

EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN EN CEREALES EN AMBIENTES DE SECANO

Rainfall-Use Efficiency of Cereals in Rainfed Environments

Cándido López-Castañeda¹

RESUMEN

Se realizaron cuatro experimentos de campo para determinar el rendimiento de grano (RG) y la eficiencia en el uso de la precipitación (EUP) en genotipos de avena (*Avena sativa* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.), y en promedio de estas especies en ambientes contrastantes de secano. Los experimentos se condujeron, en el ciclo de verano 1984, en Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí (S84) y Tecámac, México (T84), y, en 1985, en Tecámac (T85) y Montecillo, México (M85). El experimento M85 tuvo mayor RG y EUP (RG = 2572 kg ha⁻¹ y EUP = 5.3 kg ha⁻¹ mm⁻¹) que los experimentos T84 (RG = 2301 kg ha⁻¹ y EUP = 4.4 kg ha⁻¹ mm⁻¹), T85 (RG = 1040 kg ha⁻¹ y EUP = 2.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹) y S84 (RG = 653 kg ha⁻¹ y EUP = 3.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Cebada (RG = 1682 kg ha⁻¹ y EUP = 4.8 kg ha⁻¹ mm⁻¹) y trigo (RG = 1733 kg ha⁻¹ y EUP = 4.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹) tuvieron mayor RG y EUP que avena (RG = 1351 kg ha⁻¹ y EUP = 3.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Las variedades Centinela, Cerro Prieto, M-9310B y M-9717, de cebada, y Narro VF-74, Mixteco S-82, México M-82 y Pavón F-76, de trigo; M-9578 y Zacatecas VT-74, Mixteco S-82 y Pavón F-76, M-9578 y Tlaxcala, y Zacatecas-2 y México M-82; y M-9578 de cebada y trigo; produjeron los más altos RG y EUP en los experimentos S84, T84, T85 y M85, en ese orden. El RG estuvo positiva y significativamente asociado con la precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos (PA), y el número de días a madurez fisiológica (DMF), y la PA estuvo positiva y significativamente relacionada con el número de DMF en promedio de todos los genotipos y experimentos. El RG y la EUP, en ambientes de secano, podrían incrementarse al seleccionar genotipos que tengan mayor número de DMF y utilicen mayor cantidad de humedad durante la estación de crecimiento.

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México (clc@colpos.mx)

Recibido: junio de 2003. Aceptado: mayo de 2006.
Publicado en Terra Latinoamericana 24: 477-487.

Palabras clave: avena, cebada, trigo, madurez fisiológica, rendimiento de grano.

SUMMARY

Four field experiments were carried out to determine grain yield (GY) and rainfall-use efficiency (RUE) of barley (*Hordeum vulgare* L.), oats (*Avena sativa* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes and average of these species in contrasting rainfed environments. Experiments were conducted in the summer growth season of 1984 at Salinas de Hidalgo, San Luis Potosi (S84) and Tecamac, Mexico (T84), and in 1985 at Tecamac (T85) and Montecillo, Mexico (M85). Experiment M85 had higher GY and RUE (GY = 2572 kg ha⁻¹ and RUE = 5.3 kg ha⁻¹ mm⁻¹) than experiments T84 (GY = 2301 kg ha⁻¹ and RUE = 4.4 kg ha⁻¹ mm⁻¹), T85 (GY = 1040 kg ha⁻¹ and RUE = 2.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹) and S84 (GY = 653 kg ha⁻¹ and RUE = 3.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Barley (GY = 1682 kg ha⁻¹ and RUE = 4.8 kg ha⁻¹ mm⁻¹) and wheat (GY = 1733 kg ha⁻¹ and RUE = 4.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹) had higher GY and RUE than oats (GY = 1351 kg ha⁻¹ and RUE = 3.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Varieties of barley Centinela, Cerro Prieto, M-9310B and M-9717, and wheat Narro VF-74, Mixteco S-82, México M-82 and Pavón F-76; M-9578 and Zacatecas VT-74, Mixteco S-82 and Pavón F-76, M-9578 and Tlaxcala, and Zacatecas-2 and México M-82 and M 9578 of barley and wheat; produced the highest GY and in the experiments S84, T84, T85 y M85, in this order. GY was positive and significantly associated with accumulated rainfall between April and the date of physiological maturity (AR) and the number of days to physiological maturity (DPM), and AR was positive and significantly related to the number of DPM in average of all genotypes and environments. GY and RUE in dryland environments could be increased by selecting genotypes with a greater number of DPM and higher rainfall-use during crop growth season.

Index words: barley, wheat, oats, grain yield, physiological maturity, precipitation.

INTRODUCCIÓN

La agricultura de secano depende de la precipitación que ocurre en la estación de crecimiento de los cultivos como fuente única de agua; la obtención de mejores rendimientos depende de su uso eficiente. En estas condiciones, las posibilidades de incrementar el rendimiento sin un aumento en la cantidad de agua disponible para el cultivo, dependerán de las vías que permitan aumentar la eficiencia en el uso de la precipitación. Un mayor rendimiento de grano por unidad de precipitación acumulada en la estación de crecimiento puede lograrse al identificar y manipular los factores genéticos y agronómicos, que contribuyan a una mejor adaptación a los ambientes de secano, como son: disponibilidad de humedad, estrategias para el mejoramiento del rendimiento en ambientes limitantes de humedad, opciones agronómicas para mejorar el uso del agua por el cultivo, reducir las pérdidas de humedad del suelo y malezas, y mejorar la eficiencia transpiratoria y el índice de cosecha.

En primer término, determinar que condiciones de disponibilidad de humedad tiene el ambiente en el que se desarrollan los cultivos de secano, en relación con la frecuencia de años con baja precipitación. Por ejemplo, un sitio que presenta una precipitación media anual de 460 mm, con lluvias en invierno y sequía terminal durante la etapa de formación del grano en condiciones de clima mediterráneo, en Australia Occidental, puede presentar una variación en la cantidad de lluvia acumulada de 200 a 800 mm de un año al siguiente, lo que se reflejará en fuertes variaciones en el rendimiento (Asseng y Turner, 2003).

