

DESARROLLO RADICULAR Y AEREO DE LA CEBADA (*Hordeum vulgare* L.) EN CONDICIONES SALINAS

R. ISLA¹
P. ANGAS²
C. CANTERO-MARTINEZ²
R. ARAGÜES¹

¹ Unidad de Suelos y Riegos. Servicio de Investigación Agroalimentaria (DGA). Laboratorio de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC). Apdo. 727. 50080 Zaragoza

² Universitat de Lleida-IRTA. 25006 Lleida

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es cuantificar el efecto de la salinidad edáfica sobre el desarrollo radicular de la cebada y comparar el mismo con el que se produce sobre el rendimiento en grano y la biomasa aérea. Se sembraron 13 cultivares de cebada en un gradiente de salinidad impuesto por la triple línea de aspersión sobre los que se midió el rendimiento en grano (RG) y la biomasa aérea (BMA) en nueve tratamientos salinos y la densidad de longitud radicular (L_v) en la fase de antesis en tres tratamientos salinos (control-T0, salinidad intermedia-T4, y salinidad elevada-T8). En el cultivar Kym se midió además L_v en cinco fases de desarrollo en los tratamientos T0, T4 y T8.

La salinidad retrasa la tasa máxima diaria de crecimiento radicular del cultivar Kym, de tal manera que dicha tasa máxima se alcanza entre ahijado y encañado en T0, entre encañado y espigado en T4, y entre espigado y antesis en T8. La distribución vertical de raíces se linealiza con el incremento de la salinidad, de tal forma que, respecto a la L_v total media de los 13 cultivares, la $L_{v_{0-25}}$ media en los primeros 25 cm de suelo desciende desde el 67 % en T0, hasta el 45 % en T8 mientras que la $L_{v_{25-50}}$ aumenta desde el 17 % en T0 hasta el 33 % en T8. Para salinidades moderadas (T4) se produce un efecto negativo similar en los sistemas aéreo y radicular, mientras que para salinidades elevadas (T8) el sistema radicular es más tolerante a la salinidad que el sistema aéreo, lo que hace que la relación L_v /RG en el tratamiento T8 sea un 60 % mayor que en los tratamientos T0 y T4. La existencia de variabilidad genotípica en el desarrollo radicular, junto con la correlación significativa ($P < 0,05$) observada entre RG y L_v en condiciones de salinidad elevada, abre perspectivas interesantes para la mejora de cultivares de cebada por su tolerancia a la salinidad a través del incremento de su densidad de longitud radicular.

PALABRAS CLAVE: Cebada
Densidad de longitud radicular
Raíces
Salinidad
Tolerancia a la salinidad
Triple línea de aspersión

Recibido: 24-9-97

Aceptado para su publicación: 1-10-98

INTRODUCCION

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) se caracteriza por su gran adaptación a diferentes condiciones ambientales y, en particular, a la salinidad edáfica (Maas y Hoffman, 1977; Epstein, Norlyn, 1980). El efecto de la salinidad sobre el rendimiento en grano de la cebada es ampliamente conocido, pero su efecto sobre el sistema radicular es mucho más limitado. Distintos trabajos concluyen que la salinidad limita significativamente el crecimiento del sistema radicular en la colza (Boem *et al.*, 1994), el maíz (Al Khafaf *et al.*, 1988), el sorgo (Yang *et al.*, 1990), el tomate (Abrisqueta *et al.*, 1991), el trebol (Ab-Shukor *et al.*, 1988), y la cebada (Mozafar, Oertli, 1992). Sin embargo, la cuantificación de dicha reducción no está en general suficientemente precisada, existiendo además importantes discrepancias entre autores. Así, Rawson *et al.* (1988) observaron en cebada, trigo y triticale un aumento de la relación sistema radicular/sistema aéreo con la salinidad hasta que se alcanzaba un valor de salinidad umbral (alrededor de 125 mmol L⁻¹ NaCl) a partir del cual dicha relación permanecía constante, Richards (1992) encontró que la relación sistema radicular/sistema aéreo de la cebada disminuía de forma sistemática con la salinidad, y Dalton *et al.* (1997) concluyeron que, en tomate, dicha relación permanecía relativamente constante hasta valores de C_{Ess} (solución de suelo) de alrededor de 10 dS m⁻¹. Por otro lado, Bower, Tamini (1979) indicaron que las diferencias en ajuste osmótico de las raíces son la causa de las diferencias de tolerancia a la salinidad en los cereales, mientras que Gorham (1992) indica que la causa última de la mayor tolerancia a la salinidad de la cebada que la de otras especies es desconocida.

Se ha encontrado variabilidad genotípica en el crecimiento radicular en condiciones salinas en trigo, arroz y cebada (Bower y Tamimi, 1979), tomate (Abrisqueta *et al.*, 1991; Frascina y Chiesa, 1993, Pérez-Alfocea *et al.*, 1993), garbanzo (Sharma y Kumar, 1992) y algodón (Leidi y Gutierrez, 1993). Datta y Pradham (1981) utilizaron el crecimiento radicular junto al crecimiento del sistema aéreo como parámetros para cribar cultivares de arroz por su tolerancia a la salinidad en fases tempranas. En la misma línea, Ashraf *et al.* (1986a, 1986b) indican que el crecimiento radicular en fases tempranas en condiciones salinas puede ser un buen índice de tolerancia a la salinidad en diversas gramíneas, proponiéndolo como carácter de cribado para dichas condiciones. Por el contrario, Dalton *et al.* (1997) proponen que una reducción de la relación sistema radicular / sistema aéreo puede ser beneficioso en condiciones salinas, al disminuir el flujo de sales hacia el sistema aéreo.

La mayor parte de los trabajos descritos se efectuaron con un número limitado de tratamientos salinos, en condiciones de cultivo hidropónico y únicamente para las fase iniciales de crecimiento de los cultivos, razones por las cuales no se conoce suficientemente la respuesta del crecimiento de las raíces en condiciones reales de campo ni si la mayor tolerancia de la cebada a la salinidad es debida a un mayor desarrollo relativo de su sistema radicular.

Los objetivos de este trabajo son:

(1) Evaluar el efecto de la salinidad sobre el desarrollo radicular de un cultivar de cebada en cinco fases de su ciclo.

(2) Establecer y comparar las funciones de respuesta a la salinidad de la densidad de longitud radicular y del rendimiento en grano de un cultivar de cebada.

(3) Determinar la variabilidad en el patrón radicular de trece cultivares de cebada sujetos a tres niveles de salinidad.

(4) Analizar la existencia de posibles correlaciones entre la densidad de longitud radicular, el rendimiento en grano y la biomasa aérea de trece cultivares de cebada sujetos a tres niveles de salinidad.

MATERIAL Y METODOS

Descripción del ensayo y materiales utilizados

El ensayo se llevó a cabo durante la campaña 1993/1994 en una parcela del Servicio de Investigación Agroalimentaria de la Diputación General de Aragón (Montañana, Zaragoza). El suelo es un *Typic Xerofluvent* de textura franco-arcillosa. Antes de la siembra se realizó un abonado de fondo de 75 Kg N ha⁻¹, 75 Kg P₂O₅ ha⁻¹ y 75 Kg K₂O ha⁻¹. Al inicio del encañado se aplicaron 75 Kg N ha⁻¹ en forma de nitrato amónico. En dicha parcela se instaló una Triple fuente Lineal de Aspersión (TLA) compuesta por tres líneas de aspersión separadas entre sí 15 m, que es el radio mojado por los aspersores (Royo *et al.*, 1987). La línea central aplica agua salina (CE \approx 18-20 dS m⁻¹; mezcla de Cl₂Ca hidratado y ClNa en una relación molar Na:Ca = 2) y las dos líneas laterales aplican agua dulce (CE < 2 dS m⁻¹). El solapamiento de las tres líneas produce un volumen constante de agua aplicada y un gradiente lineal de salinidad a ambos lados de la línea central.

