

000 475 7 00000 1

0463531

CB-46353100000 1

W-3-189

TD-1993-3

UNIVERSIDAD DE NAVARRA
FACULTAD DE CIENCIAS

**RESPUESTA DEL SUELO Y DE UN CULTIVO DE CEBADA
AL LABOREO DE CONSERVACION EN AGROSISTEMAS DE
SECANO EN ARAGON**

Memoria presentada por M^a Victoria López
Sánchez para optar al Grado de Doctora en
Ciencias (Sección Biológicas).

Zaragoza, Diciembre de 1993

V^o.B^o.

El Director de la Tesis

Fdo. José Luis Arrúe Ugarte



R-9143

JOSE LUIS ARRUE UGARTE, COLABORADOR CIENTIFICO DEL
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS,

CERTIFICA: Que la Licenciada M^a Victoria López Sánchez ha
realizado bajo mi dirección, en la U.E.I. de Edafología de
la Estación Experimental de Aula Dei, el trabajo que, para
optar al Grado de Doctora en Ciencias (Sección
Biológicas), presenta con el título:

**RESPUESTA DEL SUELO Y DE UN CULTIVO DE
CEBADA AL LABOREO DE CONSERVACION EN
AGROSISTEMAS DE SECANO EN ARAGON.**

Y para que conste, firmo la presente Certificación en
Zaragoza, a 21 de Diciembre de 1993.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que han contribuido de una u otra forma a la realización de esta Tesis Doctoral.

Al Dr. D. José Luis Arrúe Ugarte por el planteamiento y dirección del trabajo.

A mis compañeros de la Unidad de Edafología, T. Guillamón, M^a J. Salvador, M^a T. López, M^a I. Poc y M^a A. Goñi, por su ayuda y apoyo durante la realización de la tesis.

Al personal de la casa de labor, mi más profundo agradecimiento; sin su ayuda, compartiendo los rigores del invierno y del verano en las tareas de campo, el presente estudio no habría sido posible.

A los técnicos del Centro de Transferencia Tecnológica en Producción Vegetal y del Servicio de Extensión Agraria de la D.G.A., así como a los agricultores colaboradores de los ensayos de Híjar y Banastás, por su permanente colaboración.

A la Unidad de Suelos y Riegos del Servicio de Investigación Agraria de la DGA por los equipos de campo facilitados. A Lola Quílez y Antonio Martínez-Cob, de dicha Unidad, por su asesoramiento en el análisis geoestadístico de resultados.

A José Carlos Martínez, Angel Alvarez, Miguel Sanz y Blanca Medina por su amabilidad y desinteresada ayuda en distintos momentos del trabajo.

A mi familia y a Miguel por la ayuda prestada y la comprensión mostrada en todo momento.

Esta tesis ha sido financiada por el Consejo Asesor de Investigación de la D.G.A., a través de una beca predoctoral (BCA-35/89) y del proyecto "Alternativas de laboreo de conservación para el secano aragonés" (PCA-9/89).

"Debe únicamente llamarse con propiedad agricultura el arte reflexivo de cultivar la tierra por principios y con conocimiento; pero no conviene de ningún modo este nombre á la rutina tradicional, ni á los métodos viciosos que se siguen comunmente para lograr unas cosechas escasas con dispendios crecidos, comparados los productos con las expensas."

Claudio Boutelou (1817). "Elementos de Agricultura".
Cap. I. Objeto de la agricultura.

A mi familia.
A Miguel.

"Debe únicamente llamarse con propiedad agricultura el arte reflexivo de cultivar la tierra por principios y con conocimiento; pero no conviene de ningún modo este nombre á la rutina tradicional, ni á los métodos viciosos que se siguen comunmente para lograr unas cosechas escasas con dispendios crecidos, comparados los productos con las expensas."

Claudio Boutelou (1817). "Elementos de Agricultura".
Cap. I. Objeto de la agricultura.

A mi familia.
A Miguel.

INDICE

	Página
1. INTRODUCCION	1
1.1. EL LABOREO DEL SUELO	2
1.2. EL LABOREO DE CONSERVACION COMO ALTERNATIVA	5
1.2.1. La producción científica sobre laboreo de conservación en el período 1975-1989	6
1.2.2. Síntesis del estado actual de conocimientos y prioridades de investigación	8
1.3. EL LABOREO DE CONSERVACION EN ESPAÑA	10
1.3.1. Breve reseña de las experiencias iniciadas	10
1.3.2. Balance de resultados	11
1.3.3. Perspectivas de adopción del laboreo de conservación	15
1.4. VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO Y DISEÑO EXPERIMENTAL	17
2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS	19
3. MATERIAL Y METODOS	23
3.1. SITIOS EXPERIMENTALES	24
3.1.1. Localización	24
3.1.2. Criterios de elección	24
3.1.3. Agroclimatología de las zonas de ensayo	24
3.2. PARAMETROS METEOROLOGICOS	28
3.3. CARACTERIZACION GENERAL DE LOS SUELOS	29
3.3.1. Descripción de perfiles	29
3.3.2. Determinaciones analíticas. Propiedades químicas y físicas	29
3.4. VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS SUELOS	32
3.4.1. Procedimiento experimental	32
3.4.2. Análisis geoestadístico	32
3.4.2.1. Semivariogramas	32
3.4.2.2. Estimación por krigeado	38
3.5. DISEÑO DE LA EXPERIENCIA	40
3.5.1. Sistemas de laboreo	40
3.5.2. Prácticas culturales	40
3.5.3. Diseño experimental	43

4.4.1. Campaña 1990-91	113
4.4.2. Campaña 1991-92	118
4.4.3. Relación entre resistencia a la penetración y parámetros de suelo	125
4.5. DESARROLLO Y CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE CEBADA	128
4.5.1. Campaña 1990-91	128
4.5.2. Campaña 1991-92	132
4.6. BALANCE DE AGUA Y EVAPOTRANSPIRACION	140
4.6.1. Uso del agua por el cultivo	140
4.6.1.1. Campaña 1990-91	140
4.6.1.2. Campaña 1991-92	143
4.6.2. Eficiencia en el uso del agua	145
4.6.3. Estimación de los componentes de la evapotranspiración	147
4.7. CARACTERISTICAS DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO	151
4.7.1. Distribución de tamaños de agregados	151
4.7.2. Macroporosidad	154
4.7.3. Conductividad hidráulica a saturación y sortividad	157
5. DISCUSION	160
5.1. ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO Y LABOREO DE CONSERVACIÓN	161
5.2. EFECTO DEL LABOREO SOBRE EL GRADO DE COMPACTACION DEL SUELO	168
5.3. RESPUESTA DEL CULTIVO AL LABOREO DE CONSERVACION	172
5.4. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA POR EL CULTIVO SEGUN SISTEMA DE LABOREO	182
5.5. EVALUACION DEL ESTADO ESTRUCTURAL DE LA CAPA ARABLE TRAS EL PERIODO EXPERIMENTAL	187
5.6. EFICIENCIA DEL DISEÑO DE BLOQUES INCOMPLETOS PROPUESTO	193
6. CONCLUSIONES	198
7. BIBLIOGRAFIA	204
ANEXO I	230
ANEXO II	239
ANEXO III	244

1. INTRODUCCION

Aunque hasta el presente la preocupación creciente, en todos los sectores de la sociedad, por preservar y garantizar la calidad del medio ambiente no se ha traducido en cambios sustanciales en las prácticas agrícolas tradicionales, sí se observa, en cambio, la tendencia a introducir y a ensayar sistemas alternativos, los cuales, en principio, concilian los intereses de los sectores agrícola y medioambiental. Desde este punto de vista, intentaremos analizar seguidamente algunos aspectos de la nueva orientación que, en el contexto de un desarrollo sostenido, se está dando actualmente a la primera y más ancestral práctica agrícola: la labranza del suelo.

1.1. EL LABOREO DEL SUELO

Si bien los distintos objetivos del laboreo (modificación de las condiciones físicas del suelo para una siembra y nascencia correctas; control de malas hierbas, insectos y enfermedades de las plantas; incorporación de residuos del cultivo anterior o distribución de los mismos sobre la superficie del suelo; control de las transferencias de agua, aire y calor en el suelo; incorporación de fertilizantes, pesticidas y otras enmiendas; modificación de la topografía de la superficie del suelo para facilitar el riego, drenaje y recolección; eliminación de materiales indeseables como piedras y raíces; control de la erosión hídrica y eólica) pueden ser fácilmente percibidos (Gebhardt et al., 1985), no es tan sencillo encontrar el método de laboreo más adecuado a las condiciones locales, habida cuenta de los numerosos factores que pueden condicionar la respuesta final (Fig. 1). Además, la adopción de una determinada práctica de laboreo está condicionada por el nivel económico del agricultor, sus preferencias personales, las influencias sociales, así como por las políticas agrarias coyunturales (Unger, 1988). El hecho cierto es que, en la actualidad, las prácticas de preparación del suelo no difieren sustancialmente de un lugar a otro y se aplican, generalmente, con independencia del tipo de suelo, topografía y clima (Sundsbø, 1991).

La labranza del suelo, entendida como el conjunto de operaciones en la superficie del suelo encaminadas a procurar un lecho de siembra apropiado, conlleva un elevado consumo energético: inversión intensiva de mano de obra en agriculturas poco desarrolladas y elevado coste económico en las más tecnificadas. En ambos casos, las distintas prácticas asociadas, si son convenientemente ejecutadas, pueden contrarrestar los factores edáficos limitantes de la producción. Por el contrario, prácticas de laboreo inadecuadas pueden conducir a la degradación del suelo. Es en este contexto donde el laboreo debe desempeñar un papel significativo en la optimización de la gestión de los recursos básicos para la producción agrícola (Lal, 1991).

El laboreo afecta a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, tanto ecológica

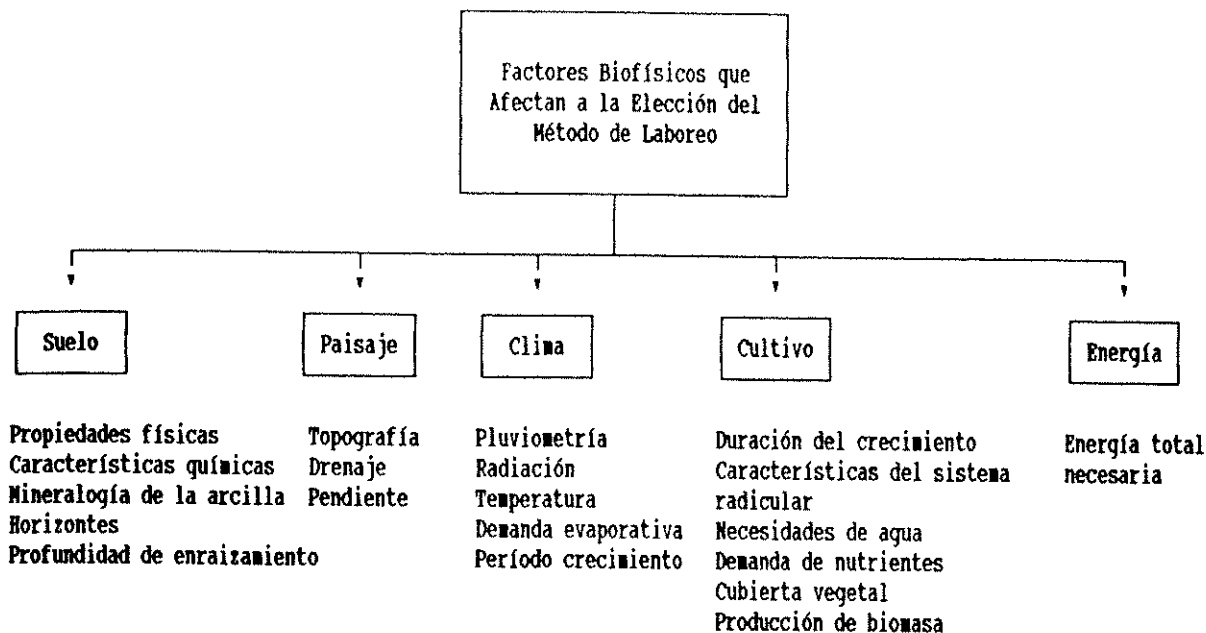


Fig. 1. Factores determinantes de la elección de los sistemas de laboreo (Lal, 1991).

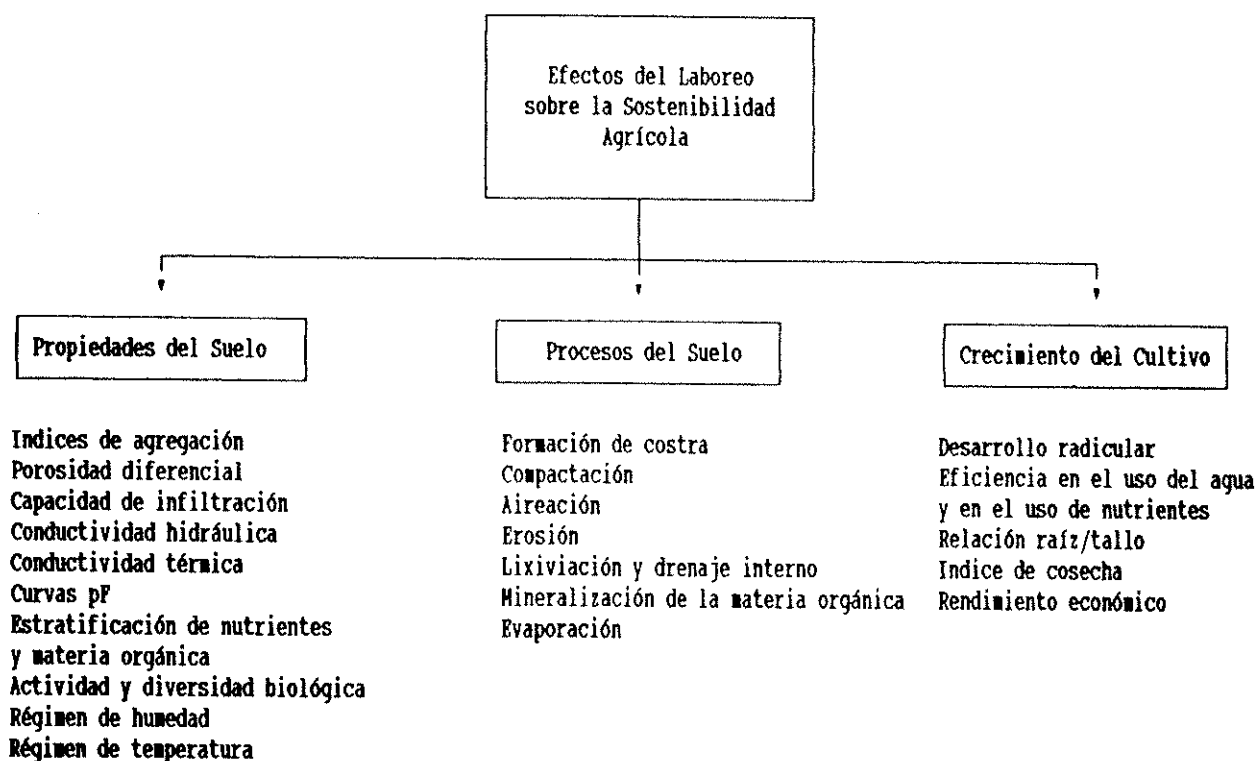


Fig. 2. Relación de parámetros de crecimiento y desarrollo del cultivo, y de propiedades y procesos del suelo afectados por el laboreo y determinantes de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Lal, 1991).

-capacidad de mantener la calidad ambiental- como agronómica -capacidad de mantener la productividad durante un período largo de tiempo- (Lowrance, 1990), a través de sus efectos en las propiedades y procesos del suelo y en el propio desarrollo de los cultivos (Fig.2).

El diseño de tecnologías y sistemas de laboreo óptimos, especialmente en regiones con ecosistemas frágiles y tierras marginales, donde la presión demográfica demanda una utilización al límite de sus escasos recursos, constituye todo un reto para la investigación agrícola actual y futura. La dificultad estriba en que la adopción de todo sistema de laboreo debe considerar no sólo su adecuación a las condiciones locales sino también sus potenciales efectos ambientales a largo plazo.

Desde el siglo pasado, la labranza tradicional, con empleo de arado de vertedera, ha sido cuestionada desde muy diferentes sectores. Gómez Orea (1990) señala como principales objeciones las siguientes: a) acentuación de los procesos erosivos; b) elevado consumo energético y consiguiente contaminación por emisión de gases a la atmósfera; c) contribución a incrementar el nivel de ruido; d) contaminación atmosférica por emisión de polvo; e) contribución a la turbidez y eutrofización de las aguas; f) pérdida de estructura y materia orgánica en el suelo; g) compactación; y h) pérdida de nutrientes. Además, existen inconvenientes derivados de la rotura de raíces en cultivos leñosos y del enterrado y germinación posterior de semillas de malas hierbas (Giráldez et al., 1990a). Por su parte, Kuipers (1991) analiza, con perspectiva histórica, algunas de estas objeciones y distingue tres olas de crítica: una de carácter técnico (diseños alternativos al arado clásico, especialmente en los últimos 50 años); otra, con origen en la Ciencia del Suelo, también desde hace unos 50 años, con dos argumentos principales, el arado es la principal causa de la erosión del suelo y el arado reduce la actividad biológica del suelo y, consecuentemente, degrada la estructura del mismo; y la más reciente, en los últimos 25 años, proveniente fundamentalmente de los productores de herbicidas, que cuestiona la utilidad de la labranza tradicional en el control de las malas hierbas. No obstante, Kuipers (1991) también considera los aspectos positivos de las prácticas agrícolas tradicionales y sostiene que los fracasos de algunas de ellas en condiciones de suelo y clima distintas de aquéllas en las que fueron inicialmente desarrolladas no debe interpretarse como motivo de descalificación.

Razones medioambientales (mayor concienciación en los distintos sectores de la actividad agraria sobre la conservación de los recursos de agua y suelo), económicas (aparición en el mercado de nuevos herbicidas y reducción de costes de explotación) y técnicas (desarrollo de nuevos aperos y sembradoras aptas para operar en presencia incluso de grandes cantidades de residuos vegetales) han dado lugar a la introducción progresiva de un conjunto de prácticas de laboreo, alternativas al método tradicional, que se engloban dentro del término "laboreo de conservación" (Unger y McCalla, 1980; Lal, 1989).

1.2. EL LABOREO DE CONSERVACION COMO ALTERNATIVA

Actualmente, los distintos sistemas de laboreo de conservación están encaminados a limitar el número de labores antes de la siembra y, con ello, a reducir las pérdidas de suelo y agua, así como los costes de producción. El término laboreo de conservación, que representa un amplio espectro de prácticas agrícolas, viene definido por la cantidad de residuos que permanecen sobre la superficie del suelo, recomendándose un mínimo de un 20 a un 30% después de la siembra. Como referencias generales sobre los distintos aspectos que conlleva la aplicación de estas técnicas (objetivos, tipos de labor, respuesta en distintos ambientes, etc.), podrían citarse, entre otros, los trabajos de Phillips et al. (1980), Unger y McCalla (1980), Gebhardt et al. (1985), Sprague y Triplett (1986), Unger (1988) y Lal (1989).

Ahora bien, dado el elevado número de prácticas culturales que pueden incluirse en dicha definición, existe cierta confusión en cuanto al significado de los diferentes términos recogidos en la literatura (Mannering et al., 1987). Es por ello que el Grupo de Trabajo sobre Terminología de Laboreo de la ISTRO (International Soil Tillage Research Organization) recomienda el uso de la terminología contenida en el Apéndice del Glosario de Términos de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, 1978), a la vez que trabaja en la edición de un glosario multilingüe, obviamente necesario (van Ouwerkerk et al., 1992).

Sin entrar a describir los distintos métodos de laboreo de conservación, a continuación vamos a presentar algunos datos que reflejan la tendencia en la aceptación de los mismos y en las investigaciones paralelas que han generado en las últimas décadas.