En segundo término, debe definirse qué estrategias utilizar para el mejoramiento del rendimiento en ambientes limitantes de humedad; al respecto, Passioura (1977) sugirió que el rendimiento (R) en condiciones limitantes de humedad puede mejorarse al incrementar alguno de los factores de la expresión:

$R = \text{agua utilizada} \times \text{eficiencia en el uso del agua} \times \text{índice de cosecha}$

donde: el agua utilizada es la cantidad de agua evapotranspirada durante la estación de crecimiento del cultivo, la eficiencia en el uso del agua representa a la cantidad de biomasa producida por unidad de agua evapotranspirada (transpiración + evaporación del suelo) y el índice de cosecha es la proporción de biomasa

acumulada en el rendimiento de grano por unidad de biomasa total.

Esta relación aplica a los factores genéticos y agronómicos que determinan el rendimiento. La lluvia ocurrida en un sitio dado puede seguir varios caminos: ser transpirada por el cultivo y por las malezas; perderse por evaporación del suelo, drenaje a una profundidad del suelo mayor que la alcanzada por las raíces y escurrimiento cuando la precipitación excede a la capacidad infiltración del suelo; o almacenarse en el suelo para su uso posterior por el cultivo. En estas condiciones, el rendimiento y la eficiencia en el uso de la precipitación pueden mejorarse al reducir las pérdidas de agua por evaporación del suelo y transpiración de las malezas, y maximizar la transpiración del cultivo. Al considerar las pérdidas de humedad del suelo y las malezas, la ecuación anterior puede expresarse como:

$R = (\text{precipitación} - \text{pérdidas de humedad del suelo y malezas}) \times \text{eficiencia transpiratoria} \times \text{índice de cosecha}$

donde: la eficiencia transpiratoria es la biomasa producida por unidad de agua transpirada.

Las opciones agronómicas para mejorar la eficiencia en el uso de la precipitación y el rendimiento, en los sistemas de secano, involucran la minimización de las pérdidas por evaporación del suelo y malezas, y la maximización de la proporción de lluvia transpirada por el cultivo.

En tercer lugar, en el mejoramiento del uso del agua por el cultivo, una de las principales alternativas para incrementar la utilización del agua por el cultivo es a través de incrementar la profundidad del sistema radical. En muchos ambientes de secano, los cultivos no utilizan toda el agua disponible en el perfil del suelo, debido a restricciones en el crecimiento del sistema radical, causadas por factores físicos, químicos o biológicos. En estos casos, las prácticas agronómicas que reduzcan la impedancia física al crecimiento de las raíces pueden beneficiar el rendimiento de los cultivos de secano en ambientes limitantes de humedad; un buen desarrollo radical a una profundidad de 30 cm resulta en un incremento del rendimiento y de la eficiencia en el uso de la precipitación en suelos profundos de textura arenosa (Asseng y Turner, 2003) y puede no tener efectos favorables para el rendimiento en suelos arcillosos y delgados con un frente de humedecimiento de menor profundidad (Smith y Harris, 1981).

La reducción de las pérdidas de humedad del suelo y malezas ha tenido un fuerte impacto en el manejo agronómico de la eficiencia en el uso de la precipitación, al aumentar la transpiración del cultivo a expensas de reducir considerablemente las pérdidas por evaporación del suelo y transpiración de las malezas; el aumento en la transpiración del cultivo a expensas de las pérdidas de agua del suelo y las malezas ha resultado en incrementos significativos del rendimiento, con un aumento de 5 a 10% en la evapotranspiración total (Asseng *et al.*, 2001a). Una fecha de siembra sincronizada con el establecimiento de las lluvias puede reducir la evaporación del suelo e incrementar el rendimiento y la eficiencia en el uso de la precipitación (French y Schultz, 1984; Asseng *et al.*, 2001b; Riffkin *et al.*, 2003); fechas de siembra sincronizadas con el establecimiento de las lluvias en ambientes mediterráneos, para trigo y lupino, mostraron una reducción de las pérdidas por evaporación del suelo, en particular al inicio de la estación de crecimiento antes de que el crecimiento del área foliar alcanzara la cobertura total del suelo (Eastham y Gregory, 2000), un mayor rendimiento y una mayor eficiencia en el uso de la precipitación (Gregory y Eastham, 1996).

La eficiencia transpiratoria juega un papel crucial para incrementar el rendimiento en condiciones limitantes de humedad; las especies que poseen el metabolismo C_4 del bióxido de carbono tienen mayor eficiencia transpiratoria que las plantas C_3 (Briggs y Shantz, 1912; Fischer y Turner, 1978; Farquhar *et al.*, 1988). Las especies C_4 tienen mayor temperatura óptima y crecen en períodos más cálidos del año con altos déficits de presión de vapor; la selección de genotipos con capacidad para crecer en temperaturas más frescas les ha permitido adaptarse a regiones templadas, donde su mayor eficiencia transpiratoria puede resultar en un mayor rendimiento que las especies C_3 con la misma cantidad de precipitación. Por lo tanto, la elección de especies puede utilizarse para mejorar el rendimiento con un uso similar de agua, aumentando la eficiencia en el uso de la precipitación; p. ej. Jones y Popham (1997) demostraron que el cultivo de sorgo produjo el doble del rendimiento de trigo e incrementó la eficiencia en el uso de la precipitación, en la región oeste de las planicies de los Estados Unidos de Norte América.

