

RESPUESTA DEL GIRASOL (*HELIANTHUS ANNUUS L.*) A LA SALINIDAD DEL SUELO

R. ARAGÜES

Unidad de Suelos y Riegos.

Servicio de Investigación Agroalimentaria (Diputación General de Aragón)
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente DGA-CSIC. Apdo. 727. 50080 Zaragoza

A. BERCERO

Centro de Técnicas Agrarias (Diputación General de Aragón).

Apdo. 727, 50080 Zaragoza

RESUMEN

El girasol es un cultivo de primavera que por razones comerciales (competitividad creciente frente al aceite de oliva), políticas (subvenciones de la Unión Europea) y edafoclimáticas (suelos de regadío afectados por sales) tiene un potencial de expansión considerable en la cuenca media del Ebro.

El objetivo de este trabajo es establecer la tolerancia del girasol a la salinidad del suelo, que en la actualidad está insuficientemente documentada y cuya clasificación cualitativa es de moderadamente sensible a moderadamente tolerante.

El híbrido *Albasol* se sembró en condiciones no salinas en 24 parcelas elementales de 4 x 4 m, regadas con aguas de diferente CE (entre 2 y 15 dS m⁻¹). La salinidad del suelo se midió periódicamente con un sensor electromagnético y una sonda de cuatro electrodos cuyas lecturas se transformaron a CE_e (extracto saturado) por medio de las correspondientes ecuaciones de calibración.

De los atributos medidos, el número de plantas por unidad de superficie y el diámetro de los capítulos fueron los más tolerantes a la salinidad, seguidos de la altura de las plantas y, finalmente, de la producción de pipas. En base a los parámetros de la tolerancia a la salinidad CE_{eu} (CE umbral del extracto saturado a partir de la cual desciende el rendimiento) y CE_{es0} (CE del extracto saturado para la que la producción máxima desciende un 50 p.100) se concluye que las clasificaciones cualitativas previas citadas en la literatura infraestiman el nivel de tolerancia del girasol a la salinidad. Así, la CE_{eu} (7,1 dS m⁻¹) y la CE_{es0} (13,8 dS m⁻¹) superan a los valores del maíz, cártamo, soja, trigo y sorgo, lo que permite concluir que el girasol es un cultivo potencialmente competitivo para las condiciones de salinidad presentes en algunos regadíos de la cuenca media del Ebro.

PALABRAS CLAVE: Girasol
Salinidad
Tolerancia
Sensor electromagnético
Sonda de cuatro electrodos

Recibido: 12-6-96

Aceptado para su publicación: 28-10-96

Redactor asociado: Juan R. Castel

INTRODUCCION

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es una planta oleaginosa bien adaptada a muchas zonas climáticas españolas cuya superficie se ha incrementado substancialmente en los últimos años en la cuenca media del Ebro debido fundamentalmente a subvenciones estipuladas por la Política Agraria Comunitaria (PAC). Así, la superficie de girasol en Aragón fue de alrededor de 35.000 ha en los primeros años noventa, aumentó hasta 127.000 ha en 1993 y se ha estabilizado posteriormente en torno a las 55.000 ha (DGA, 1995).

La tolerancia a la salinidad del girasol no está suficientemente cuantificada y su clasificación cualitativa es de moderadamente sensible (FAO, 1985, 1992) a moderadamente tolerante (Francois, Mass, 1994). Esta clasificación es muy ambigua, pues según ella el umbral de tolerancia (esto es, la conductividad eléctrica umbral CE_{eu} o CE del extracto saturado del suelo a partir de la cual desciende el rendimiento de los cultivos) estaría en el intervalo entre 1,3 y 6,0 $dS\ m^{-1}$ y la CE_{e50} (CE del extracto saturado del suelo para la que el rendimiento del cultivo se reduce en un 50 p.100 respecto al rendimiento máximo obtenido sin salinidad) estaría en el intervalo entre 4,5 y 15,0 $dS\ m^{-1}$. De acuerdo con esta información, el nivel de tolerancia del girasol sería inferior o, como mucho, similar al del cártamo, soja, sorgo y trigo, que se clasifican como cultivos moderadamente tolerantes a la salinidad. Recientemente, Francois (1996) ha concluido que los valores de CE_{eu} y CE_{e50} del girasol son 4,8 y 14,8 $dS\ m^{-1}$, respectivamente, aunque cabe señalar que el valor umbral es cuestionable por no existir observaciones menores a dicho valor, y que los parámetros se han estimado a partir del conjunto de datos obtenidos en dos años diferentes cuyas estimas individuales son diferentes.

Dependiendo de su tolerancia a la salinidad del suelo, el girasol podría ser un cultivo de primavera más rentable que el maíz (sensible a la salinidad) y el sorgo (moderadamente tolerante a la salinidad) para los suelos de la cuenca media del Ebro afectados por salinidad, que suponen en torno al 20 p.100 de los regadíos implantados en las últimas décadas (Herrero, Aragüés, 1988). Además, los incrementos recientes en el precio del aceite de oliva están aumentando el consumo de aceite de girasol, lo que refuerza su interés como posible cultivo competitivo para las condiciones edafo-climáticas de la cuenca media del Ebro.

El objetivo de este trabajo es cuantificar la respuesta de un híbrido comercial de girasol (*Albasol*) a la salinidad del suelo desde el punto de vista de su producción de semilla (pipas), número de plantas, altura de las plantas, peso específico y diámetro de los capítulos.

MATERIAL Y METODOS

El ensayo se efectuó en una parcela de la finca del Servicio de Investigación Agroalimentaria (Montañana, Zaragoza) localizada en una terraza del río Gállego. El suelo (mezclado, méxico, Typic Torrifluent) descansa en un lecho de gravas no consolidadas situado a más de 100 cm de profundidad, es de textura

franco-arenosa y aparentemente homogéneo. Así, el porcentaje de saturación del mismo es del 32 p.100 (valor gravimétrico) y similar tanto lateralmente ($CV < 8$ p.100) como en profundidad (primer metro de suelo) ($CV < 4$ p.100).

La parcela experimental se dividió en 24 parcelas elementales de 16 m² (4 x 4 m) limitadas por caballones y separadas entre sí por pasillos de 1 m de anchura. Las parcelas elementales se regaron en marzo de 1995 con 300 mm de agua «dulce» (procedente del río Gállego, y con una $CE = 2$ dS m⁻¹ y $RAS = 5,2$) con el fin de uniformizar la salinidad inicial del suelo (las lecturas efectuadas con el sensor electromagnético en distintos puntos después de este riego fueron inferiores a 0,4 dS m⁻¹). A primeros de mayo se aplicaron 700 kg/ha de abono mineral (15-15-15) y a finales de junio se aplicaron 300 kg/ha de nitrato amónico. El 22 de mayo se sembró con una sembradora neumática el girasol *Albasol* en cada parcela elemental a razón de cuatro líneas de 4 m de longitud, con un marco de siembra de 0,75 x 0,16 m y con una densidad de siembra de en torno a 83.000 plantas/ha. Se aplicó *Curaterr* contra el gusano de alambre y el herbicida de pre-emergencia *Lazzo*. La nascencia se produjo en torno al 2 de junio.