La comprobación, en distintas condiciones de clima y suelo, de la idoneidad del laboreo de conservación frente al tradicional ha supuesto un incremento notable de la superficie cultivada bajo dicho sistema. Como ejemplo de la tendencia en EE.UU., país que lidera en términos cuantitativos la adopción del laboreo de conservación, se ha pasado de 2 millones de hectáreas cultivadas en 1963 con algún tipo de práctica de laboreo de conservación a 40 millones en 1985 (Mannering et al., 1987). Las estimaciones del Servicio de Conservación de Suelos de ese país dan una cifra de 60 millones de hectáreas en 1995, lo que supondría aproximadamente el 50% de las tierras cultivadas (Richards, 1991). Una tendencia similar parece existir en Australia, donde en 1983, y sólo en las áreas con precipitaciones de invierno, alrededor de 3 millones de hectáreas de cereal se cultivaban con sistemas de laboreo mínimo o no laboreo, frente a poco más de veinte mil hectáreas en 1971 (Pratley y Rowell, 1987). Las cifras son mucho más modestas en Europa, donde la adopción de estas técnicas lleva un ritmo más lento. En Gran Bretaña, donde más de la mitad de las tierras de cultivo podrían sembrarse con cereales de invierno utilizando técnicas de laboreo reducido, sólo el 15% de esta superficie en Inglaterra y Gales se cultivaba en la campaña 1985-86 con prácticas de laboreo de conservación (Ball, 1989). En nuestro país, también comienzan a darse cifras de cierta significación. González et al. (1991) señalan que el laboreo reducido se practica actualmente en la campaña andaluza en más de treinta mil hectáreas.

El interés despertado por el laboreo de conservación en las dos últimas décadas ha supuesto la producción de una literatura científica específica. Seguidamente se presenta el

resultado del análisis bibliométrico realizado sobre la evolución de esta línea de investigación en los últimos años, destacándose la importancia que recibe, según países o regiones mundiales, frente a otros aspectos relativos a la conservación y manejo de agua y suelo.

1.2.1. La producción científica sobre laboreo de conservación en el período 1975-1989

Para caracterizar la dinámica de las publicaciones sobre laboreo de conservación, en el período indicado, se ha efectuado un recuento del número de referencias contenidas en la revista "Soil and Fertilizers", asumiendo que ésta recoge una muestra suficientemente representativa de la producción mundial. Estos indicadores se han completado con el número de citas recogidas en las "Annotated Bibliographies" de la Commonwealth Agricultural Bureau para los períodos 1958-72 y 1976-81. Representada esta información en la gráfica superior de la Figura 3, se observa, en primer lugar, que el ritmo de crecimiento es de tipo exponencial, patrón característico de la literatura científica en general, y similar al obtenido por Díaz-Fierros (1979) para la Ciencia del Suelo. En segundo lugar, se aprecia que la contribución del laboreo de conservación al total de trabajos sobre laboreo en general, que hasta 1985 se mantenía en torno a un 26%, alcanza un 40% de promedio en los últimos 4 años (Fig. 3, gráfica inferior). Este sustancial crecimiento se refleja en el número anual de citas. Así, mientras el número total de trabajos sobre laboreo se ha triplicado (129 citas/año para el período 1975-77 frente a 395 para 1987-89), el correspondiente sólo a laboreo de conservación se ha quintuplicado (33 frente 168 citas/año para los mismos trienios).

Por otro lado, y a fin de identificar cuál es la contribución de diferentes regiones mundiales a la producción científica total sobre laboreo de conservación y cómo ésta ha evolucionado en el tiempo, los trabajos correspondientes a los trienios antes señalados se agruparon por países de acuerdo con el lugar donde se llevó a cabo el estudio. El escaso número de referencias registradas en algunos países es debido a que los resultados de las investigaciones sobre laboreo en ellos realizadas no han sido publicados en las revistas recogidas en la base de datos consultada. Este es el caso de los trabajos realizados en países de América del Sur (Alegre, 1991). Siguiendo en parte el criterio de clasificación geográfica de Yaalon (1964), los trabajos se agruparon, finalmente, en las regiones indicadas en la Figura 4. Tal como puede verse, EE.UU. y Canadá constituyen la región que con un 60% del total lidera actualmente la producción mundial y es responsable del notable incremento de ésta con relación a la del período 1975-77. El interés creciente por el tema lo refleja el hecho de que en este período sólo 19 países figuraban en el concierto mundial frente a los 43 del período 1987-89; igualmente, es indicativo que en el primer trienio EE.UU. esté representado por 10 estados y en el último por 41. Teniendo en cuenta que el laboreo de conservación tiene especial acogida en áreas con un importante riesgo de erosión y déficit hídrico, resulta preocupante la escasa aportación de la región mediterránea (sólo se han considerado los países de la cuenca del mar Mediterráneo) donde estos riesgos son manifiestos.

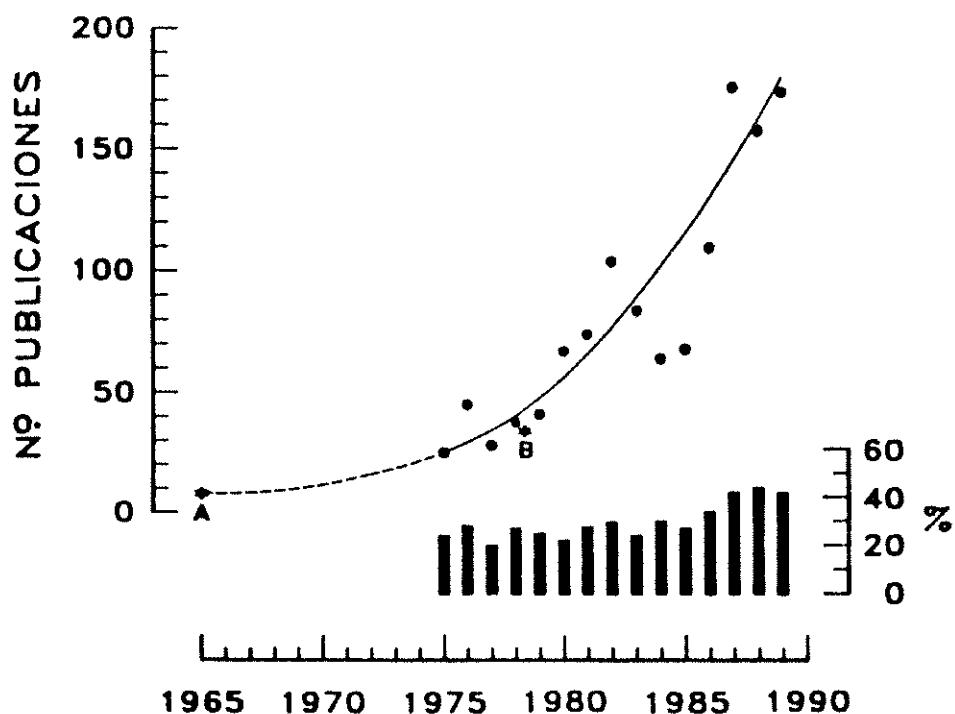


Fig. 3. Evolución del número anual de publicaciones sobre laboreo de conservación en el periodo 1975-89 (gráfica superior) y del porcentaje que representa con respecto al total de publicaciones sobre laboreo (gráfica inferior). Los puntos A y B corresponden al valor medio de los periodos 1958-72 y 1976-81 según las respectivas Annotated Bibliographies de la C.A.B. (Arrúe y López, 1991).

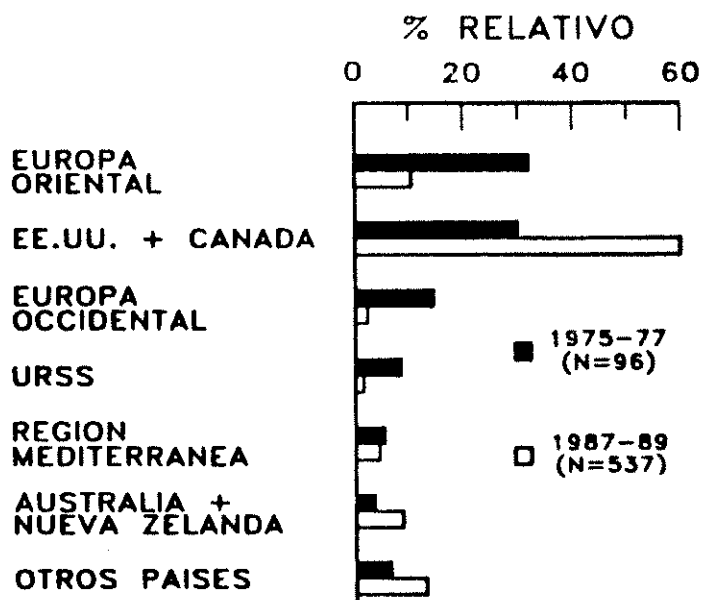


Fig. 4. Distribución geográfica de las publicaciones sobre laboreo de conservación en los periodos 1975-77 y 1987-89. Entre paréntesis se indica el número total de trabajos del periodo (Arrúe y López, 1991).

1.2.2. Síntesis del estado actual de conocimientos y prioridades de investigación

Si hubiera que hacer una valoración global del conocimiento alcanzado hasta el presente sobre laboreo de conservación, podría decirse que las condiciones locales también condicionan la viabilidad de esta práctica agrícola. En este sentido, Griffith et al. (1986) y Lal (1989) recogen algunos ejemplos de guías de aptitud del suelo para el laboreo de conservación; estas guías, por otro lado, están basadas en parámetros de suelo y clima, y raramente se apoyan en resultados obtenidos en experiencias a largo plazo.

Un aspecto claramente ventajoso de los sistemas de laboreo de conservación, comprobado en muchos estudios comparativos, y que ha favorecido su aplicación por el agricultor es el ahorro de energía que conllevan (Phillips et al., 1980). De manera indirecta, el laboreo de conservación implica también un menor gasto en infraestructura y prácticas de cultivo adicionales para conservar el agua y reducir las pérdidas de suelo.

Otro efecto beneficioso del laboreo de conservación, quizá el mejor comprobado, es el control de la erosión agrícola. Ejemplos de dicho control -reducción del volumen de escorrentía y de las pérdidas de suelo por erosión hídrica- han sido recogidos por diversos autores (Griffith et al., 1986; Lal, 1989; Logan et al., 1991). Según el Inventario Nacional de Recursos (NRI) de EE.UU. de 1987, la tasa media anual nacional de pérdidas de suelo por erosión hídrica (laminar y en surcos) de ese año fue 9,5 t/ha, frente a las 10,8 t/ha del año 1982 (George y Choate, 1989). En el período 1982-87 la erosión hídrica se redujo, por tanto, en algo más de un 11%, lo que en opinión de Lee (1990) debe ser atribuido al incremento de la superficie cultivada con laboreo de conservación en la mayoría de las regiones. Por el contrario, la tasa de erosión eólica aumentó un 6,5%, probablemente debido a la menor cubierta vegetal y producción de residuos en los años extremadamente secos en ese período.

Del volumen de residuos vegetales y de un correcto manejo de los mismos depende no sólo la eficiencia del laboreo de conservación en el control de la erosión, sino también el éxito de la práctica en sí (Dickey et al., 1986; Smith, 1986). Así, la adopción del no laboreo no sólo se ve limitada en regiones con baja producción de residuos, como son las regiones semiáridas tropicales (Laryea et al., 1991) y, muy especialmente, las situadas en África Occidental (Hulugalle y Maurya, 1991), sino también en aquéllas con elevada producción en las que, como en el caso de Gran Bretaña, las normativas que prohíben la quema de rastrojo han frenado de manera sustancial tal práctica (Ball, 1989).

Por otra parte, el laboreo de conservación ha sido propuesto, además, como práctica agrícola para la protección de la calidad de las aguas (Logan, 1990). Sin embargo, el riesgo de contaminación de éstas, especialmente las subterráneas, por nutrientes (N y P) y productos biocidas, en áreas o regiones con empleo extensivo del laboreo de conservación, constituye un aspecto controvertido en las investigaciones actuales (Arrúe, 1992).

Sin entrar a considerar otros muchos aspectos relacionados con las ventajas e inconvenientes del laboreo de conservación, pues ello no es objeto de esta Introducción, sí creemos conveniente presentar una breve síntesis de lo que, a nuestro parecer, refleja las

tendencias y prioridades de investigación sobre laboreo de conservación actualmente planteadas.

La orientación de la investigación futura es función, obviamente, del nivel de conocimientos alcanzado en cada situación particular. Así, en aquellas regiones o zonas agroecológicas en las que se ha constatado la viabilidad agronómica y económica del laboreo de conservación, el siguiente paso debería ser la intensificación de los estudios sobre los aspectos medioambientales antes señalados.

Karlen (1990) examina los resultados de las investigaciones sobre laboreo de conservación llevadas a cabo en diferentes estados del Este y Medio Oeste de EE.UU. y establece las necesidades actuales de investigación en cada uno de ellos. En estas regiones se constata la preocupación por los efectos sobre la calidad de las aguas y la tendencia hacia investigaciones para la optimización de las prácticas agronómicas asociadas al laboreo de conservación (manejo de fertilizantes, herbicidas y residuos vegetales, diseño de maquinaria agrícola específica, control del tráfico rodado, intensidad de las labores, etc.).

El laboreo de conservación no puede ser adoptado de manera aislada, sin más. Constituye una herramienta de manejo cuyas prácticas culturales deben ser desarrolladas e investigadas específicamente para cada tipo de suelo y clima. Problemas importantes en regiones semiáridas, por ejemplo, pueden no serlo en zonas tropicales húmedas. El diseño de estas prácticas debe ser tal que el sistema de laboreo de conservación, en su conjunto, resulte lo suficientemente flexible para que pueda ser adaptado a las exigencias particulares de cada agricultor.

Por lo que respecta a las regiones en las que no se dispone de información suficiente, así como en aquellas en las que por razones socioeconómicas se prevea el interés potencial del laboreo de conservación, el planteamiento de nuevas investigaciones debería hacerse teniendo en cuenta las observaciones y sugerencias de la ISTRO (van Ouwerkerk, 1992). En primer lugar, la experimentación debe plantearse a largo plazo para comprobar los efectos positivos o negativos a corto plazo de los sistemas ensayados en distintos ambientes. En segundo lugar, deberían normalizarse y coordinarse los métodos de investigación a nivel regional al objeto de posibilitar la comparación de resultados y su aplicación a regiones similares, evitándose con ello la duplicidad de los estudios.

Por último, también sería deseable la constitución de equipos multidisciplinarios en el seno de programas de investigación específicos, a fin de llegar a una evaluación más rigurosa de la viabilidad del laboreo de conservación.

1.3. EL LABOREO DE CONSERVACION EN ESPAÑA

Según el análisis bibliométrico realizado, la posición de nuestro país en el contexto mundial de la producción científica sobre laboreo de conservación no es muy relevante (Arrúe y López, 1991). Mientras que en el período 1975-79 no aparecía ninguna referencia española sobre el tema, en el trienio 1987-89 España contribuye con la mitad de los trabajos contabilizados para la región mediterránea. Esta mayor participación hay que atribuirla a la celebración en Madrid, en octubre de 1986, del I Simposium sobre Mínimo Laboreo en Cultivos Herbáceos. A continuación se resumen los resultados y conclusiones alcanzados en los estudios llevados a cabo en España sobre laboreo de conservación.

1.3.1. Breve reseña de las experiencias iniciadas

Al margen de la aparición de nuevos herbicidas, distintos factores socioeconómicos (encarecimiento de la mano de obra y de los costes de producción, bajos precios de mercado, etc.) han favorecido en España el desarrollo de programas específicos para la mejora de los principales cultivos leñosos de clima mediterráneo (olivo, vid, almendro, etc.), en los que el laboreo de conservación se ha propuesto como alternativa al sistema tradicional de manejo del suelo. En el caso del olivar, el comienzo de la experimentación sobre laboreo de conservación se remonta a los primeros años de la década de los sesenta, con ensayos de no laboreo (Frías y González, 1971; García de Repáraz, 1971), a instancia de algunos productores de fitosanitarios (Pastor et al., 1985), que dan lugar, posteriormente, al establecimiento de una red de ensayos en explotaciones olivareras colaboradoras (MAPA, 1983). En la actualidad, la investigación se centra básicamente en Andalucía (Giráldez et al., 1990b; Pastor, 1990). En otras regiones también se han iniciado experiencias; en el caso de Aragón, habría que mencionar las incluidas dentro del Programa de Mejora del Olivar Turolense (DPT, 1989). Con relación a los trabajos en viñedo, habría que mencionar, en orden cronológico, los ensayos de no laboreo iniciados a comienzos de la década de los setenta en el Marco de Jerez de la Frontera (García de Luján, 1990). Más tarde, la experimentación se establece en Aragón y La Rioja (Zaragoza, 1988; Zaragoza et al., 1990). Por otro lado, hay que destacar también los trabajos de Pomares (1975) y Juste et al. (1986, 1988) en cítricos. Por último, es a mediados de los ochenta cuando se inician en Andalucía trabajos sobre laboreo de conservación para la mejora del almendro (Saavedra, 1990).

Por lo que respecta a la experimentación sobre laboreo de conservación en cultivos herbáceos, podría decirse que ésta se inicia en nuestro país a principios de los años ochenta, estando actualmente extendida por diferentes regiones geográficas. De los trabajos realizados hasta la fecha, habría que destacar, en primer lugar, las experiencias pioneras llevadas a cabo en Castilla y León (García y González, 1985; García, 1990); en Andalucía, los trabajos de Giráldez et al. (1985, 1989), Mesa et al. (1986), Pelegrín et al. (1988, 1990), Valera et al. (1990) y Muriel et al. (1991); y en Castilla-La Mancha los de Rodríguez y Lacasta (1985) y Ballesteros y Guerrero (1986). De los trabajos realizados en la zona Centro hay que mencionar los del Departamento de Ingeniería Rural de la ETSIA de Madrid (Hernández et al., 1985; Sánchez-Girón, 1986; Hernández y Sánchez-Girón, 1988). En Navarra, el Instituto Técnico y de Gestión del Cereal diseña un plan experimental sobre no laboreo en cereales, iniciado en 1985 en distintas zonas

agroclimáticas de la región (Arnal, 1985, 1990a). Por último, habría que citar también, las experiencias de Monsanto España, S.A., en distintos puntos de la geografía española (Costa y Marfull, 1985; Valera, 1986; Costa, 1989; Valera y Costa, 1989), las iniciadas en Aragón en 1989 (CTTPV, 1992; López y Arrúe, 1992; P. Pérez, comunicación personal) y más recientemente en Cataluña (Gil et al., 1992; Cantero y Vilarrosa, 1993).

1.3.2. Balance de resultados

Un análisis global de los estudios hasta la fecha realizados sobre la respuesta de suelo y cultivo al laboreo de conservación en distintas situaciones agroclimáticas, nos indica que los objetivos de tales estudios se han orientado, preferentemente, hacia tres aspectos principales: a) propiedades físicas y mecánicas del suelo; b) conservación de agua y suelo; y c) análisis económico.

En la Tabla 1 se intenta sintetizar los resultados, a nuestro juicio más relevantes, sobre el primero de tales aspectos. A pesar de las diferentes condiciones de los ensayos considerados (tipo de suelo, cultivo, climatología, años de experimentación, topografía, metodologías empleadas, etc.), parecen detectarse ciertas tendencias de carácter general en la respuesta del suelo al laboreo de conservación. En primer lugar, se observa, prácticamente en todos los casos de estudio, un descenso de la capacidad de infiltración de agua en el suelo no labrado o labrado con laboreo reducido con respecto a un suelo bajo laboreo tradicional. Este hecho, en contraposición con la observación generalizada de una mayor infiltración con laboreo de conservación, puede ser debido a que la mayoría de los ensayos corresponde a cultivos leñosos en los que la medida de la infiltración se ha llevado a cabo en suelo desnudo o con escasa presencia de restos vegetales, favoreciendo la formación de una costra superficial (Pomares, 1975; Pastor et al., 1985; Juste et al., 1988; Pastor, 1989). Por el contrario, la tasa de infiltración aumenta en no laboreo en presencia de una cubierta vegetal adecuada (Pomares, 1975; Lasanta y Sobrón, 1988; Pelegrín, 1988).