El índice de cosecha, el cual representa el rendimiento de grano como proporción de la biomasa total, varía con la cantidad de agua utilizada antes y después del establecimiento de las estructuras reproductivas (Fischer,

1981), y puede ser influido por el manejo durante el ciclo biológico del cultivo. En ambientes semiáridos, en los cuales los cultivos dependen de la humedad almacenada en el suelo, prácticas agronómicas (como la aplicación de altas dosis de fertilizantes), un desarrollo profuso de raíces que favorecen una alta acumulación de biomasa y un mayor uso de agua antes de la floración pueden reducir el índice de cosecha como consecuencia de una menor disponibilidad de agua después de la antesis y una reducción del número de espigas y granos o el aborto de los granos (Turner y Nicolas, 1998).

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal determinar el rendimiento de grano y la eficiencia en el uso de la precipitación de genotipos comerciales y experimentales de avena (*Avena sativa* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.), en diferentes ambientes de secano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron cuatro experimentos de campo con germoplasma de avena, cebada y trigo, en distintas localidades y años: Tecámac, México (T84) (19° N, 98° O y 2294 m de altitud) y Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí (S84) (22° N, 101° O y 2100 m de altitud) en 1984; Montecillo, México (M85) (19° N, 98° O y 2250 m de altitud) y Tecámac, México (T85) en 1985. Los experimentos se sembraron una vez establecido el temporal en cada localidad y año.

En Montecillo, el suelo utilizado para los experimentos se caracterizó por presentar una textura de migajón arenoso en la profundidad de 0 a 10 cm y migajón arcillo arenoso en las profundidades de 10 a 30, 30 a 60 y 60 a 90 cm y una densidad aparente de 1.4 g mL⁻¹. En Tecámac, el suelo presentó una textura de migajón arcillo arenoso en las profundidades de 0 a 10, 10 a 30 y 30 a 60 cm, y migajón arcilloso en la profundidad de 60 a 90 cm, y densidad aparente de 1.4 g mL⁻¹ en las tres primeras profundidades y 1.3 g mL⁻¹ en la profundidad de 60 a 90 cm.

Se incluyeron líneas F_6 de cebada y variedades comerciales de avena, cebada y trigo obtenidas del Departamento de Cereales, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Chapingo, México (Cuadro 1).

La siembra se hizo el 27 de junio, en Tecámac (T84), y el 13 de julio, en Salinas de Hidalgo (S84), en 1984; el 2 de julio, en Montecillo (M85), y el 9 de julio de 1985, en Tecámac (T85). Se utilizó un diseño de bloques

completos al azar con cuatro repeticiones y la unidad experimental consistió en cuatro surcos de 5 m de longitud, separados a 0.3 m, en todos los experimentos; no se dejaron surcos libres entre unidades experimentales. La densidad de siembra se ajustó, de acuerdo con el tamaño del grano, estableciendo 130 plantas m⁻². Se aplicó una dosis de fertilización de 80-40-0, con 40 kg de N y 40 kg de P en la siembra, y 40 kg de N al inicio de la etapa de amacollamiento. Las malezas de hoja ancha se eliminaron con la aplicación de Hierbamina®, con una dosis de 1 L ha⁻¹, tres semanas después de la siembra.

Se determinó el número de días a antesis (DA) cuando 50% de los tallos presentes en cada unidad experimental presentaron espigas con anteras en dehiscencia de polen.

Se determinó el número de días a madurez fisiológica (DMF) cuando las plantas presentes en cada unidad experimental habían perdido el color verde característico de cada genotipo en 80% de sus hojas, tallos y espigas.

Se cortaron todas las plantas de los dos surcos centrales y se trillaron; se obtuvo el peso del grano limpio y se determinó el contenido de humedad (con un medidor de humedad para semillas, modelo GMA 128, Seedburo). Se calculó el rendimiento de grano, después de ajustar el peso del grano por el contenido de humedad.

La eficiencia en el uso de la precipitación para producir rendimiento de grano (EUP) se calculó al dividir el rendimiento de grano entre la cantidad de precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de cada genotipo.

Los datos diarios de la precipitación pluvial registrada en cada localidad y año, entre el mes de abril y octubre, se obtuvieron de las estaciones meteorológicas de Montecillo y Tecámac, en México, y Salinas de Hidalgo, en San Luis Potosí; en estas localidades,

los experimentos se llevaron a cabo en sitios ubicados a distancias menores de 300 m de las estaciones meteorológicas respectivas (Cuadro 2).

Los datos del número de días a antesis y madurez fisiológica, rendimiento de grano, precipitación acumulada durante la estación de crecimiento y eficiencia en el uso de la precipitación, se analizaron estadísticamente, utilizando el Programa SAS, Versión 6.12 para Windows (SAS Institute, 2001). Se calculó la diferencia mínima significativa (DMS, $P < 0.05$) para la comparación de medias de cada variable y experimento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Estadístico

El análisis de varianza detectó diferencias altamente significativas entre variedades de avena, cebada y trigo, para el número de días a antesis y madurez fisiológica, rendimiento de grano, precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, y eficiencia en el uso de la precipitación en todos los experimentos, excepto en S84, en el que las variedades presentaron diferencias significativas para el rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación, y altamente significativas para las demás variables (Cuadro 3).

Variación entre Ambientes

La distribución de la precipitación entre los meses de abril y octubre fue irregular en cada experimento: junio, agosto y octubre en S84; junio en T84; junio, julio, agosto y octubre en T85; y julio, septiembre y octubre

Cuadro 1. Germoplasma de avena, cebada y trigo utilizado en los experimentos de Salinas de Hidalgo (San Luis Potosí) y Tecámac y Montecillo (México).

