve cultivares de trigo representan el trabajo realizado durante tres décadas de mejoramiento (Salamanca-S75, Saturno-S86, Eneida-F94, Cortázar S94, Rebeca-F2000, Barcenás-S2002, Tollocañ-F2005, Maya-S2007 y Urbina S2007). Los tratamientos de fertilización nitrogenada consistieron en 0, 100, 200 y 300 kg de nitrógeno por hectárea, fraccionando los tratamientos de nitrógeno en tres momentos durante el ciclo del cultivo (siembra, espiguilla terminal y hoja bandera expandida).

Las diferentes dosis de fertilización nos permitieron observar el potencial genético de cada uno de los cultivares. Una alta disponibilidad de nitrógeno alargó ligeramente el ciclo ontogénico del trigo, existiendo una amplia variabilidad genotípica en la duración del ciclo total a madurez fisiológica. La mayor disponibilidad de nitrógeno redujo el ciclo total a fisiológica, así como los periodos que lo componen. El cultivar Eneida F94, presentó el más alto rendimiento de grano cuando la dosis de nitrógeno fue de 300 kg N ha⁻¹, mientras que en Rebeca F-2000 se observó el menor efecto del N en cuanto al rendimiento de grano.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., fertilización nitrogenada, rendimiento de grano.

ABSTRACT

In the Central Highlands of Mexico, wheat is considered as an alternative crop when the weather conditions are not appropriate for maize crops. However, the yield crop that is obtained under these circumstances is very low compared to the yield crop in other parts of Mexico. The objective of the present work was to identify the Ecophysiological Characteristics that determine the yield crop in nine wheat cultivars under four doses of Nitrogen fertilization. These nine wheat cultivars represent the work carried out during three decades of plant breeding in wheat (Salamanca-S75, Saturno-S86, Eneida-F94, Cortázar S94, Rebeca-F2000, Barcenas-S2002, Tollocan-F2005, Maya-S2007 y Urbina S2007).

The four doses of nitrogen fertilization were 00, 100, 200, 300 kg N ha⁻¹ and they were divided into three different growth scales (Sowing, Terminal pikelet and Flag Leaf all visible).

These four doses of Nitrogen allowed us to observe the Genetic potential for these wheat cultivars. The Eneida F94 cultivar showed the highest grain yield with a 300 kg N ha⁻¹ dose. Whereas the Rebeca F-2000 cultivar showed the lowest nitrogen effect in grain yield.

Key words: *Triticum aestivum* L., nitrogen fertilization, grain yield.

I.- INTRODUCCIÓN

El trigo, junto con el arroz y el maíz son los productos más ampliamente cultivados y constituyen la base de la alimentación humana (Reeves, 2016). En el caso del trigo, de acuerdo con datos de la FAO, durante el año 2017 se cultivaron alrededor de 220 millones de hectáreas a nivel mundial con una producción total de 770 millones de toneladas y un rendimiento promedio de 3.5 t ha^{-1} (FAO, 2019). En México la superficie sembrada de trigo fue de 660 000 hectáreas con una producción de 3.5 millones de toneladas y un rendimiento promedio de 5.3 t ha^{-1} (FAO, 2019). En el Estado de México se sembraron poco más de 5 000 hectáreas, con una producción de 11 500 toneladas y un rendimiento promedio de 2.2 t ha^{-1} (SIAP, 2019).

El Cultivo de trigo en los Valles Altos de la mesa central de México es considerado una alternativa a la producción de maíz cuando ocurre un retraso en la temporada de lluvias. A pesar de que el cultivo ha cobrado importancia en la zona de Valles Altos, la mayor parte de la producción del grano está destinada para elaborar alimentos balanceados para los animales debido a la baja calidad del grano para la industria panadera. Estudiar cómo se modifican los atributos ecofisiológicos que determinan el rendimiento en este cultivo ante cambios en la cantidad y disponibilidad de nitrógeno, sería de gran utilidad para incrementar los rendimientos y la calidad del grano. A la fecha no existen evidencias en la región de la magnitud de cambio en los atributos que determinan el rendimiento y la producción de biomasa a partir de la fertilización nitrogenada. Lo anterior sería relevante si en un futuro se quisiera que dicho cultivo se usara para la producción de harina y pudiera ser utilizada por la industria panadera.

Con base en lo anterior se tienen los siguientes objetivos:

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general.

Identificar los atributos ecofisiológicos que determinan el rendimiento del grano en diferentes variedades de trigo antiguas y modernas en respuesta a la fertilización nitrogenada.

1.1.2 Objetivos Particulares

- Determinar los cambios en los caracteres de desarrollo y producción de biomasa en diferentes cultivares de trigo ante cambios en la disponibilidad de nitrógeno.
- Identificar los caracteres fisiológicos y morfológicos del rendimiento que se ven más afectados ante cambios en la disponibilidad de nitrógeno en trigo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia del trigo.

El trigo, junto con el maíz y el arroz, constituyen la base de la alimentación mundial. Diariamente, la humanidad consume millones de toneladas de estos cereales ya sea de manera directa en forma de tortillas, panes, pasta, pizza y pasteles; o bien de forma indirecta ya que estos cereales son la base de la alimentación de vacas, cerdos y aves (Reeves et al., 2016).

En conjunto, el trigo, el maíz y el arroz representan poco más del 40 % del aporte calórico de la dieta humana y en algunas regiones de África, el trigo representa el 40 % de las proteínas. Además, en lugares como norte América y Europa Occidental, el trigo representa hasta el 20 % de la ingesta de proteínas.

2.1.1 Mundial

En el 2017 la producción conjunta de maíz, trigo y arroz ascendió a los 2 670 millones de toneladas. Y si tomamos en cuenta la superficie cosechada, el trigo es el cereal más extensamente cultivado a nivel mundial ya que en el 2017 se cosecharon 220 millones de hectáreas aproximadamente en comparación con los 197 millones de maíz y los 167 millones de arroz (FAO, 2019).

Según datos de la FAO, se estima que para el 2050 la demanda conjunta de maíz, arroz y trigo va a ascender a 3 300 millones de toneladas anualmente lo que implica un aumento de más de 600 millones de toneladas ya que en el 2017 la producción conjunta fue de 2 670 millones de toneladas. Por otro lado, si se considera que es poco probable aumentar la superficie destinada a la agricultura, este aumento en la

producción de cereales deberá de venir de tierras agrícolas existentes. Lo anterior resalta la importancia de conocer los atributos ecofisiológicos que lleven a un aumento en el rendimiento cuando el genotipo o las prácticas de manejo son modificadas.

2.1.2 Nacional

De manera general el trigo es el segundo cereal más importante en la alimentación de los mexicanos. El consumo per cápita es de 57.4 kg al año. Además, el trigo constituye el 40 % del gasto que se hace en cereales y representa el 10 % de la ingesta de proteínas. En el 2018 en México, la superficie sembrada de trigo fue de 467 319 hectáreas con una producción de 2.8 millones de toneladas y un rendimiento promedio de 6.0 t ha⁻¹ (SIAP, 2019) lo que coloca a México por encima de la media mundial que es de 3.5 toneladas por hectárea. Dentro de los principales estados con mayor superficie cosechada y mayor volumen producido de trigo se encuentran Sonora ocupando el primer lugar con 223 373 ha con volúmenes de producción del orden de casi 1 500 000 toneladas. Le sigue Guanajuato con 50 000 ha cosechadas y 346 000 toneladas producidas (Figura 1)

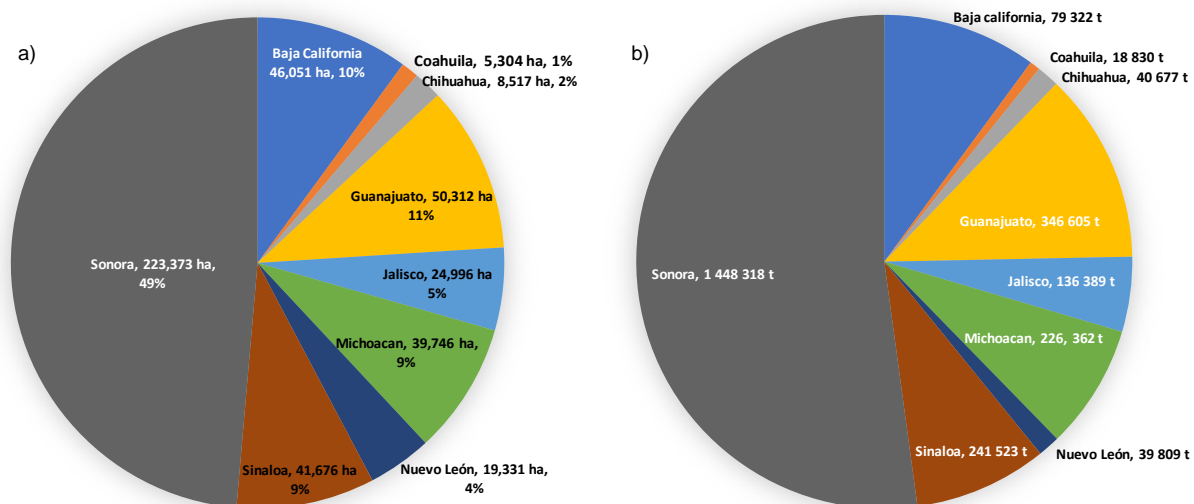


Figura 1. Principales estados productores de trigo en México, superficie cosechada (a) y volumen de producción (b), para el ciclo agrícola 2017. Fuente. SIAP, 2019.

2.1.3 Estatal

En el Estado de México se siembran poco más de 5 000 hectáreas de trigo, con una producción de 11 500 toneladas y un rendimiento promedio de 2.2 t ha⁻¹ (SIAP, 2019). Los principales distritos agrícolas que desatacan por su superficie (a) y sus volúmenes de producción (b) son: Texcoco, Jilotepec, Atlacomulco y Zumpango (Figura 2).

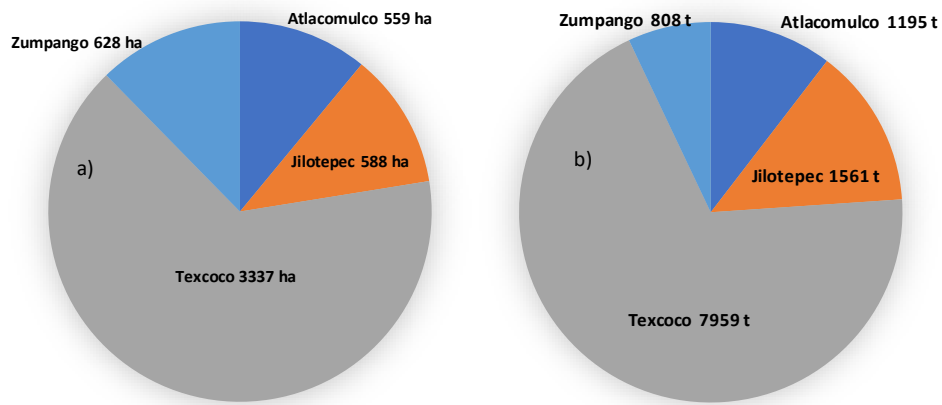


Figura 2. Superficie cultivada (a) y volúmenes de producción (b) de trigo, en los principales distritos productores en el estado de México. Fuente: SIAP, 2019.

2.2 Variedades de trigo en función de su uso final

Los trigos se clasifican con base en la especie botánica a la que pertenecen y también tomando en cuenta la dureza del grano. A partir de estas características se determina su uso final. En México, el trigo harinero (*Triticum aestivum L.*) se utiliza para la elaboración de panes, tortillas, repostería y galletas. Según la norma oficial mexicana NMX-FF-036-1996 el trigo harinero o panificable se clasifica en cuatro grupos de acuerdo con las características del gluten:

Grupo 1. Trigos de gluten fuerte que poseen las características de fuerza y propiedades viscoelásticas ideales para la industria mecanizada de la panificación y para mezclas con trigos suaves.

Grupo 2. Trigos de gluten medio fuerte que poseen las características de fuerza y propiedades viscoelásticas aptas para la industria artesanal y semi mecanizada de pan, así como para mezclas con trigos suaves.