En segundo lugar, puede decirse, también de manera generalizada, que el grado de compactación en los primeros centímetros del suelo aumenta en los tratamientos de laboreo de conservación, especialmente en los de no laboreo. En el caso de los cultivos leñosos este hecho guarda relación, de nuevo, con la formación de una costra superficial por ausencia de cubierta vegetal. A mayor profundidad en el perfil la compactación en no laboreo puede ser similar a la del laboreo tradicional (Pelegrín et al., 1988) e, incluso, inferior por ausencia de suela de labor (Pomares, 1975).

Por último, en la Tabla 1 se observa cómo la reserva de agua en el suelo bajo laboreo de conservación difiere notablemente de unas experiencias a otras. En todos los casos, la valoración del efecto se ha basado en el seguimiento del perfil hídrico del suelo durante el período experimental. Mientras que, en general, existe concordancia entre capacidad de infiltración y grado de compactación, no parece haberla entre capacidad de infiltración y almacenamiento de agua. Ello puede ser debido a que el balance hídrico en el suelo está condicionado no sólo por el tipo de laboreo sino también, entre otros factores, por la oportunidad y condiciones en las que se dieron las labores, las necesidades hídricas de cada cultivo y las particulares condiciones climáticas en las diferentes etapas

Tabla 1. Cuadro-resumen de resultados obtenidos en experiencias de laboreo de conservación en distintas regiones españolas.

CULTIVO	PROVINCIA	TEXTURA DEL SUELO	AÑOS	RESERVA DE AGUA						REFERENCIA
				INFILTRACION		DE AGUA		COMPACTACION		
				LR	NL	LR	NL	LR	NL	
Olivo	Córdoba	FA	5			0				Pastor et al. (1985)
	Córdoba	L	6		-	0				Pastor et al. (1985)
	Córdoba	FA	5		-				+	Pastor (1989)
	Córdoba	FAa	3		-				+	Pastor (1989)
	Jaén	FA	11		-					Pastor (1989)
	Cordoba	-	-						+	Pastor (1990)
Vid	Zaragoza	FAa	3	-	-	+	0	0	+	Zaragoza (1988)
	Zaragoza	F	3	-	-	0	-	0	+	Zaragoza (1988)
	La Rioja	-	-	-	+					Lasanta y Sobrón (1988)
Cítricos	Valencia	FA	5		-				+	Pomares (1975)
	Valencia	Fa	3	0	-	0	-	0	+	Juste et al. (1988)
Cereal	Madrid	FL	4				0		0	Hernández y Sánchez-Girón (1988)
	Madrid	FA	3						+	Sánchez-Girón et al. (1991)
Cereal-girasol	Sevilla	FAa	3		-		0		+	Pelegrín et al. (1990)
Cereal-girasol-leguminosa	Sevilla	A	5		0		+			González et al. (1988)
	Sevilla	F/FA	4		-		0		+	Muriel et al. (1991)
	Sevilla	A	4		-		+		+	Muriel et al. (1991)
	Cádiz	F	4		-		+		+	Muriel et al. (1991)
	Cádiz	A	4		-		+		+	Muriel et al. (1991)

LR: Laboreo reducido; NL: No laboreo

Fa: Franco-arenosa; F: Franca; FL: Franco-limosa; L: Limosa; FAa: Franco-arcillo-arenosa

FA: Franco-arcillosa; A: Arcillosa.

+: Aumento; 0: Sin efecto; -: Descenso; 0̇: Sin efecto y/o tendencia al aumento; 0̇: Sin efecto y/o tendencia al descenso.



de desarrollo del cultivo.

De igual manera que ocurre a nivel mundial, en España, el número de estudios sobre control de erosión agrícola y laboreo de conservación es aún escaso si bien tiende a aumentar en los últimos años (Arrúe y López, 1991). La desproporción entre degradación del suelo, debida entre otros factores a un manejo inadecuado, y la investigación orientada a su control, es mucho más notoria en regiones con alto riesgo de erosión. En la región mediterránea, donde actualmente una de las causas determinantes de la erosión agrícola es un excesivo trabajo del suelo, y donde sólo los agricultores más avanzados utilizan sistemas de laboreo reducido (Giordano, 1988), resulta necesario impulsar aún más las investigaciones sobre laboreo de conservación.

En el caso concreto de España, las cifras de pérdida de suelo bajo diferentes usos y aprovechamientos son realmente graves. Según las estimaciones del ICONA (1986-1988), las pérdidas de suelo en áreas de secano superan ampliamente los límites de tolerancia comunmente aceptados. Por tanto, la adopción de prácticas de laboreo de conservación en nuestro país podría suponer una reducción importante de la erosión (Arrúe y López, 1991; González et al., 1991). Los primeros trabajos realizados en este sentido así lo parecen indicar. Giráldez et al. (1989) estiman que en la campiña cordobesa la reducción de las pérdidas de suelo bajo siembra directa en cultivos como el trigo y el girasol puede ser hasta de un 90% con respecto a las que tienen lugar bajo laboreo tradicional. Con sistemas de mínimo laboreo, esta reducción puede suponer alrededor del 50% para el caso de cultivos de cereal en la provincia de Madrid (Garrido et al., 1992). Por otro lado, Giráldez et al. (1990b) encuentran, en olivar bajo no laboreo, que las pérdidas de suelo se reducen, aproximadamente, en un 78% frente al laboreo tradicional. En condiciones de laboratorio, con muestras de suelo inalteradas, la reducción es de un 88% (Giráldez et al., 1990b; Pastor et al., 1990). Por último, Lasanta y Sobrón (1988) observan que el no laboreo en viñedo reduce las pérdidas de suelo en un 18% y en un 76% con relación al laboreo tradicional efectuado siguiendo las curvas de nivel y perpendicularmente a las mismas, respectivamente. En conjunto, los estudios sobre viabilidad del laboreo de conservación como sistema para el control de la erosión se encuentran en una fase que podríamos calificar de preliminar y deberían, por tanto, intensificarse.

La reducción de costes de explotación con sistemas de laboreo de conservación frente al laboreo tradicional es un aspecto positivo comprobado en diferentes experiencias (Sánchez-Girón et al., 1987; Arnal, 1990b, 1990c, 1992; Pastor, 1990; Hernánz, 1990; Hernánz et al., 1992). Según las cifras que dan estos autores, la reducción en el número de horas de uso de tractor puede ser del orden de un 60% a un 85% en no laboreo y de un 20% a un 40% en laboreo reducido, lo que implica un importante ahorro de combustible, de un 40% a un 75% en no laboreo y del orden del 30% en laboreo reducido.

Desde el punto de vista de la producción, consideraremos, en primer lugar, algunos resultados de las experiencias realizadas con cultivos herbáceos. Del balance de la información obtenida por Arnal (1990b) en un total de 83 ensayos en Navarra, se desprende que las producciones con no laboreo en trigo, cebada y colza no difieren significativamente de las obtenidas con laboreo tradicional; únicamente en el caso de la cebada se aprecia un ligero descenso de producción (2,5%). Este mismo autor (Arnal, 1990c), en un análisis de tres años de datos de producción de trigo y cebada, obtenidos en

154 parcelas por 27 agricultores colaboradores, encuentra en trigo con no laboreo un aumento de producción de un 17% y con laboreo reducido un ligero descenso (1,3%), mientras que en cebada no se aprecia ninguna diferencia con no laboreo y sí un ligero descenso (2,6%) con laboreo reducido. Por su parte, Hernández et al. (1992) evalúan los resultados obtenidos en la zona Centro, para tres cultivos extensivos durante el período 1983-1991, y mientras que no encuentran diferencias de producción apreciables en cebada, sí lo hacen en trigo, con incrementos de un 12% y de un 10% en no laboreo y laboreo mínimo, respectivamente. Por último, Costa (1989) presenta los datos de producción de tres campañas agrícolas (período 1985-87), correspondientes a los ensayos de laboreo de conservación en cereal y en rotación cereal-girasol, establecidos por Monsanto España en la zona Norte y en Andalucía, respectivamente. En la zona Norte, con laboreo mínimo se obtiene un incremento medio de producción de un 2% a un 9%, mientras que con no laboreo el resultado oscila entre una pequeña disminución de un 0,7% y un aumento de un 6% con respecto al laboreo tradicional. En cuanto al cultivo de girasol, mientras que en estas tres campañas la producción fue prácticamente la misma bajo siembra directa y laboreo tradicional, en la campaña 1988-1989 se observa una mejora de producción en el sistema de no laboreo, con un incremento de un 16% frente al sistema tradicional (Monsanto, 1990); tras el cultivo de girasol, la producción de trigo bajo mínimo laboreo aumentó entre un 8 y un 12%, incremento que en la campaña 1988-1989 fue de tan sólo un 4%.

Por otro lado, se ha observado una mejora en los rendimientos de cultivos leñosos bajo laboreo de conservación. Según Pastor (1990), el aumento medio de producción en olivar bajo no laboreo con suelo desnudo es de un 16% con respecto al tradicional y en algunos casos superior al 40%. En el caso de la vid, Zaragoza (1988) encuentra que la producción con laboreo de conservación es igual o superior a la obtenida con laboreo tradicional (incrementos del orden del 16% bajo no laboreo en dos de los ensayos considerados y de un 22% con mínimo laboreo en uno de ellos). Para este mismo cultivo, García de Luján y Bustillo (citados por Pastor, 1990), observan también mayor producción en no laboreo en cuatro de los seis ensayos realizados. Por último, Pastor (1990) reseña cómo se obtiene también mayor producción con no laboreo en otros cultivos (almendro, plantas aromáticas).

A la vista de los resultados que acabamos de mencionar, puede concluirse que, en general, las producciones de cultivos herbáceos no se ven afectadas de forma sustancial por el sistema de laboreo utilizado y que la tendencia al aumento de producción que se observa bajo laboreo de conservación es mucho más manifiesta en el caso de los cultivos leñosos.

En los casos de estudio comentados, y a tenor de los rendimientos obtenidos, el interés de los sistemas de laboreo de conservación quedaría fuera de duda. Sin embargo, de acuerdo con Costa (1989) y Hernández (1990), la adopción de dichos sistemas debe estar fundamentada más en la reducción de costes que en el aumento potencial de producción. La simplificación de las labores en laboreo de conservación, con el consiguiente ahorro de combustible, va acompañada de un aumento de costes en otros conceptos (fitosanitarios, semillas, etc.), lo cual no siempre conduce a una mejora en el rendimiento económico de la explotación. Así, la relación producción/costes en una rotación trigo-leguminosa es claramente favorable al laboreo de conservación (45% de incremento), mientras que en

monocultivo de cebada no se aprecian diferencias significativas (Hernández et al., 1992). Igualmente, Arnal (1990b) obtiene un incremento medio de un 20% en el rendimiento económico de trigo, cebada y colza bajo no laboreo. En otro estudio, referido sólo a trigo y cebada, este porcentaje alcanza el 27%, siendo inferior (9,5%) en laboreo reducido (Arnal, 1990c).

Finalmente, podríamos completar este balance de resultados con unas consideraciones generales, síntesis de las conclusiones alcanzadas en las reuniones de carácter científico y técnico celebradas en los últimos años sobre laboreo de conservación (I Simposium sobre "Mínimo Laboreo en Cultivos Herbáceos", celebrado en Madrid en Octubre de 1986; Seminario sobre "Laboreo de Conservación en la Agricultura de los Países Desarrollados", Madrid, Febrero de 1990; Jornadas Técnicas sobre "El Agua y el Suelo: Laboreo de Conservación", Sevilla, Mayo de 1990; Jornadas sobre "Reducción de Costes de Producción en Agricultura", Valladolid, Octubre de 1990). La experimentación iniciada y realizada en nuestro país muestra, en términos generales, la viabilidad del laboreo de conservación, no sólo desde el punto de vista agronómico, como alternativa para la reducción de costes de producción, sino también, desde el punto de vista medioambiental, como sistema de manejo del suelo menos agresivo. Sólo será posible establecer recomendaciones fiables para la aplicación de las distintas opciones de laboreo de conservación a través de una intensificación en los programas de investigación, que deberá contar con el apoyo y estímulo desde las instituciones oficiales competentes.

1.3.3. Perspectivas de adopción del laboreo de conservación

Tal como se ha señalado, en la mayoría de las regiones españolas existe algún plan de experimentación encaminado a estudiar la idoneidad del laboreo de conservación. La información disponible hasta el momento responde a lo que podríamos llamar etapa de investigación preliminar, sin que en ningún caso, con la excepción, quizá, de la disponible ya en Andalucía para cultivos como el olivo, la rotación trigo-girasol, etc., se cuente con resultados a largo plazo. Este es, precisamente, uno de los principales factores que parecen limitar la adopción del laboreo de conservación en nuestro país.

La actitud tradicional del agricultor español frente a la introducción de nuevos métodos de labranza puede ser debida, en parte, a la necesidad de una reconversión técnica en relación con los equipos y prácticas de manejo (Fernández-Quintanilla, 1988). En este mismo sentido, una encuesta realizada por Monleón (1986), en Castilla-León, Castilla-La Mancha y Andalucía, puso de relieve que la posición más favorable al laboreo de conservación es la de los agricultores técnicamente más avanzados.

Actualmente, la superficie cultivada con alguna práctica de laboreo de conservación es ciertamente poco relevante, lo cual impide, por el momento, ofrecer datos por regiones acerca del grado de adopción de las mismas. No obstante, comienzan a darse en nuestro país cifras de cierta significación. González et al. (1991) señalan que el laboreo reducido se practica actualmente en la campiña andaluza en más de treinta mil hectáreas. Ello es reflejo, sin duda, de un creciente interés por parte del agricultor sobre el laboreo de conservación en dicha región. Así, en una encuesta llevada a cabo en Andalucía sobre la aceptación del laboreo de conservación por agricultores que ya lo han experimentado en

alguna de sus formas, aproximadamente un 60% de los encuestados lo valoran positivamente (Valera, 1990). Mayor conservación de agua (71% de encuestados), siembra en el momento más oportuno (46%) y ahorro de costes de producción (36%) aparecen como las principales ventajas percibidas por el agricultor. Sin embargo, el control de la erosión se contempla sólo como ventaja de segundo orden. Como factores limitantes para una mayor aceptación del laboreo de conservación se mencionan, entre otros, el desconocimiento de los efectos a largo plazo, la carestía de los herbicidas y la necesidad de nueva maquinaria. No obstante, la reducción de costes de producción que impone la actual Política Agraria Comunitaria puede favorecer una mayor aceptación del laboreo de conservación, especialmente en las explotaciones de cereal de secano.

1.4. VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

El suelo presenta una variabilidad inherente no siempre detectable a simple vista. De hecho, no es extraño encontrar propiedades del suelo, tanto químicas como físicas, con coeficientes de variación superiores al 100% (Warrick y Nielsen, 1980; Vauclin, 1983).

La naturaleza y magnitud de la variabilidad espacial del suelo debe tenerse en cuenta, por tanto, en el planteamiento de toda experimentación de campo. Esto es especialmente importante en ensayos de carácter agronómico en los que, con frecuencia, las diferencias entre tratamientos no resultan estadísticamente significativas (Mulla et al., 1990; Frye y Thomas, 1991). La principal fuente de esta falta de significación se debe, en la mayoría de los casos, a la heterogeneidad del suelo dentro de la propia área experimental. Ello se traduce en una fuente adicional de variabilidad cuyos efectos son difícilmente separables de los debidos exclusivamente a los tratamientos impuestos (van Es et al., 1989; Mulla et al., 1990).

Durante mucho tiempo la variabilidad de las propiedades del suelo ha sido considerada en términos de estadística convencional, asumiendo que las observaciones en el campo de una determinada variable son independientes entre sí y que sus valores se distribuyen en el espacio de forma totalmente aleatoria. Así, se ha aceptado, bajo esta asunción, que cualquier propiedad puede ser representada por su media y su varianza, siempre que el tamaño de la muestra sea suficientemente grande (Vauclin, 1983). Sin embargo, recientemente se ha demostrado que las propiedades del suelo no siempre se distribuyen de forma completamente aleatoria, sino que presentan dependencia espacial (Vieira et al., 1983; Warrick et al., 1986). En estos casos, para la caracterización de esta distribución espacial se debe recurrir a la Geoestadística, como alternativa a la estadística clásica cuyos procedimientos resultan ahora inadecuados.

Los fundamentos de la Geoestadística están basados en la Teoría de las Variables Regionalizadas, la cual, desarrollada por Matheron (1963), expresa básicamente la idea de que observaciones próximas en el espacio tienden a ser más parecidas que aquéllas separadas por mayores distancias. Así, se dice que una variable está "regionalizada" cuando sus observaciones siguen un patrón de distribución espacial. Aunque inicialmente se desarrolló en el campo de la Minería (Journel y Huijbregts, 1978), la Geoestadística ha encontrado aplicación posterior en otras disciplinas, como en Hidrología (Samper y Carrera, 1990), Ecología (Rossi et al., 1992), Edafología (Warrick et al., 1986), etc. La caracterización geoestadística del suelo, como recurso natural, se ha enfocado, igualmente, desde muy diferentes puntos de vista: agronómico (Vieira et al., 1983; Muñoz-Pardo et al., 1990), medioambiental (Wopereis et al., 1988, Hardy et al., 1991), cartográfico (Burgess y Webster, 1980a,b; Mausbach y Wilding, 1991; McBratney et al., 1991), climatológico (Martínez-Cob y Cuenca, 1992), optimización de esquemas de muestreo (McBratney et al., 1981; Enz y Chang, 1991), etc.

La elección de un diseño experimental adecuado puede suponer la obtención de resultados más precisos y fiables, un ahorro de costes y esfuerzo, y servir de guía en la planificación de futuros ensayos (Maindonald, 1992). En el caso de que el área experimental se caracterice por una importante variabilidad espacial de las condiciones de suelo, el hecho de no considerar esta variabilidad en el diseño experimental puede

conducir a interpretaciones erróneas y a resultados inconclusos, así como a una toma de decisiones basada en una información insuficiente (Mulla, 1989).

Actualmente, la investigación agronómica ha llegado a un punto tal que los efectos debidos a los tratamientos son pequeños y, en algunos casos, sólo detectables a largo plazo (van Es et al., 1989; Frye y Thomas, 1991). Frecuentemente, el grado de precisión que requieren tales estudios no se alcanza con los diseños convencionales.

Las experiencias más sensibles a los efectos de la heterogeneidad del suelo son, quizá, aquéllas que por su naturaleza requieren la utilización de grandes parcelas, como es el caso de los ensayos de laboreo, y en las que, por tanto, la repetición es generalmente insuficiente. La ubicación de los ensayos en áreas homogéneas no es siempre una solución adecuada, bien porque éstas no sean representativas de la región a la que los resultados de la investigación deben extrapolarse, o bien por la propia dificultad que supone encontrar grandes áreas de características uniformes. Una segunda opción para reducir, en lo posible, los efectos negativos de la heterogeneidad del suelo es mejorar el diseño experimental y los métodos de análisis estadístico (van Es et al., 1989).

El diseño clásico de bloques completos, al imponer aleatoriedad en la asignación de los tratamientos a las unidades experimentales, tiene en cuenta, en principio, el problema de la variabilidad espacial; sin embargo, en el caso, antes aludido, de una repetición insuficiente, la aleatoriedad por sí sola no asegura que todas las comparaciones entre tratamientos se hagan con igual precisión. Además, en este diseño cada bloque se considera como un área relativamente uniforme, asunción que raramente se cumple en la práctica, especialmente cuando se trata de grandes áreas (van Es et al., 1989). Estos mismos autores señalan las limitaciones de algunos de los diseños experimentales alternativos y que mejor abordan el problema de la heterogeneidad del suelo ("vecino más próximo" y "análisis de tendencia"). Por otro lado, Mulla et al. (1990) indican cómo se puede mejorar significativamente la interpretación de los resultados cuando los efectos negativos de la variabilidad espacial son eliminados mediante el análisis del "vecino más próximo".

Para el caso concreto de ensayos de laboreo, algunos autores han sugerido recientemente una optimización del diseño experimental basada, precisamente, en conceptos geoestadísticos (Zimmerman y Hinz, 1988; van Es et al., 1989, 1990). Así, van Es et al. (1989), tras analizar sus potenciales ventajas y desventajas, proponen un diseño según bloques incompletos, que, aunque especialmente aplicable a la determinación de parámetros de suelo y cultivo en ensayos de laboreo, también puede ser utilizado en otros tipos de experiencias de campo que requieran grandes parcelas.