Variedad de avena		Variedad de cebada		Variedad de trigo	
20	Diamante R-36 [§]	10	Centinela ^{††§}	1	Toluca F-73 ^{††§}
21	Tarahumara [§]	11	Cerro Prieto ^{††§}	2	Lerma Rojo S-64 ^{†§}
22	Páramo [§]	12	Celaya ^{†§}	3	Zacatecas VT-74 ^{††§}
23	Guelatao [§]	17	Puebla [§]	4	Zacatecas-2 ^{†§}
24	Cuauhtémoc [§]	18	Tlaxcala [§]	5	Narro VF-74 ^{††§}
-	-	19	Porvenir [§]	6	Cleopatra VS-74 ^{††§}
-	-	13	M-9578 ^{†§}	7	Mixteco S-82 ^{††§}
-	-	14	M-9310B ^{††§}	8	México ^{††§}
-	-	14	M-9645 ^{††§}	9	Pavón F-76 ^{††§}
-	-	16	M-9717 ^{††§}	-	-

[†] Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí (S84); [†] Tecámac, México (T84); [§] Montecillo, México (M85) y Tecámac, México (T85).

Cuadro 2. Precipitación media mensual, precipitación total acumulada entre los meses de abril y octubre, y precipitación entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, en las diferentes localidades y años.

Localidad/año	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Abril-Octubre
Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí†								
Media	26.3	27.8	27.1	25.4	27.4	24.3	27.3	186
1984 (S84)	0	0	5.2	114.8	16.2	38.7	1.8	177 (175)
Tecámac, México‡								
Media	14.6	47.6	96.3	114.9	99.3	67.1	55.3	495
1984 (T84)	0	9.1	43.3	173.4	112.4	98.2	130.7	567 (523)
1985 (T85)	3.7	14.3	38.5	66.8	80.4	106.1	11.2	321 (313)
Montecillo, México§								
Media	32.4	48.9	101.3	116.3	91.5	67.9	41.9	500
1985 (M85)	65.4	38.6	114.5	82	118.4	58.2	0	477(464)

Los números entre paréntesis representan la precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, en cada localidad y año; † Media de 35 años, estación meteorológica de Pinos, Zacatecas (García, 1988); ‡ Media de cinco años, estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, Tecámac, México; § Media de 11 años, estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

en M85, presentaron menor cantidad de precipitación que la media de varios años. La localidad de Salinas de Hidalgo fue la más seca, con 175 mm de lluvia durante la estación de crecimiento. La cantidad de precipitación acumulada en el período de abril-octubre fue 177, 567,

321 y 477 mm, y entre la fecha de siembra y la madurez fisiológica de los genotipos fue 175, 523, 313 y 464 mm, para los experimentos S84, T84, T85 y M85, respectivamente (Cuadro 3). La diferencia entre la precipitación ocurrida en el período abril-octubre y

Cuadro 3. Cuadrados medios, grados de libertad (GL) y coeficiente de variación (CV) para el número de días a antesis (DA) y madurez fisiológica (DMF), rendimiento de grano (RG), precipitación acumulada (PA) entre el mes abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, y eficiencia en el uso de la precipitación (EUP).

Fuente de variación	GL	DA	DMF	RG	PA	EUP
S84						
Bloques	3	4.5n.s.	52.9n.s.	6059.7n.s.	0.3n.s.	0.3n.s.
Genotipos	11	14.2**	161.2**	38688.4*	2.2**	1.3*
Error	33	1.4	9.1	19959.6	0.2	0.7
CV, %		2.2	3.4	21.6	0.3	22
T84						
Bloques	3	7.5n.s.	16.0n.s.	164159.3n.s.	113.0n.s.	0.6n.s.
Genotipos	15	127.1**	507.5**	1362530.1**	3004.9**	3.5**
Error	45	3.3	7.3	240543.7	57.1	0.8
CV, %		3.1	2.6	21.3	1.4	20.7
T85						
Bloques	3	3.7n.s.	25.3n.s.	120594.9n.s.	8.7n.s.	5.1n.s.
Genotipos	23	66.3**	221.4**	299146.8**	60.7**	3.5**
Error	69	17.2	27.4	69157.9	16.9	0.7
CV, %		7.1	4.8	28.9	1.3	30.4
M85						
Bloques	3	9.8n.s.	40.6n.s.	452420.0n.s.	23.0n.s.	2.1n.s.
Genotipos	23	58.6**	383.7**	1713599.6**	463.9**	7.3**
Error	69	5.3	5.9	94741.4	9.8	0.4
CV, %		4.1	2.4	12	0.7	12.3

* ** Indican la significancia de F a valores de P = 0.05 y 0.01, respectivamente. n.s. = no significativos.

CV = coeficiente de variación.

la lluvia acumulada en el período abril - fecha de la madurez fisiológica de los genotipos fue 1, 44, 8 y 13 mm para los experimentos S84, T84, T85 y M85, respectivamente (Cuadro 3).

La precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez de los genotipos mostró el patrón: T84 (523 mm) > M85 (464 mm) > T85 (313 mm) > S84 (175 mm), y representa la cantidad de lluvia disponible para el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cereales en las localidades y años en los que se realizó el presente estudio. El rendimiento de grano (RG) y la eficiencia en el uso de la precipitación (EUP) presentaron un patrón de comportamiento similar al observado para la lluvia acumulada, excepto para el experimento M85, el cual tuvo mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación que el experimento T84; M85 (RG = 2572 kg ha⁻¹ y EUP = 5.3 kg ha⁻¹ mm⁻¹), T84 (RG = 2301 kg ha⁻¹ y EUP = 4.4 kg ha⁻¹ mm⁻¹), T85 (RG = 1040 kg ha⁻¹ y 2.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹) y S84 (RG = 653 kg ha⁻¹ y 3.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Las diferencias en el rendimiento de grano y la eficiencia en el uso de la precipitación, observadas entre los experimentos T84 y M85, se debieron a que el experimento T84 tuvo menor cantidad de lluvia que el experimento M85 en abril, mayo y junio, situación que se reflejó en una menor cantidad de agua almacenada en el perfil del suelo, disponible para el establecimiento y las etapas iniciales de crecimiento del cultivo (Sadras *et al.*, 2002). Las diferencias en rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación entre ambientes se reflejaron en otras características agronómicas; Tecámac (T84) y Montecillo (M85), con una precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos *ca.* de 500 mm, tuvieron una estación de crecimiento más larga (mayor número de días entre la fecha de siembra y la etapa de madurez fisiológica) que Tecámac (T85) y Salinas de Hidalgo (S84), que tuvieron una precipitación acumulada *ca.* de 200 mm (Cuadro 4).