Las características más importantes del ensayo se presentan en la Tabla 1. La germinación y emergencia de la cebada se produjo con riegos de agua dulce, iniciándose paulatinamente los riegos salinos a partir del estado de tres hojas. Antes y después de cada riego salino se aplicaron 3 min de riego con agua dulce al objeto de minimizar la absorción iónica foliar (Aragüés *et al.*, 1994).

TABLA 1
CARACTERISTICAS GENERALES DEL ENSAYO
General characteristics of the trial

Fecha de siembra: 19 de Noviembre de 1993
Fecha de cosecha: 22 de Junio de 1994
Area de las parcelas (tratamientos) (m²): 1,5
Primer riego salino: 31/01/1994
Ultimo riego salino: 31/05/1994
Nº total de riegos: 28
Volumen total de riego (mm): 351
Volumen total de lluvia entre siembra y cosecha (mm): 118
ET cebada¹ (mm): 271
Fracción de lavado media (FL, %) del tratamiento control ² : 42

¹Medida en un lisímetro de drenaje situado a 200 m de la parcela experimental

²FL = (Riego + Lluvia - ET) / (Riego + Lluvia)

En cada uno de los diez tratamientos salinos (T0 a T9) impuestos experimentalmente por medio de la TLA se sembraron 13 cultivares de cebada: Albacete, Alpha, Barbarrosa, Cameo, Criter, Dpche-18, Igri, Kvl468, Kym, Malta, Mogador, Pen, y Reinette. Cada parcela experimental consistió de seis surcos de cebada de 1,2 m de longitud separados entre sí 0,21 m.

Salinidad del agua de riego y del suelo

Después de cada riego se midió el volumen aplicado y la salinidad del agua recogida en tres líneas de 20 pluviómetros instalados en las parcelas de los tratamientos. La Figura 1 presenta las medias temporales de la salinidad del agua de riego (CEar) y las medias espaciales de la salinidad del suelo (CEa) medidas en cada tratamiento salino (T0-control a T9). La CEa del primer metro de suelo se midió en seis fechas (2 y 18 de Febrero, 2 y 30 de Marzo, 25 de Abril y 25 de Mayo) con el sensor electromagnético (SEM) Geonics EM-38 situado sobre el suelo en posición horizontal. De esta Figura se deduce que ambos gradientes de salinidad son lineales ($P < 0,001$) y que la variabilidad temporal de la salinidad del agua aplicada en los 28 riegos, medida sobre 10 pluviómetros (uno por tratamiento salino), fue moderada (C.V. medio = 26 %) mientras que, para cada tratamiento salino, la variabilidad espacial de la salinidad del suelo fue muy baja (C.V. medio = 5,4 %).

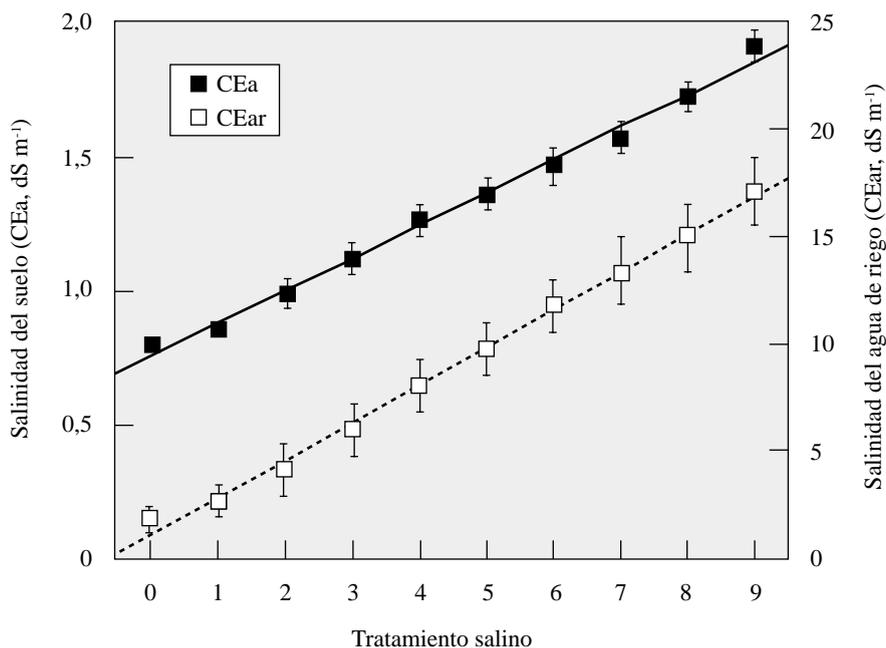


Fig. 1.—Valores medios (\pm desviación estándar) de la salinidad del agua de riego (CEar, $n = 24$ riegos) y de la salinidad del suelo (CEa, $n = 13$ cultivos) medidos en cada tratamiento salino (T0 a T9)
Mean values (\pm standard deviation) of irrigation water salinity (CEar, $n = 24$ irrigations) and soil salinity (CEa, $n = 13$ cultivars) measured in each saline treatment (T0 to T9)

La calibración del SEM se efectuó el 25 de Mayo en 15 puntos situados a lo largo del intervalo de salinidad en los que se procedió a la medida de la CEa y al muestreo de suelo cada 25 cm hasta un metro de profundidad. Las muestras se llevaron al laboratorio midién-

dose la CE_e (CE del extracto de pasta saturada) y la $CE_{1:5}$ (CE del extracto suelo:agua = 1:5). Las ecuaciones obtenidas son:

$$CE_e \text{ (dS m}^{-1}\text{)} = -1,22 + 8,19 CE_{1:5} \text{ (dS m}^{-1}\text{); } n = 28, R^2 = 0,96$$

$$CE_{1:5 \text{ (0-1 m)}} \text{ (dS m}^{-1}\text{)} = 0,12 + 0,62 CE_a \text{ (dS m}^{-1}\text{); } n = 15, R^2 = 0,81$$

El 9 de Mayo de 1994 (fase de antesis de las cebadas) se tomaron muestras de suelo cada 25 cm y hasta un metro de profundidad en los tratamientos T0, T4 y T8 de cada cultivar sobre las que se midió la $CE_{1:5}$ y la humedad gravimétrica. La $CE_{1:5}$ se convirtió a CE_e utilizando la ecuación anterior. Los valores medios de CE_e de las 13 parcelas de los cultivares para cada tratamiento salino y profundidad de suelo indican que la salinidad aumentó con el tratamiento salino y que disminuyó con la profundidad del suelo (Tabla 2). Los correspondientes C.V. fueron iguales o inferiores al 25 %, indicando que las diferencias de salinidad del suelo entre los 13 cultivares de cebada fueron bajas. La humedad gravimétrica del suelo medida en los distintos tratamientos y profundidades osciló entre un 15 y un 22 %, con un valor medio del 20 %. Si bien se observó una tendencia a aumentar la humedad del suelo con la salinidad, las diferencias en humedad del suelo entre los 13 cultivares de cebada fueron asimismo pequeñas (C.V.= 8 %).