2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

Una gran parte de la superficie cerealista en Aragón se sitúa en áreas en las que el régimen hídrico del perfil del suelo está condicionado por una climatología árida o semiárida (Alberto et al., 1984; Cuadrat, 1986a). La falta de precipitación y la irregular distribución de ésta a lo largo del período vegetativo del cultivo constituyen dos factores limitantes cuyas consecuencias son bajos rendimientos en las cosechas y variabilidad en las producciones (Alberto y Machín, 1978; de los Ríos, 1984; Martí, 1992). Igualmente, en muchas situaciones las características del suelo, especialmente la profundidad útil, condicionan notablemente los rendimientos (Alberto et al., 1979).

En los últimos años, la preocupación y sensibilidad ante el problema expuesto se ha visto reflejada en distintas reuniones y seminarios (Jornadas sobre "El Sistema Agrario Aragonés. Perspectivas y Problemas", 1985; Ciclo de Conferencias sobre "El Futuro del Secano Aragonés", 1988; Seminario sobre "El Análisis de los Ecosistemas Agrarios", 1988; Coloquio sobre "El Estado Actual de los Estudios sobre el Secano Aragonés", 1989).

De entre las posibles estrategias contempladas en estas reuniones para la mejora de la explotación cerealista, en función de la actual Política Agraria Comunitaria (PAC), figura de manera destacada la adopción de técnicas de laboreo de conservación (Costa, 1989; Fereres, 1989). Desde el punto de vista del aprovechamiento ganadero en el sistema de año y vez, y ante una eventual transformación de éste -cultivo continuo de cereal o rotación cereal/pradera artificial o forraje-, el estudio de la influencia de la reducción de la profundidad y/o del número de labores sobre la producción de paja y grano en estos sistemas se considera también prioritario (Delgado et al., 1987).

A excepción de las experiencias señaladas en la Introducción, hasta el presente apenas existe en Aragón información sobre la respuesta del cereal de secano al laboreo de conservación. La posibilidad de introducción de este sistema de laboreo en las grandes áreas de cultivos extensivos en Aragón viene justificada, fundamentalmente, por el ahorro de costes y tiempo. De acuerdo con las estimaciones de Caveró (1989), sólomente el coste de combustible en el laboreo tradicional supone un 20-25% del coste variable de la producción; por otro lado, y según datos de 1988 del Servicio de Estudios de Coordinación de la Diputación General de Aragón, de los gastos en semillas, fertilizantes, fitosanitarios y maquinaria en una explotación tipo de cereal de secano, los correspondientes a maquinaria representan un 45-50% del total. Con relación al ahorro de tiempo, Caveró (1989) concluye que con el sistema de siembra directa en un secano semiárido se podría conseguir, frente al sistema tradicional, un reducción de 3 a 4 horas/ha. Ahora bien, dado el elevado coste de la maquinaria específica del laboreo de conservación, sería conveniente orientar al agricultor hacia prácticas de conservación con la maquinaria que ya posee. La adquisición de nuevos equipos (máquinas de siembra directa, trenes de siembra, etc.) tendría que hacerse a través de agrupaciones de agricultores, cooperativas

y/o empresas de servicio (CTTPV, 1992).

Aparte de la eficiencia económica de los sistemas agrícolas, la nueva orientación de la PAC tiene también como meta la protección del medio ambiente local. En este sentido, la conservación de los recursos suelo y agua adquiere una especial relevancia. El carácter semiárido de la mayor parte de la Depresión Media del Ebro, la naturaleza de sus suelos, así como las prácticas agronómicas tradicionales, acentúan los riesgos de erosión. Según nuestras estimaciones (Tabla 2), basadas en los mapas de estados erosivos para diferentes cuencas españolas elaborados por ICONA (1987-1988), aproximadamente el 55% de las tierras de secano localizadas tanto en áreas con una pluviometría media anual entre 400 y 500 mm (secanos "semiáridos") como inferior a 400 mm (secanos "áridos"), presentan unas pérdidas de suelo anuales superiores a 12 t/ha. Márquez (1991) señala también cómo casi el 50% de la superficie de Aragón requiere un control de la erosión, especialmente en las zonas de interés agrícola más áridas, para las que propone un manejo adecuado de los suelos a través de técnicas de laboreo de conservación.

Tabla 2. Distribución en la Depresión Media del Ebro de áreas con pluviometría inferior a 500 mm y de la superficie de éstas correspondiente a tierras de secano afectadas por una pérdida de suelo anual superior a 12 t/ha (Arrúe y López, 1991).

Áreas con pluviometría media anual	Provincia	Superficie	Áreas de secano*	Áreas de secano con pérdidas de suelo >12 t ha ⁻¹ año ⁻¹
			%	
< 400 mm	Huesca	25,5	36,1	53,0
	Zaragoza	55,5	59,8	50,1
	Teruel	26,8	77,0	59,3
400 - 500 mm	Huesca	18,0	41,1	44,3
	Zaragoza	36,1	76,0	67,1
	Teruel	49,8	94,2	58,1

* Datos estimados considerando todos los usos del suelo excepto los de regadío.

En Aragón, y al igual que en el resto de España, la cebada (*Hordeum vulgare* L.) es el cultivo herbáceo que más superficie cultivada ocupa. Según cifras del Gobierno de Aragón (1993), de la superficie total dedicada en 1992 al cultivo de cereales para grano (856.788 ha), un 63% corresponde al de cebada; de esta última superficie, un 87% se cultiva en condiciones de secano. El sistema tradicional de cultivo en las zonas más áridas es la rotación cebada-barbecho (cultivo de "año y vez").

La utilidad del año de barbecho en el sistema de año y vez, aspecto controvertido en la agricultura de secano, está aún por demostrar en distintas regiones, entre ellas la aragonesa (Cavero, 1989). La eficiencia del barbecho ha sido cuestionada desde muy diferentes puntos de vista (rentabilidad de la explotación agrícola, ahorro de agua, mejora de la fertilidad del suelo, control de la erosión y aprovechamiento ganadero, entre otros).

Casallo (1964) y Mateo Box (1989) revisan desde una perspectiva histórica no sólo estos aspectos sino también las alternativas al sistema tanto dentro como fuera de España. En otras zonas semiáridas, en las que se ha evidenciado una baja eficiencia del barbecho en cuanto a almacenamiento de agua y una baja producción de forraje para el ganado, se ha planteado la posibilidad de sustituir la rotación cebada-barbecho por un cultivo continuo de cebada o una rotación cebada-leguminosa forrajera (Cooper et al., 1987a). Esta última rotación también ha sido considerada como alternativa para un mejor aprovechamiento ganadero en el secano aragonés (Delgado, 1989). Según Vomocil (citado por Costa y Marfull, 1985), en ciertas regiones de clima seco y suelos poco profundos los sistemas de laboreo de conservación permiten el cultivo continuo de cereales frente a la alternativa cereal-barbecho.

Todos estos antecedentes resaltan el interés de conocer la viabilidad del laboreo de conservación en el secano aragonés. El planteamiento del presente estudio surge de la confluencia de este interés y la necesidad planteada por la Sección de Técnicas Agrarias -actualmente Centro de Transferencia Tecnológica en Producción Vegetal- del Servicio de Producción y Sanidad Vegetal de la Diputación General de Aragón, en dar respuesta a las demandas continuas del agricultor sobre este particular.

Por todo ello, se creyó conveniente iniciar una investigación con los siguientes objetivos principales:

a) Evaluar el efecto del laboreo de conservación (laboreo reducido y no laboreo) sobre el almacenamiento de agua en el suelo en distintas zonas de producción de cebada de secano en Aragón.

b) Conocer la influencia de tales prácticas en el estado físico del suelo, a través del grado de compactación y de cambios en la estructura del suelo.

c) Analizar la respuesta del cultivo en desarrollo y rendimiento a cada sistema de laboreo de conservación.

La consecución de estos objetivos lleva implícito la evaluación de la eficiencia del barbecho, en el sistema de año y vez, en el aprovechamiento del agua de lluvia y en la posterior respuesta del cultivo, tanto con un manejo del suelo tradicional como con laboreo de conservación.

3. MATERIAL Y METODOS

3.1. SITIOS EXPERIMENTALES

3.1.1. Localización

En atención al planteamiento y objetivos del estudio, anteriormente enunciados, se procedió a la elección de cuatro sitios de ensayo. En la Tabla 3 y Figura 5 se indica la ubicación de los mismos dentro del territorio aragonés. Dos de ellos, E1 (EEAD) y E2 (El Vedado), se sitúan en las fincas experimentales de secano de la Estación Experimental de Aula Dei (C.S.I.C.) y de la Diputación General de Aragón, respectivamente. Los otros dos, E3 (Hijar) y E4 (Banastás), en fincas particulares de agricultores colaboradores.

3.1.2. Criterios de elección

En la selección de los ensayos se ha tratado de satisfacer, por un lado, el interés y demanda del sector agrícola en determinadas comarcas por conocer la posibilidad de sistemas de labranza alternativos y, por otro, el carácter específico de su respuesta en función, principalmente, de las condiciones locales de clima y suelo. Por otro lado, el planteamiento a medio-largo plazo de este tipo de experimentación exigía, en primer lugar, que la continuidad de los ensayos estuviera garantizada, y que éstos fueran representativos de las principales zonas cerealistas del secano aragonés. Por último, la ubicación definitiva de los sitios de ensayo se estableció tras un reconocimiento preliminar de la heterogeneidad espacial del suelo y de la historia previa de cultivo.

3.1.3. Agroclimatología de las zonas de ensayo

De acuerdo con la caracterización agroclimática de las provincias aragonesas (De León et al., 1987, 1991a,b), en la Tabla 3 se presentan el tipo climático según la clasificación de J. Papadakis y el índice climático de potencialidad agrícola de L. Turc correspondientes a las zonas de ensayo.

En la Tabla 3 se muestran, además, las correspondientes clases de zonas agroclimáticas según el reciente trabajo del Centro de Semillas y Protección Vegetal de la Diputación General de Aragón (CSPV, 1992). Esta última clasificación, desarrollada de manera específica para el cultivo de cereal en las zonas de mayor aridez en el valle del Ebro, además de considerar el índice de productividad de Turc, se basa en un análisis de la sequía y del riesgo de heladas en los meses de primavera. Así, el ensayo E1 corresponde a una zona árida temprana (índice de Turc inferior a 7 y producción media inferior a 1500 kg/ha) y los ensayos E2 y E3 a una zona semiárida temprana (índice de Turc entre 7 y 10 y producción media de 2000 kg/ha, aproximadamente). Por último, el ensayo E4 se sitúa en una zona que, con un índice de Turc superior a 10 y una producción media superior a 3000 kg/ha, queda fuera de esta clasificación; la asignación del término subhúmedo respeta la terminología empleada con anterioridad (Cavero, 1989) para la calificación de los tipos de secano en Aragón, en concordancia con el tipo de clima de la clasificación de Thornthwaite (Liso y Ascaso, 1969).

Tabla 3. Cuadro-resumen de situación y características agroclimáticas de las zonas de ensayo.

	ENSAYOS			
	E1	E2	E3	E4
DENOMINACION	EEAD	E1 Vedado	Híjar	Banastás
LOCALIDAD	Peñaflor (Zaragoza)	Leciñena (Zaragoza)	Híjar (Teruel)	Banastás (Huesca)
LATITUD	41°44'30''N	41°51'30''N	41°04'14''N	42°10'42''N
LONGITUD	0°46'18''O	0°41'16''O	0°21'43''O	0°27'07''O
ALTITUD (msnm)	270	400	440	538
CLASIFICACION AGROCLIMATICA				
Tipo climático según Papadakis ¹	Mediterráneo continental	Mediterráneo continental	Mediterráneo continental templado	Mediterráneo templado
Indice de Turc ²	0-10	0-10	5-15	10-20
Zonas agroclimáticas según C.S.P.V. ³	Árida temprano	Semiárida temprano	Semiárida temprano	Subhúmeda ⁴

^{1,2} De León et al. (1987; 1991a y b).

³ Centro de Semillas y Protección Vegetal, DGA (1992).

⁴ Cervero (1989).

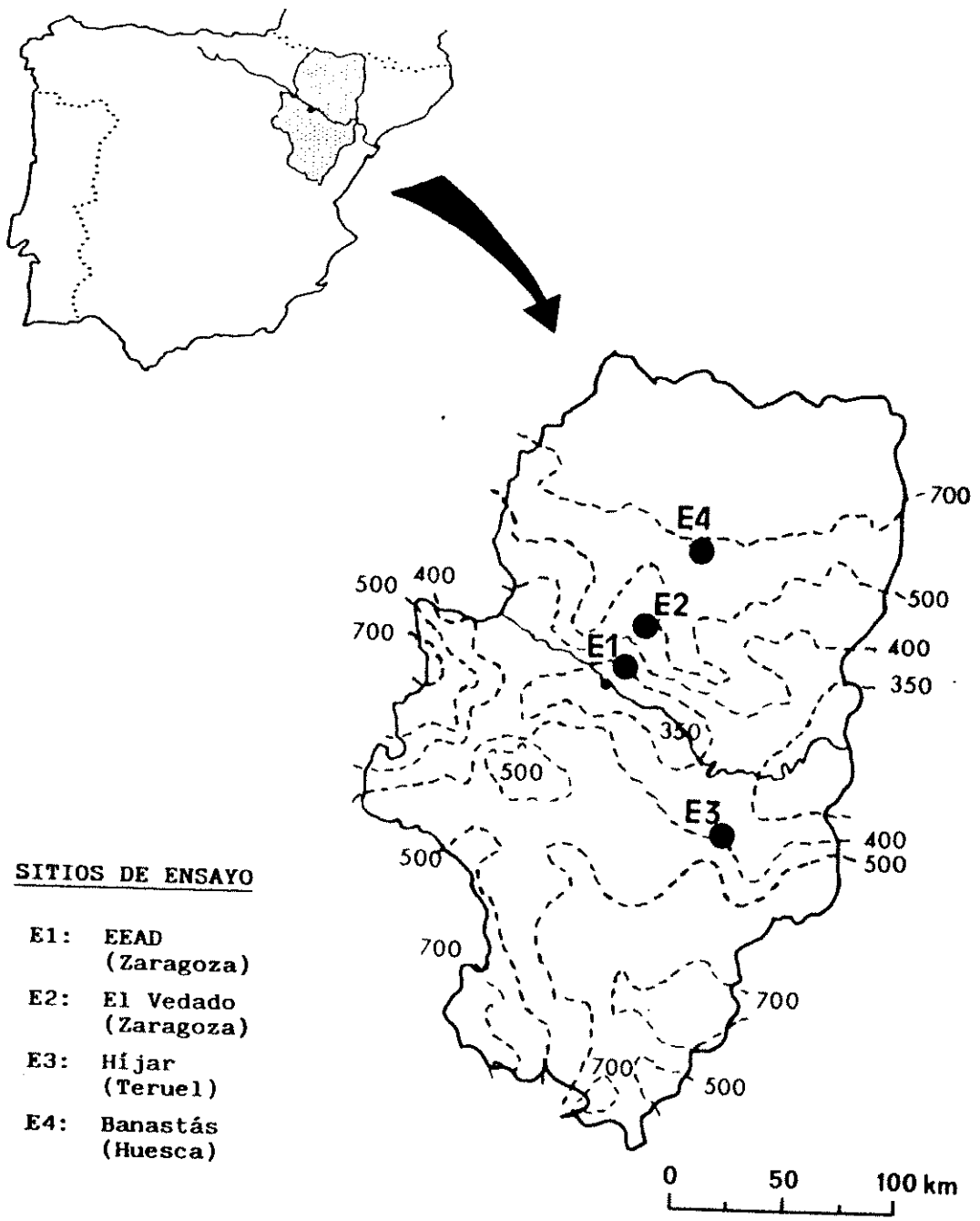


Fig. 5. Localización de los sitios de ensayo. En trazo discontinuo se indican las isoyetas de precipitación media anual (mm).

En síntesis, podría decirse que, según el gradiente de aridez que delimitan, los sitios de ensayo elegidos, además de cumplir las premisas arriba mencionadas, representarían, de manera preferente, a las zonas de producción de cebada de secano con clima árido y semiárido temprano. De acuerdo con las cifras de superficie y producción para el período 1986-91 (CSPV, 1992), estas zonas suponen aproximadamente el 50% de la superficie total de este cultivo en Aragón.

3.2. PARAMETROS METEOROLOGICOS

Las variables meteorológicas que se han considerado en el período experimental del presente trabajo (1990-1992) han sido, fundamentalmente, la precipitación y las temperaturas máxima y mínima del aire en cada uno de los sitios de ensayo. En los ensayos E1 y E2 se han registrado valores diarios de estas variables en las estaciones termopluviométricas 499 (Zaragoza-Aula Dei) y 495 (Zuera-El Vedado), de la red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y operativas en las respectivas fincas experimentales. En los ensayos E3 y E4 (fincas colaboradoras) la precipitación diaria se registró en pluviómetros instalados en las parcelas al comienzo de la experiencia; en estos ensayos, los datos de temperatura del aire fueron los registrados en las estaciones 573 (Alcañiz-Ayuntamiento) y 898 (Monflorite), respectivamente, como estaciones meteorológicas próximas más completas.

Los registros mensuales de precipitación y temperatura del aire en las estaciones meteorológicas mencionadas han sido utilizados para caracterizar el régimen termopluviométrico del año medio en cada sitio de ensayo. Se han considerado los períodos de registro de datos más completos hasta el inicio del trabajo: 1954-1989 para E1; 1966-1989 para E2; 1961-1989 para E3; y 1955-1989 para E4. Para completar la falta puntual de registros en E2, E3 y E4 se tuvieron en cuenta, además, las series de datos de las estaciones de apoyo 495F (Leciñena) para E2, 543 (Ariño) para E3 y 897 (Apies) para E4.

Los valores diarios de precipitación se utilizaron para la determinación del balance hídrico para cada una de las campañas agrícolas (1990-91 y 1991-92) y ensayos considerados. Los datos mensuales de precipitación y temperatura media del aire, tanto para el año medio como para los años experimentales, sirvieron para estimar los regímenes de humedad y temperatura del suelo de acuerdo con el modelo matemático de Newhall, mediante la aplicación del programa de ordenador NSM desarrollado por Van Wambeke et al. (1986). Por último, las temperaturas medias mensuales máxima y mínima, así como la humedad relativa media mensual en las estaciones en que se disponía de este parámetro (E1 y E4), se utilizaron para calcular el déficit de presión de vapor ($e^* - e$), necesario en la estimación de los componentes del balance hídrico según se detalla en el apartado 4.6.3.



3.3. CARACTERIZACION GENERAL DE LOS SUELOS

Con la ayuda de una retroexcavadora (Smalley, modelo 5 W), en cada sitio de ensayo y en el pasillo central entre los bloques de parcelas anuales y parcelas año-vez (apartado 3.5.3.), se abrió una calicata para la descripción morfológica del suelo por horizontes. De cada uno de estos se tomaron muestras de suelo para la caracterización posterior en laboratorio.

En el Anexo I figuran los datos correspondientes a la descripción morfológica y a las propiedades y componentes de los distintos horizontes, obtenidos según la metodología que seguidamente se presenta.

3.3.1. Descripción de perfiles

La descripción de los perfiles se realizó siguiendo la guía de campo elaborada en la U.E.I. de Edafología de la Estación Experimental de Aula Dei según las normas del "Soil Survey Manual" (Soil Survey Staff, 1951) y de la FAO (1977). La designación de los horizontes y la clasificación de los suelos se efectuó de acuerdo con los criterios de la FAO (1989).

3.3.2. Determinaciones analíticas. Propiedades químicas y físicas

La caracterización general de los suelos se llevó a cabo en muestras de suelo secas al aire y tamizadas por malla de 2 mm, a excepción de la densidad aparente, para cuya determinación se utilizaron muestras de suelo inalterado tomadas en cilindros.

a) Propiedades químicas

pH. Se determinó con un pH-metro (Crison, modelo micropH 2001), en suspensiones de suelo en agua y en KCl 1N (relación suelo-solución 1:2,5).