Grupo 3. Trigos suaves de gluten débil que poseen las características de fuerza y propiedades viscoelásticas aptas para la industria galletera, y para la elaboración de tortillas y otros productos.

Grupo 4. Trigos de gluten tenaz que poseen poca fuerza y valores de tenacidad altos, aptos para mezclas y en la producción de harinas con diferente potencial de utilización en la industria pastelera, galletera y en otros productos.

Si bien, la genética, la sanidad y calidad física del grano son determinantes para la comercialización de trigo harinero, también se sabe que el manejo agronómico incide de manera directa en algunos de los parámetros físicos de este cereal; por lo que el objetivo de este trabajo es identificar esos atributos que determinan el rendimiento.

2.3 Importancia de la fertilización nitrogenada en trigo

El nitrógeno es el motor principal de la producción agrícola, cuando la luz del sol y la disponibilidad de agua no son limitantes. En este sentido la producción de materia seca y rendimiento de grano están estrechamente relacionadas con la disponibilidad y absorción del nitrógeno (Barraclough et al., 2010). Los cultivares de trigos modernos requieren del uso de fertilizantes minerales, herbicidas y fungicidas para lograr altos rendimientos de grano. En este sentido el nitrógeno en el suelo es particularmente importante ya que es un elemento esencial para obtener altos

rendimientos de grano y de buena calidad (Guarda et al. 2004). Se estima que alrededor del 40 al 60% del nitrógeno que se aplica es aprovechado en el cultivo de trigo y este porcentaje disminuye a medida que la cantidad aplicada se incrementa (Ortiz-Monasterio et al. 1997; Foulkes et al., 1998; Derici y Schepers, 2001). La aplicación fraccionada del nitrógeno en diferentes momentos del ciclo del cultivo evita pérdidas de este elemento por lixiviación de tal forma que una mayor cantidad pueda ser aprovechada para ser depositada en el grano e incrementar la cantidad de proteína (Weber et al. 2008). En la actualidad, no existen en la región de valles altos y específicamente en la región Toluca-Atlacomulco evidencias que muestren la respuesta de diferentes variedades de trigo (antiguas y modernas) a la fertilización nitrogenada en diferentes momentos del ciclo del cultivo. Un mejor entendimiento de dicha respuesta ayudará a incrementar los rendimientos y la calidad del grano, mejorando el poder adquisitivo de los productores del Estado de México.

Cuando la disponibilidad de nitrógeno en el suelo es limitante, el cultivo disminuye la captura de recursos (agua y luz), disminuye la eficiencia en el uso de los recursos o ambas (Lemaire et al. 2008). El primer tipo de respuesta se debe a una reducción en la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (RPAI) como consecuencia de una reducción en la tasa de expansión foliar (Muchow, 1988; Gastal y Nelson, 1994) o cantidad de macollos producidos (Masle, 1981) reduciendo el índice de área foliar (Colnenne et al. 2002). Por otro lado, una segunda respuesta ante una deficiencia de nitrógeno es una reducción en la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) lo cual es debido a una reducción en el

contenido de nitrógeno foliar, lo cual afecta directamente la tasa fotosintética del cultivo.

2.4 Etapas de desarrollo en trigo y su importancia en el rendimiento

El desarrollo de los cereales de invierno ha sido definido como la secuencia de eventos fenológicos controlados por factores externos, los cuales determinan cambios en la morfología y/o función de los órganos. Entre los factores externos que regulan la duración de dichos eventos en los cereales están la temperatura y el fotoperiodo (Hay y Kirby, 1991; Slafer y Rawson, 1994). Sin embargo, otros factores tales como la disponibilidad de nutrientes (Longnecker et al., 1993; Rodríguez et al., 1999), y agua (Evans, 1987; Rawson, 1993; McMaster, 1997; Ivandic, et al., 2000; McMaster y Wilhelm, 2003) también pueden afectar la tasa de desarrollo de los cereales, aunque el impacto de estos factores sobre la tasa de desarrollo es menor al ejercido por la temperatura y el fotoperiodo. El efecto de estos factores sobre la tasa de desarrollo de los cultivos depende principalmente de la intensidad, el momento de ocurrencia y la duración del estrés (Frank y Bauer, 1982; Slafer y Rawson, 1994; McMaster et al., 2005).

El efecto universal de la temperatura sobre la tasa de desarrollo es incrementar ésta a medida que existe un incremento de la temperatura (Slafer y Rawson, 1994), un efecto similar se ha observado cuando la disponibilidad de agua en el suelo es reducida (Krenzer, et al., 1991; McMaster, 1997; Ivandic, et al., 2000; McMaster y Wilhelm, 2003).

Un apropiado desarrollo fenológico es la característica que tiene el efecto más dominante sobre la adaptación de los cereales a su ambiente, permitiéndole maximizar su productividad (Muchow et al., 1994; Passioura, 1996; Richards, 1996). En este sentido, se ha argumentado que el periodo de tiempo desde la emergencia del cultivo hasta la antesis es de vital importancia para mejorar la adaptabilidad del cultivo a distintos ambientes (Worland, 1996; Slafer y Whitechurch, 2001). Esto es particularmente importante en regiones con clima Mediterráneo en donde la precipitación durante el verano es impredecible, y se requiere que los cereales completen su ciclo antes que el agua del suelo se agote de modo tal que el llenado de grano se dé bajo temperaturas y condiciones no estresantes (Quarrie et al., 1999). La variabilidad en la fase de desarrollo, asociada a los eventos de estrés (tanto hídricos como nutricionales, para un determinado genotipo estaría más vinculado a cambios en el filocrono (por tratarse de un evento que evidencia aspectos de crecimiento) que, en el número final de hojas, el cual es un claro evento de desarrollo (Arisnabarreta y Miralles, 2006). Determinar variabilidad en la duración total del ciclo a antesis puede ser de gran ayuda en la identificación de cultivares con amplia adaptabilidad y/o adaptación específica a distintas condiciones ambientales.

Desde el punto de vista de la vinculación entre el rendimiento y el desarrollo del cultivo, se ha demostrado tanto en trigo como en cebada, que una forma de incrementar el rendimiento potencial podría ser mediante una mayor duración de la etapa reproductiva tardía (desde espiguilla terminal hasta antesis) a expensas de una menor duración de la etapa vegetativa sin alterar el tiempo a antesis (Slafer et al., 1996; Araus et al., 2002; González et al., 2003, González et al 2005; Miralles y

Slafer, 2007), a través de la manipulación de la sensibilidad al fotoperiodo (Miralles et al., 2000). Sin embargo, para que estos rasgos puedan ser explotados por el mejoramiento genético se debe detectar en una primera instancia la existencia de variabilidad genotípica en la duración de las etapas que ocurren antes y después de espiguilla terminal, para igual duración de ciclo total a antesis (Miralles y Slafer, 2007).

2.5 Componentes fisiológicos del rendimiento

El rendimiento de un cultivo puede ser expresado en términos de la biomasa producida (BT) por el índice de cosecha (IC). Entendiéndose que el IC es la proporción de BT que representa el rendimiento económico o el grano cosechado. La producción de biomasa o crecimiento del cultivo es el resultado de la división y alargamiento celular de los órganos diferenciados en la planta, como resultado de la producción, transporte y acumulación de fotoasimilados y nutrientes (Cárcova et al., 2015). Por otro lado, el índice de cosecha refleja la asignación de fotoasimilados hacia los granos u órganos de interés. Por analogía, se puede definir también el índice de cosecha de nutrientes minerales (por ejemplo, nitrógeno, fósforo, potasio, etc.), el cual reflejaría la proporción del nutriente que es exportada hacia los granos. Un aspecto importante para considerar se refiere a que para realizar comparaciones válidas de IC entre especies y entre genotipos se debe tener en cuenta que la mayoría de los valores de IC que se encuentran en la literatura, no están consideradas las raíces ni tampoco las hojas que se han caído al suelo como constituyentes de la biomasa, por lo que seguramente existe una sobre estimación del IC (Cárcova et al., 2015). Diversos estudios alrededor del mundo han

identificado características promisorias asociadas con la producción de biomasa en trigo bajo condiciones limitantes, entre las que destacan la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN), la discriminación isotópica de carbono, la eficiencia transpiratoria, entre otras. Se ha argumentado que las diferencias entre genotipos en producción de biomasa y rendimiento de grano pueden estar relacionadas con diferencias en absorción y translocación por unidad de nutriente absorbido (Clark and Duncan, 1991). El mejoramiento genético actual se ha enfocado a que los cultivares tengan una alta tolerancia a la aplicación de bajos niveles de nutrientes. Sin embargo, el nivel de aplicación de nutrientes tiene una gran influencia sobre la acumulación de biomasa afectando la demanda del nutriente (absorción /utilización). Por ejemplo, incrementar las aplicaciones de 0 a 210 kg ha⁻¹, reduce la eficiencia en el uso del nitrógeno en arroz.

2.6 Componentes numéricos del rendimiento

El rendimiento de los cultivos de grano se establece y por lo general se mide al finalizar el ciclo del cultivo. El rendimiento de grano en trigo queda establecido y puede ser medido, inmediatamente después de que finaliza el ciclo del cultivo. Sin embargo, el mismo se genera a lo largo de toda la ontogenia como consecuencia del aporte de las distintas estructuras que lo componen (Satorre *et al.*, 2003).

La generación del rendimiento es un sistema complejo por lo que el análisis de cada una de sus partes se simplifica al dividirlo en cada uno de sus componentes. Los dos componentes principales del rendimiento son el número de granos por unidad

de superficie (NG) y el peso promedio unitario de los granos (PIG). Por lo tanto, el rendimiento de un cultivo de grano puede explicarse como el producto de ambos componentes.

$$\text{Rendimiento (g m}^{-2}\text{)} = \text{NG} \times \text{PIG}$$

Esta descomposición en número y peso de los granos es la forma más simple y menos especie-dependiente de describir al rendimiento. Cada uno de estos componentes a su vez puede ser dividido en varios subcomponentes dependiendo de la especie, por lo que, se hace más difícil describir los mecanismos generales de producción del rendimiento. Para el caso de trigo se puede decir que el rendimiento de grano puede ser descrito en base al número y peso de los granos. El primero es el resultado del producto entre el número de espigas y el número de granos por espiga, mientras que éste último resulta del producto del número de espiguillas por espiga y el número de granos por espiguilla. Por lo que respecta al peso individual de grano, este es el resultado de la duración del periodo de llenado de grano y de la tasa de llenado (Figura 3).

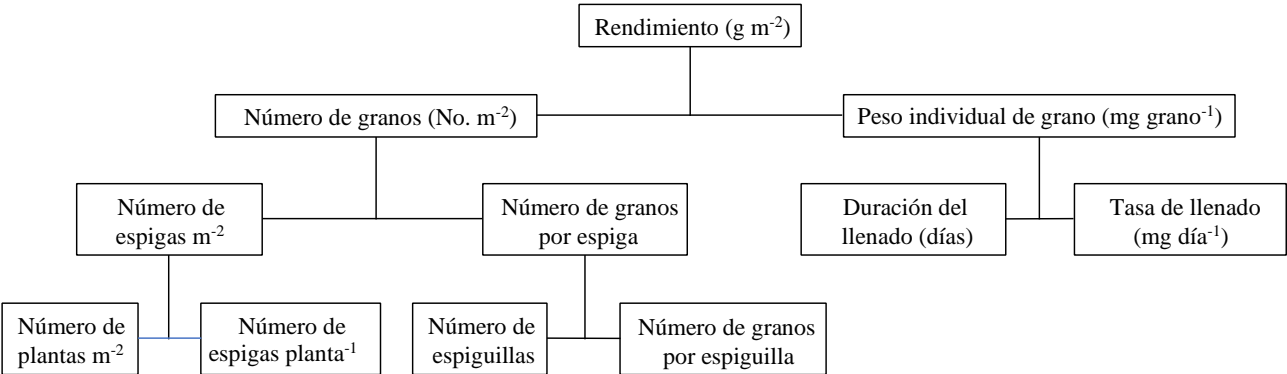


Figura 3. Diagrama de la generación del rendimiento y sus componentes en trigo

A lo largo del ciclo del cultivo de trigo, se llevan a cabo una gran cantidad de procesos que se observan a simple vista (cambios externos) y otros que sólo son visibles mediante la disección de la planta. La etapa reproductiva es muy importante en términos de generación de componentes del rendimiento; durante esta etapa queda definido el número de espigas m^{-2} , el número de granos espiga⁻¹, siendo éstos los componentes centrales del número de granos m^{-2} (Slafer *et al.*, 2003; Miralles, 2004) que, junto al peso promedio del grano, determinan el rendimiento del cultivo. El número de granos m^{-2} se define cerca de antesis y el peso del grano durante el período de llenado (Abbate *et al.*, 1994).