Cuadro 4. Días a antesis (DA) y madurez fisiológica (DMF), rendimiento de grano (RG), precipitación acumulada (PA) entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos y eficiencia en el uso de la precipitación (EUP) en Salinas (S84), Tecámac (T84 y T85) y Montecillo (M85).

Localidad/experimento	DA	DMF	RG	PA	EUP
			kg ha ⁻¹	mm	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
S84	54	88	653	175	3.7
T84	59	106	2301	523	4.4
T85	59	108	1040	313	2.7
M85	55	103	2572	464	5.3
DMS (P < 0.05)	1	1	105	2	0.3

La eficiencia en el uso de la precipitación para trigo en promedio de varios ambientes de secano en Victoria y Nueva Gales del Sur, Australia, fue de 9.1 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Sadras *et al.*, 2002), dos veces mayor que la obtenida en el presente estudio, en promedio de avena, cebada y trigo (4.0 kg ha⁻¹ mm⁻¹); la mayor eficiencia en el uso de la precipitación obtenida en Australia se debió a que, en esos estudios, se cuantificó la precipitación ocurrida al inicio de la estación de crecimiento y almacenada en el perfil del suelo, que representó un volumen de 130 mm, removidos del cálculo de la eficiencia en el uso de la precipitación, mientras que, en el presente estudio, no se determinó la proporción de la lluvia infiltrada en el suelo antes de la siembra y, por lo tanto, los valores de eficiencia en el uso de la precipitación obtenidos fueron más bajos.

Variación entre Especies

La cebada y el trigo tuvieron mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación que la avena, en promedio de todos los ambientes; el trigo produjo su mayor rendimiento con un mayor número de días a antesis y madurez fisiológica, y mayor cantidad de precipitación acumulada entre el mes de abril y la madurez fisiológica de los genotipos, que cebada y avena. Los genotipos de cebada produjeron mayor rendimiento de grano, tuvieron mayor eficiencia en el uso de la precipitación y menor precipitación acumulada entre el mes de abril y la madurez fisiológica de los genotipos, que las variedades de avena; las variedades de cebada produjeron su mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación con un menor número de días a madurez fisiológica que las variedades de avena (Cuadro 5). Otros trabajos de investigación realizados en Nueva Gales del Sur, Australia, en condiciones de sequía terminal, han mostrado que cebada tiene mayor eficiencia en el uso del agua que trigo, triticale y avena,

Cuadro 5. Días a antesis (DA) y madurez fisiológica (DMF), rendimiento de grano (RG), precipitación acumulada (PA) entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, y eficiencia en el uso de la precipitación (EUP) en Salinas (S84), Tecámac (T84 y T85) y Montecillo (M85).

Especies	DA	DMF	RG	PA	EUP
			kg ha ⁻¹	mm	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
Avena	55	98	1351	363	3.7
Cebada	56	95	1682	338	4.8
Trigo	59	109	1733	367	4.7
DMS (P < 0.05)	1	2	161	3	0.5

debido a un rápido desarrollo del área foliar que redujo las pérdidas por evaporación del suelo y un menor número de días a antesis, reflejado en una menor exposición de los genotipos al estrés hídrico terminal (López-Castañeda y Richards, 1994).

Variación entre Genotipos

La variación entre genotipos para el número de días a antesis y madurez fisiológica, rendimiento de grano, precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, y la eficiencia en el uso de la precipitación fue significativa en cada experimento. Las variedades con mayor rendimiento de grano fueron Centinela y Cerro Prieto, y las líneas F₆ M-9310B y M-9717, de cebada, y las variedades Narro VF-74, Mixteco S-82, México M-82 y Pavón F-76, de trigo, en el experimento S84; la línea F₆ de M-9578 de cebada y las variedades Zacatecas VT-74, Mixteco S-82 y Pavón F-76 de trigo, en el experimento T84 (Cuadro 6). Asimismo, la línea F₆ M-9578 y la variedad Tlaxcala, de cebada, y la línea F₆ Zacatecas-2 y la variedad México M-82, de trigo, presentaron el más alto rendimiento de grano en el experimento T85, y la línea F₆ M-9578 tuvo el más alto rendimiento de grano en el experimento M85 (Cuadro 7).

Las variedades Centinela y Cerro Prieto, y la línea F₆ M-9578, de cebada y las variedades Narro VF-74, Mixteco S-82, México M-82 y Pavón F-76, de trigo, en el experimento S84; la línea F₆ M-9578, de cebada, y las variedades Zacatecas VT-74, Mixteco S-82 y Pavón F-76, de trigo, en el experimento T84; la línea F₆ M-9578 y la variedad Tlaxcala, de cebada, y la línea F₆ Zacatecas-2 y la variedad México M-82, de trigo, en el experimento T85, y la línea F₆ M-9578, de cebada, en el experimento M85, produjeron su mayor rendimiento de grano con una alta eficiencia en el uso de la precipitación (Cuadros 6 y 7). Las variedades Narro VF-74, Mixteco S-82 y