Carbonatos totales. Para su determinación se utilizó un calcímetro manométrico, siguiendo el procedimiento de E. Barahona (Grupo de Trabajo de Normalización de Métodos Analíticos, 1984).

Yeso. El porcentaje en yeso se estimó a través de la pérdida de las dos moléculas de agua de cristalización, por desecación en estufa entre 50 y 150°C durante 24 horas.

Carbono y Materia orgánica. Su determinación se llevó a cabo siguiendo el método de Walkley-Black (MAPA, 1986): oxidación húmeda del carbono orgánico del suelo por ataque con dicromato potásico 1N y ácido sulfúrico concentrado, con la modificación de la valoración del exceso de dicromato por colorimetría (Spectronic 601). El porcentaje de materia orgánica se obtuvo multiplicando el contenido en carbono por el factor empírico 1,72.

Nitrógeno total. Se determinó por el método Kjeldahl (MAPA, 1986).

Conductividad eléctrica (C.E.). Se determinó por medio de un conductímetro Crison, modelo 522, sobre un extracto suelo-agua en relación 1:5. En los casos en los que se obtuvo un valor de C.E. superior a 0,6 dS/m, la C.E. se determinó, asimismo, en el extracto de pasta saturada obtenido según el procedimiento del U.S.S.L. (1954); en este último extracto se determinaron los siguientes iones solubles:

Cloruros, carbonatos y bicarbonatos. Por valoración con electrodos selectivos, en titrimetro Mettler DK-14.

Sulfatos. Por turbidimetría, con espectrofotómetro Pye Unicam SP6/5004V.

Sodio, litio, calcio y magnesio. Por espectrometría de plasma de acoplamiento inducido (ICP), con un espectrómetro Jobin Yvon 38.

Potasio. En fotómetro de llama Perkin-Elmer/Coleman 51Ca.

b) Propiedades físicas

Composición granulométrica. Se determinó a partir de muestras de suelo de 20 g que se dispersaron por agitación mecánica durante 12 h, utilizando hexametáfosfato sódico como agente dispersante, tras la eliminación previa de la materia orgánica por tratamiento con agua oxigenada en caliente. Las clases de tamaños de partícula determinadas fueron las del Departamento de Agricultura de EE.UU. (Soil Survey Staff, 1975): arena (2-0,05 mm) con cinco fracciones (arena muy gruesa, 2-1 mm; arena gruesa, 1-0,5 mm; arena media, 0,5-0,25 mm; arena fina, 0,25-0,1 mm y arena muy fina, 0,1-0,05 mm), limo (0,05-0,002 mm) y arcilla (<0,002 mm). Además, la fracción limo se separó, a su vez, en tres subfracciones (limo grueso, 0,05-0,02 mm; limo medio, 0,02-0,005 mm; limo fino, 0,005-0,002 mm). Las fracciones de arena se separaron por tamizado y las correspondientes a limo y arcilla por el método de la pipeta (Gee y Bauder, 1986). La clase textural del suelo que figura en la descriptiva de los perfiles se determinó según el triángulo de texturas del U.S.D.A. (Gee y Bauder, 1986).

Retención de agua. Para la estimación del agua retenida en el suelo a "capacidad de campo" (-33 kPa) y en el "punto de marchitez permanente" (-1500 kPa) se utilizó un aparato de Richards (Soilmoisture Equipment Corp., Santa Bárbara, CA). Tras saturación en agua durante 24 horas, las muestras de suelo contenidas en anillos de goma, por triplicado, se sometieron a las presiones indicadas, en un extractor de placa cerámica en el primer caso y en un extractor de membrana en el segundo, hasta alcanzar el equilibrio (U.S.S.L., 1954).

Densidad real. Para la determinación de la densidad real (D_r) o peso específico del suelo sin considerar los espacios vacíos, se llevó a cabo por picnometría, en muestras por duplicado, siguiendo el método propuesto por el Grupo de Trabajo de Normalización de Métodos Analíticos (1978).

Densidad aparente. Para la determinación de la densidad aparente (D_a) o peso específico del suelo considerando todos sus poros y espacios internos, se emplearon

muestras naturales de suelo contenidas en cilindros de acero inoxidable de 6 cm de diámetro y 6 cm de altura, tomados por triplicado de cada uno de los horizontes y de 10 en 10 cm hasta una profundidad en el perfil de 80 cm. Tras desecación de los cilindros de suelo en la estufa a 105°C hasta peso constante, la densidad aparente se calculó por referencia del peso de suelo seco al volumen del cilindro.

Porosidad total. El volumen total de poros se calculó a partir de los valores de densidad real y densidad aparente según la expresión:

$$\text{Porosidad total (\%)} = (1 - D_a/D_r) \cdot 100$$

Límites de Atterberg. La determinación del límite líquido y del límite plástico se llevó a cabo en muestras de suelo tamizadas por malla de 420 μm , siguiendo básicamente el método de Sowers (1965). En el caso del límite líquido se empleó un aparato de Casagrande automático (Mecánica Científica, S.A.).

Color. Se determinó mediante la tabla Munsell tanto en húmedo como en seco.

3.4. VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS SUELOS

Las superficies de ensayo en cada sitio experimental se establecieron tras una caracterización de la heterogeneidad del suelo en las áreas previamente seleccionadas. Esta se llevó a cabo mediante aplicación de técnicas geoestadísticas al análisis de la variabilidad espacial de propiedades del suelo de fácil determinación, tal como se detalla seguidamente.

3.4.1. Procedimiento experimental

El contenido de humedad del suelo (W) y el porcentaje de limo más arcilla ($L+A$, fracción $<50 \mu\text{m}$, condicionante de la disponibilidad de agua útil para el cultivo) fueron los parámetros de suelo seleccionados. Estos se determinaron durante la campaña 1989-90, siguiendo la metodología que se indica en los apartados 3.6.1. y 3.3.2., en muestras de suelo tomadas a dos niveles de la capa de labor, 0-20 cm y 20-40 cm, según el esquema de muestreo que se indica en la Tabla 4 y en la Figura 6. La inclusión en los ensayos E1 y E2 de un muestreo adicional siguiendo dos transectos perpendiculares permitía disponer de un mayor número de pares de puntos y de distancias entre pares de puntos menores que las impuestas por el muestreo en malla. El área muestreada en todos los casos fue lo suficientemente extensa como para que las parcelas de ensayo pudieran disponerse en más de un sentido en función de la posible variabilidad espacial, a excepción del ensayo E1 con una menor superficie disponible.

3.4.2. Análisis geoestadístico

El tratamiento geoestadístico de los datos de W y $L+A$ se realizó mediante el programa GEOPACK, amablemente proporcionado por sus autores (Yates y Yates, 1989).

Ya que la mayoría de los métodos geoestadísticos sólo son óptimos si la variable estudiada sigue una distribución normal, ésta fue comprobada con nuestros datos usando el test de Kolmogorov-Smirnov, especialmente ventajoso con muestras de pequeño tamaño (Sokal y Rohlf, 1979). Para ello, se calculó un estadístico del test (KS_t) y se comparó con el valor crítico (KS_c) para una probabilidad de 0,1. Si el valor de KS_t es menor que el de KS_c se acepta la hipótesis de que la distribución que siguen los datos no se diferencia significativamente de una distribución normal. Se seleccionó una probabilidad mayor que 0,05 con el fin de reducir la probabilidad del error de tipo II, siguiendo la recomendación de Rao et al. (citados por Yates y Yates, 1989).

3.4.2.1. Semivariogramas

Una primera etapa en la descripción de la estructura espacial de las propiedades seleccionadas es el cálculo del "semivariograma experimental", definido por:

Tabla 4. Esquema de muestreo seguido para la caracterización de la heterogeneidad del suelo en cada sitio de ensayo.

	Ensayo			
	E1	E2	E3	E4
Superficie caracterizada	1,12 ha	1,56 ha	1,56 ha	1,00 ha
Muestreo en malla cuadrada de:	20x20 m	25x25 m	25x25 m	20x20 m
Muestreo en dos transectos perpendiculares cada:	5,10,15 m	5,10,15 m	—	—
Nº de puntos de muestreo	47	43	25	25
Horizontes de muestreo en la capa arable:	—	—	0-20 cm, 20-40 cm	—
Parámetros de suelo	—	—	W ¹ , L+A ²	—

¹ W, contenido de humedad del suelo (% peso)

² L+A, contenido de elementos finos, limo + arcilla, fracción <50 µm (%)

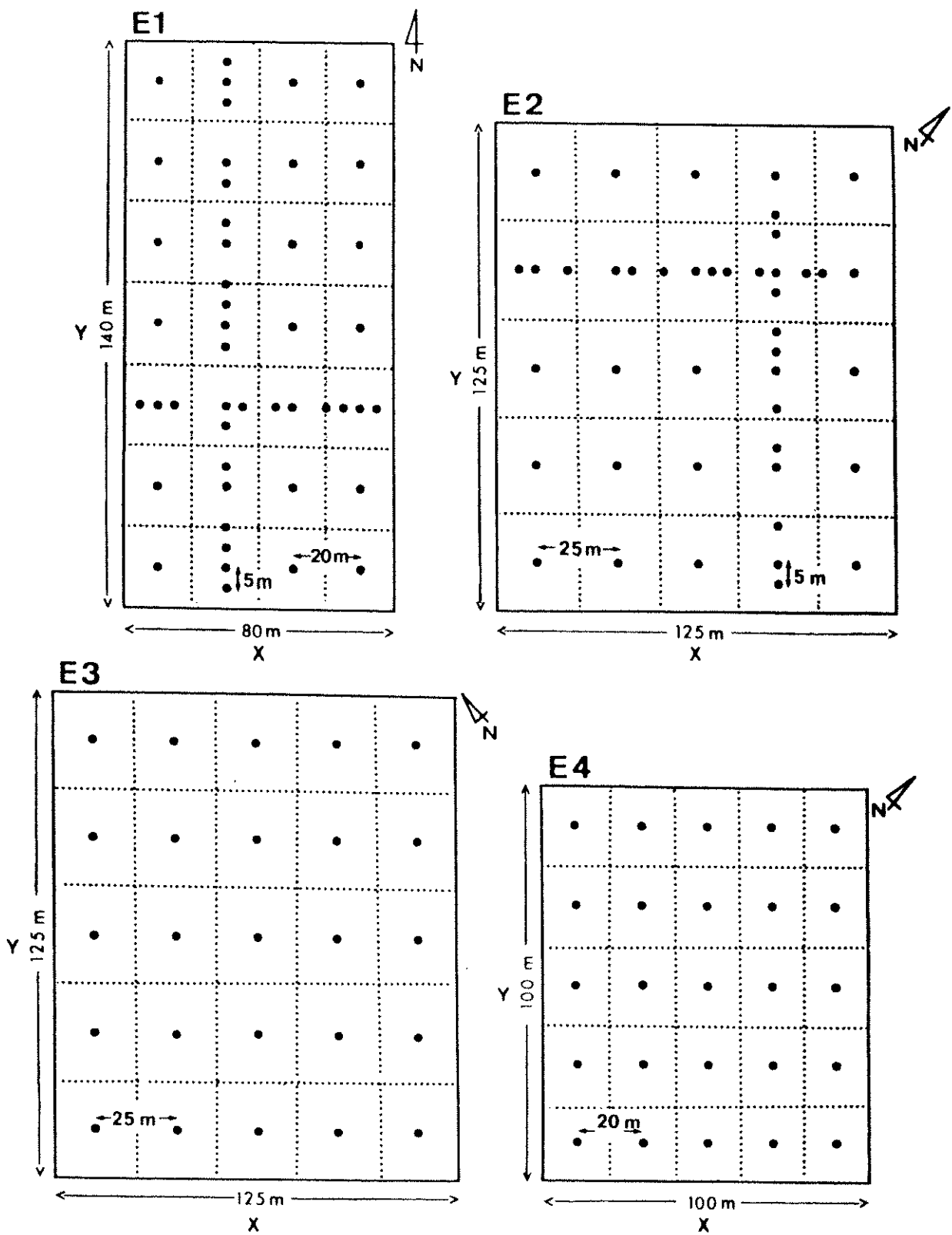


Fig. 6. Esquema de muestreo seguido para la caracterización de la variabilidad espacial del suelo en cada uno de los sitios de ensayo.

$$\gamma(h) = [1/2N(h)] \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$

donde:

$N(h)$ = número de pares de puntos separados por una distancia h ,

$Z(x_i)$ = valor experimental de la variable Z en el punto x_i , y

$Z(x_i+h)$ = valor experimental de la variable Z en el punto x_i+h .

La cantidad $\gamma(h)$ es la "semivarianza", parámetro que puede ser descrito como la mitad del error de estimación del valor de la variable en un punto dado a partir de su observación en otro, siendo h el vector de separación ("lag"). El semivariograma se representa gráficamente dibujando $\gamma(h)$ frente a h , tal como se muestra en la Figura 7.

Los semivariogramas experimentales fueron calculados en los ensayos E1 y E2 para una distancia máxima de 85 y 70 m, respectivamente, es decir, aproximadamente la mitad de la máxima distancia de separación entre puntos de muestreo, de acuerdo con el criterio de Gascuel-Odoux y Merot (1988). Esta recomendación, en cambio, no se siguió en los ensayos E3 y E4 al disponer en ellos de un número de puntos bastante menor; en estos ensayos se consideró un lag máximo de 112 m (E3) y 90 m (E4), ya que a distancias mayores el número de pares de puntos era insuficiente para obtener un valor fiable de la semivarianza.

Una vez obtenidos los semivariogramas experimentales, los datos se ajustaron a modelos matemáticos, siguiendo el procedimiento de ajuste no lineal por mínimos cuadrados de Marquardt (citado por Yates y Yates, 1989), eligiéndose el modelo más apropiado. Para evaluar el grado de bondad del modelo de semivariograma elegido, se utilizó el método de validación cruzada (Vauclin et al., 1983). Básicamente, este método de validación consiste en suprimir del conjunto de datos un valor $Z(x_i)$ y estimar el mismo, $Z^*(x_i)$, a partir del resto por kriging ordinario, según se indica en el siguiente apartado. Así, para un conjunto de n puntos $\{Z(x_i), i = 1 \text{ a } n\}$ disponemos de un conjunto de estimaciones $\{Z^*(x_i), i = 1 \text{ a } n\}$ con sus correspondientes varianzas de estimación $\{\sigma_k^2(x_i), i = 1 \text{ a } n\}$. A través de un proceso iterativo, GEOPACK va probando con diferentes valores de los parámetros del semivariograma hasta que la media de los errores se aproxime a 0 y que éstos sean consistentes con la desviaciones estándar proporcionadas por el kriging, $\sigma_k(x_i)$. Así, la media de los errores reducidos definida por la expresión:

$$R\mu = 1/n \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]/\sigma_k(x_i) \sim 0$$

y la varianza reducida:

$$R\sigma^2 = 1/n \sum_{i=1}^n \{[Z(x_i) - Z^*(x_i)]/\sigma_k(x_i)\}^2 \sim 1$$

se usaron como indicadores para la elección de los parámetros que definen los semivariogramas teóricos (Yates y Warrick, 1987), estableciéndose un compromiso entre una $R\mu$ pequeña y una $R\sigma^2$ cercana a 1.

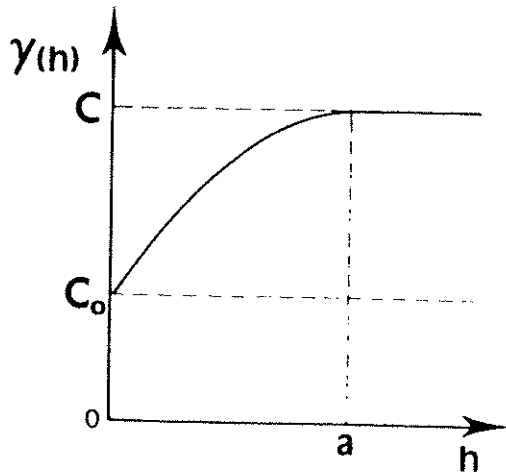


Fig. 7. Parámetros del semivariograma (a : rango; C : meseta; C_0 : efecto pepita).

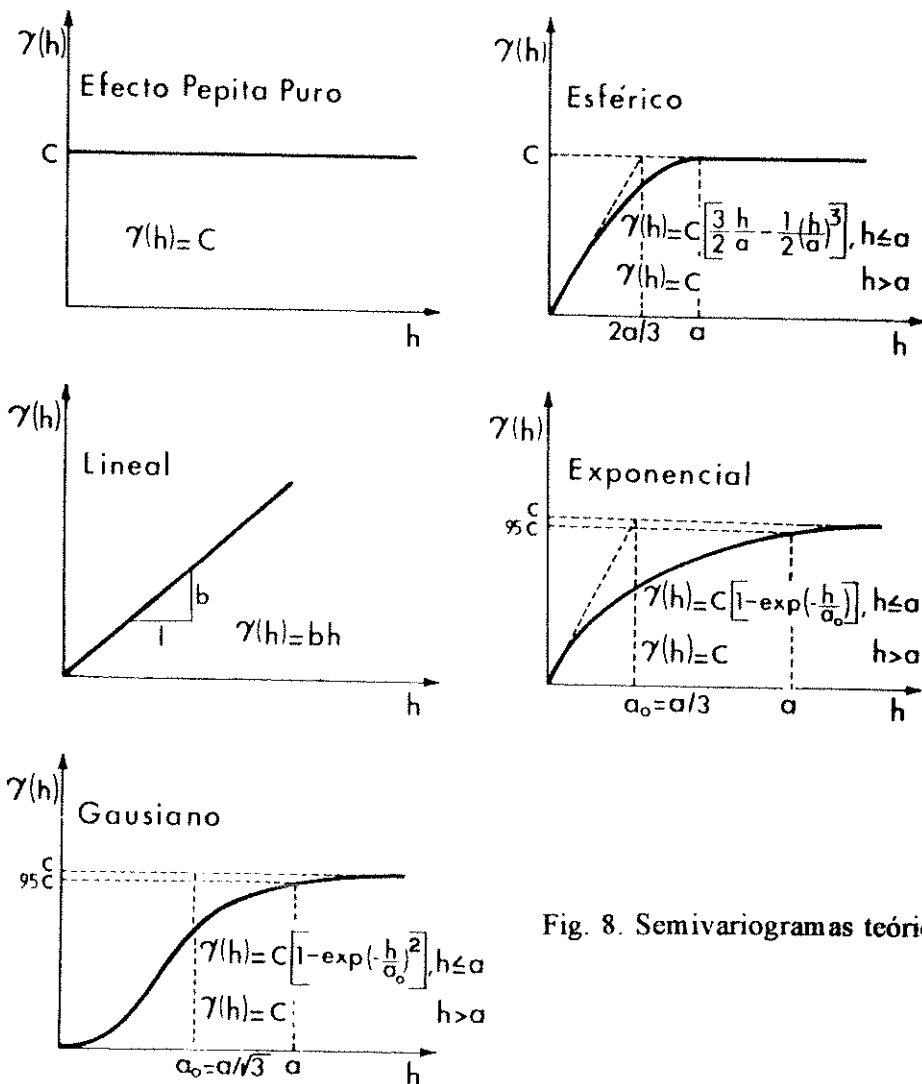


Fig. 8. Semivariogramas teóricos más comunes.

Tal como se muestra en la Figura 7, para una variable que presenta estructura espacial $\gamma(h)$ aumenta hasta alcanzar un valor constante denominado "meseta" (C). Asociado con la meseta está el "rango" o "alcance" (a), valor que marca el límite de la dependencia espacial, de tal manera que a lags mayores que el rango las observaciones de la variable son independientes, es decir, no están correlacionadas espacialmente. En principio, $\gamma(h)$ para un lag de 0 sería 0; sin embargo, en la práctica es frecuente encontrar que cuando h se aproxime a 0, $\gamma(h)$ lo haga a un valor positivo C_0 . Este hecho, conocido como "efecto pepita" o "efecto nugget", refleja la discontinuidad del semivariograma en las proximidades del origen y es debido a la variabilidad de la propiedad a escalas menores que la de muestreo, así como a errores experimentales. Webster y Burgess (1983) señalan que en muchos casos los errores de medida sólo constituyen una pequeña proporción de la semivarianza nugget. Así, el cociente nugget/meseta (C_0/C) suele considerarse como el porcentaje de aleatoriedad de la propiedad para la escala de muestreo utilizada.