TABLA 2

VALORES MEDIOS Y C.V. DE LA SALINIDAD DEL SUELO (CE_e) MEDIDOS EL 9 DE MAYO DE 1994 EN LAS PARCELAS DE 13 CULTIVARES DE CEBADA EN TRES TRATAMIENTOS SALINOS (T0, CONTROL; T4, SALINIDAD INTERMEDIA; T8, SALINIDAD ELEVADA) Y CUATRO PROFUNDIDADES DE SUELO (0-25, 25-50, 50-75 Y 75-100 cm)

Mean values and coefficients of variation of soil salinity (EC_e : electrical conductivity of the soil saturation extract) measured on 9 May 1994 in the plots of 13 barley cultivars in three saline treatments (T0, control; T4, intermediate salinity; T8, high salinity) and four soil depths (0-25, 25-50, 50-75 and 75-100 cm)

Tratamiento salino	Prof. (cm)	CE_e (dS m ⁻¹)	
		Media	C.V. (%)
T0	0-25	3,6	23
	25-50	2,9	25
	50-75	2,4	17
	75-100	2,0	17
T4	0-25	7,5	12
	25-50	6,6	12
	50-75	5,8	12
	75-100	5,2	20
T8	0-25	12,3	21
	25-50	9,8	10
	50-75	7,6	10
	75-100	6,8	10

Densidad de longitud radicular

El desarrollo radicular de los cultivares de cebada se caracterizó mediante la densidad de longitud radicular (L_v). Esta medida implica la obtención de muestras de suelo que se llevan al laboratorio y se dispersan con hexametáfosfato sódico. Mediante un sistema de flotación y una contracorriente de agua, el suelo dispersado pasa a través de un tamiz de 0,2 mm de malla que retiene las raíces presentes en la muestra original. Las raíces se someten a tinción con Rojo Congo durante 3 min para determinar aquellas que son biológicamente activas. La tinción se fija mediante inmersión en alcohol de 96° durante 3 min, procediendo a continuación al lavado y disposición homogénea de las raíces sobre un disco de papel de filtro. Una vez seco al aire, se coloca una lámina adhesiva transparente sobre el disco y se guarda en una cámara oscura hasta el momento del recuento de raíces. La densidad de longitud radicular se determinó mediante el método de intersección lineal propuesto por Newman (1965) y modificado por Tennant (1975) que consiste en el recuento, mediante lupa de cuatro aumentos, del número de intersecciones de las raíces presentes en la lámina con una malla de 25 cuadrados superpuesta a dicha lámina. A partir de dicho recuento y de la humedad y densidad aparente del suelo se calcula la densidad de longitud radicular.

En el cultivar Kym la L_v se midió por triplicado a las profundidades de suelo de 0-25, 25-50, 50-75 y 75-100 cm de los tratamientos T0 (control sin salinidad), T4 (salinidad intermedia) y T8 (salinidad elevada) en cinco fechas de muestreo (2 de marzo, 103 días después de siembra (DDS), ahijamiento; 26 de marzo, 127 DDS, encañado; 18 de abril, 150 DDS, espigado; 9 de mayo, 171 DDS, antesis; y 30 de mayo, 192 DDS, madurez fisiológica). En los 12 cultivares restantes, la L_v se midió en un único muestreo el 9 de mayo (171 DDS, antesis) en las mismas profundidades de los tres tratamientos (T0, T4 y T8). Además, en el cultivar Kym en su fase de antesis se midió L_v por triplicado en los nueve tratamientos salinos. En todos los casos, cada muestra de suelo se separaba en dos submuestras, realizando dos recuentos de longitud radicular en cada uno de ellos.

Rendimiento de grano y biomasa

El rendimiento de grano de los 13 cultivares de cebada se midió en cada tratamiento salino T0 a T9 cosechando mediante una cosechadora de ensayos cada una de las parcelas experimentales. En los tratamientos T0, T4 y T8 de cada cultivar de cebada se segaron las parcelas manualmente al objeto de medir la biomasa aérea.

RESULTADOS Y DISCUSION

Evolución temporal de la densidad de longitud radicular del cultivar Kym medida en tres tratamientos salinos

La Figura 2 presenta la evolución, desde el ahijado a la madurez fisiológica, de la densidad media de longitud radicular en el primer metro de suelo (L_{v0-100}) del cultivar Kym expuesto a los tratamientos T0 (control; CE_c media = 3,1 dS m^{-1}), T4 (salinidad intermedia; CE_c media = 6,2 dS m^{-1}) y T8 (salinidad elevada; CE_c media = 10,0 dS m^{-1}). Estos valores de CE_e se han obtenido a partir de la ecuación $CE_e-CE_{1,5}$ presentada anteriormente, donde

CE_{1,5} es el valor medio de los cinco muestreos por las cuatro profundidades de muestreo. En el tratamiento control (T0) la $L_{V_{0-100}}$ aumentó entre las fases de ahijado y antesis, alcanzándose la tasa máxima diaria de crecimiento radicular en la fase temprana de crecimiento (ahijado a encañado: tasa máxima = 0,043 cm cm⁻³ día⁻¹). En el tratamiento de salinidad intermedia (T4) la $L_{V_{0-100}}$ aumentó asimismo entre ahijado y antesis, pero dicho aumento fue inferior y el crecimiento se vio retrasado respecto al del tratamiento control, alcanzándose la tasa máxima de crecimiento radicular en la fase intermedia del ciclo de la cebada (encañado a espigado: tasa máxima = 0,023 cm cm⁻³ día⁻¹). En el tratamiento de salinidad elevada (T8) el crecimiento radicular fue mucho más bajo y se vio muy retrasado, de tal manera que la $L_{V_{0-100}}$ incluso disminuyó entre las fases de ahijado y espigado y solo se observó un crecimiento radicular en la fase tardía de espigado a antesis (tasa máxima = 0,023 cm cm⁻³ día⁻¹). Las diferencias de $L_{V_{0-100}}$ entre los tres tratamientos salinos fueron ya evidentes en el primer muestreo (ahijado), y dichas diferencias aumentaron en general a lo largo del ciclo de la cebada. Los valores máximos de $L_{V_{0-100}}$ se obtuvieron en los tres tratamientos en la fase de antesis (valores de $L_{V_{0-100}}$ de 3,1 cm cm⁻³ en T0, 2,2 cm cm⁻³ en T4 y 1,1 cm cm⁻³ en T8). Para esta fase, el descenso de $L_{V_{0-100}}$ respecto al del tratamiento control (T0) fue del 29 % en T4 y del 65 % en T8. En definitiva, el incremento de la salinidad produjo tanto una reducción de $L_{V_{0-100}}$ como un retraso en la tasa máxima de crecimiento radicular.

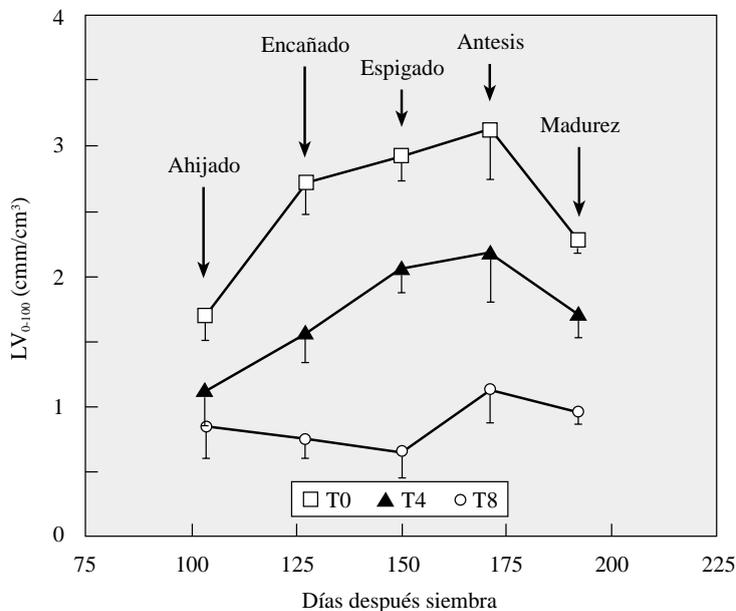


Fig. 2.—Evolución de la densidad media de longitud radicular ($L_{V_{0-100}}$) medida a lo largo del ciclo de la cebada Kym expuesta a tres niveles de salinidad (T0, control; T4, salinidad intermedia; T8, salinidad elevada).