Pavón F-76, de trigo, en el experimento S84; las variedades Zacatecas VT-74, Mixteco S-82 y Pavón F-76, de trigo, en el experimento T84, y la línea F₆ Zacatecas-2 y la variedad México M-82, de trigo, en el experimento T85, además de presentar alta eficiencia en el uso de la precipitación, mostraron mayor número de días a madurez fisiológica que los otros genotipos. La línea F₆ M-9717, de cebada, en el experimento S84 y la línea F₆ M-9578, de cebada, en los experimentos T85 y M85, además de tener alto rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación, mostraron un mayor número de días a antesis que los otros materiales genéticos (Cuadros 6 y 7). La existencia de variabilidad genética, en atributos agronómicos favorables para el rendimiento en condiciones de escasez de agua, es importante para la conservación y utilización racional de los recursos del ambiente; un alto rendimiento de grano, acompañado de alta eficiencia en el uso de la precipitación, es deseable para el mejoramiento genético en los sistemas de producción de secano con problemas de sequía; la selección de genotipos con alta eficiencia en el uso de la precipitación permitirá una mayor producción de biomasa y rendimiento de grano, sin un aumento significativo en la cantidad de agua disponible para el crecimiento durante el ciclo de los cultivos, sobre todo ahora que el cambio climático global afecta los patrones de distribución espacial y estacional de la lluvia en diversas áreas agrícolas de secano.

Relaciones entre el Rendimiento de Grano y Precipitación Acumulada, y Madurez Fisiológica

El rendimiento de grano estuvo positiva y significativamente asociado con la cantidad de precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, en promedio de todos los materiales genéticos y ambientes (RG = 6.3(PA) - 723, r = 0.43, P < 0.05) (Figura 1). Los genotipos con

Cuadro 6. Días a antesis (DA) y madurez fisiológica (DMF), rendimiento de grano (RG), precipitación acumulada (PA) entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, y eficiencia en el uso de la precipitación (EUP) en Salinas, S.L.P. (S84) y Tecámac, México (T84).

Variedad	S84					T84					
	DA	DMF	RG	PA	EUP	DA	DMF	RG	PA	EUP	
			kg ha ⁻¹	mm	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹			kg ha ⁻¹	mm	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	
Cebada											
10	Centinela	54	79	686	175	3.9	51	96	2231	499	4.5
11	Cerro Prieto	55	80	612	175	3.5	54	95	1918	495	3.9
12	Celaya	- [†]	-	-	-	-	59	95	2004	494	4.1
13	M-9578	-	-	-	-	-	63	102	2846	522	5.4
14	M-9310B	54	80	775	175	4.5	51	93	1873	488	3.8
15	M-9645	58	87	473	175	2.7	52	95	1948	495	4.0
16	M-9717	58	84	690	175	4.0	51	95	1514	495	3.1
Trigo											
1	Toluca F-73	53	88	587	175	3.4	54	96	1428	498	2.9
2	Lerma Rojo S-64	-	-	-	-	-	60	107	2222	525	4.3
3	Zacatecas VT-74	55	96	576	177	3.2	63	120	2989	554	5.4
4	Zacatecas-2	-	-	-	-	-	61	115	2225	542	4.1
5	Narro VF-74	54	93	649	177	3.7	61	114	1932	545	3.5
6	Cleopatra VT-74	53	86	592	175	3.4	64	117	2290	550	4.2
7	Mixteco S-82	54	96	782	176	4.5	66	121	3196	558	5.7
8	México M-82	52	90	617	175	3.5	61	116	2787	548	5.1
9	Pavón F-76	54	96	805	177	4.6	68	123	3408	558	6.2
Media general		54	88	653	175	3.7	59	106	2301	523	4.4
DSH (P < 0.05)		2	4	203	1	1.2	3	4	698	4	0.5

[†] En las celdas con - no se obtuvieron datos, porque no se sembró.

mayor rendimiento de grano utilizaron mayor cantidad de lluvia acumulada durante la estación de crecimiento; esta relación positiva muestra la posibilidad de lograr incrementos en el rendimiento, asociados con el mejoramiento de la eficiencia en el uso de la precipitación. Una asociación positiva entre la lluvia registrada durante la estación de crecimiento y el rendimiento de grano se ha observado en diversos estudios conducidos en ambientes de secano (López-Castañeda y Richards, 1994; Turner, 1997; Asseng *et al.*, 2001a; Sadras *et al.*, 2002; Araus *et al.*, 2003).

El rendimiento de grano también estuvo relacionado positiva y significativamente con el número de días a madurez fisiológica, en promedio de todos los genotipos y ambientes ($RG = 30(DMF) - 1392$, $r = 0.50$, $P < 0.05$) (Figura 2a). Los genotipos con mayor rendimiento de grano tuvieron mayor número de días a madurez fisiológica; esta asociación positiva entre el rendimiento de grano y el número de días a madurez fisiológica indica que una estación de crecimiento más larga o un mayor número de días a madurez podría dar oportunidad a incrementos en el rendimiento de grano, en tanto que

haya disponibilidad de humedad en la etapa de crecimiento y formación del grano. En el presente estudio, se observa que en todos los experimentos hubo precipitación cercana a o mayor que la media de varios

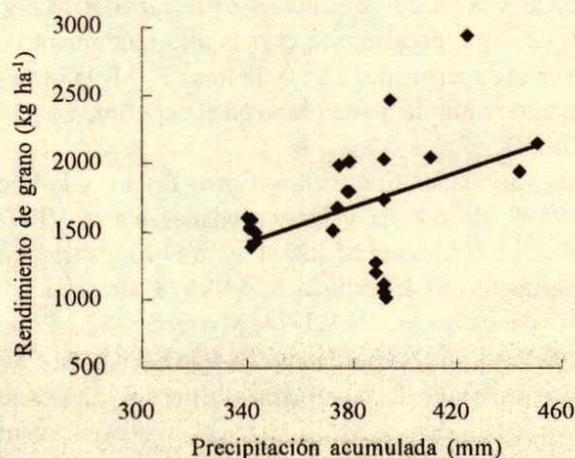


Figura 1. Relación entre la precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos y el rendimiento de grano promedio de todos los genotipos y ambientes.