El número de granos por unidad de superficie se establece en la fase reproductiva, que comprende el periodo entre las etapas de iniciación floral y antesis (Slafer *et al.*, 1996). El número de granos m^{-2} depende de la radiación interceptada y de la temperatura que controla la duración del período de crecimiento de las espigas.

Por otro lado, el número de granos por espiga se conforma en función del número de espiguillas por espiga (definido entre el estado de doble lomo y la aparición de la espiguilla terminal) y del número de granos por espiguilla (que se define entre el estado de espiguilla terminal y el cuaje de los granos) (Kiniry y Ritchie, 1985; Schussler y Westgate, 1991).

El número de granos por espiga se determina inmediatamente después de la antesis. El desarrollo inicial del grano depende del suministro de asimilados a la espiga durante dicha etapa (Kiniry y Ritchie, 1985; Schussler y Westgate, 1991). Por lo tanto, cuanto mejores sean las condiciones de crecimiento de la planta después de la antesis, menor será el porcentaje de aborto y, por lo tanto, mayor el

número final de granos por espiga (Andrade *et al.*, 1996). Por consiguiente, el número de granos por espiga esta función de la supervivencia de espiguillas y de granos, más que del número total de espiguillas diferenciadas (Andrade *et al.*, 1996). Un estrés hídrico durante el período de crecimiento de la espiga incrementa la mortalidad de flores (Fischer, 1973) y origina una menor eficiencia de conversión de la radiación interceptada en materia seca (Whitfield y Smith, 1989), lo cual contribuye a reducir el número de granos por m^2 (Abbate *et al.*, 1994). De acuerdo con lo anterior, el cultivo debe estar sano, libre de malezas y bien provisto de agua y nutrimentos, y así favorecer, la intercepción de radiación, la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa y la partición de biomasa a estructuras reproductivas durante el periodo de floración (Andrade *et al.*, 1996).

Otro componente del número de granos, el número de espigas por m^2 resulta de la combinación del número de plantas por m^2 y del número de espigas por planta. El número de plantas por m^2 está determinado por la densidad de siembra (definido desde la siembra hasta la emergencia). En la definición de este componente, influyen factores como la fertilización nitrogenada y la disponibilidad de agua (Hay y Walker, 1989).

El número de espigas por planta, que se determina durante el período de iniciación floral a antesis, está influenciado por el número de tallos producidos y la proporción de éstos que dan origen a una espiga; siendo ésta última, el resultado de la competencia por un suministro limitado de asimilados dentro de la planta y por la intercepción de la luz dentro del cultivo (De la Morena *et al.*, 1986).

Finalmente, el peso de grano resulta del efecto combinado que ejercen la duración del período efectivo de llenado y la tasa de llenado (Andrade *et al.*, 1996). En las primeras dos semanas posteriores a la antesis, el grano fecundado acumula poco peso; asimismo, condiciones desfavorables durante esta etapa reducen el número de células, disminuyendo el tamaño potencial del grano (Frey, 1981; Reddy y Daynard, 1983; Jones *et al.*, 1985).

La duración efectiva del período de llenado se define como el cociente entre el peso final del grano y la tasa de crecimiento de los granos durante la etapa lineal de acumulación de peso (Andrade *et al.*, 1996). Esta duración está en función de la fuente de fotoasimilados disponibles y de la temperatura, que determina la tasa con que dicha fuente es asignada al grano en desarrollo (Cirilo y Andrade, 1996). Si la provisión de fotoasimilados durante el período de llenado de grano es baja, la cual puede ocurrir por baja radiación incidente, por baja interceptación debida a la disminución del área foliar, se reduce la duración del período de llenado (Andrade *et al.*, 1996). Cuando la fuente de fotoasimilados no es limitante durante el llenado de grano, la duración del período efectivo de llenado es función de la temperatura. Este factor determina, a través de su efecto sobre la tasa de crecimiento del grano, el tiempo en que el peso máximo es alcanzado (Brown, 1976; Kiniry y Bonhomme, 1991).

Las altas temperaturas durante el período de llenado reducen el peso potencial del grano (Fischer y HilleRis-Lambers, 1978) y la duración del período de llenado (Wiegand y Cuellar, 1981), pero incrementan la tasa diaria de llenado (aumento en peso por grano por día) (Sofield *et al.*, 1974), produciendo un efecto compensatorio bajo ciertas circunstancias.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio.

El experimento se estableció en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, localizado en el Cerrillo Piedras Blancas, municipio de Toluca, México (99°41'30'' longitud oeste y 19°42'30'' latitud norte) a una altitud de 2640 m.s.n.m. El clima predominante en esta localidad es del tipo C(w2) (w)b(i), que, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1988), corresponde al 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 promedio anual de 900 mm.

El experimento se sembró en el mes de diciembre (2010) a una densidad de 336 semillas por m², en parcelas de 6 surcos de 3 m de largo y 0.20 m de separación. Para garantizar una buena uniformidad de plantas, la siembra de la semilla se realizó colocando ésta a una distancia equidistante en cintas de papel biodegradable (garantizando la densidad arriba mencionada), las cuales fueron previamente preparadas en el laboratorio.

El experimento se estableció bajo condiciones de riego y el agua se aplicó por medio de cintas de goteo, procurando mantener el suelo muy cerca de capacidad de campo durante todo el ciclo de cultivo. Antes de la siembra se obtuvieron muestras de suelo con el fin de determinar el nitrógeno y fósforo disponibles. Al momento de la siembra se aplicaron 60 kg de fósforo y 30 kg de potasio para evitar deficiencia de estos elementos. Las malas hierbas se controlaron manualmente y se realizaron

aplicaciones de insecticidas y fungicidas para controlar y prevenir plagas y enfermedades, respectivamente. A partir de inicio de elongación del tallo se instalaron redes de tutoreo para evitar el acame de las plantas.

3.2 Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos (dosis de nitrógeno) se establecieron bajo un arreglo de franjas divididas y dentro de cada una de ellas los cultivares fueron aleatorizados bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Desde la emergencia del cultivo y hasta la madurez fisiológica las temperaturas máxima y mínima del aire y la radiación incidente (MJ m^{-2}) se registraron por medio de una estación meteorológica (Davis Vantage Pro2, USA), la cual se encuentra instalada a 200 m del campo experimental.

3.3 Mediciones

3.3.1 Variables fenológicas

Durante el ciclo del cultivo se registraron las principales etapas fenológicas del cultivo (inicio de elongación del tallo, embuche, espigamiento, antesis y madurez fisiológica).

Todas las etapas fenológicas del cultivo se expresaron tanto en días calendario como en tiempo térmico utilizando como temperatura base de 0°C (Gallagher, 1979; Baker *et al.*, 1980; Kernich y Halloran, 1996). Para determinar las etapas fenológicas de inicio de elongación del tallo, embuche, espigamiento y antesis se utilizará la escala propuesta por Zadocks *et al.*, (1974). Para determinar el momento de la madurez fisiológica se marcaron en antesis 20 espigas por parcela seleccionadas

de manera aleatoria con igual número de espiguillas por espiga. Se registró el peso seco de los 4 granos basales de 4 espiguillas centrales de cada espiga, al cosechar periódicamente (dos veces por semana) una espiga, a partir de los 7 días posteriores a la antesis. La madurez fisiológica será estimó mediante una regresión bilineal entre el peso seco del grano y el tiempo térmico desde antesis (Miralles y Slafer, 1995) utilizando la siguiente ecuación:

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

Donde: "Y" es el peso seco del grano, "a" es el intercepto, "b" es la tasa de llenado de grano, "x" es el tiempo térmico después de antesis (°Cd) y "c" es la duración total de llenado de grano o madurez fisiológica.

3.3.2 Determinación de la biomasa aérea

Se realizaron cortes de biomasa en un área de dos surcos de 60 cm de largo, en los estadios de amacollamiento (GS 23), inicio de elongación del tallo (GS 31), antesis (GS 65), grano lechoso (GS 75) y madurez fisiológica (GS 91). Las muestras de biomasa se separaron en los estratos de vástagos principales y macollos. El peso seco de hojas (verdes o muertas), tallos y espigas (cuando estuvieron presentes) de cada categoría se registró después de secar las muestras en una estufa de aire forzado a 60°C durante 72 horas.

3.3.3 Rendimiento de grano y sus componentes

Cuando el cultivo se encontró en madurez fisiológica se procedió a la cosecha de éste. En cada parcela las plantas de dos surcos centrales de 100 cm de longitud se cosecharon manualmente y se separaron en vástagos principales y macollos. Se

separaron las espigas y el resto del material dentro de cada categoría (vástagos principales y macollos). Cada uno de los estratos se secó en una estufa a 60°C durante 72 horas hasta peso constante. Se determinó el rendimiento de la muestra (el cual se llevó a unidad de área), el índice de cosecha (cociente entre el rendimiento de grano y la materia seca), el número de granos por unidad de área, el peso promedio de los granos, el número de espigas por m², el número de granos por espiga y el número de espiguillas por espiga (vástago principal) y peso hectolítrito.

3.3.4 Análisis estadístico de los datos

Las variables de respuesta del experimento se sometieron a análisis de varianza de acuerdo con el modelo lineal utilizado. Cuando la prueba de F de los análisis de varianza resultó significativa, se procedió a realizar la prueba de medias utilizando para ello la diferencia mínima significativa honesta (DMSH) de la prueba de Tukey a un nivel de significancia del 5% (Palaniswamy y Palaniswamy, 2006). Las relaciones entre variables se analizaron mediante análisis de regresión y se ajustaron modelos lineales, bilineales, o sigmoideos (TBL curve, Jandel Scientific, AISN Software) según la variable y/o el experimento.

IV. RESULTADOS

4.1 Análisis de varianza para las variables de desarrollo

En el Cuadro 1 se muestran los valores de F y su significancia estadística para la duración de las etapas de desarrollo consideradas, en el cual se observa que para el caso de repeticiones dentro de nitrógeno solo se encontraron efectos significativos ($P < 0.05$) en tiempo térmico a ET, mientras que para el resto de las variables no se observaron diferencias significativas. Para el caso de nitrógeno se observaron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) para todas las etapas de desarrollo consideradas. Por otro lado, para el factor variedades se observaron efectos significativos en la duración de todas las etapas de desarrollo evaluadas (Cuadro 1). De igual forma, la interacción N x Var estuvo presente de manera significativa en todas las variables de desarrollo. Los coeficientes de variación estuvieron en el rango de 1.9 y 3.8% correspondiendo al tiempo térmico a madurez fisiológica y doble lomo, respectivamente.

Cuadro 1. Valores de F y su significancia estadística para la duración de las etapas de desarrollo doble lomo (DL), espiguilla terminal (ET), hoja bandera expandida (HBE), antesis (ANT) y madurez fisiológica (MF) expresadas en tiempo térmico (°Cd), para 9 variedades de trigo establecidas en 4 dosis de nitrógeno en Toluca, México.