Cada punto es la media de tres repeticiones y los segmentos verticales representan una desviación estándar
Evolution of the mean root length density ($L_{V_{0-100}}$) measured along the cycle of the barley Kym subjected at three salinity levels (T0, control; T4, intermediate salinity; T8, high salinity). Each point is the mean of three replications and the vertical segments represent one standard deviation

Respecto a la distribución en profundidad de la densidad radicular, los valores máximos se alcanzaron en los tres tratamientos en el horizonte superficial (valores de Lv_{0-25} en anthesis de $7,2 \text{ cm.cm}^{-3}$ en T0, $4,5 \text{ cm.cm}^{-3}$ en T4 y $2,8 \text{ cm.cm}^{-3}$ en T8) y disminuyeron con el incremento de la profundidad, de tal manera que los valores máximos medidos en el horizonte más profundo (Lv_{75-100}) fueron tan solo de $1,3 \text{ cm.cm}^{-3}$ en T0, $0,9 \text{ cm.cm}^{-3}$ en T4 y $0,1 \text{ cm.cm}^{-3}$ en T8.

Al aumentar la salinidad se observó una alteración de la evolución temporal de los patrones de Lv en profundidad desde el momento de ahijamiento (datos no mostrados), ya que mientras en el tratamiento control (T0) se produjo una curva de aumento de Lv con el tiempo para todas las profundidades, en el T4 esta curva de aumento fue únicamente apreciable en las dos primeras profundidades (0-25 y 25-50 cm), no existiendo prácticamente aumento en el tratamiento T8 para ninguna de las profundidades.

Funciones de respuesta a la salinidad de la densidad media de longitud radicular y del rendimiento en grano de la cebada Kym

La Figura 3 presenta los valores de densidad media de longitud radicular (Lv_{0-100}) y del rendimiento en grano (RG) del cultivar Kym expuesto a 10 niveles de salinidad del suelo (CEa). El RG se ajustó satisfactoriamente ($R^2 = 95 \%$) al modelo sigmoide de van-Genuchten (1983), obteniéndose una CEa_{50} (salinidad del suelo a la que el RG se reduce

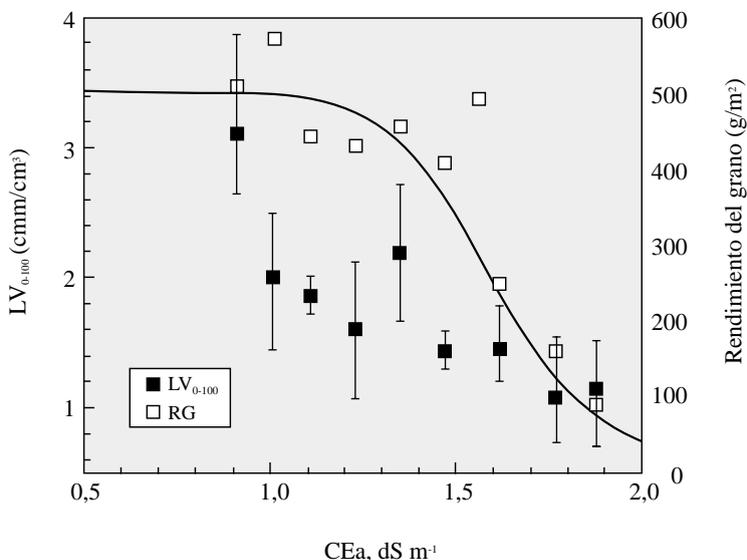


Fig. 3.—Efecto de un gradiente salino en el suelo (CEa, dS m^{-1}) sobre la densidad media de longitud radicular (Lv_{0-100}) en anthesis y sobre el rendimiento de grano (RG) del cultivar Kym. Para las observaciones de rendimiento de grano se representa el modelo sigmoide de van-Genuchten (1983).

Para Lv , los segmentos verticales representan la desviación estándar de tres repeticiones.

Effect of a soil salinity gradient on mean root length density (Lv_{0-100}) at anthesis and on grain yield (RG) of the cultivar Kym. The van-Genuchten (1983) sigmoidal model for grain yield observations is represented. For Lv , the vertical segments represent one standard deviation of three replications.

un 50 %) de $1,63 \text{ dS m}^{-1}$ (error estándar = 0,04). Por el contrario, la Lv_{0-100} no se ajustó significativamente a dicho modelo, observándose un descenso acusado de la misma entre los tratamientos 0 (control) y 1, y un descenso mas o menos lineal y menos acusado a partir de dicho tratamiento. Tanto este comportamiento de Lv con la salinidad como las, en general, elevadas desviaciones estándar observadas (Fig. 3) impidieron un ajuste adecuado al modelo sigmoide, por lo que no es posible una comparación sólida de ambas funciones de respuesta.

Densidad de longitud radicular de 12 cultivares de cebada medida en la fase de antesis en tres tratamientos salinos

La Figura 4 presenta los valores medios (y sus desviaciones estándar) de Lv medidos en las tres repeticiones de los 12 cultivares de cebada a cuatro profundidades de suelo en los tratamientos T0, T4 y T8 de la triple línea de aspersión.

En el tratamiento control (T0), la distribución vertical de la densidad de longitud radicular se aproximó a la de un modelo exponencial decreciente, típico de cultivos regados con elevada frecuencia como es el caso de la TLA, en el que Lv es máximo en el horizonte superficial y disminuye con el aumento de la profundidad del suelo. Así, la Lv media de los 13 cultivares (incluido el cultivar Kym) medida en los primeros 25 cm de suelo del tratamiento T0 supuso el 67 % del total (Fig. 5). En el tratamiento de salinidad media y, especialmente, en el de salinidad elevada, la distribución vertical de Lv tendió a linealizarse, de tal manera que la Lv_{0-25} en los primeros 25 cm de suelo supuso únicamente el 55 % (T4) y el 45 % (T8) del Lv total (Fig. 5). Este comportamiento puede estar parcialmente inducido por el perfil de salinidad invertido impuesto en la TLA (esto es, la salinidad de los distintos tratamientos es siempre máxima en el horizonte más superficial; Tabla 2). Este descenso porcentual de Lv en el horizonte superficial conforme aumenta la salinidad se refleja fundamentalmente en un incremento respectivo entre 25 y 50 cm de profundidad (Lv_{25-50} = 17 % en T0, 23 % en T4 y 33 % en T8), mientras que por debajo de los 50 cm el porcentaje es relativamente similar en los tres tratamientos (Fig. 5). Holloway, Alston (1992), Minhas, Gupta (1993) encontraron asimismo una importante alteración del patrón de crecimiento exponencial de las raíces de trigo expuestas a un perfil de salinidad invertido similar al de este ensayo.