Cuadro 7. Días a antesis (DA) y madurez fisiológica (DMF), rendimiento de grano (RG), precipitación acumulada (PA) entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, y eficiencia en el uso de la precipitación (EUP) en Tecámac (T85) y Montecillo, México (M85).

Variedad	T85					M85					
	DA	DMF	RG	PA	EUP	DA	DMF	RG	PA	EUP	
			kg ha ⁻¹	mm	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹			kg ha ⁻¹	mm	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	
Avena											
20	Diamante R-31	55	98	1024	310	2.8	51	98	2188	473	4.6
21	Tarahumara	56	103	1021	310	2.7	53	97	2461	472	5.2
22	Páramo	53	93	920	310	2.4	49	90	1649	467	3.5
23	Guelatao	58	100	829	310	2.0	54	95	1394	472	3.0
24	Cuauhtémoc	64	108	707	313	1.3	60	96	1314	472	2.8
Cebada											
10	Centinela	57	108	807	313	2.3	53	97	2292	473	4.8
11	Cerro Prieto	60	110	908	313	2.4	59	99	2918	473	6.2
12	Celaya	64	109	1146	313	3.4	60	98	2967	473	6.3
13	M-9578	61	113	1681	313	5.1	63	105	4312	476	9.0
14	M-9310B	53	102	1276	310	3.8	50	94	2480	472	5.3
15	M-9645	57	104	820	313	2.3	55	97	2326	473	4.9
16	M-9717	54	99	1180	310	3.3	54	97	2718	473	5.8
17	Puebla	55	103	1090	310	2.9	52	95	2961	472	6.3
18	Tlaxcala	57	108	1433	313	4.1	54	98	3507	473	7.4
19	Porvenir	55	99	648	310	1.7	53	92	1761	466	3.8
Trigo											
1	Toluca F-73	56	110	1054	310	2.8	54	103	2661	477	5.6
2	Lerma Rojo S-64	59	112	902	313	2.2	57	113	2687	493	5.4
3	Zacatecas VT-74	65	120	871	321	1.6	60	118	2711	495	5.5
4	Zacatecas-2	59	115	1391	318	3.9	59	114	2822	493	5.7
5	Narro VF-74	58	114	835	315	2.1	59	115	2615	494	5.3
6	Cleopatra VT-74	57	112	1277	315	3.5	58	113	2532	490	5.2
7	Mixteco S-82	61	117	893	321	1.2	59	117	2334	495	4.7
8	México M-82	62	117	1314	318	3.2	56	116	3251	495	6.6
9	Pavón F-76	69	120	947	321	2.7	61	121	2873	495	5.8
Media general		59	108	1040	313	2.7	55	103	2572	464	5.3
DSH (P < 0.05)		11	6	371	2	0.7	3	3	434	4	0.9

años en los meses de septiembre y octubre, meses en los que ocurre el llenado de grano en cereales.

La precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos tuvo una relación positiva y significativa con el número de días a madurez fisiológica, en promedio de todas las variedades y ambientes ($PA = 2.1(DMF) + 168$, $r = 0.51$, $P < 0.01$) (Figura 2b); los genotipos con mayor longitud del ciclo utilizaron mayor cantidad de precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica. Un mayor ciclo biológico ofrece la posibilidad de aumentar la acumulación de humedad disponible para

el cultivo que, a su vez, puede reflejarse en incrementos en la eficiencia en el uso de la precipitación y el rendimiento de grano (Turner, 1997; Asseng *et al.*, 2001b; Sadras *et al.*, 2002; Araus *et al.*, 2003).

La eficiencia en el uso de la precipitación y el rendimiento de grano en cereales podría incrementarse al seleccionar genotipos con una estación de crecimiento más larga que aprovechen la humedad disponible durante el ciclo. El agua disponible durante la etapa final de crecimiento y formación del grano es de particular importancia para el rendimiento y la calidad del grano, por lo que habrá que poner atención a las características

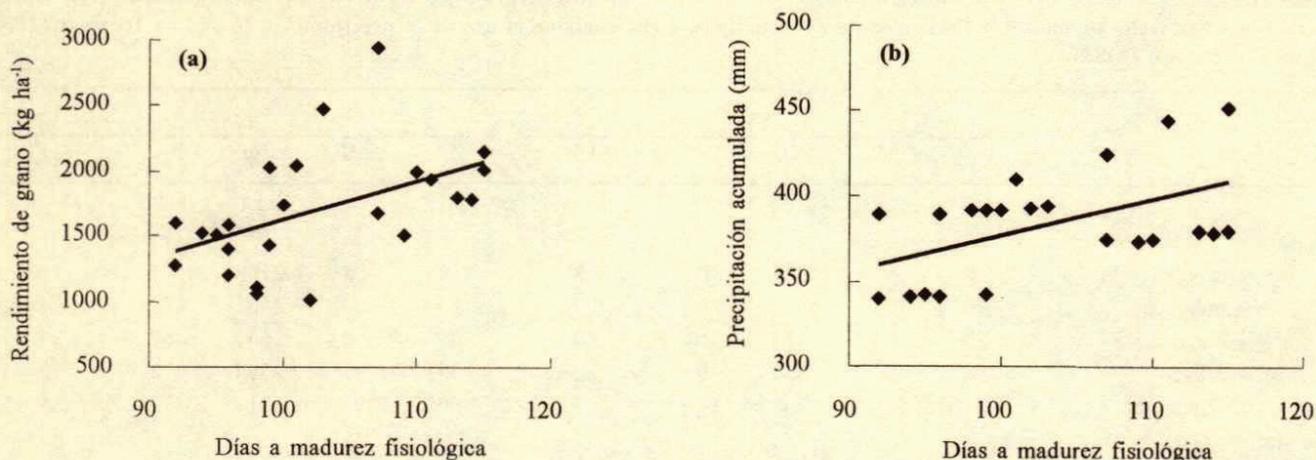


Figura 2. Relación entre el número de días a madurez fisiológica y el rendimiento de grano (a) y la precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos (b) en promedio de todos los genotipos y ambientes.

agronómicas y a los procesos fisiológicos que contribuyan al rápido crecimiento del grano y la removilización de asimilados del tallo al grano.