F.V.	Tiempo térmico (°cd) desde emergencia a					
	g.l.	DL	ET	HB	ANT	MF
Repetición(N)	8	0.9ns	2.12*	1.5ns	0.6ns	0.9ns
Nitrógeno(N)	3	13.2**	10.8**	17.5**	38.0**	45.8**
Variedades (Var)	8	8.9**	66.4**	54.5**	76.2**	34.0**
N. x Var.	24	3.6**	2.8*	3.3**	4.7**	9.2**
Error (CME)	64	192.2	471.6	1000.1	915.5	1463.6
Coeficiente Var.		3.8	3.5	3.1	2.3	1.9

^{ns} No significativo *Significativo 0.05 ** Muy significativo 0.01

Los valores de F para cada uno de los periodos que comprende tanto la duración total del ciclo del cultivo, como la duración del periodo pre-antesis se presentan en el Cuadro 2, en el cual se aprecia que no existió significancia estadística para repeticiones dentro de nitrógeno para ningún periodo considerado, mientras que para el factor dosis de nitrógeno existieron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) para todos los periodos evaluados. Por otro lado, para el factor variedades el análisis de varianza reveló diferencias altamente significativas para la duración de los diferentes periodos considerados. De igual manera se observó la existencia de interacción significativa para todos los periodos de desarrollo considerados en la presente investigación. Los coeficientes de variación oscilaron entre 3.8 a 13.2%, correspondiendo a la duración de los periodos desde emergencia a doble lomo y desde hoja bandera a antesis, respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de F y su significancia estadística para los periodos de desarrollo doble lomo a espiguilla terminal (DL-ET), espiguilla terminal a hoja bandera (ET-HB), hoja bandera a antesis (HB-ANT), y desde antesis a madurez fisiológica (ANT-MF) expresados en grados día desarrollo para 9 variedades de trigo crecidas en 4 dosis de nitrógeno en Toluca, México.

Fuente de variación	g. l	Tiempo térmico (°Cd) desde			
		DL-ET	ET-HB	HB-ANT	ANT-MF
Repetición (N)	8	1.8ns	0.8ns	1.3ns	0.5ns
Nitrógeno (N)	3	13.8**	5.2**	8.6**	47.8**
Variedades (Var)	8	55.8**	42.0**	10.1**	13.9**
N x Var	24	3.6**	3.0**	3.0**	8.8**
Error (CME)	64	520.8	1116.7	1405.2	1500.8
C.V (%)		9.0	8.4	13.2	6.2

^{ns} No significativo *Significativo 0.05 ** Muy significativo 0.01

4.2 Prueba de medias para las variables de desarrollo

Los cambios en la duración de las etapas fenológicas debidos a las dosis de nitrógeno se presentan en el Cuadro 3, en el que se aprecia que la duración desde emergencia a doble lomo mostró ligeros cambios entre las dosis estudiadas, siendo la dosis de 200 kg N ha⁻¹, la que presentó la mayor duración de esta etapa, diferenciándose significativamente del resto de las dosis evaluadas. Para el caso de la duración de la etapa a espiguilla terminal se observa que el efecto de la mejor disponibilidad de nitrógeno se vio reflejado en una menor duración de la etapa. En este sentido, la dosis de 00 kg N, incrementó en 4% la duración de esta etapa

respecto al promedio del resto de las dosis de nitrógeno (Cuadro 3). Por otro lado, la duración de la etapa fenológica de hoja bandera expandida fue incrementada con las dosis de 00 y 200 kg N ha⁻¹, las cuales duraron en promedio ca. 5% más respecto del promedio obtenido en las dosis de 100 y 300 kg N ha⁻¹. De igual forma la duración total a antesis fue afectada significativamente por la disponibilidad de nitrógeno, siendo la dosis de 00 kg N la que duró significativamente más (4%) respecto del promedio de los tratamientos que consideraron mayor disponibilidad del nutriente. Para el caso de la duración total del ciclo del cultivo (MF) el efecto del nitrógeno sobre la duración de esta etapa fue muy similar al observado en las etapas anteriores, con la diferencia que en esta etapa se vio claramente reflejado que a medida que se incrementó la disponibilidad la duración de la etapa fue significativamente menor (Figura 4). De tal manera que cuando no se aplicó nitrógeno la duración de la etapa se incrementó ca. 8% respecto del tratamiento que consideró la mayor disponibilidad de este nutriente (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valores medios de tiempo térmico para la duración de las etapas fenológicas desde la emergencia a doble lomo (DL), espiguilla terminal (ET), hoja bandera (HB), antesis (ANT) y madurez fisiológica (MF), para cuatro dosis de fertilización nitrogenada 0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹, evaluadas en 9 variedades de trigo en Toluca, México.

Dosis de nitrógeno (kg ha ⁻¹)	Tiempo térmico (°Cd) desde emergencia a				
	DL	ET	HB	ANT	MF
0	359.0 b	635.0 a	1028.9 a	1335.3 a	1966.0 a
100	355.4 b	601.7 b	988.9 b	1248.7 c	1927.1 b
200	377.5 a	615.4 b	1034.0 a	1304.9 b	1919.2 b
300	362.2 b	614.4 b	1002.9 b	1297.0 b	1846.5 c

Medias Unidas por la misma letra no difieren significativamente con la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad de error.

La diferente disponibilidad de nitrógeno afectó significativamente la duración de los periodos que componen a la duración total del ciclo a antesis y aquel correspondiente al periodo post-antesis (Cuadro 4). En este sentido, el periodo comprendido desde la emergencia del cultivo hasta doble lomo fue incrementado significativamente con la dosis de 200 kg N ha⁻¹, mientras que el periodo desde iniciación floral (DL) hasta la iniciación de la espiguilla terminal se incrementó en un 11% respecto del promedio de aquellos tratamientos que incluían alguna aplicación de nitrógeno.

Cuadro 4. Valores medios de tiempo térmico para la duración de los periodos de desarrollo desde emergencia a doble lomo (EME-DL) desde doble lomo a espiguilla terminal (DL-ET), de espiguilla terminal a hoja bandera (ET-HB), desde hoja bandera a antesis (HB-ANT) y desde antesis a madurez fisiológica (ANT-MF), para cuatro dosis de fertilización nitrogenada, evaluadas en 9 variedades de trigo en Toluca, México.

Dosis de nitrógeno (kg ha ⁻¹)	Tiempo térmico (°Cd) desde				
	EME-DL	DL-ET	ET-HB	HB-ANT	ANT-MF
0	359.0 b	275.9 a	393.8 b	306.4 a	630.6 b
100	355.4 b	246.3 b	387.1 b	259.8 c	678.3 a
200	377.5 a	237.8 b	418.6 a	270.8 bc	614.3 b
300	362.2 b	252.2 b	388.4 b	294.1 ab	553.5 c

Medias unidas por la misma letra no difieren significativamente con la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad de error.

Contrariamente para el periodo desde espiguilla terminal a hoja bandera expandida no existió una tendencia muy defina entre la diferente disponibilidad de nitrógeno, dado que en la dosis de 200 kg N se observó la mayor duración de dicho periodo, mientras que para el último periodo reproductivo que abarca desde hoja bandera a antesis nuevamente la menor disponibilidad de nitrógeno incrementó la duración del periodo considerado, siendo en promedio 17% más largo respecto a la dosis de 100 kg N ha⁻¹ (Cuadro 4, Figura 4).

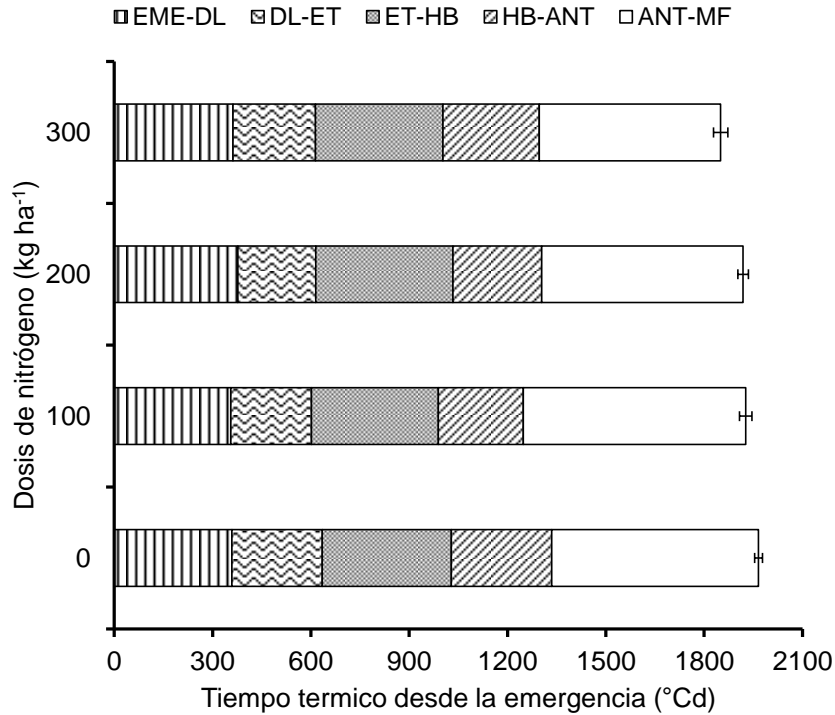


Figura 4. Tiempo térmico para los periodos de desarrollo doble lomo a espiguilla terminal (DL-ET), espiguilla terminal a hoja bandera expandida (ET-HB), desde hoja bandera a antesis (HB-ANT) y desde antesis a madurez fisiológica (ANT-MF) respecto a 4 dosis de nitrógeno evaluadas en 9 variedades de trigo en Toluca, México. Datos representan el promedio de 9 variedades.

La comparación de medias para variedades en las diferentes etapas fenológicas consideradas en la presente se muestra en el Cuadro 5. En este Cuadro se aprecia que en la etapa de desarrollo doble lomo las variedades difirieron grandemente entre sí, siendo las variedades Saturno S-86 y Cortázar S-94 las que mostraron la mayor duración de este periodo, siendo en promedio 6% mayor respecto del promedio del resto de las variedades. Respecto a la duración de la etapa de iniciación de espiguilla terminal el cultivar Rebeca F-2000 requirió mayor tiempo

térmico (742.5 °Cd) para lograr esta etapa de desarrollo, mientras que los cultivares Maya S-2007, Eneida F-94 y Tollocan F-2005 resultaron ser los más precoces en esta etapa con 570.8, 581.5 y 581.0 °Cd, respectivamente. Cabe señalar, que los cultivares Rebeca F-2000y Tollocan F-2005 requirieron en promedio 14% más °Cd respecto de los cultivares más precoces (Bárcenas S-2002 y Maya S-2007) en esta etapa. Por lo que respecta al tiempo total a antesis los cultivares de gluten fuerte se caracterizaron por requerir una mayor cantidad de tiempo (1368 °Cd en promedio) para lograr esta etapa, lo cual representó un 8% más respecto al promedio requerido por el resto de los cultivares de gluten suave. Por lo que respecta a la duración total del ciclo del cultivo (MF), los cultivares Rebeca F-2000, Tollocan F-2005, Saturno S-86 y Salamanca S-75 requirieron la mayor cantidad de tiempo térmico a MF, siendo en promedio 6% más tardíos respecto al promedio del resto de los cultivares (Cuadro 5).

Cuadro 5. Valores medios de tiempo térmico para la duración de las etapas fenológicas desde la emergencia a doble lomo (DL), espiguilla terminal (ET), hoja bandera (HB), antesis (ANT) y madurez fisiológica (MF), para cuatro dosis de fertilización nitrogenada 0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹, evaluadas en 9 variedades de trigo en Toluca, México.