La Figura 4 muestra que Lv varía considerablemente entre los 12 cultivares de cebada. La única similitud evidente entre estos cultivares son los muy bajos valores de Lv para las profundidades superiores a 50 cm en los tres tratamientos salinos. Así, el valor medio de Lv_{50-100} de los doce cultivares y de los tres tratamientos salinos fue de $0,99 \text{ cm cm}^{-3}$, y su intervalo de variación de $1,79 \text{ cm cm}^{-3}$. Por el contrario, las diferencias entre los valores de Lv_{0-50} medidos en estos cultivares y tratamientos son mas importantes (Lv_{0-50} medio = 4,01 cm cm^{-3} , intervalo = $7,19 \text{ cm cm}^{-3}$).

Las diferencias encontradas entre los distintos cultivares dentro de cada tratamiento salino deben atribuirse a diferencias genotípicas y no a variaciones en la salinidad del suelo, ya que no se observaron correlaciones significativas entre las Lv y las respectivas $CE_{1,5}$.

La Tabla 3 presenta los valores de Lv_{0-100} de los 13 cultivares de cebada medidos en los tratamientos T0, T4 y T8 de la triple línea de aspersión. No se encontraron corre-

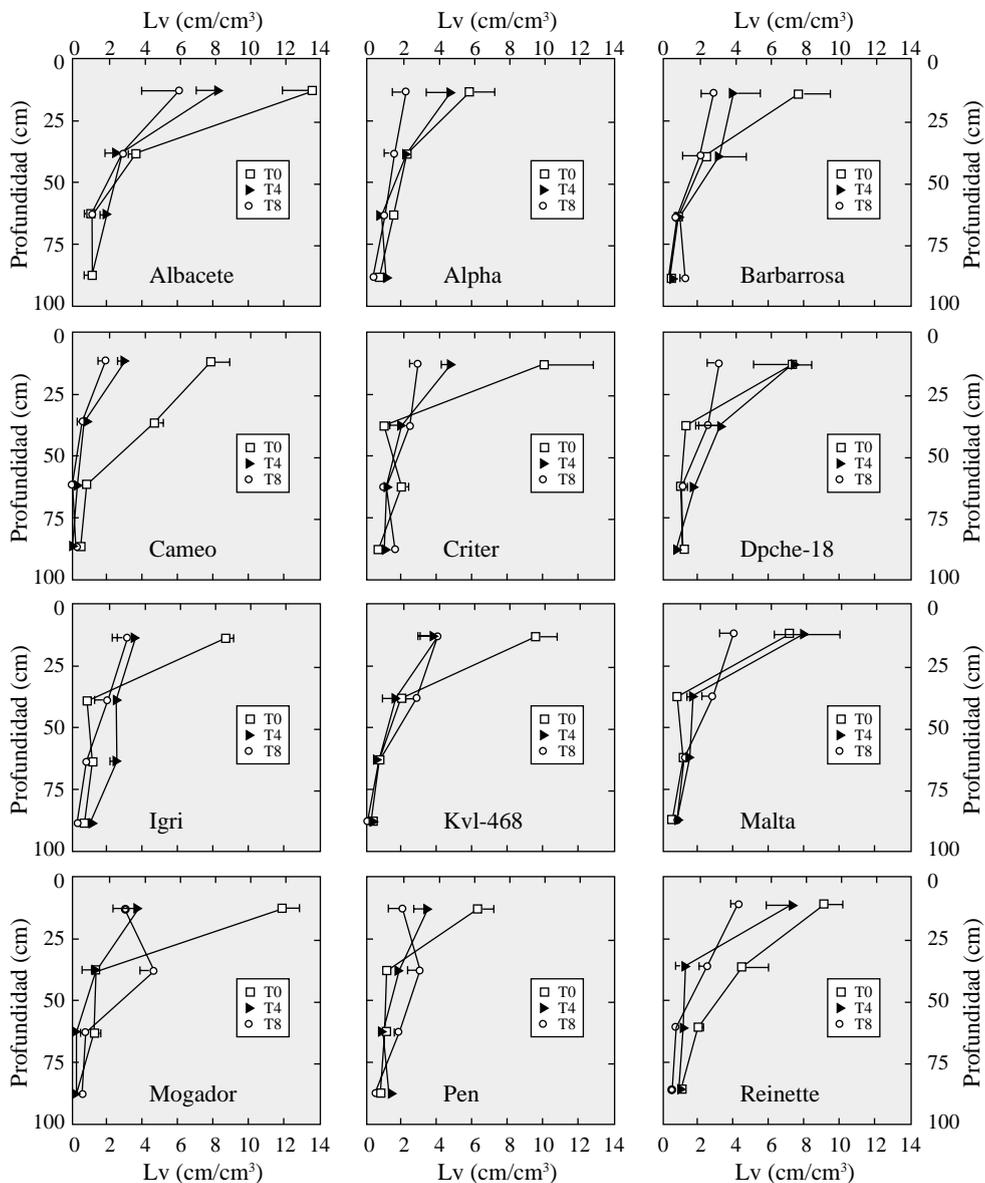


Fig. 4.—Densidad de longitud radicular de 12 cultivares de cebada medida en la fase de anthesis en tres tratamientos salinos (T0, control; T4, salinidad intermedia; T8, salinidad elevada) y cuatro profundidades de suelo (0-25, 25-50, 50-75 y 75-100 cm). Cada punto es la media de tres repeticiones y los segmentos horizontales representan una desviación estándar.

Root length density of 12 barley cultivars measured at anthesis in three saline treatments (T0, control; T4, intermediate salinity; T8, high salinity) and four soil depths (0-25, 25-50, 50-75 and 75-100 cm). Each point is the mean of three replications and the horizontal segments represent one standard deviation.

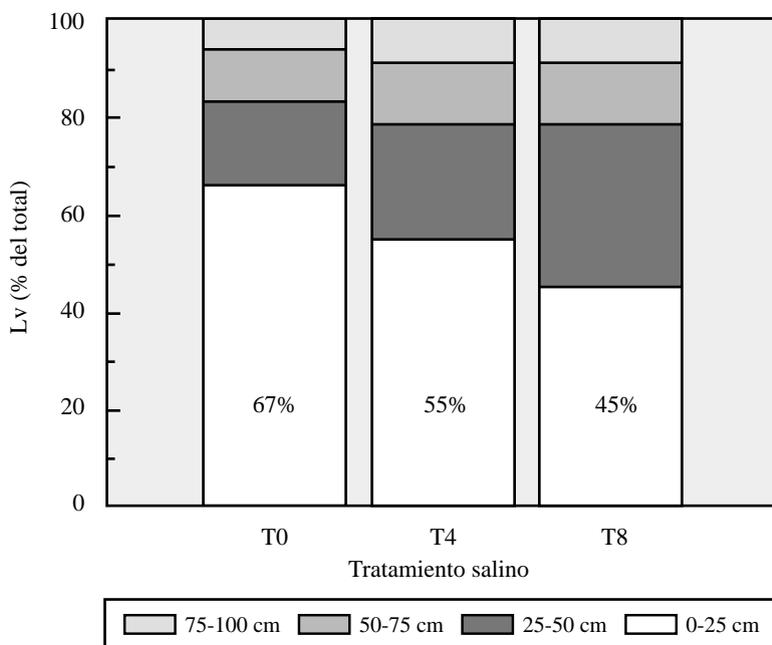


Fig. 5.—Distribución a cuatro profundidades de suelo (0-25, 25-50, 50-75 y 75-100 cm) de la densidad media de longitud radicular (Lv, % del total) de 13 cultivares de cebada medida en anthesis en los tratamientos T0 (control), T4 (salinidad intermedia) y T8 (salinidad elevada)