Después de la nascencia del girasol se aplicaron por gravedad semanalmente riegos salinos diferenciales de unos 50 mm a cada parcela elemental. Se utilizaron ocho aguas con salinidades (CE) de 2, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 dS m⁻¹, correspondientes a ocho tratamientos y tres repeticiones completamente aleatorizados. El agua más salina ($CE = 15$ dS m⁻¹) se preparó en un depósito añadiendo 25 kg de NaCl y 25 kg de CaCl₂ • 2H₂O a 5.000 l de agua dulce ($CE = 2$ dS m⁻¹ y $RAS = 5,2$). Una vez regadas las tres parcelas elementales de dicho tratamiento, se añadía agua dulce al agua salina sobrante en el depósito hasta conseguir una CE de 13 dS m⁻¹ medida con un conductímetro portátil. De esta manera se prepararon y aplicaron el resto de soluciones hasta alcanzar la del tratamiento control ($CE = 2$ dS m⁻¹). El número total de riegos fue de 13, efectuándose el primero el 14 de junio [23 días después de la siembra (DDS); esto es, después de la fase de emergencia del cultivo] y el último el 12 de septiembre (113 DDS). La dosis total de agua aplicada a las parcelas fue de 650 mm, siendo nula la lluvia caída durante el ensayo.

Medidas de la salinidad del suelo efectuadas en cada parcela elemental

(a) Salinidad media del primer metro de suelo a través de las lecturas (CE_{sem-h}) efectuadas con un sensor electromagnético (Aragüés, Millán, 1986) apoyado en el suelo en posición horizontal. Las lecturas se efectuaron al día siguiente de los riegos en las fechas 35, 45, 51, 58, 66, 101 y 114 DDS. (b) Salinidad a 20 cm de profundidad mediante lecturas (CE_{20}) efectuadas con una sonda portátil de cuatro electrodos en las fechas 51, 58, 66, 101 y 114 DDS. (c) CE del extracto 1:5 ($CE_{1:5}$) medida en muestras de suelo tomadas el 20 de julio (59 DDS) a las profundidades de 0-25 y 25-50 cm. (d) $CE_{1:5}$ medida en muestras de suelo tomadas el 6 de septiembre (107 DDS) a las profundidades de 0-25, 25-50, 50-75 y 75-100 cm. Además en esa misma fecha se tomó una muestra de suelo por tratamiento y profundidad (8 tratamientos x 4 profundidades = 32 muestras) para la medida de

la CE del extracto saturado del suelo (CE_e). Todos los valores de CE se corrigieron a la temperatura de referencia de 25°C.

Medidas de planta efectuadas en cada parcela elemental

(a) Número de plantas contadas en las dos líneas centrales el 19 de junio (28 DDS) y el 19 de septiembre (120 DDS). (b) Altura de tres plantas medida el 6 (45 DDS), 12 (51 DDS), 19 (58 DDS) y 27 (66 DDS) de julio. (c) Diámetro de los capítulos medido en las tres plantas anteriores el 5 de septiembre (106 DDS). (d) Recolección de plantas el 28 de septiembre (129 DDS) y cribado de los capítulos; medida del peso, humedad y peso específico de las pipas recolectadas en cada parcela (equivalente a plantas cosechadas en 12 m² de superficie). El conjunto de las parcelas elementales se cubrió con una red anti-pájaros el 28 de julio.

Análisis de los datos

Tal como se discutirá posteriormente, los valores de salinidad medidos en las tres repeticiones de cada tratamiento salino no fueron siempre coincidentes, lo que cuestionaba la validez de establecer las funciones de respuesta a la salinidad en base a los valores medios de dichas repeticiones. Por ello, se prefirió establecer dichas funciones considerando 24 tratamientos salinos en lugar de ocho tratamientos con tres repeticiones. Este enfoque es además más apropiado para el análisis de regresión que se detalla a continuación, ya que los resultados son más robustos al considerar 24 observaciones (tratamientos) independientes en lugar de ocho observaciones (tratamientos) medias con tres repeticiones por tratamiento.

Las funciones de respuesta del girasol se establecieron a través de las regresiones lineales « $Y = a + b X$ » de los 24 pares de observaciones Y-X, donde Y es la producción y el peso específico de las pipas, la altura de las plantas, el n.º de plantas cosechadas y el diámetro de los capítulos, y X es la salinidad del suelo (CE_{sem} y CE_{s4e} , valores medios ponderados por el tiempo). La utilización de un modelo de regresión lineal es aceptable en nuestro caso ya que no existieron observaciones por debajo de la salinidad umbral (Royo *et al.*, 1991). Esta salinidad umbral (CE_u) se aproximó considerando como tal la salinidad para la que se obtuvieron el o los valores máximos (Y_m) de las variables de planta anteriormente indicadas. Por definición, la CE_{50} se determinó a partir de dichas regresiones lineales tomando $Y = Y_m/2$ (esto es, $CE_{50} = ((Y_m/2) - a)/b$).

La falta de homogeneidad entre las repeticiones de los distintos tratamientos fue debida en parte a la compactación superficial del suelo en un área concreta de la parcela experimental. Dicha compactación se apreció claramente en 9 de las 24 parcelas elementales, en las que, al contrario que en las 15 parcelas restantes, la inserción de la sonda de cuatro electrodos exigió la realización previa de un agujero con barrena. Por ello, el análisis anterior con 24 observaciones se completó en el caso de la altura de las plantas y de la producción de pipas, que es el atributo de planta más importante, con un análisis similar separado para las 15

parcelas de suelo normal y las nueve parcelas de suelo compactado. Este análisis independiente permitió verificar la estabilidad de los resultados obtenidos con el conjunto de las 24 parcelas, así como determinar el efecto de la compactación del suelo sobre la respuesta del girasol a la salinidad.

RESULTADOS Y DISCUSION

Variabilidad espacio-temporal de la salinidad del suelo

El análisis de la variabilidad espacial horizontal de la salinidad del suelo impuesta en cada tratamiento se ha efectuado calculando el coeficiente de variación (CV) de la media de la $CE_{1.5}$ medida en las tres repeticiones de cada tratamiento a las profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm (20 de julio: 59 DDS) y de 0-25, 25-50, 50-75 y 75-100 cm (6 de septiembre: 107 DDS).

Los resultados obtenidos (Fig. 1) indican que los CV fueron de moderados (CV = 4-25 p.100 según profundidades y fechas de muestreo) a altos (CV = 40 p.100 o superiores, especialmente en los horizontes más profundos muestreados el 6 de septiembre). Los valores más elevados del CV están relacionados en parte con la existencia de algunas parcelas elementales con problemas de compactación del suelo originados por tráfico de maquinaria. Esta variabilidad espacial es la responsable de que el diseño estadístico planteado inicialmente (ocho tratamientos y tres repeticiones) no sea estrictamente aplicable, ya que las repeticiones no pueden tratarse como tales.

La variabilidad vertical de la salinidad del suelo en cada tratamiento salino se ha establecido a partir de los valores de $CE_{1.5}$ medidos el 6 de septiembre a cuatro profundidades de suelo. La Figura 2 muestra los perfiles medios de salinidad establecidos para las tres «repeticiones» de cada tratamiento salino o CE_{ar} del agua de riego (indicados por los números próximos a cada perfil de $CE_{1.5}$). Esta Figura muestra que, salvo para los tratamientos más salinos (CE_{ar} de 11, 13 y 15 dS m^{-1}), la salinidad aumenta hasta los 40-50 cm de profundidad y disminuye a partir de dicha profundidad para alcanzar en todos los tratamientos valores de $CE_{1.5}$ bastante parecidos a la máxima profundidad muestreada (75-100 cm). El pico máximo de salinidad situado en torno a 50 cm puede asociarse con la presencia de un horizonte menos permeable a dicha profundidad, y/o con la profundidad máxima efectiva de la zona de raíces (FAO, 1992), por lo que parece razonable establecer las funciones de respuesta del girasol en base a la salinidad media de los primeros 50 cm de suelo.