En la Figura 8 se muestran algunos de los modelos de semivariogramas más comúnmente utilizados. El modelo de efecto pepita puro corresponde a aquellos casos en los que la variable carece de autocorrelación espacial, es decir, presenta una distribución totalmente aleatoria en el espacio.

Una condición que deben cumplir los modelos de semivariogramas es que $\gamma(h)$ sea una función "condicionalmente negativa definida" o, bien que, $-\gamma(h)$ sea "condicionalmente positiva definida" (Journel y Huijbregts, 1978; Samper y Carrera, 1990). En este sentido, un modelo lineal con una meseta finita no es un semivariograma válido en sentido estricto y sólo podrá aplicarse con seguridad para distancias incluidas dentro del rango. Así, cuando exista una meseta, los modelos a aplicar serán los esféricos, exponenciales y gaussianos. Cuando la meseta no exista, serán utilizados modelos potenciales y logarítmicos (Warrick et al., 1986).

Para poder aplicar las técnicas geoestadísticas, la variable considerada, $Z(x)$, debe satisfacer dos condiciones de estacionariedad que definen la "hipótesis intrínseca" de la teoría de las variables regionalizadas (Journel y Huijbregts, 1978). Así, $Z(x)$ es estacionaria de orden 2 o de segundo orden si:

(1) El valor esperado de $Z(x)$, $E[Z(x)]$, existe y no depende de su posición en el espacio, x, es decir:

$$E[Z(x)] = m \quad \text{para todo } x$$

(2) Para toda pareja de variables aleatorias, $\{Z(x+h), Z(x)\}$, la función de covarianza, $C(h)$, existe y no depende de x sino sólo del vector de separación h, es decir:

$$E[Z(x+h)Z(x)] - m^2 = C(h)$$

La estacionariedad de la covarianza implica que la semivarianza y el semivariograma existen, son finitos y no dependen de x, de tal manera que:

$$\gamma(h) = 1/2 E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\}$$

Ahora bien, existen casos en los que la variable no satisface estas condiciones y su comportamiento en el espacio presenta una deriva; se trata de variables aleatorias no estacionarias. Así, semivariogramas sin meseta, en los que $\gamma(h)$ tienden al infinito cuando lo hace h , reflejan la existencia de fenómenos no estacionarios. Como veremos en el siguiente apartado, en el procedimiento seguido para la obtención de los mapas de estimación se tuvo en cuenta el carácter estacionario o no estacionario de las variables.

Por otro lado, $\gamma(h)$, como cualquier función vectorial, puede depender tanto de la magnitud de h como de su orientación. Cuando esto ocurre se dice que el semivariograma es "anisotrópico", siendo "isotrópico" cuando $\gamma(h)$ es independiente de la dirección. Para detectar una posible anisotropía, para cada propiedad se calcularon cuatro semivariogramas direccionales a ángulos de 0° , 45° , 90° y 135° , correspondiendo a 0° la dirección horizontal y a 90° la vertical. Teniendo en cuenta que, tal como se discute en la literatura (Laslett et al., 1987; Moolman y van Huyssteen, 1989), no parece existir un método objetivo para identificar la anisotropía, la decisión está basada en consideraciones subjetivas. Así, en los casos más complicados encontrados en nuestro análisis, la determinación de isotropía/anisotropía se fundamentó en la similitud del comportamiento global de cada uno de los semivariogramas direccionales. Al igual que la presencia de deriva, la anisotropía también debe tenerse en cuenta en el proceso de krigado para la obtención de los mapas de estimación, como veremos a continuación.

3.4.2.2. Estimación por krigado

Los semivariogramas, validados para cada una de las propiedades, profundidades y sitios de ensayo considerados, fueron utilizados en una segunda etapa del análisis: la estimación de valores de las variables en puntos en donde no se hicieron medidas. Para ello, se utilizó la técnica geoestadística de interpolación conocida como "krigado ordinario". Con esta técnica, un valor desconocido de la variable en un punto x_0 , $Z^*(x_0)$, se estima a partir de una combinación lineal de n observaciones de $Z(x_i)$ (Journel y Huijbregts, 1978):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

donde λ_i es el peso asignado al valor experimental de la variable en el punto de medida x_i .

Los n pesos λ_i son calculados a partir de la dependencia espacial expresada en el semivariograma y de la relación geométrica entre puntos de muestreo. Bajo condiciones de no sesgo del estimador y de mínima varianza del error de estimación, se desarrolla un sistema lineal de $n+1$ ecuaciones, ecuaciones de krigado, con $n+1$ incógnitas para resolver los n pesos λ_i y una variable auxiliar, el multiplicador de Lagrange, μ (Journel y Huijbregts, 1978). La varianza del error esperado de la estimación, también llamada varianza del krigado, $\sigma_k^2(x_0)$, se calcula como:

$$\sigma_k^2(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(h_{i0}) + \mu$$



donde $\gamma(h_{i_0})$ define el modelo de semivariograma para la distancia h_{i_0} que separa un punto x_i de otro x_0 .

En nuestro caso, todas las estimaciones se hicieron en las esquinas de las celdas de una malla de 5 x 5 m sobre la misma superficie muestreada inicialmente en cada sitio de ensayo (Tabla 4). En E4, el tamaño de la parcela elemental de ensayo obligó a ampliar en 25 x 100 m la superficie inicialmente muestreada para la estimación por krigado. En todos los casos, el sistema de interpolación utilizó los 10 puntos más próximos al punto de estimación, x_0 , dentro de un radio de búsqueda igual al rango del semivariograma.

La anisotropía detectada en algunos de los semivariogramas fue incorporada al proceso de krigado, introduciendo el "cociente de anisotropía", razón entre el rango del semivariograma en la dirección de mayor variación y el correspondiente al de menor variación (David, 1977).

En los casos de no estacionariedad de las variables estudiadas, la interpolación se realizó por "krigado en un entorno" (Samper y Carrera, 1990). Con este procedimiento se emplean sólo los puntos que caen dentro de un entorno del punto a estimar. La reducción del entorno permite suavizar las hipótesis hechas sobre la variable $Z(x)$. Así, este método puede ser aplicado aunque la variable no sea estacionaria; basta con que la media varíe lentamente, de forma que su rango de variación en el entorno del punto sea pequeño y ésta pueda considerarse constante (Samper y Carrera, 1990). En nuestro caso, el entorno se definió reduciendo el radio de búsqueda hasta una distancia que permitiera disponer para cada lag de un número suficiente de parejas de puntos y que no incrementara significativamente las varianzas del krigado.

Los valores estimados de cada propiedad, profundidad y ensayo, así como los de la varianza de estimación se representan gráficamente en mapas de líneas de contorno. En el apartado 4.1.3. se presentan estos mapas de estimación y el área que dentro de los mismos se destinó al ensayo de laboreo en cada uno de los sitios.

3.5. DISEÑO DE LA EXPERIENCIA

3.5.1. Sistemas de laboreo

De acuerdo con los objetivos del trabajo, los tratamientos de laboreo comparados fueron los siguientes: laboreo convencional (V), laboreo reducido (Ch) y no laboreo o siembra directa (SD).

El tratamiento V consistió en una labor primaria con arado de vertedera hasta una profundidad entre 30 y 40 cm, seguida de otra secundaria más superficial (10-15 cm), con grada o cultivador. Este sistema de laboreo, tradicional en las zonas de estudio, constituyó el tratamiento de referencia frente al que se ensayaron los otros dos. En el tratamiento Ch la labor primaria se realizó con un arado "chisel" o arado cincel, hasta una profundidad de 25 a 30 cm, sin inversión del suelo y manteniendo una gran parte de los residuos vegetales en superficie, a la que siguió, al igual que en V, una labor secundaria con grada o cultivador. En el tratamiento SD no se hizo preparación alguna del terreno, realizándose la siembra directamente sobre el rastrojo del cultivo anterior; en este tratamiento, la única alteración que sufrió el suelo se produjo en la línea de siembra por los discos abridores y los rodillos traseros de la sembradora.

El establecimiento de los ensayos de laboreo se llevó a cabo durante el verano y comienzos de otoño de 1990, tras la campaña 1989-90. En ésta los cuatro sitios de ensayo mantuvieron un cultivo de cebada, que en el caso de los ensayos E1, E2 y E3 seguía la rotación tradicional de cereal-barbecho, también conocida como cultivo de "año y vez". En la zona del ensayo E4, las características agroclimáticas posibilitan el cultivo continuo o anual de cebada. En el esquema de la Figura 9 se resumen las principales características de ambos sistemas de cultivo. El número de días indicado en el esquema corresponde en cada caso al valor medio del período experimental.

En los sitios de ensayo con cultivo de año y vez los tratamientos de laboreo señalados se compararon tanto en cultivo anual como en cultivo de año y vez. Para ello, se estableció un sistema de dobles parcelas, unas siguiendo la rotación indicada (parcelas "año-vez") y otras con cultivo anual (parcelas "anuales"). De esta manera, durante la primera campaña agrícola experimental (1990-91) sólo se sembraron las anuales, manteniéndose en barbecho las de año y vez, y durante la segunda campaña (1991-92) todas las parcelas fueron cultivadas con cebada. En el ensayo E4 únicamente se dispuso de parcelas anuales.

3.5.2. Prácticas culturales

Las variedades de cebada y dosis de siembra utilizadas fueron las habituales en cada zona de ensayo, según las recomendaciones del Servicio de Extensión Agraria de la Diputación General de Aragón (Tabla 5).

En el Anexo II se sintetizan las labores y prácticas culturales asociadas a cada uno de los tratamientos de laboreo y sistemas de cultivo, con indicación de las fechas de aplicación y, en su caso, los herbicidas y abonos utilizados con sus dosis correspondientes.

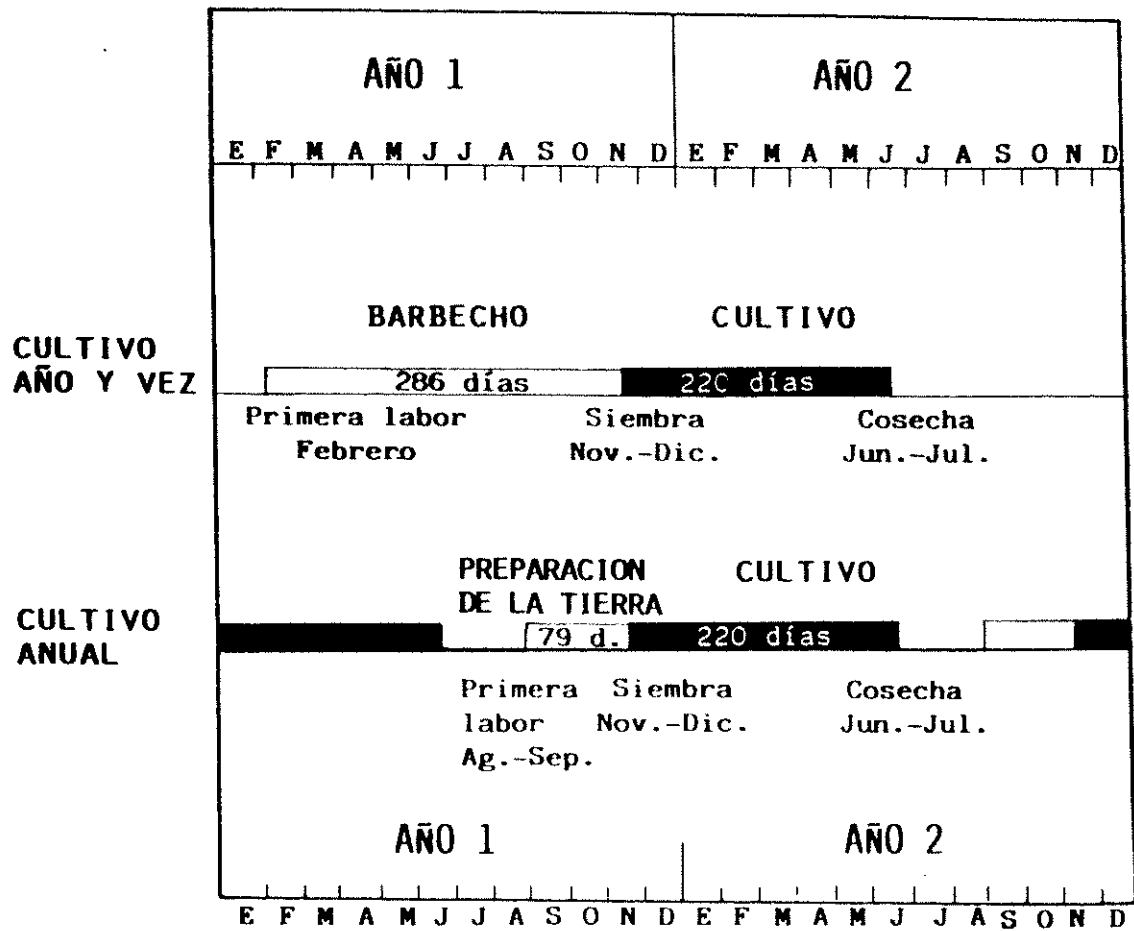


Fig. 9. Esquema de los sistemas de cultivo anual y de año y vez tradicionales en las zonas de ensayo.

Tabla 5. Variedades de cebada, dosis de siembra y profundidad de las labores en cada uno de los ensayos.

Ensayo	Variedad de cebada	Dosis de siembra (kg/ha)	Profundidad de la labor (cm)			
			Arado	Vertedera	Arado Chisel	Cultivador Grada
E1	Albacete	170	35-40	30	10	10-15
E2	Alpha	150	35	30	-	15
E3	Steptoe	130-150	30	25	12-15	-
E4	Reinette	185-200	30-35	25-30	15	-

Los aperos de labranza, así como la maquinaria y equipos auxiliares fueron, básicamente, los disponibles en cada una de las fincas experimentales y colaboradoras. La potencia de los tractores utilizados varió entre 30 y 90 kw, según las labores a realizar en cada sitio de ensayo. En los ensayos E1 y E2 se utilizó un arado de vertedera bisurco, y trisurco en los E3 y E4. A excepción del ensayo E3, en el que se empleó un arado chisel de 9 brazos, en el resto de ensayos la labor de chisel se realizó con uno de 7 brazos (ZAZURCA CHZ-7). En cuanto a las labores secundarias, éstas se efectuaron con grada de discos o cultivador en función de las condiciones del suelo. En la Tabla 5 se indica la profundidad de labor de cada apero. Las siembras se realizaron con una sembradora convencional de chorrillo en los tratamientos V y Ch y con sembradora directa en el tratamiento SD (SOLA/MOORE en la campaña 1990-91 y AMAZONE NT 250 en la campaña 1991-92). La recolección se realizó con una microcosechadora de ensayos de 1,50 m de anchura de corte.

3.5.3. Diseño experimental

En los ensayos E1, E2 y E3 se delimitaron dos grandes bloques de parcelas, separados por un pasillo de 10 m de anchura, uno con parcelas anuales y otro con parcelas año-vez (Fig. 10). En el E4, obviamente, sólo se contó con el bloque anual. Cada uno de estos bloques estuvo constituido por 10 parcelas elementales (4 con tratamiento V, 3 con Ch y 3 con SD), de 10 x 50 m en los ensayos E2, E3 y E4 y de 10 x 33,5 m en el E1. En todos los casos, se dejó un pasillo de 1 m de anchura entre parcelas.

El orden de las parcelas elementales con los diferentes tratamientos de laboreo fue el mismo en los dos bloques y común en los 4 ensayos, siguiendo el sistema de bloques incompletos (BI) propuesto por van Es et al. (1989), cuyo fundamento teórico se presenta en el apartado siguiente. Tal como se muestra en la Figura 10, cada par de parcelas adyacentes forman un bloque incompleto de tamaño 2 (zona delimitada por líneas discontinuas). Así, los tratamientos V y Ch forman un bloque incompleto en 3 ocasiones (parcelas 1 y 2, 8 y 9, y 9 y 10), de la misma manera que lo hacen los tratamientos V y SD, y Ch y SD. Para asegurar que todos los pares de tratamientos aparezcan juntos el mismo número de veces es necesario que el tratamiento V se repita en 4 ocasiones, frente a las 3 de Ch y SD.

Las comparaciones entre tratamientos de laboreo se realizaron para cada uno de los grandes bloques de parcelas siguiendo el diseño BI. Para la comparación cultivo anual-cultivo año y vez se utilizó el modelo "split-block", limitado a las 9 primeras parcelas elementales, ya que no existe este tipo de modelo basado en el diseño BI aquí utilizado.

La aplicación del diseño BI no impide el tratamiento de los datos según el diseño clásico de bloques completos al azar (BC). Así, excluyendo la décima parcela, 10V, las restantes 9 parcelas forman 3 bloques completos, tal como se muestra en la Figura 10. Ello permite el análisis de parámetros de los que sólo se dispone de una observación por parcela elemental. Este fue el caso de las características estructurales del suelo que en nuestro estudio sólo se determinaron ocasionalmente durante el período experimental.

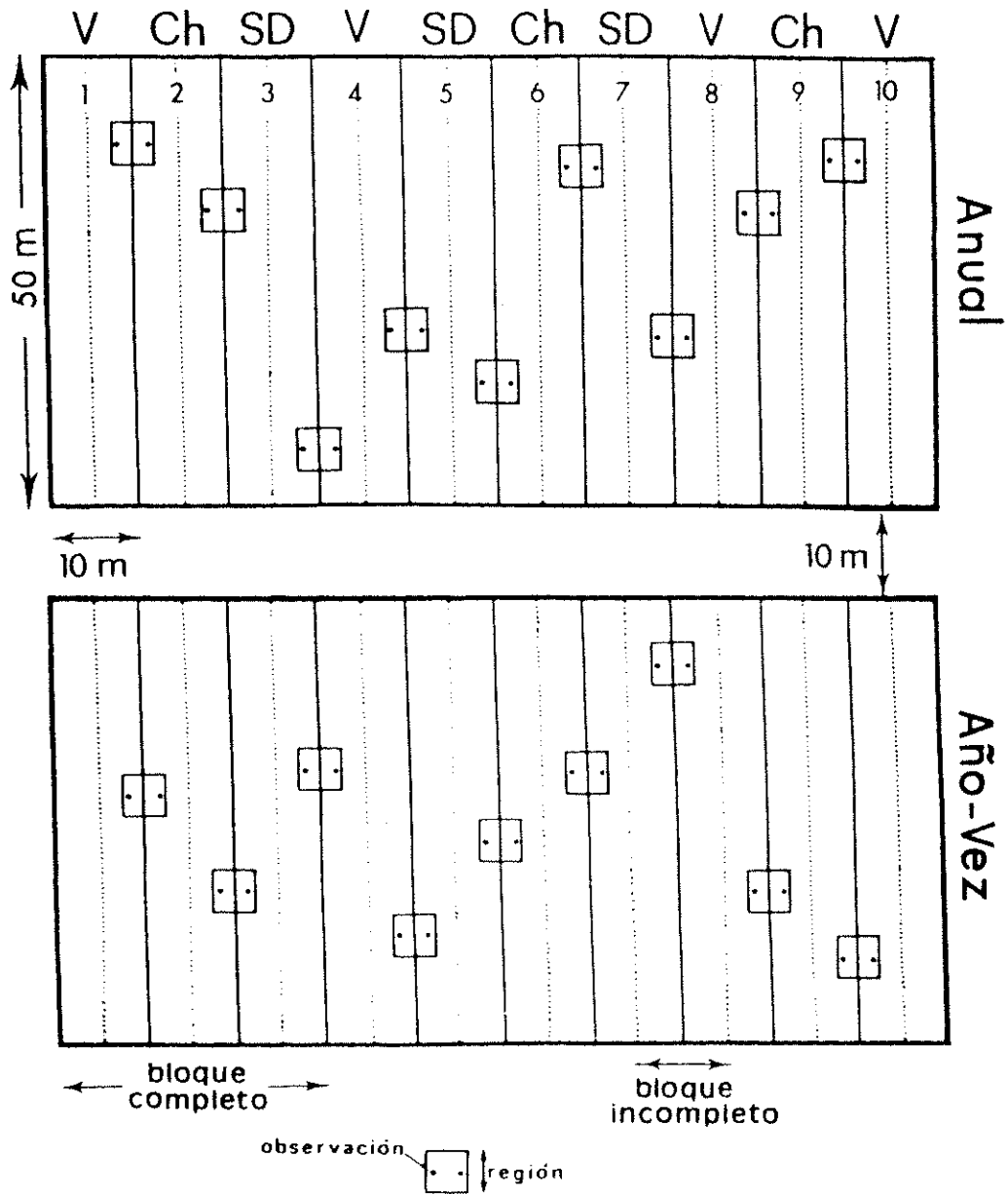


Fig. 10. Diseño experimental seguido en los distintos sitios de ensayo (V: laboreo tradicional con vertedera; Ch: laboreo reducido con chisel; SD: siembra directa). Los recuadros señalan las áreas de seguimiento de los diferentes parámetros de suelo y planta (regiones de observación).