Distribution at four soil depths (0-25, 25-50, 50-75 y 75-100 cm) of the mean root length density (Lv, % of total) of 13 barley cultivars measured at anthesis in treatments T0 (control), T4 (intermediate salinity) and T8 (high salinity)

laciones significativas ($P > 0,05$) entre los valores de Lv_{0-100} de estos cultivares en condiciones sin salinidad (T0) y en condiciones salinas (T4 y T8), aunque existe una correlación significativa ($r = 0,61$; $P < 0,05$) entre los valores de Lv_{0-100} en T4 y T8. Estos resultados sugieren que los cultivares con mayor Lv en condiciones sin salinidad no son necesariamente los de mayor Lv en condiciones salinas. A pesar de esta falta de correlación, los cultivares Albacete y Mogador se encuentran entre los cuatro cultivares de mayor Lv_{0-100} tanto en condiciones control como en el tratamiento de salinidad más elevada (T8) mientras que el cultivar Alpha es uno de los cultivares de menor Lv en control y en condiciones salinas. El elevado valor de Lv_{0-100} del cultivar Albacete podría ser una de las causas de su buen comportamiento en condiciones de sequía, y la razón por la que ha sido uno de los cultivares de cebada más utilizados en zonas áridas de España.

TABLA 3

**DENSIDAD MEDIA DE LONGITUD RADICULAR (Lv_{0-100})
MEDIDA EN ANTESIS, RENDIMIENTO EN GRANO (RG)
Y BIOMASA AEREA (BMA) DE 13 CULTIVARES DE CEBADA EXPUESTOS
A LOS TRATAMIENTOS T0 (CONTROL), T4 (SALINIDAD INTERMEDIA)
Y T8 (SALINIDAD ELEVADA)**

Mean root length density (Lv_{0-100}) measured at anthesis, grain yield (RG) and shoot biomass (BMA) of 13 barley cultivars subjected at treatments T0 (control), T4 (intermediate salinity) and T8 (high salinity)

Cultivar	Lv_{0-100} (cm cm ⁻³)			RG (g m ⁻²)			BMA (g m ⁻²)		
	T0	T4	T8	T0	T4	T8	T0	T4	T8
Albacete	4,80	3,49	2,75	678	491	323	2009	1467	977
Alpha	2,52	2,19	1,22	796	631	218	2412	1598	640
Barbarrosa	2,80	2,18	1,74	809	481	266	1856	1093	720
Cameo	3,54	1,07	0,75	913	594	203	1816	1231	540
Criteria	3,55	2,38	2,07	727	664	369	1759	1505	838
Dpche-18	2,84	3,50	2,15	510	371	171	1968	1219	634
Igri	2,97	2,52	1,72	609	367	193	1739	903	657
Kvl468	3,27	1,79	1,99	338	344	136	1479	925	464
Kym	3,12	2,18	1,14	510	456	88	1628	1064	292
Malta	2,67	3,27	2,47	614	394	276	1734	1097	768
Mogador	3,81	1,59	2,45	729	579	243	2016	1465	628
Pen	2,39	1,95	1,90	704	455	342	1799	1112	807
Reinette	4,12	2,63	1,97	640	584	308	2050	1346	829

Relaciones entre la densidad de longitud radicular en anthesis, el rendimiento en grano y la biomasa aérea de trece cultivares de cebada expuestos a tres niveles de salinidad

La Tabla 3 presenta los valores de rendimiento en grano (RG) y biomasa aérea (BMA) de los 13 cultivares de cebada sujetos a los tratamientos T0, T4 y T8. El rendimiento en grano (RG) y la biomasa aérea (BMA) de los 13 cultivares de cebada no están significativamente correlacionados ($P > 0,05$) con Lv_{0-100} en los tratamientos T0 y T4. Por el contrario, en el tratamiento más salino (T8) existe una correlación positiva ($r = 0,62$, $P < 0,05$) entre BMA y Lv_{0-100} y entre RG y Lv_{0-100} ($r = + 0,48$, $P < 0,09$). Estos resultados, coincidentes con los obtenidos por Ashraf *et al.* (1986a) y Ashraf (1990) en diversas gramíneas forrajeras, sugieren que en suelos no salinos o moderadamente salinos, el rendimiento en grano y la biomasa aérea de estos 13 cultivares de cebada son independientes de sus densidades radicales, mientras que en suelos con salinidad elevada la reducción de los valores de Lv_{0-100} limita en cierta

medida el rendimiento en grano y, en mayor medida, la biomasa aérea. Estas correlaciones entre Lv_{0-100} y RG (y BMA) en condiciones salinas elevadas están fundamentalmente asociadas con los valores de densidad radicular profundos, ya que existe una correlación significativa ($r = 0,55$, $P = 0,05$) entre RG y Lv_{50-75} y entre RG y Lv_{75-100} ($r = 0,64$, $P < 0,05$), mientras que no existen correlaciones significativas entre RG y Lv_{0-25} o Lv_{25-50} . Asimismo, existe una correlación significativa ($r = 0,60$, $P < 0,05$) entre BMA y Lv_{50-75} y entre BMA y Lv_{75-100} ($r = 0,68$, $P < 0,05$), mientras que no existen correlaciones significativas entre BMA y Lv_{0-25} o Lv_{25-50} . Este resultado sugiere que, en suelos con perfiles salinos invertidos elevados, los cultivares con mayor desarrollo radicular en profundidad, tal como Albacete, son más productivos como consecuencia de su mayor capacidad para extraer agua de los horizontes profundos menos salinos.

La Figura 6 presenta los valores de RG, BMA y Lv_{0-100} de los 13 cultivares de cebada medidos en T8 respecto a los correspondientes valores medidos en T0. Estos valores relativos (RGr, BMAr y Lv_{0-100r}) son una expresión de tolerancia, de tal manera que valores más elevados implican mayor tolerancia a la salinidad. Los valores de

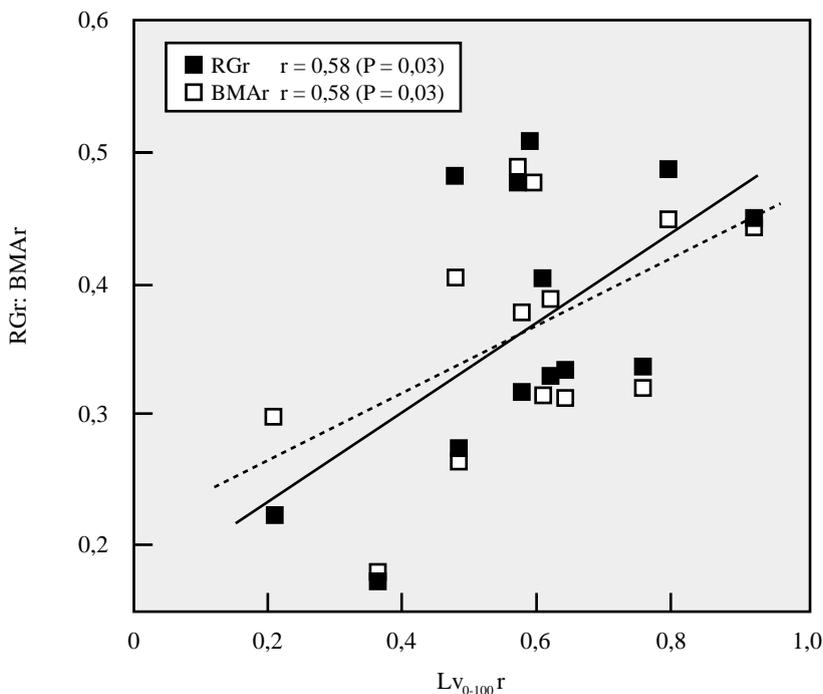


Fig. 6.—Relación entre los valores relativos de rendimiento en grano ($RGr = RG_{(T8)} / RG_{(T0)}$) y biomasa aérea ($BMAr = BMA_{(T8)} / BMA_{(T0)}$) con los valores relativos de densidad de longitud radicular en antesis ($Lv_{0-100}r = Lv_{0-100(T8)} / Lv_{0-100(T0)}$) de 13 cultivares de cebada
Relationship between the relative values of grain yield ($RGr = RG_{(T8)} / RG_{(T0)}$) and aerial biomass ($BMAr = BMA_{(T8)} / BMA_{(T0)}$) with the relative values of root length density at anthesis ($Lv_{0-100}r = Lv_{0-100(T8)} / Lv_{0-100(T0)}$) of 13 barley cultivars