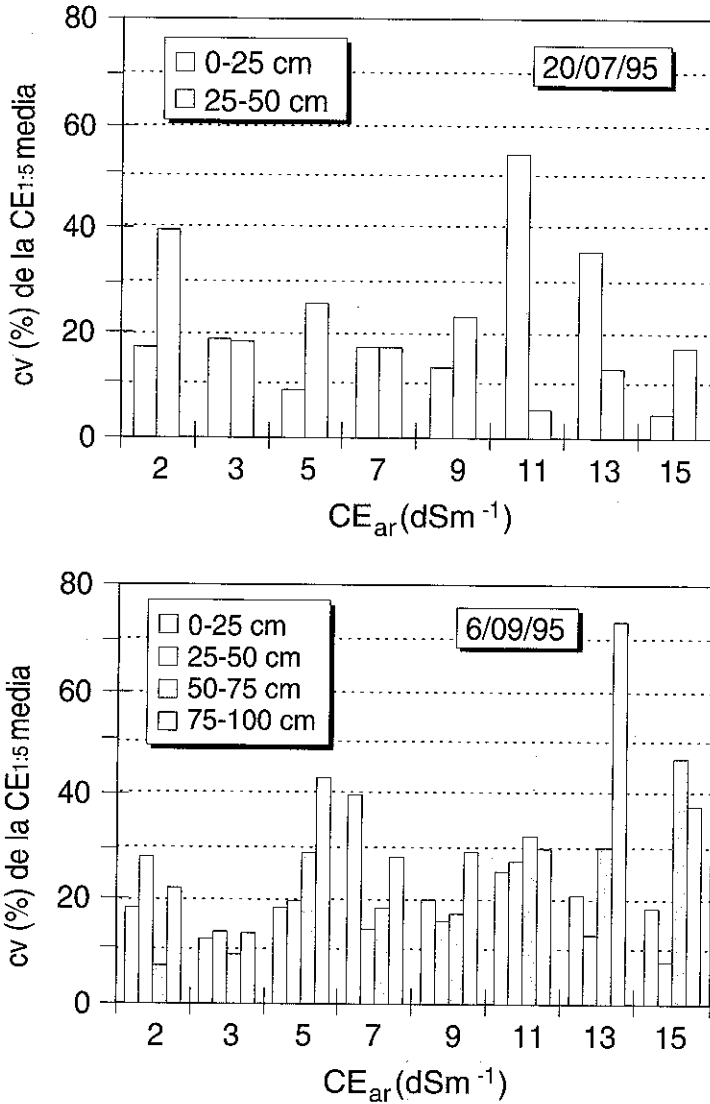


Fig. 1.- Variabilidad horizontal de la salinidad del suelo: coeficiente de variación (CV, %) de la $CE_{1:5}$ media de las tres repeticiones de cada tratamiento salino (CE_{ar}) medida a las profundidades de suelo de 0-25 y 25-50 cm (fecha de muestreo: 20/07/1995) y 0-25, 25-50, 50-75 y 75-100 cm (fecha de muestreo: 6/09/1995).

Horizontal variability of soil salinity: coefficient of variation (CV, %) of the average $CE_{1:5}$ of the three replications of each saline treatment (CE_{ar}) measured at soil depths of 0-25 and 25-50 cm (sampling date: 20/07/1995) and 0-25, 25-50, 50-75 and 75-100 cm (sampling date: 6/09/1995).

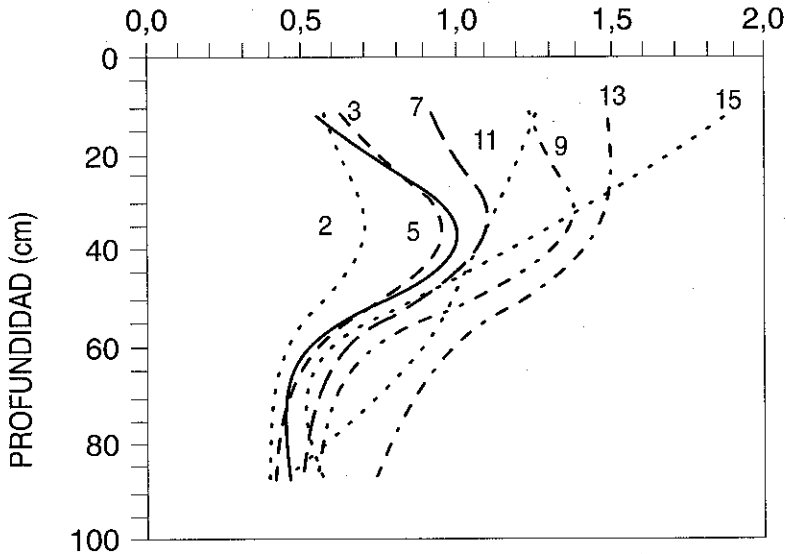


Fig. 2.- Variabilidad vertical de la salinidad del suelo: perfiles de la $CE_{1,5}$ media de las tres repeticiones de cada tratamiento salino (CE_{ar} : números próximos a cada curva) medida el 6 de septiembre de 1995 a las profundidades de suelo de 0-25, 25-50, 50-75 y 75-100 cm.

Vertical variability of soil salinity: profiles of the average $CE_{1,5}$ of the three replications of each saline treatment (CE_{ar} : numbers close to each curve) measured on september 6, 1995 at soil depths of 0-25, 25-50, 50-75 and 75-100 cm.

La evolución temporal de la salinidad del suelo se ha establecido mediante las lecturas de CE_{sem-h} efectuadas en cada parcela elemental en siete fechas (Fig. 3). Los valores de CE_{sem-h} medidos en la primera fecha (35 DDS) fueron bastante parecidos en los distintos tratamientos salinos (lo que es lógico ya que el primer riego salino se efectuó sólo doce días antes) y más elevados de lo que cabría anticipar puesto que en marzo se aplicaron 300 mm de agua dulce. A partir de esa fecha los valores de CE_{sem-h} aumentan (especialmente en los tratamientos más salinos) hasta 50-60 DDS, se estabilizan o incluso disminuyen ligeramente hasta 101 DDS, y vuelven a aumentar en la última fecha de muestreo (114 DDS).

Para cada tratamiento salino, los CV de las medias de CE_{sem-h} de las siete fechas de muestreo oscilaron entre el 12 p.100 (tratamiento de $CE_{ar} = 7 \text{ dS m}^{-1}$) y el 19 p.100 (tratamientos de $CE_{ar} = 2$ y 3 dS m^{-1}), con un valor medio del 16 p.100 para el conjunto de los tratamientos. Por lo tanto, la estabilidad de la salinidad del suelo en cada tratamiento salino fue relativamente elevada, tal como es deseable en los estudios de tolerancia de los cultivos a la salinidad. A pesar de ello, al objeto de tener en cuenta las pequeñas variaciones de salinidad detectadas a lo largo del experimento, los valores de salinidad del suelo medidos con el sensor electromagnético y con la sonda de cuatro electrodos se han calculado como medias ponderadas por el tiempo.

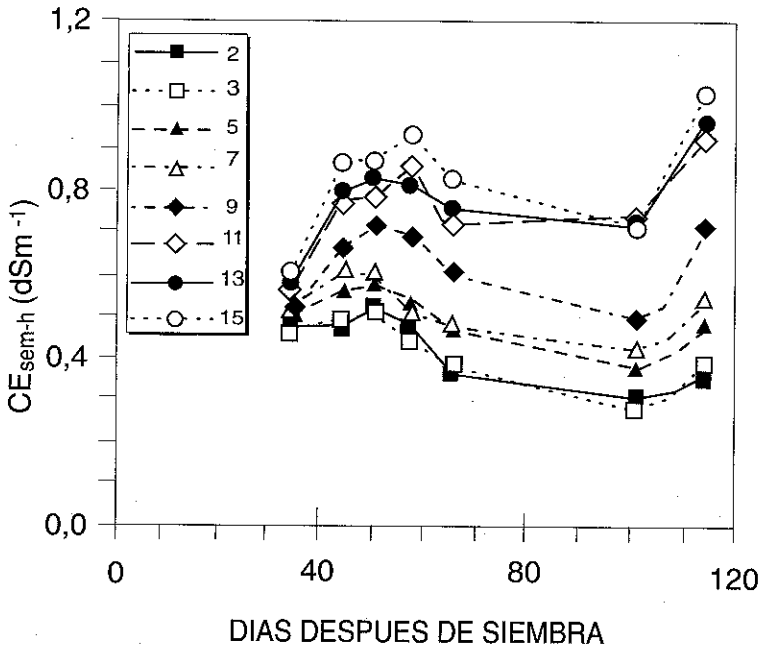


Fig. 3.- Variabilidad temporal de la salinidad del suelo: lecturas medias de CE_{sem-h} (sensor electromagnético) efectuadas en las tres repeticiones de cada tratamiento salino (CE_{ar} : números en la leyenda) en siete fechas (días después de siembra) de muestreo.