Variedad	Tiempo térmico (°Cd) desde emergencia a:				
	DL	ET	HB	ANT	MF
Salamanca S-75	366.5 bc	616.4 bc	990.1 c	1291.4 c	1954.1 a
Saturno S-86	372.9 ab	599.2 bcd	1009.4 bc	1298.2 c	1955.9 a
Cortázar S-94	385.4 a	615.0 b	1001.0 bc	1309.9 c	1891.6 b
Bárcenas S-2002	364.4 bc	628.0 b	945.5 d	1173.9 d	1842.1 bc
Urbina S-2007	361.5 bcd	615.2 b	988.8 c	1287.3 c	1870.1 bc
Maya S-2007	361.7 bcd	570.8 d	953.2 d	1194.3 d	1830.4 c
Eneida F-94	349.0 cd	581.5 d	1031.6 b	1322.4 bc	1889.0 b
Rebeca F-2000	365.5 bc	742.5 a	1090.8 a	1424.7 a	2000.1 a
Tollocan F-2005	345.0d	581.0 d	1112.6 a	1357.3 b	1998.9 a

En la duración de los periodos que comprende el ciclo total a antesis y aquella desde antesis a madurez para cada una de las variedades evaluadas, se observó una amplia variabilidad genotípica en cada uno de los periodos considerados (Cuadro

6). En este sentido, para el periodo comprendido desde emergencia hasta doble lomo los cultivares Cortázar S-94 y Saturno S-75 fueron los que requirieron mayor tiempo para lograr esta etapa. Contrariamente, para la duración del periodo desde doble lomo a espiguilla terminal el cultivar que requirió más tiempo fue Rebeca F-2000 (376.9 °Cd), resultando 37% más tardío respecto al promedio del resto de los cultivares. El cultivar más corto en este periodo fue Maya S-2007 con 209.1 °Cd. Para el periodo comprendido desde espiguilla terminal a hoja bandera Tollocan F-2005 requirió un 41% más tiempo térmico con respecto al cultivar Bárcenas S-2002 el cual sobresalió por su precocidad en este periodo (Cuadro 6). Por otro lado, fue evidente también la amplia variabilidad genotípica para el periodo desde hoja bandera a antesis, en donde los cultivares Rebeca F-2000 y Cortázar S-94, fueron los cultivares que requirieron en promedio 16% más tiempo térmico para este periodo respecto al promedio del resto de los cultivares evaluados. Para el periodo de llenado de grano que comprende desde antesis hasta madurez fisiológica, se puede apreciar en el Cuadro 6, que los cultivares Bárcenas S-2002, Salamanca S-75, Saturno S-86, Tollocan F-2005 y Maya F-2007 resultaron ser en promedio 12% más tardíos respecto al promedio del resto de los cultivares.

Cuadro 6. Valores medios de tiempo térmico para la duración de los periodos de desarrollo desde emergencia a doble lomo (EME-DL) desde doble lomo a espiguilla terminal (DL-ET), de espiguilla terminal a hoja bandera (ET-HB), desde hoja bandera a antesis (HB-ANT) y desde antesis a madurez fisiológica (ANT-MF), para 9 variedades de trigo evaluadas en cuatro dosis de fertilización nitrogenada, en Toluca, México. Datos correspondientes al promedio de las 4 dosis de nitrógeno.

Variedad	EME-DL	DL-ET	ET-HB	HB-ANT	ANT-MF
Salamanca S-75	366.5 bc	249.9 bc	373.6 cd	301.3 ab	662.7 a
Saturno S-86	372.9 ab	226.3 cd	410.1 bc	288.8 abc	657.6 a
Cortázar S-94	385.4 a	229.6 cd	385.9 cd	308.9 a	581.6 b
Bárceñas S-2002	364.4 bc	263.6 b	317.4 e	228.4 d	668.2 a
Urbina S-2007	361.5 bcd	253.6 cb	373.5 cd	298.5 ab	582.8 b
Maya S-2007	361.7 bcd	209.1 d	382.3 cd	241.0 cd	636.1 a
Eneida F-94	349.0 cd	232.5 cd	450.1 b	290.7 ab	566.6 b
Rebeca F-2000	365.5 bc	376.9 a	348.2 de	333.9 a	575.4 b
Tollocan F-2005	345.0d	236.0 bcd	531.6 a	253.5 bcd	641.6 a

Cabe señalar, que existieron cultivares que para la misma duración total a antesis la duración de las etapas previas fue diferente (Figura 5), por ejemplo, los cultivares

Tollocan F-2005 y Saturno S-86 presentaron casi la misma duración total a antesis (1998.9 y 1955.9 °Cd) pero diferente duración relativa de las etapas anteriores, dado principalmente por una mayor duración del periodo desde espiguilla terminal a hoja bandera en el cultivar Tollocan F-2005. La misma situación fue observada en los cultivares Maya S-2007 y Bárcenas S-2002 (Figura 5).

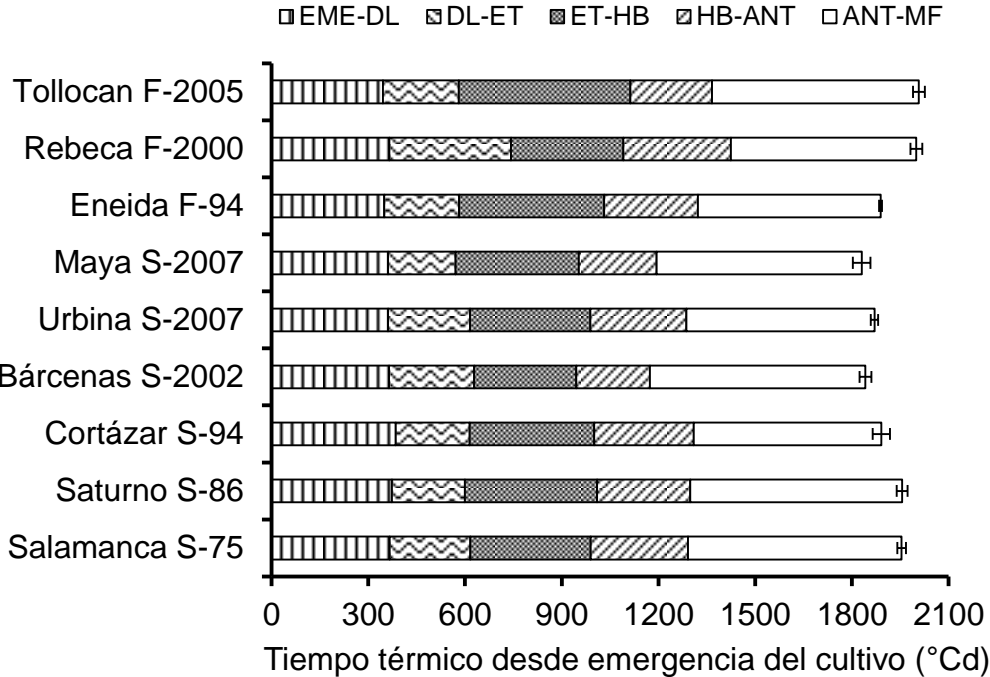


Figura 5. Tiempo térmico para los diferentes periodos que comprenden la duración total a antesis y aquella desde antesis a madurez fisiológica para 9 cultivares de trigo evaluados en 4 dosis de fertilización nitrogenada en Toluca, México. Datos correspondientes al promedio de las 4 dosis de nitrógeno.

4.3 Análisis de varianza para rendimiento y sus principales componentes fisiológicos y numéricos

En el Cuadro 7, se muestran los valores de F y su significancia estadística para los componentes numéricos y fisiológicos del rendimiento de grano, en el cual se observa que para el caso de repeticiones dentro de nitrógeno se observaron efectos significativos ($P < 0.05$) para $Biom_{MF}$ e IC y altamente significativos ($P < 0.01$) para NG, no observándose significancia para Rend y PIG. Por otro lado, para el factor nitrógeno existieron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) para rendimiento de grano, número de granos e índice de cosecha y significativas ($P < 0.05$) para biomasa. Para el caso de repeticiones dentro de nitrógeno se observaron diferencias significativas para todas las variables estudiadas. Por otro lado, el factor variedades resultó altamente significativo para todas las variables en estudio. Así mismo, existió interacción altamente significativa ($P < 0.01$) para todas las variables estudiadas, excepto para peso individual de grano. Los coeficientes de variación oscilaron entre 5.7 y 9.8 %, para las variables biomasa y índice de cosecha, respectivamente (Cuadro 7).

Cuadro 7. Valores de F y su significancia estadística para las variables rendimiento de grano (Rend), número de granos por unidad de superficie (NG), peso individual de grano (PIG), biomasa a madurez (Biom_{MF}) e índice de cosecha (IC), para nueve variedades de trigo sembradas en 4 dosis de nitrógeno.

F.V.	g. l	Rend	Biom _{MF}	IC	NG	PIG
Repetición (N)	8	1.8ns	2.2*	2.0*	4.8**	1.3ns
Nitrógeno (N)	3	500.4**	1038.2*	10.6**	529.7**	7.7**
Variedades (Var)	8	34.8**	19.2**	20.3**	19.9**	11.4**
N x Var.	24	9.44**	11.2**	7.6**	9.2**	0.8 ^{ns}
Error (CME)	64	1245.2	6161.7	0.0008	927134.0	7.4
C.V (%)	0	9.4	5.6	11.1	9.0	6.2

^{ns}No significativo *Significativo 0.05 ** Muy significativo 0.01

4.4 Comparación de medias

La comparación de medias para las dosis de nitrógeno en los componentes numéricos y fisiológicos del rendimiento de grano se muestran en el Cuadro 8, el cual se observa que existió un efecto positivo de las dosis sobre el rendimiento de grano, dado que a medida que se incrementa la dosis también se incrementa el rendimiento, lo cual fue atribuido principalmente a incrementos en el número de granos por unidad de superficie y no por incrementos en el peso individual de grano. Por otro lado, la biomasa fue afectada significativamente por la disponibilidad de nitrógeno, mientras que el IC solo fue afectado ligeramente (Cuadro 8).

Cuadro 8. Valores medios para las variables rendimiento de grano (Rend), número de granos por unidad de superficie (NG), peso individual de grano (PG), biomasa total a madurez fisiológica (Biom_{MF}) e índice de cosecha (IC), para cuatro dosis de fertilización nitrogenada evaluadas en 9 variedades de trigo en Toluca, México.

Dosis de nitrógeno (kg ha ⁻¹)	Rend (g m ⁻²)	NG (m ⁻²)	PG (mg)	Biom _{MF} (g m ⁻²)	IC
0	187.8d	5659.5d	34.4b	743.5d	0.25b
100	345.3c	9855.4c	37.4a	1394.7c	0.24b
200	410.3b	10996.7b	36.9a	1558.3b	0.26b
300	554.0a	16027.7a	34.9b	1904.7a	0.29a

La biomasa producida en madurez fisiológica determinó en gran medida el rendimiento de grano obtenido, ya que la mejor disponibilidad de nitrógeno se vio reflejada en un mayor rendimiento de grano (Cuadro 8). Los valores de índice de cosecha mejoraron también con la mejor disponibilidad de nitrógeno, sin embargo, la magnitud de cambio fue mucho menos evidente respecto a los valores de biomasa.

La comparación de medias para variedades se muestra en el Cuadro 9, en el cual se observa que existió una gran variabilidad genotípica para rendimiento de grano, siendo la variedad Maya S-2007 la que sobresalió por su rendimiento más alto (436.0 g m⁻²), superando en un 42% a la variedad menos rendidora Rebeca F-2000 (Cuadro 9). Dentro de las variedades de gluten fuerte sobresalió Eneida F-94, seguida de Tollocan F-2005, las cuales rindieron 2 y 28% menos respecto de la

variedad más rendidora. El mayor rendimiento de las variedades antes mencionadas fue atribuido a que obtuvieron también un mayor número de granos por unidad de superficie. Cabe señalar, que las variedades de gluten fuerte (Eneida F-94, Rebeca F-2000 y Tollocan F-2005) presentaron 22% menos rendimiento respecto de las variedades de gluten suave (resto). Por otro lado, la variedad Eneida F-94 obtuvo el mayor número de granos superando en un 46% a la variedad Rebeca F-2000 la cual fue la que menor número de granos presentó. Dentro de las variedades con el mayor peso individual de grano destacan Maya S-2007, Bárcenas S-2002, Salamanca S-75 y Saturno S-86, las cuales en promedio presentaron granos 16% más pesados respecto de la variedad Tollocan F-2005 la cual obtuvo el valor más bajo en esta característica.

Cuadro 9. Valores medios para las variables rendimiento de grano (Rend), número de granos por unidad de superficie (NG), peso individual de grano (PIG), biomasa a madurez fisiológica (Biom_{MF}) e índice de cosecha (IC), para nueve variedades de trigo evaluadas en 4 dosis de nitrógeno en Toluca, México.