3.5.3.1. Fundamento teórico

Tal como se ha indicado, el diseño de bloques incompletos utilizado en el presente trabajo, alternativo al diseño de bloques completos al azar, sigue el modelo propuesto por van Es et al. (1989) para ensayos de laboreo u otros ensayos de campo que requieran grandes parcelas. Este diseño se basa en la teoría de las variables regionalizadas en la que se apoya la geoestadística (Journel y Huijbregts, 1978). Recordando lo ya dicho en la Introducción (apartado 1.4.), según esta teoría, observaciones próximas en el espacio tienden a ser más parecidas que aquéllas separadas por grandes distancias.

Teniendo en cuenta que la mayoría de las propiedades del suelo no se distribuyen en el espacio de forma aleatoria sino que muestran patrones de distribución espacial, la teoría de las variables regionalizadas debe ser considerada en el diseño de ensayos de campo, como en el del presente estudio.

Así, cuando se comparan dos observaciones, y_i y y_j , de una variable Y_i , realizadas en puntos diferentes de un área experimental (Fig. 11A), aparecen discrepancias entre las asunciones geoestadísticas y las comunes de muchos diseños experimentales, entre ellos el diseño BC. Mientras que este último asume que las observaciones de la variable Y_i se distribuyen independientemente, la geoestadística considera que están correlacionadas espacialmente. De acuerdo con la hipótesis intrínseca de la teoría de las variables regionalizadas (ver apartado 3.4.2.1.), existe una relación entre varianza y separación espacial (h). Así, si se comparan observaciones separadas por diferentes h , tal como ocurre en la mayor parte de los diseños convencionales, las varianzas esperadas serán probablemente diferentes.

Según lo anterior, se pone de relieve la importancia que en investigaciones de campo tiene la separación física entre obseraciones. Esto significa que si para un determinado ensayo se construyen bloques que contengan todos los tratamientos (bloque completo), es más probable encontrar diferencias significativas entre tratamientos situados en los extremos del bloque que entre tratamientos contiguos. Según el ejemplo de la Figura 11B, cabe esperar que existan más diferencias entre T_1 y T_4 que entre T_1 y T_2 , T_2 y T_3 o T_3 y T_4 , simplemente porque están más separados.

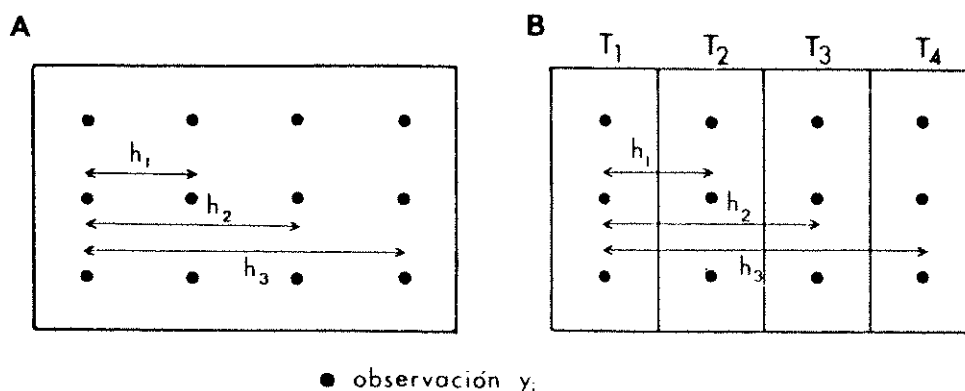


Fig. 11. Localización espacial de observaciones en un área hipotética de ensayo: (A) sin aplicación de tratamientos; (B) con aplicación de tratamientos (van Es et al., 1989).

En teoría, el diseño clásico de BC tiene en cuenta este problema al imponer aleatoriedad en la asignación de los tratamientos a las unidades experimentales; sin embargo, en la práctica, y especialmente en muchos ensayos de laboreo, con grandes parcelas y mínima replicación, este diseño no asegura que todas las comparaciones se hagan con igual precisión.

Por tanto, para contrastar efectos de tratamientos entre variables regionalizadas (humedad del suelo, densidad aparente, infiltración, rendimiento, etc.), las comparaciones deben hacerse únicamente entre observaciones separadas por una misma distancia. De acuerdo con la hipótesis intrínseca, la variación entre dichas observaciones, por ejemplo, para una distancia de separación de h unidades, será constante, es decir, $\gamma(h)$. Una forma de diseñar estos experimentos es construir bloques incompletos de tamaño 2 (2 tratamientos por bloque). Con este modelo se garantiza que todas las comparaciones se hagan bajo las mismas condiciones, lo cual incrementa la eficiencia del ensayo cuando la heterogeneidad del suelo sea elevada (van Es et al., 1989).

3.5.3.2. Esquema de muestreo

Dentro de cada bloque incompleto se delimitaron áreas denominadas "regiones de observación" (Fig. 10), en las que se concentraron las determinaciones de aquellas variables de suelo y cultivo que requirieron un seguimiento continuo a lo largo de todo el período experimental. Para la medida de parámetros de suelo se consideró una región de observación por bloque incompleto. Las determinaciones de parámetros de cultivo se llevaron a cabo en dos regiones de observación durante la campaña 1990-91 y en una en la campaña 1991-92, tal como se detalla más adelante. En todos los casos las regiones de observación se delimitaron en áreas homogéneas seleccionadas sobre los mapas de estimación de W y $L+A$ obtenidos por krigeado. En cada región se realizaron dos observaciones (una por tratamiento). La distancia entre puntos de observación dentro de cada región se mantuvo constante y fue, aproximadamente, de 5 m.

Finalmente, a modo de resumen, el diseño BI considerado proporciona:

- 9 bloques incompletos (3 bloques por cada par V-Ch, Ch-SD y V-SD)
- 1 x 9 = 9 regiones de observación (parámetros de suelo)
- 2 x 9 = 18 " " " (parámetros de cultivo)
- 2 x 1 x 9 = 18 puntos de observación (parámetros de suelo)
- 2 x 2 x 9 = 36 " " " (parámetros de cultivo)

Tal como se ha indicado, la aplicación del modelo BI no impide el tratamiento de los datos según el diseño clásico de BC. Realizando una observación más en la parcela 1V y excluyendo la 10V, las restantes 9 parcelas forman 3 bloques completos (Fig. 10). Según este modelo experimental, se dispone, pues, de:

- 3 bloques completos
- 3 x 3 = 9 parcelas de ensayo (3 por tratamiento)
- 2 x 9 = 18 observaciones (parámetros de suelo)
- 4 x 9 = 36 " (parámetros de cultivo)
- 1 x 9 = 9 " (características estructurales del suelo)

3.6. PARAMETROS DE SUELO Y CULTIVO. SEGUIMIENTO Y CARACTERIZACION

En el Anexo III se recogen los parámetros de suelo y cultivo determinados en cada uno de los sitios de ensayo y campañas experimentales, con indicación de las fechas de determinación de cada uno de ellos y del estadio del cultivo en las mismas. Seguidamente se detalla los métodos seguidos para la caracterización de los distintos parámetros.

3.6.1. Contenido de humedad del suelo

La determinación del contenido de agua en el perfil del suelo a lo largo de las dos campañas experimentales se efectuó por el método gravimétrico convencional, sobre muestras de suelo tomadas, cada 10 cm hasta 80 cm de profundidad, con la ayuda de una barrena de media caña y de 100 cm de longitud. El volumen de suelo muestreado en cada capa, 50 cm³, resulta adecuado dado el régimen de humedad de los suelos considerados (Hawley et al., 1982).

En cada fecha de determinación, la toma de muestras se llevó a cabo sobre la línea de cultivo en las regiones de observación, lo que supuso disponer de 6 puntos de muestreo por tratamiento. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en recipientes herméticos y desecadas en estufa a 105°C durante 24 horas. El contenido de humedad del suelo, expresado como porcentaje de agua en peso (W), se obtuvo según la expresión:

$$W = (P_h - P_s / P_s) \cdot 100$$

siendo P_h el peso de suelo húmedo y P_s el peso de suelo seco a 105°C. El contenido de humedad volumétrico se obtuvo multiplicando W por la densidad aparente del suelo (D_a).

3.6.2. Resistencia del suelo a la penetración

La determinación in situ de la resistencia del suelo a la penetración (RP) se efectuó con un penetrógrafo Stiboka (Eijkelkamp). Básicamente, el aparato registra sobre una banda de papel, de manera continua con la profundidad, la resistencia que ofrece el suelo a la introducción de una varilla de punta cónica procurando una velocidad constante. Dependiendo de las condiciones de suelo, se utilizaron varillas de 8 y 10 mm de diámetro y puntas cónicas de 60° y de 1 y 2 cm² de sección, respectivamente.

Las medidas de RP, simultáneas a las del contenido de humedad del suelo (Anexo III), se efectuaron dentro de las regiones de observación en las hileras de cultivo, evitando las zonas de rodadura. Se obtuvo un número mínimo de 4 curvas de RP-profundidad por punto de observación. De cada banda se leyeron los valores de RP cada 5 cm hasta una profundidad máxima de 40 cm, obteniéndose una curva media para cada punto de observación (6 por tratamiento). El valor máximo de RP que permite registrar el penetrógrafo utilizado es 5 MPa.

3.6.3. Características estructurales del suelo

3.6.3.1. Distribución de tamaños de agregados

La **distribución de tamaños de agregados** de suelo según diámetro se determinó por tamizado en seco, utilizando una tamizadora electromagnética (C.I.S.A) de vibración vertical y una torre de 7 tamices con las siguientes luces de malla: 8, 4, 2, 1, 0,84, 0,50 y 0,25 mm.

El tamizado se efectuó sobre muestras de suelo tomadas en las parcelas anuales de los cuatro sitios de ensayo tras la cosecha de la 2ª campaña experimental (Anexo III); en cada parcela elemental se recogió una muestra de suelo a tres profundidades: 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Antes del tamizado, las muestras, secas al aire, se pasaron por el tamiz de 8 mm. El tiempo de tamizado (3 minutos), la intensidad de vibración (aproximadamente 1 mm de amplitud) y el peso de la muestra de suelo inicial (100-120 g) se fijaron en ensayos previos. Tras el tamizado, se pesaron los agregados retenidos en cada uno de los tamices.

A partir de la distribución de tamaño de agregados, se calculó, en primer lugar, el **diámetro medio ponderado (DMP)**. Este se estimó, en una primera etapa, de acuerdo con la expresión de Kemper y Rosenau (1986):

$$DMP' = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i$$

donde \bar{X}_i es el diámetro medio de cada fracción de tamaños y W_i la proporción del peso de cada fracción con respecto al peso total. Según estos autores, DMP' sobreestima generalmente el diámetro medio ponderado correspondiente al concepto original de Van Bavel (Kemper y Rosenau, 1986), por lo que se corrigió aquél según la expresión dada por Youker y McGuinness (1956):

$$DMP = 0,876 DMP' - 0,079$$

En segundo lugar, y siguiendo la propuesta de Dobrzanski et al. (1975), se calculó el **índice de agregación (IA)**, según:

$$IA = \sum_{i=1}^n P_i Q_i$$

donde P_i es el porcentaje de agregados de cada fracción y Q_i un factor de ponderación asignado a cada una de ellas. Los valores de Q_i se eligieron adaptando los propuestos por Dobrzanski et al. (1975) y Weill et al. (1988) a nuestras clases de agregados, según la siguiente equivalencia:

Fracciones de tamaños de agregados (mm)

>8	8-4	4-2	2-1	1-0,84	0,84-0,50	0,50-0,25	<0,25	
Q:	0	3	8,5	9,5	6	4,5	3	0

3.6.3.2. Macroporosidad

La caracterización de la distribución de macroporos según tamaño se llevó a cabo en el ensayo E4 tras la cosecha de la 2ª campaña experimental (Anexo III). En una primera fase, se procedió a la descripción in situ de macroporos, grietas y restos vegetales incorporados en la capa arable. Para ello, se abrieron 9 calicatas (una por parcela elemental) con ayuda de una retroexcavadora (Smalley, modelo 5 W). A continuación, se expusieron planos horizontales a 5, 15 y 25 cm de profundidad (Fig. 12) en los que, tras una preparación adecuada de la superficie, evitando el sellado de los poros, se dibujó con rotuladores indelebles el contorno de los mismos en láminas de acetato transparente sobre una superficie de 40 x 40 cm, siguiendo un procedimiento similar al descrito en otros trabajos (Logsdon et al., 1990; Singh et al., 1991).

En una segunda fase de trabajo de gabinete, se hizo un recuento del número de macroporos de distintos tamaños y se midió el área total ocupada por los mismos, así como la de grietas y restos vegetales, con ayuda de un planímetro digital (PLACOM KP- 90N, Koizumi, Japón). De acuerdo con la representatividad en las láminas de los distintos tamaños, se consideraron únicamente tres clases de macroporos: <2, 2-5 y >5 mm de diámetro. Obviamente, dentro de los poros <2 mm sólo se registraron aquéllos visibles al ojo humano; por imperativo de la resolución del planímetro utilizado, el área total de estos últimos macroporos se estimó asumiendo para todos ellos una sección circular de 1 mm de diámetro medio.

3.6.3.3. Conductividad hidráulica a saturación y sortividad

Estos parámetros se determinaron en las parcelas anuales del ensayo E1 en dos momentos de cada una de las dos campañas experimentales: la primera en los meses de febrero-marzo y la segunda tras la recolección (Anexo III). Las determinaciones, una por parcela elemental (tres por tratamiento de laboreo), se llevaron a cabo siguiendo la técnica del permeámetro de Guelph (Modelo 2800KI, Soilmoisture Equipment Corp., Santa Bárbara, CA).

Este permeámetro, desarrollado por Reynolds et al. (1983), hace uso del principio de Mariotte y permite efectuar medidas de infiltración en condiciones de saturación al mantener un nivel constante de agua en el interior de un pozo de reducidas dimensiones. El fundamento teórico y la construcción de este aparato están descritos por Reynolds et al. (1983) y Reynolds y Elrick (1986); más detalles sobre las posibilidades de utilización del equipo pueden consultarse en el manual del mismo (Soilmoisture Equipment Corp., 1986).

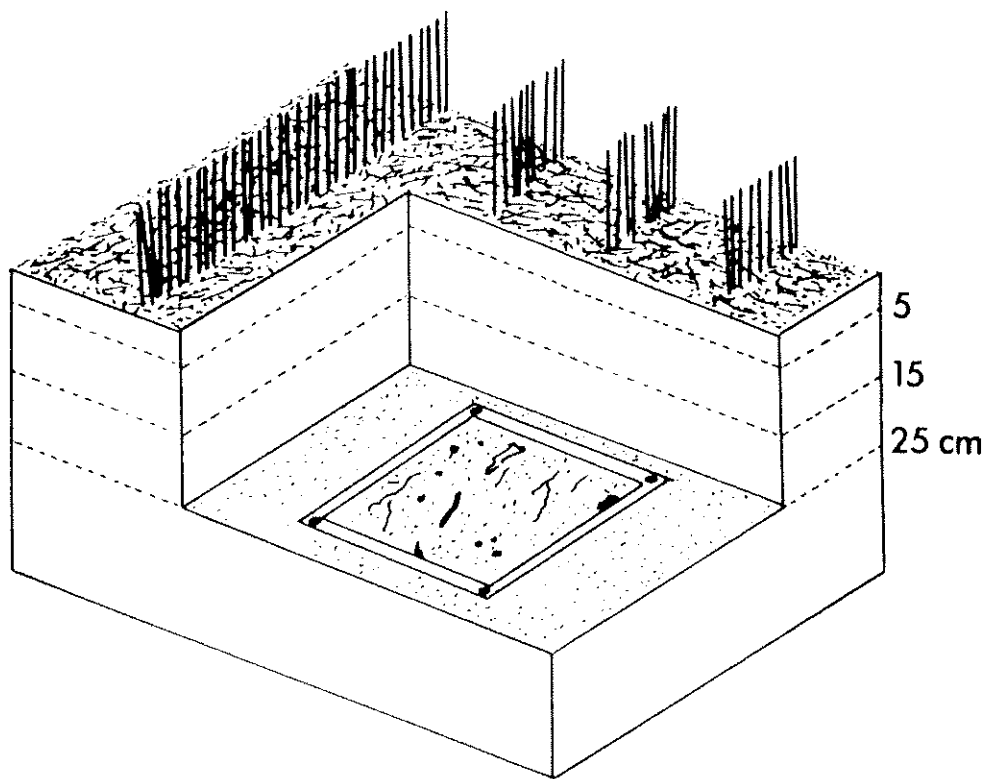


Fig. 12. Esquema del método de campo utilizado para la caracterización de macroporos a distintos niveles de la capa arable en el ensayo E4.

En nuestro estudio las medidas se realizaron a 20 cm de profundidad en un pozo de 6 cm de diámetro perforado sobre las líneas de cultivo. Esta profundidad de medida se eligió a efectos comparativos entre tratamientos, tras comprobarse en ensayos preliminares que el bulbo de humectación comprendía, prácticamente, toda la capa arable (0-40 cm). La tasa de flujo constante (Q) se determinó para dos niveles de agua en el pozo (H), 5 y 10 cm.

El cálculo de la conductividad hidráulica a saturación (K_{fs}) y de la sortividad (S) se basa en la solución de Reynolds et al. (1985) a la ecuación de Richards para flujo de agua constante fuera del pozo:

$$2\pi H^2 K_{fs} + C\pi a^2 K_{fs} + 2\pi H\phi_m = CQ$$

donde a es el radio del pozo, C es una constante de proporcionalidad sin dimensiones dependiente de la relación H/a y ϕ_m es el potencial de flujo matricial. Según la aproximación de Reynolds et al. (1985), la resolución simultánea de esta ecuación para las dos condiciones de H indicadas permite obtener K_{fs} y ϕ_m de manera independiente.

El parámetro S ha sido traducido del original en inglés (sorptivity) como "sorbilidad" (Fuentes, 1989) o como "absorbilidad" o "desorbilidad" (López y Giráldez, 1992) según se trate del proceso de infiltración o de evaporación. En el presente trabajo, el término elegido es el de sortividad ya que, en nuestra opinión, refleja el sentido amplio que se pretende transmitir en el estudio.

De acuerdo con Reynolds et al. (1985), S se obtiene a partir de ϕ_m según la expresión de Philip (1969):

$$S = (2 \Delta\theta \phi_m)^{1/2}$$

donde $\Delta\theta$ es la diferencia entre el contenido de agua volumétrico del suelo al inicio y al final de las medidas. Por ello, en un área adyacente al pozo y a 20 cm de profundidad se tomaron cilindros de suelo (3 por parcela elemental) en los que se determinó la densidad aparente y el contenido de humedad inicial del suelo. Concluidas las medidas de infiltración, del fondo del pozo se tomaron muestras de suelo para la determinación del contenido de humedad a saturación.