Temporal variability of soil salinity: average readings of CE_{sem-h} (electromagnetic sensor) performed in the three replications of each saline treatment (CE_{ar} : number in legend) in seven sampling dates (days after sowing).

Salinidad del agua de riego y del suelo

Los valores medios ponderados por el tiempo de la salinidad del suelo (CE_{sem-h} y CE_{s4e} , $dS\ m^{-1}$) medida en cada parcela elemental están bien correlacionados con la salinidad CE_{ar} ($dS\ m^{-1}$) del agua aplicada tal como indican los respectivos coeficientes de correlación (significativos a $p < 0,001$) de la Figura 4a. Puede asimismo observarse el hecho ya señalado de que las salinidades medidas en algunas repeticiones no son similares (por ejemplo, los valores de CE_{sem-h} de las tres repeticiones del tratamiento $CE_{ar} = 13\ dS\ m^{-1}$), lo que sustenta la necesidad ya apuntada de efectuar el análisis en base a 24 observaciones (parcelas elementales) independientes. A pesar de que estos resultados sugieren que sería posible establecer la respuesta del girasol a la salinidad del agua de riego, se ha preferido establecer las funciones de respuesta a la salinidad del suelo (CE_{sem-h} y CE_{s4e}), ya que las fracciones de lavado (y por lo tanto las relaciones $CE_{ar}-CE_{sem-h}-CE_{s4e}$) no han sido necesariamente las mismas en los distintos tratamientos salinos.

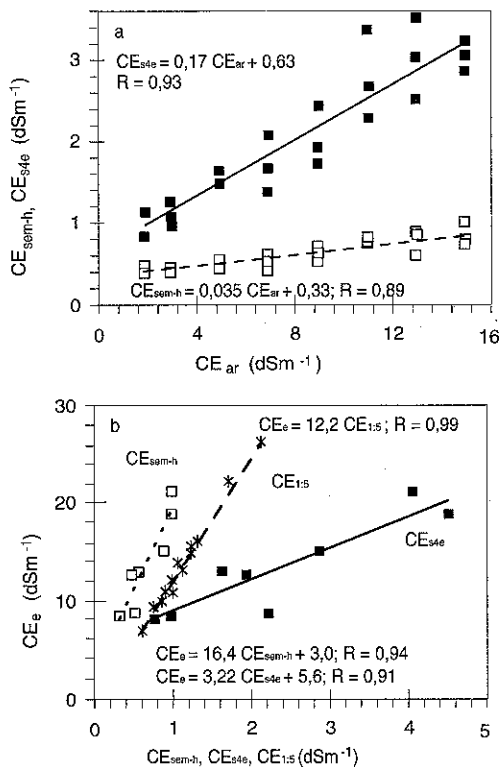


Fig. 4.- Regresiones lineales establecidas entre (a) la salinidad del suelo (CE_{sem-h} y CE_{s4e} , valores medios ponderados por el tiempo medidos en cada parcela elemental) y la salinidad del agua de riego (CE_{ar}) y (b) la salinidad del suelo expresada como CE_e (media de 0-50 cm medida 107 BDS) y como CE_{sem-h} (media de las lecturas del sensor electromagnético efectuadas 101 y 114 DDS), CE_{s4e} (media de las lecturas de la sonda de cuatro electrodos efectuadas 101 y 114 DDS) y $CE_{1:5}$ (media de 0-50 cm medida 107 DDS).

Linear regressions established between (a) soil salinity (CE_{sem-h} and CE_{s4e} , time-weighted values measured in each elemental plot) and irrigation water salinity (CE_{ar}), and (b) soil salinity given as CE_e (average 0-50 cm measured 107 days after sowing) and as CE_{sem-h} (average electromagnetic sensor readings made 101 and 114 days after sowing), CE_{s4e} (average four electrode readings made 101 and 114 days after sowing) and $CE_{1:5}$ (average 0-50 cm measured 107 days after sowing).

Las funciones de respuesta obtenidas con las variables CE_{sem-h} y CE_{s4e} se han transformado a funciones de respuesta obtenidas con la variable CE_e (0-50 cm de profundidad del suelo), que es el parámetro de referencia para expresar la salinidad de la solución del suelo. Dicha transformación se ha efectuado utilizando las ecuaciones de regresión lineal que se presentan en la Figura 4b, cuyos coeficientes de correlación son significativos a $p < 0,01$. En esta Figura se presenta asimismo la regresión lineal $CE_{1:5}$ - CE_e (significativa a $p < 0,001$) que permite estimar la CE_e a partir de los valores de $CE_{1:5}$.

Cabe señalar que, a pesar de que el volumen y la profundidad de suelo explorados por ambos instrumentos es muy diferente, las lecturas del sensor electromagnético y de la sonda de cuatro electrodos (medias temporales de cada una de las 24 parcelas elementales) están significativamente ($p < 0,001$) correlacionadas ($CE_{s4e} = -0,65 + 4,41 CE_{sem-h}$; $r = 0,93$; $n = 24$).

Funciones de respuesta del girasol a la salinidad del suelo

Tal como se ha discutido anteriormente, se han establecido las funciones de respuesta a la salinidad del (a) peso específico de las pipas, (b) diámetro de los capítulos, (c) n.º de plantas cosechadas, (d) altura de las plantas y (e) producción de pipas, a través de las respectivas regresiones lineales obtenidas entre estas variables dependientes y las variables independientes de salinidad (CE_{sem-h} y CE_{s4e} , medias ponderadas por el tiempo). La obtención para cada uno de estos atributos de planta de dos funciones de respuesta en base a estas dos medidas diferentes de la salinidad del suelo permite (a) determinar qué medida de salinidad se ajusta mejor a las variables independientes y, por lo tanto, es más adecuada para establecer las funciones de respuesta y (b) comparar los resultados obtenidos (una vez transformados a los respectivos valores de CE_e por medio de las ecuaciones mostradas en la Fig. 4b) y verificar la estabilidad de los parámetros de tolerancia estimados (CE_{eu} y CE_{e50}), lo que proporciona una mayor fiabilidad a estos resultados.

La respuesta de la producción de pipas a la salinidad del suelo se ha establecido tanto por las técnicas de regresión lineal ya señaladas como por técnicas de regresión no lineal según el modelo propuesto por van Genuchten (1983) definido por la ecuación:

$$Y = \frac{Y_m}{1 + (CE / CE_{50})^p}$$

donde Y es la producción para una determinada CE , Y_m es la producción máxima en condiciones no salinas, CE es la conductividad eléctrica del suelo (en este caso, CE_{sem-h} o CE_{s4e}), CE_{50} es la CE que produce un 50 p.100 de disminución del valor de Y_m y p es una constante empírica. Fijando Y_m se estiman a partir de esta ecuación los parámetros CE_{50} y p , que son los que determinan el nivel de tolerancia de la producción de pipas a la salinidad del suelo.