Variedad	Rend	NG	PIG	Biom _{MF}	IC
	(g m ⁻²)	(m ²)	(mg)	(g m ⁻²)	
Salamanca S-75	388.3bcd	10198c	37.7ab	1538.9a	0.25bcd
Saturno S-86	408.4ab	11406b	37.3ab	1337.8b	0.31a
Cortázar S-94	414.5abc	12032ab	34.5bc	1440.8a	0.28ab
Bárcenas S-2002	380.2cd	10093c	37.7ab	1304.0b	0.29ab
Urbina S-2007	347.7de	9644cd	36.6b	1510.5a	0.23de
Maya S-2007	436.0a	10787bc	40.1a	1454.0a	0.30ab
Eneida F-94	428.4ab	12695a	34.3bc	1458.0a	0.27bc
Rebeca F-2000	253.9f	8675d	32.5c	1287.0b	0.20e
Tollocan F-2005	311.6e	10179c	32.2c	1271.0b	0.23cd

Por lo que respecta, a la producción de biomasa en madurez fisiológica las variedades Salamanca S-75, Cortázar S-94, Urbina S-2007, Maya S-2007 y Eneida F-94 presentaron la mayor producción de biomasa al final del ciclo, superando en promedio un 12% al resto de las variedades (Cuadro 9). Cabe señalar que las variedades de gluten fuerte en promedio produjeron 6% menos biomasa a madurez respecto al promedio de las variedades de gluten suave. Por otro lado, los valores de índice de cosecha en términos generales fueron bajos los cuales estuvieron en

el rango de 0.20 a 0.31 para Rebeca F-2000 y Saturno S-86, respectivamente, no observándose ninguna tendencia hacia los trigos de gluten fuerte o suave, aunque en promedio las variedades de gluten fuerte presentaron en promedio valores de IC 15% más bajos respecto al promedio de las variedades de gluten suave (Cuadro 9).

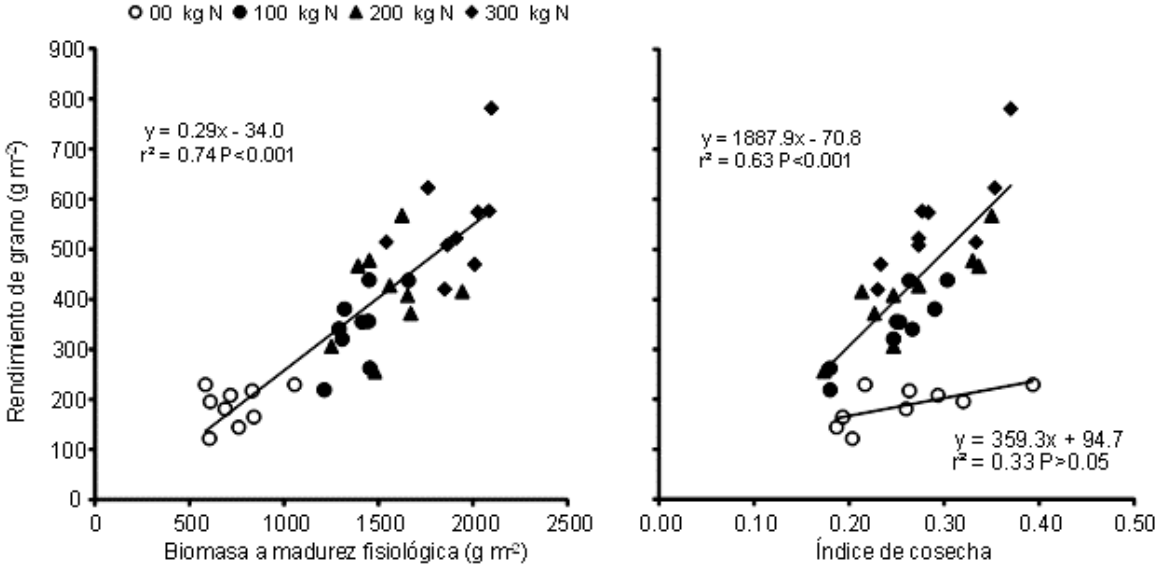


Figura 6. Relaciones entre el rendimiento de grano y la producción de biomasa a madurez fisiológica (a) y con el índice de cosecha (b) para nueve cultivares de trigo cultivados en cuatro dosis de nitrógeno en Toluca, México.

El análisis de la interacción nitrógeno x variedad reveló que una mayor disponibilidad de nitrógeno incrementó tanto la producción de biomasa como el rendimiento de grano, siendo las variedades Cortázar, Eneida, Salamanca y Urbina las que obtuvieron la mayor producción de biomasa cuando la dosis de nitrógeno

fue de 300 kg N ha⁻¹ (Figura 7a). Sin embargo, en esta misma dosis Eneida supero de manera significativamente al resto de los genotipos (Figura 7b).

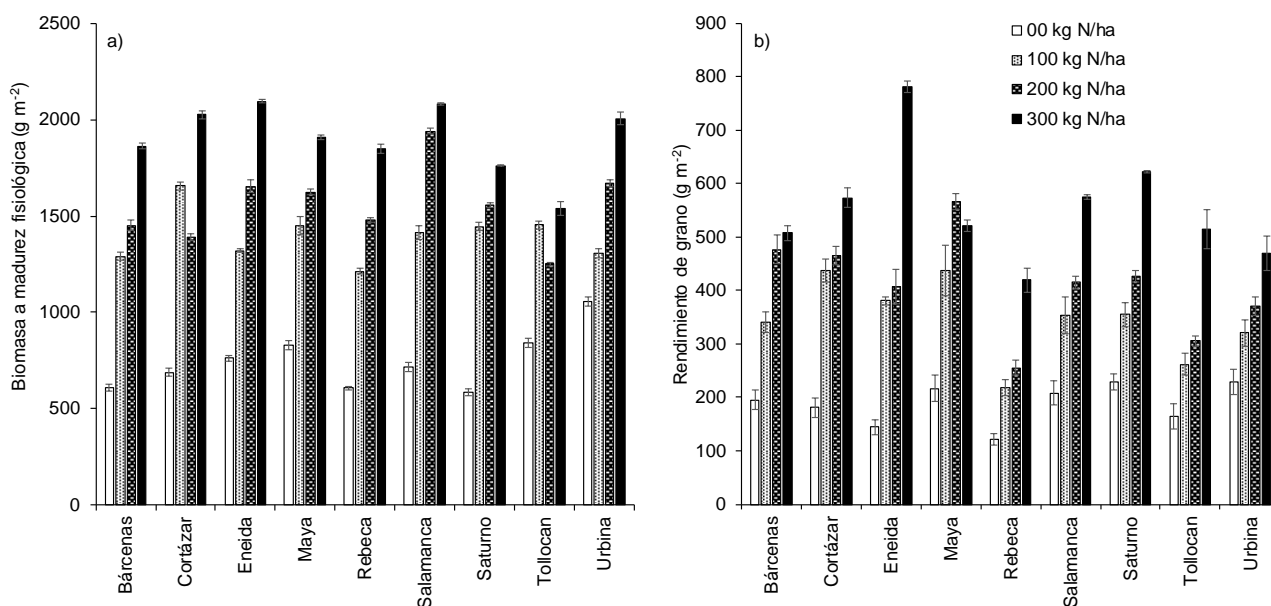


Figura 7. Interacción genotipo x nitrógeno para la producción de biomasa (a) y el rendimiento de grano (b) para nueve cultivares de trigo cultivados en cuatro dosis de nitrógeno en Toluca, México.

Por otro lado, el análisis de la interacción cultivar x nitrógeno para para los componentes números del rendimiento de grano, mostró un comportamiento diferencial de los cultivares en cada una de las dosis de nitrógeno para el caso del número de granos por unidad de superficie, en donde el cultivar Eneida se caracterizó por presentar el mayor número de granos en dosis de 300 kg N ha⁻¹, seguida de Cortázar, Saturno y Salamanca. En el cultivar Rebeca no se apreció una tendencia muy clara del efecto del nitrógeno sobre el número de granos (Figura 8a).

Por lo que respecta al peso individual de grano, no se observó un efecto diferencial de las dosis de nitrógeno en cada uno de los genotipos (Figura 8b), al menos no de la misma magnitud observada en el número de granos, ya que en su mayoría cambios observados estuvieron más asociados a efectos genotípicos (Figura 8b).

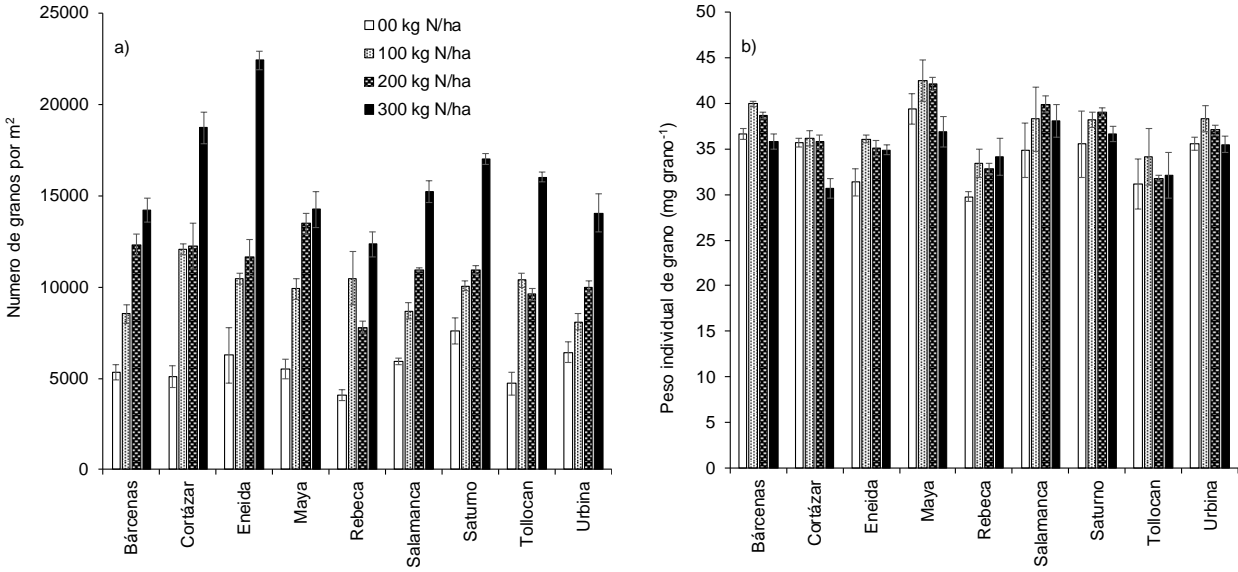


Figura 8. Interacción genotipo x nitrógeno para en número de granos por unidad de superficie (a) y el peso individual de grano (b) para nueve cultivares de trigo cultivados en cuatro dosis de nitrógeno en Toluca, México.

V. DISCUSIÓN

En los análisis de varianza para las variables de desarrollo existieron efectos significativos para repeticiones dentro de nitrógeno solo para tiempo térmico a ET, lo que indica que en esta variable el bloqueo dentro de cada dosis permitió separar la variabilidad existente en el material experimental. Para el caso de nitrógeno se observaron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) para todas las etapas de desarrollo consideradas, resultados similares fueron observado en cebada por Abeledo et al. (2003), quienes al evaluar diferentes genotipos de cebada en diferentes dosis de fertilización nitrogenada encontraron efectos significativos del nitrógeno para las variables de desarrollo estudiadas. Por otro lado, para el factor variedades se observaron efectos significativos en la duración de todas las etapas de desarrollo evaluadas coincidiendo con los resultados de Abeledo et al. (2003). De igual forma, la interacción nitrógeno x variedad estuvo presente de manera significativa en todas las variables de desarrollo, lo que indica que las variables de desarrollo consideradas en este estudio son afectadas de manera diferencial en función del genotipo y de la dosis de nitrógeno evaluada. La deficiencia de nitrógeno incrementó la duración del ciclo a espiguilla terminal en 4%, mientras que la duración a hoja expandida fue extendida en 5% con este mismo tratamiento. Por otro lado, la duración total a antesis también fue mayor (4%) ante restricciones en la disponibilidad de nitrógeno. Se han reportado efectos significativos de la disponibilidad de nitrógeno sobre la duración de las etapas de desarrollo en cereales y otros cultivos, principalmente sobre la duración total a antesis. Por ejemplo, Guarda et al. (2004) al estudiar el efecto de diferentes dosis de N en trigo, encontraron una mayor duración del tiempo total a antesis al incrementar la dosis

de N. Contrariamente, Massignam et al., (2009), observaron un acortamiento del 14% del periodo total a antesis en maíz cuando la disponibilidad de N fue máxima, una tendencia similar fue observada por estos mismos autores en girasol. No obstante, estos autores no encontraron efectos significativos para el periodo total a madurez fisiológica en maíz, pero si los observaron en girasol. En otras especies tales como el arroz, se ha observado un retraso en la floración desde 8 hasta 19 días con aplicación de 250 kg N ha⁻¹ (Williams y Angus, 1994), mientras que en sorgo el tiempo a floración se reduce entre 6 y 9 días cuando se aplican 353 kg N ha⁻¹ (Van Oosterom et al., 2010). Es claro que estos efectos del nitrógeno sobre la duración del tiempo total a antesis, podría tener un gran impacto si estos cambios ubican al cultivo en mejores condiciones ambientales durante las etapas donde se define el número de granos y el llenado de estos.