RGr y BMAr varían entre 0,1 y 0,5 y los de Lv_{0-100r} entre 0,2 y 0,9, lo que sugiere que, en general, la densidad de longitud radicular es más tolerante a la salinidad que el rendimiento en grano y que la biomasa aérea. Existe una correlación positiva entre RGr y Lv_{0-100r} ($r = 0,58$; significativa a $P < 0,05$) y entre BMAr y Lv_{0-100r} ($r = 0,52$; $P = 0,06$), razón por la cual, con algunas excepciones, los cultivares más tolerantes a la salinidad por su rendimiento en grano (Criter, Pen, Reinette y Albacete, con valores de RGr próximos a 0,5) tienen valores relativamente elevados de Lv_{0-100r} (próximos o superiores a 0,6), mientras que los dos cultivares menos tolerantes a la salinidad por su rendimiento en grano (Kym y Cameo, con valores de RGr de 0,17 y 0,22, respectivamente) son asimismo los de menores valores de Lv_{0-100r} (0,37 para Kym y 0,21 para Cameo).

La Tabla 4 presenta los valores medios de rendimiento de grano (RG), biomasa aérea (BMA) y densidad media de longitud radicular (Lv_{0-100}) de los 13 cultivares de cebada expuestos a los tratamientos T0, T4 y T8. Las reducciones de RG, BMA y Lv_{0-100} en el tratamiento de salinidad intermedia (T4) relativas al tratamiento control (T0) fueron relativamente similares (25 % para RG, 34 % para BMA y 28 % para Lv_{0-100}), mientras que las reducciones en el tratamiento de salinidad elevada (T8) fueron del 63 % para RG y del 64 % para BMA frente a tan solo un 43 % para Lv_{0-100} . Estos resultados implican que si bien para salinidades moderadas se produce un efecto negativo similar para el sistema aéreo que para el radicular, a salinidades más elevadas Lv_{0-100} es más tolerante que RG y que BMA y, por consiguiente, la reducción del sistema radicular es mucho menor que la del rendimiento en grano y biomasa aérea. Por ello, la relación Lv_{0-100}/RG es próxima a $4,9 \times 10^{-3}$ en T0 y T4 y aumenta hasta casi ocho $7,7 \times 10^{-3}$ en T8. Este resultado coincide con los obtenidos en cebada, trigo y triticale por Rawson *et al.* (1988), discrepando de los obtenidos por Richards (1992) utilizando diversos cultivos.

TABLA 4

VALORES MEDIOS (\pm DESVIACION ESTANDAR) DEL RENDIMIENTO EN GRANO (RG), BIOMASA AEREA (BMA) Y DENSIDAD DE LONGITUD RADICULAR (Lv_{0-100}) DE 13 CULTIVARES DE CEBADA EXPUESTOS A LOS TRATAMIENTOS T0 (CONTROL), T4 (SALINIDAD INTERMEDIA) Y T8 (SALINIDAD ELEVADA)

Mean values (\pm standard deviation) of grain yield (RG), aerial biomass (BMA) and root length density (Lv_{0-100}) of 13 barley cultivars subjected at treatments T0 (control),

T4 (intermediate salinity) and T8 (high salinity)

Tratamiento salino	RG (g m ⁻²)	BMA (g m ⁻²)	Lv_{0-100} (cm/cm ³)
T0	660 \pm 150	1867 \pm 232	3,26 \pm 0,69
T4	493 \pm 108	1233 \pm 226	2,36 \pm 0,73
T8	241 \pm 83	676 \pm 179	1,87 \pm 0,57

CONCLUSIONES

La densidad media de longitud radicular del cultivar Kym medida en los primeros 100 cm de suelo ($L_{v_{0-100}}$) disminuyó significativamente con el incremento de la salinidad del suelo. Las diferencias de $L_{v_{0-100}}$ entre los tratamientos control (T0: CE_e media = 3,1 dS m^{-1}), de salinidad intermedia (T4: CE_e media = 6,2 dS m^{-1}), y de salinidad elevada (T8: CE_e media = 10,0 dS m^{-1}) fueron ya evidentes en la fase de ahijado y, en general, aumentaron entre si hasta la fase de antesis.

La salinidad del suelo provocó un retraso en la tasa máxima diaria de crecimiento radicular del cultivar Kym, de tal manera que dicha tasa máxima se alcanzó entre ahijado y encañado en T0, entre encañado y espigado en T4, y entre espigado y antesis en T8.

La salinidad del suelo produjo una linealización de la distribución vertical de raíces, de tal forma que la $L_{v_{0-25}}$ media de 13 cultivares de cebada en los primeros 25 cm de suelo descendió desde el 67 % de la $L_{v_{0-100}}$ en T0, hasta el 45 % de la $L_{v_{0-100}}$ en T8. Este descenso porcentual de $L_{v_{0-25}}$ con la salinidad se reflejó en un incremento respectivo de la $L_{v_{25-50}}$, que pasó del 17 % en T0 al 33 % en T8.

La $L_{v_{0-100}}$ media de 13 cultivares de cebada medida en la fase de antesis disminuyó un 28 % en T4 y un 43 % en T8 respecto a la del tratamiento control (T0). La reducción media del rendimiento en grano (RG) y de la biomasa aérea (BMA) de los mismos cultivares de cebada fue del 25 % (RG) y del 34 % (BMA) en T4, pero se redujo hasta un 63 % (RG) y un 64 % (BMA) en T8. Esto es, para salinidades moderadas (T4) se produjo un efecto negativo similar en los sistemas aéreo y radicular, mientras que para salinidades elevadas (T8) el sistema radicular ($L_{v_{0-100}}$) fue más tolerante a la salinidad que el sistema aéreo (RG y BMA). Estos resultados implican que la relación L_v/RG fue similar en los tratamientos T0 y T4, pero aumentó en cerca de un 60 % en el tratamiento T8.

El rendimiento en grano relativo (RG en T8 / RG en T0) y la densidad media de longitud radicular relativa ($L_{v_{0-100}}$ en T8 / $L_{v_{0-100}}$ en T0) de los 13 cultivares de cebada están significativamente ($P < 0,05$) correlacionados ($r = 0,58$). Esta correlación está fundamentalmente asociada con los valores de densidad radicular profundos, lo que sugiere que en suelos con perfiles salinos invertidos, en los que la salinidad disminuye con la profundidad del suelo, los cultivares con mayor desarrollo radicular profundo son más productivos debido a su mayor capacidad de extracción de agua de los horizontes profundos menos salinos.