Peso específico

Este carácter se ha mostrado insensible a la salinidad, tal como indican las regresiones lineales no significativas ($p < 0,05$) establecidas entre el mismo y CE_{sem-h} y CE_{s4e} . Las ordenadas en el origen de estas regresiones han oscilado entre $43,9 \text{ g cm}^{-3}$ (obtenida con CE_{sem-h}) y $44,8 \text{ g cm}^{-3}$ (obtenida con CE_{s4e}), que son valores normales para esta variedad de girasol. Es interesante resaltar que

Royo, Aragüés (1995) concluyeron asimismo que el peso específico de la cebada era independiente de la salinidad. Este resultado es importante ya que, independientemente de la respuesta de producción del girasol a la salinidad, la reducción substancial del peso específico con la salinidad habría cuestionado el potencial comercial de las pipas obtenidas bajo estrés salino.

Diámetro de los capítulos

El diámetro de los capítulos del girasol tiende a disminuir con la salinidad, tal como indican las correlaciones negativas (significativas a $p < 0,05$) que se presentan en la Figura 5. Tomando como Y en las respectivas regresiones el valor máximo medio del diámetro de los dos valores mayores medidos ($Y_m = 13,0$ cm) pueden estimarse los valores de CE_u en base a CE_{sem-h} ($CE_u = 0,094$ dS m^{-1}) y CE_{s4c} ($CE_u = 0,124$ dS m^{-1}). Asimismo, tomando como Y el valor de $Y_m/2$ (6,5 cm) se estiman los correspondientes valores de CE_{50} (1,11 en base a CE_{sem-h} y 4,16 en base a CE_{s4c}). Finalmente, transformando estos valores a CE_e por medio de las ecuaciones presentadas en la Figura 4b, se obtienen los valores de CE_{eu} y CE_{e50} que se presentan en la Tabla 1.

Los resultados de la Figura 5 y de la Tabla 1 indican que el grado de correlación entre el diámetro de los capítulos y la salinidad es bajo y que este atributo es relativamente tolerante a la salinidad, de tal manera que dicho diámetro en las condiciones más salinas es en torno a un 40 p.100 inferior al medido en las condiciones menos salinas. Las estimas de CE_{eu} y CE_{e50} efectuadas en base a la CE_{sem-h} y la CE_{s4c} son relativamente similares, especialmente para la CE_{e50} , que es el parámetro de tolerancia más importante y cuyo valor medio es de 20,0 dS m^{-1} , indicativo de la elevada tolerancia del diámetro de los capítulos a la salinidad del suelo.

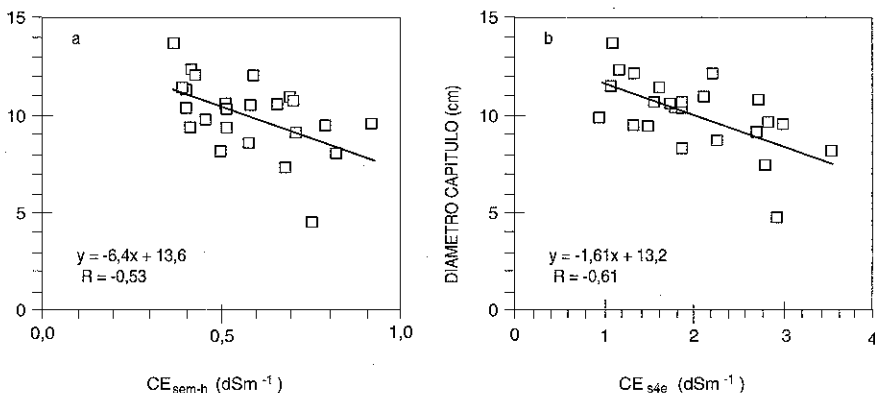


Fig. 5.- Regresiones lineales establecidas entre el diámetro de los capítulos de girasol y la salinidad del suelo (CE_{sem-h} y CE_{s4c}) media ponderada por el tiempo medida en cada parcela elemental. *Linear regressions established between sunflower head diameter and time-weighted soil salinity (CE_{sem-h} and CE_{s4c}) measured in each elemental plot.*

TABLA 1

VALORES DE CE_{eu} Y CE_{e50} DE LOS ATRIBUTOS ANALIZADOS
 CALCULADOS EN BASE A LA CE_{sem}
 (SENSOR ELECTROMAGNETICO) Y LA CE_{s4e}
 (SONDA DE CUATRO ELECTRODOS).

Values of CE_{eu} and CE_{e50} of the analyzed attributes calculated on the basis of the CE_{sem} (electromagnetic sensor) and the CE_{s4e} (four electrode probe) readings

Atributo	base CE_{sem}		base CE_{s4e}		Media	
	CE_{eu} dS m ⁻¹	CE_{e50} dS m ⁻¹	CE_{eu} dS m ⁻¹	CE_{e50} dS m ⁻¹	CE_{eu} dS m ⁻¹	CE_{e50} dS m ⁻¹
Diámetro capítulos	4,5	21,1	6,0	19,0	5,2	20,0
Nº plantas cosechadas	11,3	22,0	10,9	21,0	11,1	21,5

Número de plantas cosechadas

Ya se ha señalado que los tratamientos salinos se impusieron después de la emergencia y establecimiento del girasol. Por ello, el número de plantas nacidas fue bastante parecido en todos los tratamientos, con un valor medio de 82 plantas por parcela y un coeficiente de variación (CV) del 13 p.100. A pesar de que este CV es aceptablemente bajo, el número de plantas nacidas fue sensiblemente inferior en algunas parcelas y, en particular, en algunas de las compactadas. Por ello, el número de plantas cosechadas (medidas 120 DDS) se presenta como porcentaje del descenso respecto del número de plantas nacidas (medidas 28 DDS). La Figura 6 (a, b) indica que este descenso fue irrelevante (descensos inferiores al 5 p.100) hasta unos valores umbral en torno a 0,5 dS m⁻¹ (CE_{sem-h}) y 1,7 dS m⁻¹ (CE_{s4e}). Por encima de estos umbrales el descenso en el número de plantas fue incrementándose con la salinidad hasta alcanzar unos descensos medios para los tratamientos más salinos próximos al 20 p.100. De esta Figura se deduce que hay algunas parcelas con descensos en el número de plantas cosechadas superiores a los de las parcelas más salinas, lo que sugiere que otras variables (en particular, la compactación del suelo) afectaron asimismo a estos resultados.

La función de respuesta a la salinidad del número de plantas cosechadas se ajustó de forma pobre (aunque significativa a $p < 0,01$) al modelo lineal tal como indican los bajos coeficientes de correlación de la Figura 6 (c, d). Las CE_{50} deducidas de las ecuaciones de regresión indicadas en esta Figura fueron de 1,2 dS m⁻¹ (base CE_{sem-h}) y 4,8 dS m⁻¹ (base CE_{s4e}). Los correspondientes valores transformados a CE_e , que se presentan en la Tabla 1, indican que este atributo es tolerante a la salinidad (valores medios de $CE_{eu} = 11,1$ dS m⁻¹ y de $CE_{e50} = 21,5$ dS m⁻¹). De esta Tabla se deduce que los valores de las estimas establecidas en base a CE_{sem-h} y CE_{s4e} son coincidentes, lo que proporciona una mayor confianza sobre los resultados obtenidos.