Fue observada una gran variabilidad genotípica en la duración de las diferentes etapas que componen el ciclo total del cultivo, principalmente el tiempo a antesis y a madurez fisiológica. En este sentido, los cultivares de gluten fuerte se caracterizaron por presentar un ciclo total a antesis 8% más largo que aquellos de gluten suave, este mismo grupo de cultivares la madurez fisiológica fue 6% más larga con respecto al promedio del resto de los cultivares. Los anteriores resultados resaltan la importancia de este tipo de experimentos para seleccionar genotipos adecuados a las condiciones climáticas de la región en función de su ciclo de cultivo y las prácticas de manejo (ejemplo, Fertilización).

Existieron efectos significativos de las dosis de nitrógeno sobre el rendimiento de grano, observándose incrementos en esta variable a medida que se incrementó la dosis, de tal manera que el rendimiento de incrementó 66% con la dosis más alta

de N, respecto a dosis de 0 kg N ha⁻¹. Incrementos de la misma magnitud (61%) fueron observados en la biomasa a madurez fisiológica y para el número de granos por unidad de superficie (65%), corroborando lo que se ha menciona en la literatura de que la producción de biomasa y el número de granos son dos de los componentes más importantes para la generación del rendimiento en los cultivos de grano (Slafer et al., 2014; Ordoñez et al., 2015). Cuando se han estudiado diferentes ambientes han sido observados diferencias en el rendimiento de grano como resultados de cambios en el número de granos (componente número más importante), por ejemplo, en trigo harinero por Guarda et al. (2004) y en cebada por Prystupa et al., (2004). El peso de grano cambio significativamente al incrementar la dosis de nitrógeno de 0 a 100 y 200 kg N ha⁻¹, lo que indica que este elemento juega un papel fundamental para la determinación del peso de grano. Resultados similares fueron encontrados por Albrizio et al., (2010) quienes, al evaluar diferentes dosis de nitrógeno y láminas de riego en trigo, encontraron que el peso de grano es favorecido al incrementar la disponibilidad de N.

Entre las prácticas de manejo que han mostrado impactos significativos en el rendimiento de grano, se encuentra la elección del genotipo (De La Vega y De La Fuente, 2015), en este sentido, la evaluación genotípica resulta ser interesante para seleccionar genotipos con potencial para las diversas zonas agroecológicas donde se produce este cereal. En nuestro trabajo, fue observada una gran variabilidad genotípica en los caracteres estudiados, de tal manera que el rendimiento de grano entre los cultivares estuvo dentro del rango de 2539 a 4360 kg ha⁻¹, siendo la diferencia de 1821 kg ha⁻¹. Resultados similares fueron encontrados por Le Gouis et al., (2000), quienes al estudiar un conjunto de cultivares de 20 cultivares de trigo,

encontraron una amplia variabilidad genotípica tanto para rendimiento de grano, como para otros caracteres agronómicos. Nuestros resultados revelan que variedades de gluten fuerte como Eneida F-94 y de gluten suave como Maya S-2007, los cuales obtuvieron los más altos rendimiento de grano y pueden ser una buena alternativa para la región de Valles Altos de México. La dureza del gluten es una característica que permite ubicar el destino final del grano de trigo, de tal forma que trigos de gluten tenaz mezclados con los de gluten fuerte sirven para la elaboración de pastas y panificación, mientras que los de gluten suave son ideales para la fabricación de galletas (Troccoli y di Fonzo, 1999; Peña *et al.*, 2008) Cabe señalar, que en nuestro trabajo se evaluaron genotipos de gluten suave y fuerte que pueden abrir oportunidades de producción para diversos fines según su grano.

Los dos componentes fisiológicos del rendimiento de grano en trigo (Biomasa e índice de cosecha) se relacionaron positiva y significativamente con la producción de grano en nuestro trabajo, reforzando los resultados de otros autores, que señalan que el rendimiento es fuertemente dependiente de estos componentes (Austin *et al.*, 1980; Calderini *et al.*, 1995; Sayre *et al.*, 1997). Es importante recalcar que los incrementos en el rendimiento de grano en un futuro estarán dados por cambios significativos en estos dos componentes fisiológicos, es decir en la cantidad de materia seca producida y la proporción de esta que representa el rendimiento económico (Reynolds *et al.*, 1999).

La interacción genotipo x ambiente ha sido ampliamente estudiada en muchos cultivos de grano, por ejemplo, Donmez *et al.*, (2001), al estudiar un conjunto de cultivares de trigo liberados en diferentes épocas y evaluarlos en diferentes localidades y años, encontró efectos significativos para la interacción genotipo por

año y localidad, observando que los genotipos más nuevos presentaron mejores ganancias tanto en producción de biomasa y rendimiento de grano. Por otro lado, Le Gouis et al., (2000), al estudiar un conjunto de cultivares de trigo con diferentes dosis de N, encontraron efectos significativos para la interacción genotipo x nitrógeno, siendo los genotipos Cappelle, Recital and Arche los que más contribuyeron a dicha interacción. En nuestro trabajo, resultó significativa la interacción genotipo x nitrógeno para producción de biomasa y rendimiento de grano, donde se pudo constatar que todos genotipos presentaron buena respuesta a cambios en la disponibilidad de N, con excepción de Cortázar S-94, Saturno S-86 y Tollocan F-2005 los cuales no mostraron una tendencia muy clara. El cultivar Eneida F94, presentó el más alto rendimiento de grano cuando la dosis de nitrógeno fue de 300 kg N ha⁻¹, mientras que en Rebeca F-2000 se observó el menor efecto del N en esta característica.

Por otro lado, dentro de los componentes numéricos del rendimiento de grano, el número de granos fue el que mostró interacción significativa genotipo x nitrógeno, en donde el cultivar Eneida F-94 mostró el mejor comportamiento con alta disponibilidad de N, seguido de Cortázar S-94, saturno S-86 y Tollocan F-2005. En peso individual de grano no se observaron efectos significativos para la interacción. Los resultados de la presente investigación resaltan la importancia de la evaluación genotípica y de la disponibilidad de nitrógeno, aspectos de manejo indispensables para incrementar los rendimientos de trigo en la región de los Valles Altos de México, de tal manera que efectivamente trigo se convierta en un cultivo alternativo a la producción de maíz en esta región. Fue claro que existen genotipos con buen potencial de rendimiento y una muy clara respuesta a la disponibilidad de nitrógeno.

VI CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación y en función de las condiciones climáticas prevalecientes durante la conducción de los experimentos se puede concluir lo siguiente:

- El efecto de las dosis de nitrógeno se vio reflejada en un acortamiento significativo de cada uno de los periodos de desarrollo estudiados y en el ciclo total a antesis y a madurez fisiológica.
- Los cultivares más tardíos fueron Rebeca F-2000, Tollocan F-2005, Saturno S-86 y Salamanca S-75, los cuales requirieron mayor cantidad de tiempo térmico a MF.
- La producción de biomasa se incrementó cuando mayor disponibilidad de nitrógeno hubo, sin cambios significativos en el índice de cosecha.
- El componente numérico del rendimiento más afectado por la disponibilidad de nitrógeno fue el número de granos, mientras que el peso individual de grano solo presentó cambios ligeros.
- La variedad Maya S-2007 obtuvo el más alto rendimiento de grano, seguida de Eneida F-94 y Cortázar F-94 con 4360, 4284 y 4145 kg ha⁻¹, respectivamente.
- Los resultados de la presente investigación resaltan la importancia de la evaluación genotípica y de la disponibilidad de nitrógeno, aspectos de manejo indispensables para incrementar los rendimientos de trigo en la región.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abbate**, P. E., Andrade, F. y Culot, J. P. (1994). Determinación del rendimiento en trigo. Boletín Técnico N° 133. EEA INTA Balcarce. Balcarce, Buenos Aires. 17 p.
- Abeledo**, L. G., Calderini, D. F. y Slafer, G. A. (2003). Genetic improvement of yield responsiveness to nitrogen fertilization and its physiological determinants in barley. *Euphytica* 133, 291-298.
- Albrizio**, R., Todorovi, M., Matic, T. y Stellacci, A. M. (2010) Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* 115, 179–190
- Andrade**, F., Cirilo, A., Uhart, S. y Otegui, M. (1996). Ecofisiología del cultivo de maíz. Ed. La Barrosa. Balcarce, Buenos Aires. 147-192.
- Araus**, J. L., Slafer G. A., Reynolds, M. P. y Royo, C. (2002). Plant breeding and water relations in C3 cereals: what to breed for? *Annals of Botany* 89, 925-940.
- Arisnabarreta**, S. y Miralles D. J. (2006). Yield responsiveness in Two- and six-rowed barley grown in contrasting nitrogen environments. *Journal of Agronomy and Crop Science* 192, 178-185.
- Austin**, R. B., Bingham, J., Blackwell, R. D., Evans, L. T., Ford, M. A., Morgan C. L. y Taylor, M. (1980). Genetics improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *Journal of Agricultural Science* 94, 675-689.

- Baker** C. K., Gallagher J. N. y Monteith J. L. (1980). Daylength change and leaf appearance in winter wheat. *Plan Cell Environmental* 3, 285-287.
- Barraclough**, B. P., Howarth R. J., Jones J., Lopez-Bellido R., Parmar S., Shepherd E.C. y Hawkesford J. M. (2010). Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement. *European Journal of Agronomy*. *European Journal of Agronomy* 33, 1-11
- Brown**, D. M. (1976). Response of maize to environmental temperatures: a review. *In: Agrometeorology of the maize crop. Proc. 1976 Symp. Ames, Iowa. Publ. WMO-481. World Meteorological Organization, Geneva. pp..15-26.*
- Calderini**, D. F., Dreccer, M. F. y Slafer, G. A. (1995). Genetic improvement in wheat yield and associated traits. A re-examination of previous results and latest trends. *Plant Breeding* 114, 108-112.
- Cárcova**, J., Abeledo, G. L. y López, P. M. (2015). Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En: *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. E. Satorre et al. (eds.) FAUBA. pp. 75-95.*
- Cirilo**, A. G. y Andrade, F. H. (1996). Sowing Date and Kernel Weight in Maize. *Crop Science*, 36, 325-331.
- Clark**, R. B. y Duncan, R. R. (1991). Improvement of plant mineral nutrition through breeding. *Field Crops Research*, 27, 219-240

- Colnenne, C., Meynard J. M., Roche R. y Reau R. (2002).** Effects of nitrogen deficiencies on autumnal growth of oilseed rape. *European Journal of Agronomy* 17, 11-28.
- De la Morena, I., Ramos, J. M. y García del Moral, L. F. (1986).** Análisis de crecimiento y de la producción de grano en cultivos de cebada bajo las condiciones ambientales de la provincia de Granada. II. Evolución y supervivencia de los tallos hijos. *Anuales de Edafología y Agrobiología*, 779-796.
- De La Vega, J. y De La Fuente E. (2015).** Elección de genotipos. En: Pascale J. (ed.). *Producción de granos, bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Editorial Facultad de Agronomía. págs. 319-349
- Derici, C. y Schepers, J. S. (2001).** Yield response and N-fertilizer recovery of rainfed wheat. *Field Crops Res.* 71 (2), 113–122.
- Donmez, E., Sears, R. G., Shroyer, J. P., y Paulsen, G. M. (2001).** Genetic gain in yield attributes of winter wheat in the Great Plains. *Crop Sci.* 41, 1412–1419
- Evans, L.T (1987).** Short day induction of inflorescence in some winter wheat varieties. *Australian Journal of Plant Physiology* 14, 277-286.
- FAO (2019)** FAOSTAT, FAO statistical databases – agriculture (available at <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx>) (fecha de acceso 28/04/2019).