La existencia de variabilidad genotípica en el desarrollo radicular de 13 cultivares de cebada expuestos a condiciones salinas, junto con la correlación significativa observada entre RG y $L_{v_{0-100}}$ en condiciones de salinidad elevada, abre perspectivas interesantes para el cribado de cultivares de cebada por su tolerancia a la salinidad. La generalización de estos resultados permitiría establecer programas de mejora por tolerancia a la salinidad edáfica en los que un objetivo de mejora sería el incremento de la masa radicular del material mejorado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONAI (DGA-Aragón) la concesión de una beca pre-doctoral a R. Isla.

SUMMARY

Root and aerial development of barley (*Hordeum vulgare L.*) in saline conditions

The objective of this work is to quantify the effect of soil salinity on root development of barley and to compare it with the effect on grain yield and on aerial biomass. 13 barley cultivars were sown in a salinity gradient imposed by a triple-line source sprinkler system. Grain yield (RG) and aerial biomass were measured in nine salinity treatments, and root length density (Lv) at anthesis was measured in three salinity treatments (control-T0, intermediate salinity-T4 and high salinity-T8). Lv was also measured at five developmental stages in treatments T0, T4 and T8 in cv. Kym.

Salinity delays the maximum daily rate of root growth, so that it is reached between tillering and stem elongation in T0, stem elongation and heading in T4 and heading and anthesis in T8. Increasing soil salinity linearizes the vertical distribution of the roots so that, relative to the mean total Lv of the 13 cultivars, the mean Lv_{0-25} in the first 25 cm of soil decreases from 67 % in T0 to 45 % in T8, whereas Lv_{25-50} increases from 17 % in T0 to 33 % in T8. At moderate salinity values (T4) similar negative effects are found for the aerial and root systems, whereas at high salinity values (T8) the root system is more tolerant than the aerial system, so that the ratio Lv/RG in treatment T8 is 60 % higher than in treatments T0 and T4. The existence of a genotypic variability in root development, together with the significant ($P < 0.05$) correlation found between RG and Lv under high salinity conditions offers interesting perspectives in breeding barley cultivars for increasing salinity tolerance through an increase in root length density.

KEY WORDS: Barley
 Root length density
 Roots
 Salinity
 Salinity tolerance
 Triple line sprinkler system

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABRISQUETA J.M., HERNANDEZ A., ALARCON J.J., LOZANO L.A., 1991. Dinámica del sistema radicular de dos genotipos de tomate en invernadero en riego por goteo sometidos a estrés salino. Suelo y Planta. 1: 351-361.
- AB-SHUKOR N.A., KAYQ.O.N., STEVENS D.P., SKIBINSKI D.O.F., 1988. Salt tolerance in natural populations of *Trifolium repens L.* New Phytologist 109(4): 483-490.
- AL-KHAFAF S., AL-JANABI K., HUSSAIN I.A., MANKY F.S., SALIEM L.H., 1988. Maize root development under various levels of salinity and water distribution. Agricultural Water Management 15(4): 377-385.
- ARAGÜES R., ROYO A., GRATAN S.R., 1994. Foliar uptake of sodium and chloride in barley sprinkler-irrigated with saline water: effect of pre-irrigation with fresh water. Eur. J. Agron. 3(1): 9-16.
- ASHRAF M., 1990. Selection for salt tolerance and its genetic basis in perennial ryegrass (*Lolium perenne L.*). Hereditas-Landskrona. 113 (1): 81-85.
- ASHRAF M., MCNEILLY T., BRADSHAW A.D., 1986a. The potential for evolution of salt (NaCl) tolerance in seven grass species. New Phytologist 103(2): 299-309.
- ASHRAF M., MCNEILLY T., BRADSHAW A.D., 1986b. The response of selected salt-tolerant and normal lines of four grass species to NaCl in sand culture. New Phytologist 104(3): 453-461.
- BOEM F. H. G., SCHEINER J.D., LAVADO L.S., 1994. Some effects of soil salinity on growth, development and yield of rapeseed (*Brassica napus L.*). Journal of Agronomy and Crop Science 172(3): 182-187.
- BOWER C.A., TAMIMI Y.N., 1979. Root adjustments associated with salt tolerance in small grains. Agron. J. 71: 690-693.
- DALTON F.N., MAGGIO A., PICCINNI G., 1997. Effect of root temperature on plant response functions for comparison of static and dynamic salinity stress indices. Plant and Soil 0: 1-13 (in press).
- DATA S. K., PRADHAN S.S., 1981. A mass-screening method for salt tolerance of rice varieties at seedling stage. International Rice Research Newsletter 6(3): 9-10.
- EPSTEIN E., NORLYN J.D., 1980. Seawater-based crop production: A feasibility study. Science 197: 249-251.
- FRASCHINA A., CHIESA A., 1993. Tolerancia a salinidad de cultivares de tomate durante la germinación. Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg. Vol. 8(3): 341-349.

- GORHAM J., 1992. Stress tolerance and mechanisms behind tolerance in barley. *Barley genetics* : 1035-1049.
- HOLLOWAY R.E., ALSTON A.M., 1992. The Effects of Salt and Boron on Growth of Wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 43: 987-1001.
- LEIDI E.O., GUTIERREZ J.C., 1993. Nota sobre variabilidad en el crecimiento de raíces de algodón en estado de plántula: efecto de genotipo y estrés osmótico. *Invest. Agr.:Prod. Prot. veg.* Vol. 8 (2), 165-169.
- MAAS E.V., HOFFMAN G.J., 1977. Crop Salt Tolerance—Current Assessment. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE*, 103: 115-134.
- MINHAS P.S., GUPTA R.K., 1993. Conjunctive use of saline and non-saline waters. I. Response of wheat to initial salinity profiles and salinisation patterns. *Agric. Water Manage.* 23: 125-137.
- MOZAFAR A., OERTLI J.J., 1992. Root-zone temperature and salinity: interacting effects on tillering, growth and element concentration in barley. *Plant and Soil* 139(1): 31-38.
- NEWMAN E.I., 1965. A method for estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* 2: 139-145.
- PEREZ-ALFOCEA F., ESTAÑ M.T., CARO M., BOLARIN M.C., 1993. Response of tomato cultivars to salinity. *Plant and Soil* 150: 203-211.
- RAWSON H.M., RICHARDS R.A., MUNNS R., 1988. An examination of selection criteria for salt tolerance in wheat, barley and triticale genotypes. *Aus. J. Agric. Res.* 39: 759-772.
- RICHARDS R.A., 1992. Increasing salinity tolerance of grains crops: Is it worthwhile ?. *Plant and Soil* 146: 89-98.
- ROYO A., FACI J., ARAGÜES R., 1987. Utilización de la triple línea de aspersión para evaluar la respuesta de los cultivos a la salinidad. *Riegos y Drenajes XXI*, 17: 48-54.
- SHARMA S.K., KUMAR S., 1992. Effect of salinity on Na⁺, K⁺, and Cl⁻ content in different organs of chickpea and basis of ion expression. *Biologia Plantarum* 34 (3-4), 311-317.
- TENNANT D., 1975. A test of a modified line integral method of estimating root length. *J. Appl. Ecol.* 63: 995-1001.
- VAN-GENUCHTEN M.Th., 1983. Analyzing crop salt tolerance data: model description and user's manual. Washington: USDA-ARS-USSL Research report N°120.
- YANG Y.W., NEWTON R.J., MILLER F.R., 1990. Salinity Tolerance in *Shorgum*.I. Whole Plant Response to Sodium Chloride in *S. bicolor* and *S.halepense*. *Crop Sci.* 30: 775-781.