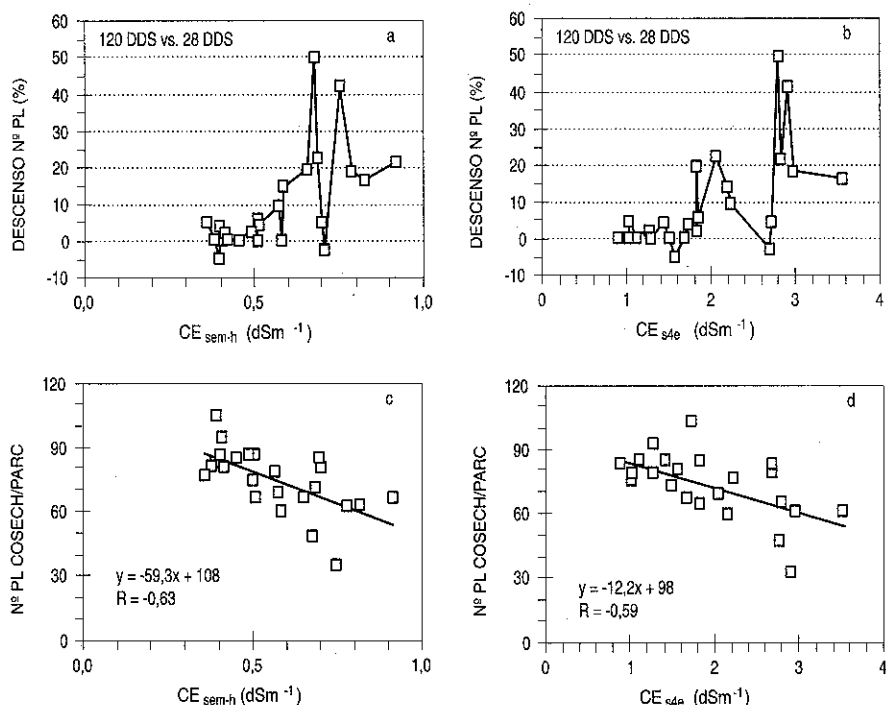


Fig. 6.- (a, b): Porcentaje de descenso del número de plantas cosechadas respecto del número de plantas nacidas frente a la salinidad del suelo (CE_{scm-h} y CE_{s4e}) media ponderada por el tiempo medida en cada parcela elemental. (c, d): Regresiones lineales establecidas entre el número de plantas cosechadas en cada parcela elemental y la salinidad del suelo (CE_{scm-h} y CE_{s4e}) media ponderada por el tiempo medida en cada parcela elemental

(a,b); percent decrease of the number of harvested plants with respect to the number of emerged plants against the time-weighted soil salinity (CE_{scm-h} and CE_{s4e}) measured in each elemental plot. (c,d): Linear regressions established between the number of harvested plants in each elemental plot and the time-weighted soil salinity (CE_{scm-h} and CE_{s4e}) measured in each elemental plot.

Altura de las plantas

Este atributo disminuye significativamente ($p < 0,01$) con la salinidad del suelo, tal como indican los resultados de la Figura 7. A partir de la altura máxima definida experimentalmente ($Y_m = 104,9$ cm) y del valor $Y_m/2$ se calcularon los correspondientes valores de CE_u y CE_{50} , tanto en base a CE_{scm-h} y CE_{s4e} como en base a los respectivos valores transformados a CE_e (Tabla 2). La concordancia de valores estimados en base a ambos instrumentos es razonable, obteniéndose un valor medio de CE_{eu} ($5,4$ dS m^{-1}) relativamente bajo y un valor medio de CE_{e50} ($18,0$ dS m^{-1}) elevado.

La altura de las plantas fue afectada por la compactación del suelo, razón por

la cual se ha efectuado un análisis de regresión para las quince parcelas «normales» y para las nueve parcelas «compactadas». Los resultados que se presentan en la Figura 7 (b, d) indican que los ajustes de las observaciones al modelo de regresión lineal mejoran considerablemente (los coeficientes de correlación obtenidos son significativos a $p < 0,001$). El descenso de la altura de las plantas conforme aumenta la salinidad es superior en los suelos compactados que sin compactar, de tal manera que las pendientes de regresión obtenidas en los suelos compactados son inferiores en 1,6 veces (base CE_{sem-h}) y 1,3 veces (base CE_{s4e}) respecto a las obtenidas en los suelos normales.

La Tabla 2 presenta las estimas de CE_u y CE_{50} obtenidas para estos dos suelos, así como los valores transformados a CE_c . La CE_{eu} en el suelo compactado ($8,9 \text{ dS m}^{-1}$) es superior a la del suelo normal ($7,5 \text{ dS m}^{-1}$), pero la mayor caída relativa de la altura de las plantas con el incremento de salinidad en el suelo compactado hace que los valores de CE_{e50} sean inferiores en éste ($15,5 \text{ dS m}^{-1}$) que en el suelo normal ($19,3 \text{ dS m}^{-1}$). Puede por lo tanto concluirse que la compactación afecta de forma más negativa a la altura de las plantas conforme aumenta la salinidad del suelo.

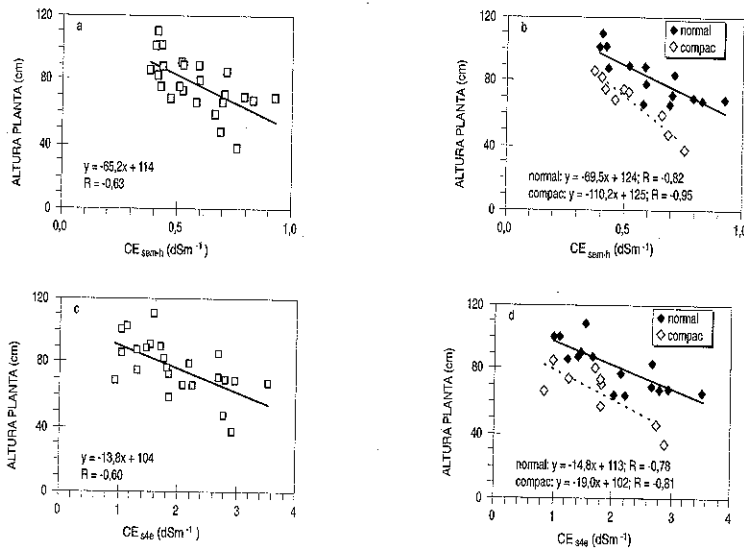


Fig. 7.- Regresiones lineales establecidas entre la altura de las plantas de girasol y la salinidad del suelo (CE_{sem-h} y CE_{s4e}) media ponderada por el tiempo medida en cada parcela elemental.

(a, c): Regresiones establecidas para las 24 parcelas elementales.
 (b, d): Regresiones establecidas para las 15 parcelas elementales con suelo normal y las 9 parcelas elementales con suelo compactado.

Linear regressions established between plant height and time-weighted soil salinity (CE_{sem-h} and CE_{s4e}) measured in each elemental plot.

(a,c): Regressions established for the 24 elemental plots.
 (b,d): Regressions established for the 15 elemental plots with normal soil and the 9 elemental plots with compacted soil.

TABLA 2

VALORES DE $CE_{1/2}$, CE_{50} , CE_{eu} Y CE_{e50} DE LOS ATRIBUTOS ANALIZADOS CALCULADOS EN BASE A LA CE_{sem} (SENSOR ELECTROMAGNETICO) Y LA CE_{34e} (SONDA DE CUATRO ELECTRODOS) PARA LAS 24 PARCELAS CON SUELO NORMAL Y COMPACTADO, LAS 15 PARCELAS CON SUELO NORMAL Y LAS 9 PARCELAS CON SUELO COMPACTADO

Values of $CE_{1/2}$, CE_{50} , CE_{eu} and CE_{e50} of the analyzed attributes calculated on the basis of CE_{sem-h} (electromagnetic sensor) and CE_{34e} (four electrode probe) for the 24 plots with normal and compacted soil, the 15 plots with normal soil and the 9 plots with compacted soil