- Fischer, R. A.** (1973). The effect of water at various stages of development on yield processes in wheat. *In: Plant Response to Climatic Factors, Proc. Uppsala Symp. 1970*, pp. 233-241. (UNESCO:Paris).
- Fischer, R.A.** y HilleRisLambers, D. (1978). Effects of environment and cultivar on source limitation to grain weight in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29, 443-458.
- Foulkes, M. J., Sylvester-Bradley, R.** y Scott, R. K. (1998). Evidence for differences between winter wheat cultivars in acquisition of soil mineral nitrogen and uptake and utilisation of applied fertilizer nitrogen. *J. Agric. Sci. Camb.* 130, 29–44.
- Frank, A. B.** y Bauer, A. (1982). Effect of temperature and fertilizer N on apex development in spring wheat. *Agronomy Journal* 74, 504-509.
- Frey, N. M.** (1981). Dry matter accumulation in kernels in maize. *Crop Science*, 13, 436-439.
- Gallagher, J. N.** (1979). Field studies of cereal leaf growth. I. Initiation and expansion in relation to temperature and ontogeny. *Journal Experimental Botany* 30, 625-636.
- García, E.** (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México, D. F. p. 217.

- Gastal**, F. y Nelson, C. J. (1994). Nitrogen use within the growing leaf blade of tall fescue. *Plant Physiology* 105, 191–197.
- González**, F. G., Slafer, G. A. y Miralles, D. J. (2003). Grain and floret number in response to photoperiod during stem elongation in fully and slightly vernalized wheats. *Field Crops Research* 81, 17-27.
- González**, F. G., Slafer, G. A. y Miralles, D. J. (2005). Pre-anthesis development and number of fertile florets in wheat as affected by photoperiod sensitivity genes Ppd-D1 and Ppd-B1. *Euphytica* 146, 253-269.
- Guarda** G., Padovan, S. y Delogu, G. (2004). Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *European Journal of Agronomy* 21, 181-192.
- Hay**, R. K. M y Kirby, E. J. M. (1991). Convergence and synchrony – A review of the coordination of development in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 42, 661-700.
- Hay**, R. K. M. y Walker, A. J. (1989). An introduction to the physiology of crop yield. Longman Scientific Technical. 292 p.
- Ivandić**, V., Hackett, C. A., Zhang, Z. J., Staub, J.E., Nevo, E., Thomas, W. T. B. y Forster, B. P. (2000). Phenotypic responses of wild barley to experimentally imposed water stress. *Journal of Experimental Botany* 51, 2021-2029.

- Jones**, R. J., Roessler, J. y Ouattar, S. (1985). Thermal environment during endosperm cell division in maize: Effects on number of endosperm cells and starch granules. *Crop Science*, 25, 830- 834.
- Kernich**, G. C y Halloran, G.M. (1996). Temperature effects of the duration of the spikelet growth phase and spikelet abortion in barley. *Journal of Agronomy and Crop Science* 176, 23-29.
- Kiniry**, J. R. y Ritchie, J. T. (1985). Shade-sensitive interval of kernel number in maize. *Agronomy Journal*, 77, 711-715
- Kiniry**, J. R. y Bonhomme, R. (1991). Predicting maize phenology. *In: Predicting crop phenology*. T. Hodges (ed.). CRC Press. Boca Raton, Ann Arbor. Boston. pp. 115-131.
- Krenzer**, E. G Jr., Nipp, T. L. y McNew, R.W. (1991). Winter wheat mainstem leaf appearance and tiller formation vs moisture treatment. *Agronomy Journal* 83, 663-667.
- Le Gouis**, J., Béghin, D., Heumez, E. y Pluchard, P. (2000) Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy* 12, 163–173
- Lemaire**, G., Jeuffroy, H. M. y Gastal, F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy* 28, 614-624.

- Longnecker**, N., Kirby, E. J. M. y Robson, A. (1993). Leaf Emergence, tiller growth, and apical development of nitrogen-deficient spring wheat. *Crop Science* 33, 154-160.
- Masle**, M. J. (1981). Elaboration of the ears number of a winter wheat submitted to competition for nitrogen, 1: importance of critical stage for a tiller, relevant to its elongation. *Agronomie* 8, 623-632.
- Massignam**, A. M., Chapman, S. C., Hammer, G. L. y Fukai, S. (2009). Physiological determinants of maize and sunflower grain yield as affected by nitrogen supply. *Field Crops Research* 113, 256–267.
- McMaster**, G. S. (1997). Phenology, development, and growth of the wheat (*Triticum aestivum* L.) shoot apex: a review. *Advances in Agronomy* 59, 63-118.
- McMaster**, G. S y Wilhelm, W. W. (2003). Simulating wheat and barley phenological responses to water and temperature stress. *Journal of Agricultural Science Cambridge* 141, 129-147.
- McMaster**, G. S., Wilhelm, W.W. y Frank, A. B. (2005). Developmental sequences for simulating crop phenology for water-limiting conditions. *Australian Journal of Agricultural Research* 56, 1277-1288.
- Miralles**, D. J 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.

- Miralles**, D. J., Richards, R. A. y Slafer, G. A. (2000). Duration of the stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Australian Journal of Plant Physiology* 27, 931-940.
- Miralles**, D. J. (2004). Consideraciones sobre ecofisiología y manejo de Trigo. Información técnica de trigo. Campaña 2004. Publicación Miscelánea N° 101. Mayo 2004. INTA. pp. 1-7.
- Miralles**, D. J y Slafer, G. A (2007). Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *Journal of Agricultural Science Cambridge* 145, 1-11.
- Muchow**, R. C. (1988). Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment III. Grain yield and nitrogen accumulation. *Field Crops Research* 18, 31-43.
- Muchow**, R. C., Hammer, G. L. y Vanderlip, R. L. (1994). Assessing climate risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. II. Effects of planting date, soil water at planting, and cultivar phenology. *Field Crops Research* 36, 246-253.
- Ordóñez**, R. A., Savin, R., Cossani, C. M. y Slafer, G. A. (2015). Yield response to heat stress as affected by nitrogen availability in maize. *Field Crops Research* 183, 84–203
- Ortiz-Monasterio**, J. I., Sayre, K. D., Rajaram, S. y McMahon, M., (1997). Genetic progress in wheat yield and nitrogen use efficiency under four nitrogen rates. *Crop Science* 37, 898–904.

- Palaniswamy**, U. R y Palaniswamy, K. M. (2006). Handbook of statistics for teaching and research in plant and crop science. The Harworth Press, Inc., New York. pp 624.
- Passioura**, J. B. (1996). Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regulation* 20, 79-83.
- Peña**, B. R. J., Perez, H. P., Villasenor, M. H. E., Gómez, V. M. M. y Mendoza, L. M. A. (2008). Calidad de la cosecha de trigo en México. Ciclo primavera-verano 2006. Publicación Especial del CONASIST-CONATRIGO, Tajín No. 567, Col. Vertiz Narvarte, Delegación Benito Juárez C.P. 03600 México, D.F. 28p.
- Prystupa**, P., Savin, R. y Slafer, G. A. (2004). Grain number and its relationship with dry matter, N and P in the spikes at heading in response to N x P fertilization in barley. *Field Crops Res.* 90, 245-254.
- Quarrie**, S. A., Stojanovic, J. y Pekic, S. (1999). Improving drought resistance in small grained cereals: A case study, progress and prospects. *Plant Growth Regulation* 29, 1-21.
- Rawson**, H. M. (1993). Radiation effects on development rate in a spring wheat grown under different photoperiods and high and low temperatures. *Australian Journal of Plant Physiology* 20, 719-727.
- Reddy**, V. H. y Daynard, T.B. (1983). Endosperm characteristics associated with rate of grain filling and kernel size in corn. *Maydica*, 28, 339-355.

- Reeves**, T. G., Graeme Thomas, G. y Ramsay, G. (2016). Save and Grow in Practice: Maize, Rice, Wheat. A Guide to Sustainable Cereal Production. Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome.
- Reynolds**, M. P., Sayre, K. D., y Rajaram, S. (1999). Physiological and genetic changes in irrigated wheat in the post Green Revolution period and approaches for meeting projected global demand. *Crop Sci.* 39: 1611–1621.
- Richards**, R.A (1996). Defining selection criteria to improve yield under drought. *Plant Growth Regulation* 20, 157-166.
- Rodríguez**, D., Andrade, F.H. y Goudriaan, J. (1999). Effects of phosphorous nutrition on tiller emergence in wheat. *Plant and Soil* 209, 283-295.
- Satorre**, E. H., Benech Arnold, R. L., Slafer, G. A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E. y Savin, R. (2003). Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 783 p.
- Sayre**, K. D., Rajaram, S., y Fischer, R. A. (1997). Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico. *Crop Sci.* 37: 36–42.
- Schussler**, J. R. y Westgate, M. E. (1991). Maize kernel set at low water potential: I. Sensitivity to reduced assimilates during early kernel growth. *Crop Science*, 31, 1189-1195.

SIAP (2019). Servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera.
Disponible en

http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351. Consultado el 6 de abril de 2019.

Slafer, G. A y Rawson, H. M. (1994). Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologist and modelers. *Australian Journal of Plant Physiology* 21, 393-426.

Slafer, G. A., Calderini, D. F. y Miralles, D. J. (1996). Yield components and compensation in wheat: opportunities for further increasing yield potential. In: Reynolds MP, Rajaram S, McNab A (Eds). *Increasing yield potential in wheat: Breaking the Barriers*, pp. 101-133. CIMMYT, Mexico DF.

Slafer, G.A y Whitechurch, E.M. (2001). Manipulating wheat development to improve adaptation and to research for alternative opportunities to increase yield potential. In: Reynolds MP, Ortiz-Monasterio JL, McNab A (Eds), *Application of Physiology to Wheat Breeding*, CIMMYT, Mexico, DF, pp. 160-170.

Slafer, G. A., Miralles, D. J., Savin, R., Whitechurch, E. M. y González, F. G. (2003). Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en trigo. *In: Producción de granos. bases funcionales para su manejo*. E. Satorre *et al.* (eds.). FAUBA. pp. 101-112.

- Slafer**, G. A., Savin, R. y Sadras, V. O. (2014). Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crop Res.* 157,71–83.
- Sofield**, I., Evans, L. T., Cook, M. G. y Wardlaw, I. F. (1974). Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology*, 4, 785-797.
- Troccoli**, A. y Di Fonzo, N. (1999). Relationship between kernel size features and test weight in *Triticum durum*. *Cereal Chemistry* 76, 45–49
- van Oosterom**, E. J., Borrell, A. K., Chapman, S. C., Broad, I. J. y Hammer, G. L. (2010) Functional dynamics of the nitrogen balance of sorghum. I. N demand of vegetative plant parts. *Field Crops Res.* 115, 19- 28.
- Weber**, E. A., Graeff, S., Koller, W.-D., Hermann, W., Merkt, N. y Claupein, W. (2008). Impact of nitrogen amount and timing on the potential of acrylamide formation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research* 106, 44-52.
- Whitfield**, D. M. y Smith, C. J. (1989). Effects of irrigation and nitrogen on growth, light interception and efficiency of light conversion in wheat. *Field Crops Research*, 20, 279-295.
- Wiegand** C. L. y Cuellar, J. A. (1981). Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. *Crop Science*, 21, 95-101.
- Williams**, R. L., y Angus, J. (1994). Deep floodwater protects high-nitrogen rice crops from low-temperature damage. *Aust. J. Exp. Agric.* 34, 927–932.

Worland, A. J (1996). The influence of flowering time genes on environmental adaptability in European wheats. *Euphytica* 89, 49-57.

Zadoks, J. C., Chang, T. T. y Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Research* 14, 415-421.