CONCLUSIONES

- Las localidades de Montecillo y Tecamac tuvieron mayor precipitación, entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica, que Salinas de Hidalgo; esta mayor precipitación se reflejó en mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación.
- La cebada y el trigo tuvieron mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación que la avena, en promedio de todos los ambientes.
- Las variedades con mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación fueron Centinela y Cerro Prieto, y las líneas F_6 M-9310B y M-9717, de cebada, y Narro VF-74, Mixteco S-82, México M-82 y Pavón F-76, de trigo, en el experimento S84; la línea F_6 M-9578, de cebada, y las variedades Zacatecas VT-74, Mixteco S-82 y Pavón F-76, de trigo, en el experimento T84; la línea F_6 M-9578 y la variedad Tlaxcala, de cebada, y la línea F_6 Zacatecas-2 y la variedad México M-82, de trigo, en el experimento T85, y la línea F_6 M-9578, de cebada, en el experimento M85.
- El rendimiento de grano estuvo positiva y significativamente relacionado con la precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos y el número de días a madurez fisiológica; y la precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica estuvo asociada positiva y significativamente con el número de días a

madurez fisiológica, en promedio de todos los genotipos y ambientes.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al M.C. Marcial Fernández-Rivera (Colegio de Postgraduados, *Campus* San Luis Potosí), su colaboración en la conducción del experimento de cereales realizado en Salinas de Hidalgo, S.L.P.

LITERATURA CITADA

- Araus, J. L., D. Villegas, N. Aparicio, L. F. García del Moral, S. El Haini, Y. Rharrabti, J. P. Ferrio y C. Royo. 2003. Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *Crop Sci.* 43: 170-180.
- Asseng, S. y N. C. Turner. 2003. Evaluating water-use efficiency of rainfed wheat using a simulation model. pp. 70-79. *In*: S. Kang, B. Davies, L. Shan y H. Cai (eds.). *Water-saving agriculture and sustainable use of water and land resources*. Shaanxi Science and Technology Press. Xi'an, China.
- Asseng, S., F. X. Dunin, I. R. P. Fillery, D. Tennant y B. A. Keating. 2001a. Potential deep drainage under wheat crops in a Mediterranean climate: II. Management opportunities to control drainage. *Austr. J. Agric. Res.* 52: 57-66.
- Asseng, S., N. C. Turner y B. A. Keating. 2001b. Analysis of water- and nitrogen-use efficiency of wheat in a Mediterranean climate. *Plant Soil* 233: 127-143.
- Briggs, L. J. y H. L. Shantz. 1912. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. *Bulletin* 230. United States Department of Agriculture, Bureau of Plant Industry. Washington, DC, USA.
- Eastham, J. y P. J. Gregory. 2000. The influence of crop management on the water balance of lupin and wheat crops

- on a layered soil in a Mediterranean climate. *Plant Soil* 221: 239-251.
- Farquhar, G. D., K. T. Hubick, A. G. Condon y R. A. Richards. 1988. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency. pp. 21-40. *In*: P. W. Rundell, J. R. Ehleringer y K. A. Nagy (eds.). *Stable isotopes in ecological research*. Springer-Verlag. New York, NY, USA.
- Fischer, R. A. 1981. Optimising the use of water and nitrogen through breeding crops. *Plant Soil* 58: 249-279.
- Fischer, R. A. y N. C. Turner. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 29: 277-317.
- French, R. J. y J. E. Schultz. 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. Relation between yield, water use and climate. *Austr. J. Agric. Res.* 35: 742-764.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Gregory, P. J. y J. Eastham. 1996. Growth of shoots and roots, and interception of radiation by wheat and lupin crops on a shallow, duplex soil in response to time of sowing. *Austr. J. Agric. Res.* 47: 427-447.
- Jones, O. R. y T. W. Popham. 1997. Cropping and tillage systems for dryland grain production in the southern high plains. *Agron. J.* 89: 222-232.
- López-Castañeda, C. y R.A. Richards. 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments. III. Water use and water-use efficiency. *Field Crops Res.* 39: 85-98.
- Passioura, J. B. 1977. Grain, yield, harvest index, and water use of wheat. *J. Austr. Institute for Agric. Sci.* 43(3-4): 117-120.
- Riffkin, P. A. P. M. Evans, J. F. Chin y G. A. Kearney. 2003. Early-maturing spring wheat outperforms late-maturing winter wheat in the high rainfall environment of south-west Victoria. *Austr. J. Agric. Res.* 54: 193-202.
- Sadras, V., D. Roger y G. O'Leary. 2002. On-farm assessment of environmental and management constraints to wheat yield and efficiency in the use of rainfall in the Mallee. *Austr. J. Agric. Res.* 53: 587-598.
- SAS Institute. 2001. Release 6.12 for Windows. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Smith, R. C. y H. C. Harris. 1981. Environmental resources and restraints to agricultural production in a Mediterranean-type environment. *Plant Soil* 58: 31-57.
- Turner, N. C. 1997. Further progress in crop water relations. *Adv. Agron.* 58: 293-338.
- Turner, N. C. y M. E. Nicolas. 1998. Early vigour: a yield positive characteristic for wheat in drought-prone Mediterranean-type environments. pp. 47-62. *In*: R. K. Behl, D. P. Singh y G. P. Lodhi (eds.). *Crop improvement for stress tolerance*. CCS Haryana Agricultural University, Hisar- Max Mueller Bhawan. New Delhi, India.