Modelo lineal	Suelo normal y compactado (N = 24)				Suelo normal (N = 15)				Suelo compactado (N = 9)			
	$CE_{1/2}$ dS m ⁻¹	CE_{50} dS m ⁻¹	CE_{eu} dS m ⁻¹	CE_{e50} dS m ⁻¹	$CE_{1/2}$ dS m ⁻¹	CE_{50} dS m ⁻¹	CE_{eu} dS m ⁻¹	CE_{e50} dS m ⁻¹	$CE_{1/2}$ dS m ⁻¹	CE_{50} dS m ⁻¹	CE_{eu} dS m ⁻¹	CE_{e50} dS m ⁻¹
Altura plantas	0,14	0,94	5,3	18,4	0,28	1,03	7,6	19,8	0,37	1,98	0,75	9,0
base CE_{sem-h}	-0,06	3,73	5,4	17,6	0,57	4,11	7,4	18,8	0,95	3,15	—	8,7
base CE_{34e}	—	—	5,4	18,0	—	—	7,5	19,3	—	—	—	8,9
media	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Producción pipas	0,23	0,66	6,8	13,8	0,25	0,70	7,0	14,4	0,31	1,44	0,55	8,1
base CE_{sem-h}	0,44	2,38	7,0	13,3	0,47	2,54	7,1	13,8	0,69	1,98	—	7,8
base CE_{34e}	—	—	6,9	13,5	—	—	7,1	14,1	—	—	—	7,9
media	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Modelo no lineal	Suelo normal y compactado (N = 24)				Suelo normal (N = 15)				Suelo compactado (N = 9)			
	$CE_{1/2}$ (e.e.) dS m ⁻¹	p (e.e.)	CE_{50} (e.e.) dS m ⁻¹	p (e.e.)	$CE_{1/2}$ (e.e.) dS m ⁻¹	p (e.e.)	CE_{50} (e.e.) dS m ⁻¹	p (e.e.)	$CE_{1/2}$ (e.e.) dS m ⁻¹	p (e.e.)	CE_{50} (e.e.) dS m ⁻¹	p (e.e.)
Producción pipas	0,64 (0,03)	3,2 (0,68)	13,5	0,68 (0,02)	14,1	0,54 (0,01)	5,2 (0,72)	11,8				
base CE_{sem-h}	2,27 (0,15)	2,5 (0,53)	12,9	2,42 (0,10)	13,4	1,95 (0,13)	3,9 (1,2)	11,9				
base CE_{34e}	—	—	13,2	—	13,8	—	—	—				
media	—	—	—	—	—	—	—	—				

i error estandar de la estima

Producción de pipas

Desde el punto de vista económico, éste es el atributo más importante de los estudiados en este trabajo, razón por la cual se efectúa un análisis más pormenorizado del mismo consistente en el ajuste al modelo lineal y no lineal de las 24 (suelo normal y compactado), 15 (suelo normal) y 9 (suelo compactado) parcelas.

El ajuste de las observaciones al modelo lineal se presenta en la Figura 8. Todos los coeficientes de correlación son significativos a $p < 0,001$, alcanzando valores de $r = -0,75$ para las 24 observaciones (suelo normal y compactado) e iguales o superiores (en valor absoluto) a $-0,90$ para las 15 (suelo normal) y 9 observaciones (suelo compactado). Es evidente que la compactación diferencial del suelo afecta de forma relevante a la producción, razón por la cual los coeficientes de correlación de las rectas de regresión aumentan substancialmente al ajustar por separado las observaciones obtenidas en el suelo normal y en el compactado. De la Figura 8 (b, d) se deduce que la compactación afecta tanto a la producción máxima como, especialmente, a la tasa de descenso de la producción con la salinidad, de tal manera que las pendientes de las rectas de regresión obtenidas en los suelos compactados son inferiores en 1,5 veces (base CE_{sem-h}) y 1,3 veces (base CE_{s4e}) respecto a las obtenidas en los suelos normales.

Tomando la media de las dos producciones máximas como valor de Y_m ($Y_m = 2.731, 3.014$ y 2.364 $kg\ ha^{-1}$ para las 24, 15 y 9 observaciones respectivamente) se estiman los valores de CE_u de la Tabla 2. Asimismo, tomando los respectivos valores de $Y_m/2$ se estiman los valores de CE_{50} de la Tabla 2. En esta tabla se presentan también los respectivos valores transformados a CE_e . De acuerdo con estos resultados, la CE_{eu} del girasol es 6,9 (suelo normal y compactado), 7,1 (suelo normal) y 7,9 (suelo compactado) $dS\ m^{-1}$. Los respectivos valores de CE_{50} son 13,5, 14,1 y 12,0 $dS\ m^{-1}$. Nuevamente, la concordancia entre los valores estimados en base a CE_{sem-h} y CE_{s4e} refuerza la confianza en los resultados obtenidos.

El ajuste de las observaciones al modelo no lineal se presenta asimismo en la Tabla 2. Los coeficientes de correlación obtenidos entre los valores medidos y estimados por este modelo fueron similares a los obtenidos en el modelo lineal, demostrando que el modelo lineal es aplicable a los valores experimentales obtenidos en nuestro trabajo. Los errores estándar (e. e.) de las estimas de CE_{50} son en todos los casos muy bajos (Tabla 2), siendo algo inferiores para las estimas basadas en el sensor electromagnético (e. e. inferiores al 5 p.100 de la estima de CE_{50}) que para las estimas basadas en la sonda de cuatro electrodos (e. e. inferiores al 7 p.100 de la estima de CE_{50}). Los errores estándar de las estimas del parámetro p , que define la tasa de caída de la producción con la salinidad, son relativamente elevados pero aceptables en el caso del suelo normal (e. e. inferiores al 13 p.100 de la estima de p).

De la Tabla 2 se deduce de nuevo la concordancia obtenida entre los valores de CE_{50} estimados en base a CE_{sem-h} y CE_{s4e} , que en el peor de los casos difieren en menos del 5 p.100. Asimismo, de la Tabla 2 se infiere que los valores de CE_{e50} deducidos del modelo lineal y del modelo no lineal son similares, de tal manera que, tomando los valores más conservadores obtenidos para el suelo normal, pue-

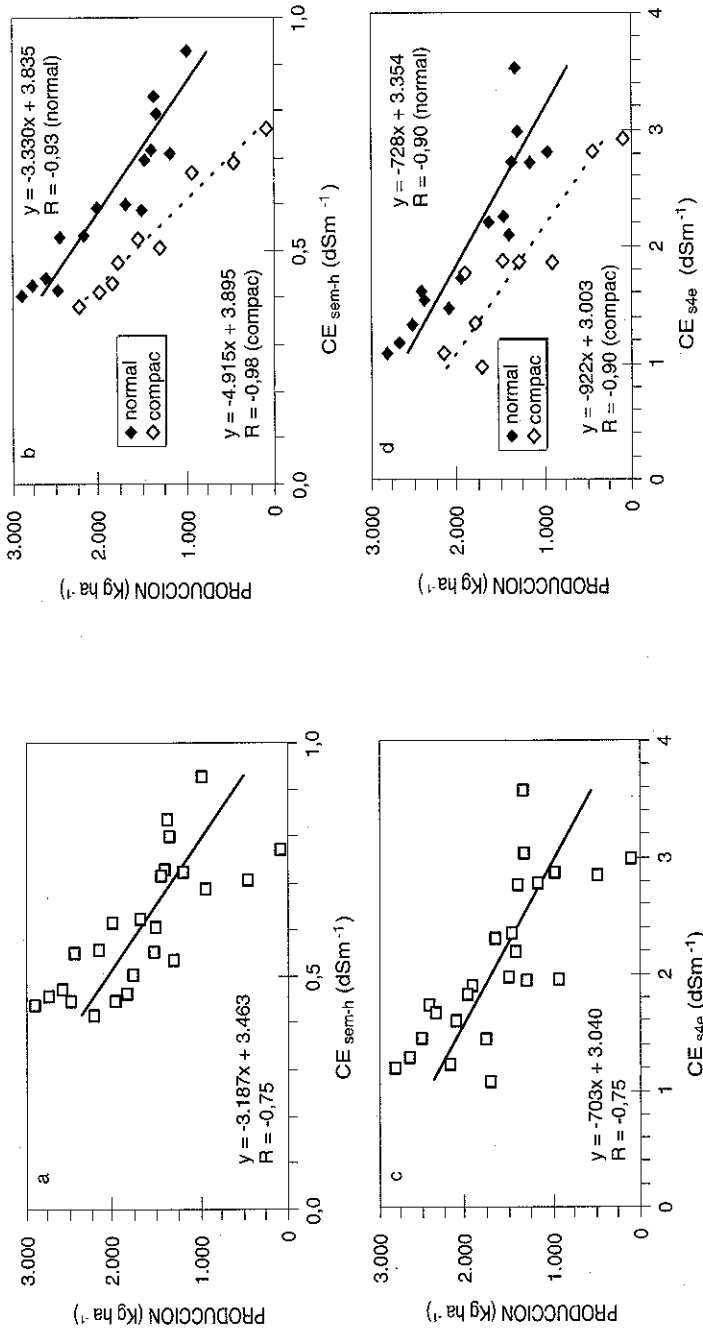


Fig. 8.- Regresiones lineales establecidas entre la producción de pipas de girasol y la salinidad del suelo (CE_{sem-h} y CE_{s4e}) media ponderada por el tiempo medida en cada parcela elemental.

(a, c): Regresiones establecidas para las 24 parcelas elementales.

(b, d): Regresiones establecidas para las 15 parcelas elementales con suelo normal y las 9 parcelas elementales con suelo compactado.

Linear regressions established between sunflower seed production and time-weighted soil salinity (CE_{sem-h} and CE_{s4e}) measured in each elemental plot.

(a,c): Regresions established for the 24 elemental plots.

(b,d): Regresions established for the 15 elemental plots with normal soil and the 9 elemental plots with compacted soil.

den generalizarse para el girasol valores de CE_{eu} de $7,1 \text{ dS m}^{-1}$ y de CE_{e50} de $13,8 \text{ dS m}^{-1}$. Tal como se mencionó en el apartado de material y métodos, la ausencia de observaciones a la izquierda del umbral limita en parte los resultados obtenidos, ya que podrían estar sobrestimando los parámetros de tolerancia obtenidos. Sin embargo, dicha sobrestimación no puede ser substancial, ya que los valores de Y_m obtenidos en este trabajo son similares a los valores máximos obtenidos en ensayos locales del SEA realizados en suelos sin salinidad.

Estos valores de tolerancia a la salinidad del girasol son substancialmente superiores a las clasificaciones cualitativas citadas en la literatura. Asimismo, respecto a los valores obtenidos por Francois (1996), nuestro valor de CE_{eu} ($7,1 \text{ dS m}^{-1}$) es un 48 p.100 superior a su valor de $4,8 \text{ dS m}^{-1}$, mientras que nuestro valor de CE_{e50} ($13,8 \text{ dS m}^{-1}$) es un 7 p.100 inferior a su valor de $14,8 \text{ dS m}^{-1}$. En definitiva, este cultivo puede clasificarse como «moderadamente tolerante» a «tolerante» según la clasificación FAO (1985, 1992). Ello implica que el girasol es más tolerante a la salinidad que el cártamo, soja, trigo y sorgo, similar en tolerancia a la remolacha azucarera y menos tolerante que el algodón y la cebada. Es importante resaltar que la CE_{e50} del girasol ($13,8 \text{ dS m}^{-1}$) es un 39 p.100 superior a la CE_{e50} del sorgo ($9,9 \text{ dS m}^{-1}$) y un 134 p.100 superior a la CE_{e50} del maíz ($5,9 \text{ dS m}^{-1}$), que son los dos principales cultivos alternativos al girasol en la cuenca media del Ebro. Por consiguiente, el girasol puede ser un cultivo substitutivo del maíz y sorgo para suelos de salinidad baja-media y moderada-alta, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a D. Alejandro Ardevines, D. Mariano Canales, D. Jesús Gaudó, D.^a Eva Gracia y D. Miguel Izquierdo su colaboración en los trabajos de campo, y a D.^a Teresa Molina y D.^a Dolores Naval su colaboración en los trabajos de laboratorio.

SUMMARY

Response of sunflower (*helianthus annuus* L.) to soil salinity

The sunflower is a spring crop that, due to commercial (increasing competitiveness as opposed to olive oil), political (European Union subsidies) and edaphic and climatic (irrigated salt-affected soils) reasons, has a considerable expansion potential for the middle Ebro basin.

The objective of this work is to establish the tolerance of sunflower to soil salinity, presently not well documented and with a qualitative ranking between moderately sensitive and moderately tolerant.

The hybrid *Albasol* was sown in non saline conditions in 24 elemental plots of $4 \times 4 \text{ m}$. irrigated with water of different EC (between 2 and 15 dS m^{-1}). Soil salinity was periodically measured with an electromagnetic sensor and a four electrode probe, and the readings were transformed to EC_e (saturation extract) by means of the corresponding calibration equations.

Of the measured attributes, the number of plants per unit surface and the head diameter were the more tolerant to salinity, followed by plant height and, finally, by the production of seeds. Based on the salt tolerance parameters EC_{eu} (threshold EC value of the soil saturation extract above which crop

yield starts to decline) and EC_{e50} (EC of the soil saturation extract at which the maximum yield decreases by 50 p.100), it is concluded that the qualitative classifications previously reported in the literature underestimate the salinity tolerance of sunflower. Thus, the EC_{eu} (7.1 dS m^{-1}) and the EC_{e50} (13.8 dS m^{-1}) are higher than those for maize, safflower, soybean, wheat and sorghum, therefore allowing to conclude that the sunflower is a potential competitive crop for the salinity conditions present in some irrigated areas of the middle Ebro basin.

KEY WORDS: Sunflower
Salinity
Tolerance
Electromagnetic sensor
Four electrode probe

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ARAGÜES R., MILLAN M., 1986. Métodos de medida de la salinidad del suelo. I: Revisión bibliográfica. Comunicaciones INIA. Serie General 18, 5-93.
- DGA, 1995. Evolución de Datos Estadísticos Agrarios de Aragón. Departamento de Agricultura y Medio Ambiente, Zaragoza.
- FAO, 1985. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper n.º 29 (Rev. 1), Rome, 174 pp.
- FAO, 1992. The Use of Saline Waters for Crop Production. FAO Irrigation and Drainage Paper n.º 48, Rome, 133 pp.
- FRANCOIS L.E., 1996. Salinity effects on four sunflower hybrids. Agron. J. 88, 215-219.
- FRANCOIS L.E., MAAS E.V., 1994. Crop Response and Management on Salt-Affected Soils. In: Handbook of Plant and Crop Stress. Pessarakli M., ed. Marcel Dekker Inc., New York, pp. 149-181.
- HERRERO J., ARAGÜÉS R., 1988. Suelos afectados por salinidad en Aragón. Surcos de Aragón, 9, 5-8.
- ROYO A., ARAGÜÉS R., QUILEZ D., 1991. Descripción y evaluación de cuatro modelos de respuesta de cultivares de cebada a la salinidad. Investig. Agrar.: Prod. Prot. Veg. Vol. 6, 319-330.
- ROYO A., ARAGÜÉS R., 1995. Efecto de la salinidad sobre diversos caracteres morfo-fisiológicos y sobre el rendimiento en grano de la cebada. Investig. Agrar.: Prod. Prot. Veg. Vol. 10, 71-84.
- VAN GENUCHTEN M.T., 1983. Analyzing crop salt tolerance data: model description and user's manual. U.S.D.A. Agricultural Research Service. U.S. Salinity Laboratory. Research Report N.º 120, 50 pp.