La utilización de la técnica de ecuaciones simultáneas para la obtención de K_{fs} y ϕ_m puede conducir a un alto porcentaje de valores negativos de estos parámetros (Reynolds et al., 1985; Elrick et al., 1989). Como solución a este problema, debido a la heterogeneidad del medio poroso (estratificación del suelo, presencia de canales de raíces, lombrices, etc.), Reynolds y Elrick (1985) sugieren recalcular K_{fs} a partir del análisis de Laplace:

$$2\pi H^2 K_{fs} + C\pi a^2 K_{fs} = CQ$$

y ϕ_m a partir del análisis de Gardner:

$$2\pi H\phi_m = CQ$$

Estas alternativas requieren un único H y pueden ser aplicadas con suficiente precisión (Reynolds y Elrick, 1985).

3.6.4. Parámetros de cultivo

El desarrollo y crecimiento del cultivo de cebada se siguió en las dos campañas experimentales a través de la determinación de diferentes parámetros en distintas fases de su ciclo, tal como se detalla en el Anexo III.

Dada la imposibilidad material de llevar a cabo todas las observaciones, muestreos y determinaciones en los cuatro sitios de ensayo, se decidió limitar esta tarea, preferentemente, a los ensayos E1 y E3, con lo que quedaba suficientemente representada la respuesta en las zonas de ensayo áridas y semiáridas. En la campaña 1990-91 el control se llevó a cabo en estos ensayos en cinco ocasiones. Tal como se comentará más adelante, la sequía que caracterizó la campaña 1991-92 impidió un seguimiento normal en el ensayo E1, por lo que se creyó conveniente completar el estudio con determinaciones entre espigado y cosecha en el ensayo E4 (Anexo III).

En la 1ª campaña se consideraron 2 regiones de observación por bloque incompleto, disponiéndose, por tanto, de 12 repeticiones por tratamiento. Durante la 2ª campaña, dado que el seguimiento se efectuaba tanto en parcelas anuales como en parcelas año-vez, el número de puntos de observación se redujo a la mitad en los ensayos E1 y E3. En cada uno de estos puntos se delimitaron líneas de cultivo de 0,5 m de longitud, recogiendo en bolsas de plástico todas las plantas en ellas contenidas, las cuales se mantenían a 4°C hasta su manipulación en laboratorio. La posición de las regiones de observación variaron de una fecha de control a otra con el fin de evitar la formación de zonas alteradas como consecuencia de los sucesivos muestreos. Las distintas determinaciones se llevaron a cabo en submuestras de 10 plantas separadas al azar del total extraído en cada punto de observación.

El **estadio del cultivo** se estableció según la sistemática de Zadoks-Chang-Konzak (Zadoks et al., 1974).

La nascencia se caracterizó a través del **índice de emergencia (IE)** que informa del tiempo medio requerido para una emergencia completa del cultivo (Smith y Millett, 1964). A partir del número de plantas emergidas, en las líneas de cultivo de 0,5 m, en distintas fechas desde la aparición de las primeras hasta el final de la nascencia, este índice se obtuvo según la expresión:

$$IE = \sum_{i=1}^n (d_i \cdot p_i) / p$$

donde d_i es el número de días transcurridos desde el día de la siembra, p_i el número de plantas emergidas desde la última evaluación y p el número final de plantas emergidas.

La **profundidad de siembra**, profundidad a la que quedaron depositadas las semillas

tras la siembra, se determinó midiendo la porción blanca del rizomoide comprendida entre la semilla y el inicio de la zona clorofílica (Sánchez-Girón, 1986).

Para obtener la **producción de biomasa**, expresada como peso de materia por unidad de superficie, la parte aérea de las plantas, fraccionada en tallos, hojas verdes, hojas secas y espigas, se desecó en estufa a una temperatura de 68°C durante 48 horas.

El **índice de área foliar (LAI)** se calculó a partir de la cuantificación automatizada en el laboratorio de la superficie verde de las hojas utilizando un analizador de imágenes Delta-T.

El **rendimiento en grano** y los componentes del mismo (número de espigas, número de granos por espiga, peso de un grano, etc.) se determinaron, igualmente, a partir de las plantas extraídas de las hileras de 0,5 m.

3.6.5. Estimación de la evapotranspiración

A partir de las determinaciones del contenido de humedad en el suelo efectuadas hasta 80 cm de profundidad es posible, en primer lugar, calcular el agua almacenada (S) en el perfil en cada una de las fechas de determinación. Asumiendo que en las condiciones de ensayo, las pérdidas de agua por drenaje y escorrentía pueden considerarse despreciables, la evapotranspiración (ET), en los periodos del cultivo delimitados por las fechas de medida de S (Anexo III), se ha estimado a partir de la siguiente expresión de balance hídrico simplificado:

$$ET = \Delta S + P$$

en la que ΔS representa el cambio en el agua almacenada en la zona radicular entre dos fechas determinadas y P la precipitación recibida entre las mismas.

En el apartado 4.6.3. se presenta y discute la metodología seguida para la estimación de los componentes de evaporación (E) y transpiración (T) de ET.

3.7. METODOS ESTADISTICOS PARA EL ANALISIS DE RESULTADOS

Tal como se ha indicado, tres han sido los modelos experimentales considerados en el presente estudio: modelo BI (bloques incompletos), propuesto para la comparación de los diferentes tratamientos de laboreo, modelo split-block, para la comparación de sistemas de cultivo y modelo clásico de BC (bloques completos), utilizado también para calcular la eficiencia relativa del diseño BI. A continuación se presentan los análisis de varianza (ANOVAS) correspondientes a cada uno de estos diseños.

a) Análisis de varianza para el diseño BI

El ANOVA de BI se complica con respecto a uno convencional por el hecho de que tratamientos y bloques no son ortogonales entre sí. Esta falta de ortogonalidad es debida a que no todos los tratamientos están presentes en cada bloque, por lo que, para poder estimar y comparar los efectos de los diferentes tratamientos, se requiere un análisis "intrabloque". Con este método de análisis todas las inferencias se basan en las comparaciones hechas únicamente dentro de los bloques, es decir, a cortas distancias.

Las estimaciones de las diferencias entre tratamientos a partir de los contrastes intrabloque pueden obtenerse a través de dos tipos de comparación. Así, fijándonos en nuestro diseño experimental (Fig. 10), para la comparación V y Ch se estiman las diferencias a partir de aquellos bloques incompletos que contienen esos dos tratamientos. También se puede ganar información a partir de otros contrastes intrabloque. Así, si consideramos un bloque que contenga V y SD y otro con Ch y SD, la diferencia entre sus estimaciones respectivas, (V-SD)-(Ch-SD), producirá otra estimación del contraste V-Ch, aunque en esta última la varianza incluya la variación bloque-a-bloque. Por tanto, todos los bloques incompletos aportan información sobre una determinada comparación entre tratamientos. La estimación intrabloque utiliza una media ponderada de las diferentes comparaciones, estableciendo los pesos de tal forma que la varianza de la estimación combinada sea reducida.

En el ANOVA los efectos de los tratamientos se ajustan para las diferencias entre bloques y se asume que el error, o residuo intrabloque, está distribuido normal e independientemente con media 0 y varianza σ_e^2 . En la Tabla 6 se muestra el ANOVA aplicado para el análisis intrabloque, donde t, b y r son, respectivamente, el número de tratamientos, bloques y regiones de observación por bloque. Para nuestro esquema experimental, estos números son, respectivamente, 3, 9 y 1 ó 2 según se trate de parámetros de suelo o de cultivo.

Las sumas de cuadrados debidas a bloques y a errores de muestreo se calculan de la forma usual, a pesar de la falta de ortogonalidad. La suma de cuadrados debida a los tratamientos, ajustados para los bloques, es:

$$\sum_{i=1}^t Q^2 / 2\lambda tr$$

Tabla 6. Análisis de varianza para el diseño BI.

Fuente de variación	Grados de libertad ¹
Tratamiento, ajustado [T]	t - 1
Bloque [B]	b - 1
Error experimental	b - t + 1
Error de muestreo	2b (r - 1)
Total	2br - 1

¹ t, b y r son, respectivamente, el número de tratamientos, de bloques y de regiones por bloque

El símbolo λ representa el número de veces que cada par de tratamientos aparecen juntos en un mismo bloque, y que en nuestro caso es 3. Los valores Q reflejan los efectos puros de los tratamientos y están libres de los efectos de los bloques. Así:

$$Q_i = 2T_i - B_i,$$

siendo T_i el total de las parcelas a las que se ha asignado el tratamiento i y B_i el total de los bloques que contienen el tratamiento i (los totales de los tratamientos se multiplican por 2 ya que cada bloque contiene 2 tratamientos).

La suma de cuadrados del error experimental se obtiene por sustracción y su cuadrado medio es una estimación no sesgada de σ_e^2 . Para comprobar las diferencias entre tratamientos se establece el cociente entre el cuadrado medio de los tratamientos ajustados y el cuadrado medio del error experimental. En este análisis no se pueden comprobar los efectos de los bloques ya que el cociente entre el cuadrado medio de los bloques no ajustados y el cuadrado medio del error no es un test F válido.

b) Análisis de varianza para el diseño BC

El modelo BC aplicado es un modelo mixto, en el que los bloques suministran los efectos aleatorios y los tratamientos de laboreo los efectos fijos. Según este diseño, el valor de una observación cualquiera (Y_{ijk}) es el resultado aditivo de la media de todas las observaciones (μ), de un efecto debido al tratamiento (T_i), de un efecto debido al bloque (B_j), de una variación no controlada denominada error experimental, proveniente de las diferencias entre bloques para un mismo tratamiento (e_{ij}), y de otro componente aleatorio denominado error de muestreo, correspondiente a las diferencias entre observaciones realizadas dentro de un mismo bloque y tratamiento (δ_{ijk}):

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + B_j + e_{ij} + \delta_{ijk}$$

El ANOVA correspondiente al diseño BC se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Análisis de varianza para el diseño BC.

Fuente de variación	Grados de libertad ¹
Tratamiento	t - 1
Bloque	b - 1
Error experimental	(b - 1) (t - 1)
Error de muestreo	bt (r - 1)
Total	btr - 1

¹ t, b y r son, respectivamente, el número de tratamientos, de bloques y de observaciones por parcela

c) Análisis de varianza para el diseño split-block

Asignado el tratamiento de laboreo a las parcelas completas (tratamiento principal) y el tratamiento cultivo anual-cultivo de año y vez a las subparcelas (subtratamiento), una observación Y_{ijk} correspondiente al tratamiento i, bloque j y subtratamiento k, es el resultado aditivo de la media de todas las observaciones (μ), del efecto del bloque (B_j), del efecto del tratamiento principal (T_i), del efecto del subtratamiento (S_k), del efecto de la interacción entre ambos tratamientos ($(TS)_{jk}$), del componente aleatorio del tratamiento principal (ϵ_{ij}), del componente aleatorio del subtratamiento (ϵ_{ik}) y del componente aleatorio de las subparcelas (δ_{ijk}); esquemáticamente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_j + T_i + S_k + (TS)_{jk} + \epsilon_{ij} + \epsilon_{ik} + \delta_{ijk}$$

El ANOVA correspondiente a este diseño se presenta en la Tabla 8.

d) Comparaciones de medias

Las comparaciones de medias se realizaron siguiendo el procedimiento de rango-múltiple de Duncan. Según este método, una vez colocadas las medias en sentido decreciente, la significación de la diferencia entre dos medias es probada comparándola con el valor de la diferencia mínima significativa (DMS) mayorada según un valor tabulado, elegido en función del nivel de significación, de los grados de libertad del error y de la posición de las medias en el orden establecido. Cuando se comparan dos medias adyacentes el valor tabulado, obviamente, es 1,00.

Con el diseño BI se siguió el mismo procedimiento de comparación de medias, con la salvedad de que para calcular la DMS sólo se utilizó la información intrabloque; así, el error estándar se obtuvo de la forma siguiente:

$$\sqrt{2 k CME/t\lambda r}$$

donde k es el número de tratamientos asignados a cada bloque incompleto, CME el cuadrado medio del error experimental, t el número de tratamientos, λ el número de veces que cada par de tratamientos aparecen juntos en el mismo bloque y r el número de regiones de observación por bloque.

En el diseño split-block la comparación entre medias de los dos subtratamientos para un mismo tratamiento de laboreo se realizó con valores de error típico (S_y) y t de Student calculados de la siguiente forma:

$$S_y = \sqrt{\frac{(t-1) CME_b + CME_a}{rt}} \quad t = \frac{(t-1) CME_b (t_b) + CME_a (t_a)}{(t-1) CME_b + CME_a}$$

donde CME_a y CME_b son, respectivamente, los cuadrados medios de los errores E_a y E_b , y t_a y t_b los valores t tabulados para los grados de libertad de E_a y E_b .

Todos los datos han sido procesados en ordenador, habiéndose utilizado para la concepción de la base de datos el programa dBASE III PLUS. El tratamiento estadístico de los datos según BC y split-block se ha realizado con el programa BMDP-8V. Para BI ha sido necesario desarrollar, con la ayuda del Departamento de Métodos Estadísticos de la Universidad de Zaragoza, programas específicos en FORTRAN-77.

Tabla 8. Análisis de varianza para el diseño split-block.

Fuente de variación	Grados de libertad ¹
Bloque	$b - 1$
Tratamiento (T)	$t - 1$
Error tratamiento	$(b - 1) (t - 1)$
Parcelas completas	$bt - 1$
Subtratamiento (S)	$s - 1$
Error subtratamiento (E_a)	$(b - 1) (s - 1)$
T x S	$(t - 1) (s - 1)$
Error subparcelas (E_b)	$(b - 1) (t - 1) (s - 1)$
Total (subparcelas)	$bts - 1$

¹ b , t y s son, respectivamente, el número de bloques, de tratamientos y de subtratamientos.



4. RESULTADOS

4.1. VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO EN LA CAPA ARABLE. ESTABLECIMIENTO DE LAS SUPERFICIES DE ENSAYO

Según lo indicado anteriormente, el estudio de variabilidad espacial realizado pretendía una doble finalidad: evaluar el grado de heterogeneidad del suelo en las áreas de ensayo disponibles y, por tanto, su idoneidad para llevar a cabo la experimentación propuesta, y ubicar las parcelas elementales, con los diferentes tratamientos de laboreo, en las áreas más homogéneas y representativas.

Por ello, los resultados que a continuación se presentan deben contemplarse como herramienta de trabajo preliminar para un mejor cumplimiento de los objetivos propios de la investigación sobre laboreo de conservación planteada.

4.1.1. Análisis estadístico clásico

En la Tabla 9 se presentan los valores medios, varianzas, coeficientes de variación y valores máximos y mínimos de los datos de W (contenido de humedad del suelo, % en peso) y L+A (% de limo más arcilla) para cada una de las profundidades de suelo y sitios de ensayo. En todos los casos los datos siguen una distribución normal, tal como lo indican valores de KS_t siempre inferiores a los de KS_c (Tabla 9).

De acuerdo con estos estadísticos descriptivos, se puede destacar, en primer lugar, que la similitud entre las dos profundidades de la capa arable hay que atribuirla al manejo agrícola tradicional al que han estado sometidos los suelos. Año tras año, el laboreo profundo con vertedera, con inversión y mezcla del suelo, termina por crear una capa uniforme en los primeros 30-40 cm del perfil. Este hecho se corrobora y completa al considerar los coeficientes de variación obtenidos, del mismo orden de magnitud que los registrados en la literatura para suelos agrícolas (Muñoz-Pardo et al., 1990; Shouse et al., 1990) pero inferiores a los de suelos no cultivados (Vauclin, 1983; Nash et al., 1992). En definitiva, este análisis pone de relieve cómo el laboreo ejerce un efecto homogeneizador del suelo y cómo éste tiene lugar tanto en el espacio como en profundidad.

4.1.2. Análisis de la estructura espacial

Los parámetros de los modelos de semivariogramas obtenidos para cada propiedad, profundidad y ensayo se muestran en la Tabla 10. Valores próximos a 0 y a 1 de R_μ y $R\sigma^2$, respectivamente (Tabla 10), decidieron la elección de dichos parámetros. Así, los modelos teóricos utilizados para describir la estructura espacial de W y L+A fueron los modelos esférico, gaussiano, lineal y efecto pepita puro. A modo de ejemplo, en la Figura 13 se muestra de forma gráfica algunos de estos semivariogramas.

El efecto pepita (C_0) presente en alguno de los modelos tiene mayor importancia en W, alcanzando prácticamente el 100% de la variabilidad total (C) en E1 para las dos profundidades y en E4 sólo para 20-40 cm (Tabla 10); en estos casos se puede asumir un efecto pepita puro (Fig. 13A) y una distribución espacial totalmente aleatoria de la variable dentro del área de estudio considerada. En estas situaciones la aplicación de las técnicas

Tabla 9. Media, varianza, coeficiente de variación, valores máximo y mínimo de los contenidos de humedad (W) y elementos <50 μm (L+A) en el suelo de cada sitio de ensayo.

Ensayo	Variable (% peso)	Profundidad (cm)	m	S ²	CV	Máx.	Mín.	KS _t ¹	KS _C ²
E1	W	0-20	4,02	0,55	0,18	5,66	2,17	0,066	0,117
		20-40	6,37	0,85	0,15	9,46	4,63	0,091	0,117
	L+A	0-20	72,88	16,50	0,056	81,80	64,95	0,087	0,117
		20-40	73,09	17,09	0,057	82,53	64,04	0,106	0,117
E2	W	0-20	10,45	1,27	0,11	13,65	8,00	0,108	0,132
		20-40	13,03	2,26	0,12	17,28	9,76	0,111	0,124
	L+A	0-20	66,11	10,39	0,049	74,95	59,50	0,109	0,123
		20-40	66,19	14,21	0,057	75,64	56,60	0,094	0,123
E3	W	0-20	11,25	1,77	0,12	15,18	9,74	0,185	0,238
		20-40	12,55	1,06	0,082	14,99	10,64	0,139	0,238
	L+A	0-20	65,03	8,95	0,046	69,19	58,16	0,160	0,238
		20-40	65,67	13,35	0,056	72,09	57,55	0,122	0,238
E4	W	0-20	13,48	3,06	0,13	15,91	9,36	0,122	0,238
		20-40	16,24	3,22	0,11	19,02	11,61	0,125	0,238
	L+A	0-20	85,18	15,15	0,046	92,08	78,20	0,163	0,238
		20-40	85,69	14,91	0,045	91,64	78,79	0,139	0,238

¹ KS_t: Valor obtenido en el test de Kolomogorov-Smirnov.

² KS_C: Valor crítico para $\alpha=0,1$

Tabla 10. Modelos y parámetros de los semivariogramas (C_0 : efecto pepita; C: meseta; a: rango) correspondientes a los contenidos de humedad (W) y elementos $<50 \mu\text{m}$ (L+A) del suelo en cada sitio de ensayo.

Ensayo	Variable (% peso)	Profundidad (cm)	Modelo	C_0	C	a (m)	$R\mu^1$	Ro^2^1
E1	W	0-20	—————	efecto pepita puro		—————		
		20-40	—————	efecto pepita puro		—————		
	L+A	0-20	Esférico	0,00	20,00	43,98	0,006	1,082
		20-40	Esférico	0,00	19,86	40,48	0,007	1,030
E2	W	0-20	Esférico	0,42	1,21	57,63	-0,020	1,127
		20-40	Esférico	0,93	2,11	55,17	-0,037	1,044
	L+A	0-20	Gaussiano	1,23	11,15	39,06	0,026	1,080
		20-40	Gaussiano	1,45	13,14	26,79	0,099	0,951
E3	W	0-20	Lineal	0,86	$b = 1,52 \cdot 10^{-2}$		-0,001	1,148
		20-40	Lineal	1,03	$b = 0,13 \cdot 10^{-2}$		-0,037	1,190
	L+A	0-20	Gaussiano	4,09	11,00	83,02	-0,022	0,993
		20-40	Gaussiano	7,31	19,64	127,03	-0,005	1,101
E4	W	0-20	Esférico	0,00	3,60	49,08	0,050	1,049
		20-40	—————	efecto pepita puro		—————		
	L+A	0-20	Gaussiano	0,67	23,95	78,29	0,030	1,142
		20-40	Gaussiano	0,89	22,05	72,62	0,016	1,183

¹ $R\mu$ y Ro^2 representan, respectivamente, los valores de la media y de la varianza de los errores reducidos, tras el proceso de validación cruzada.

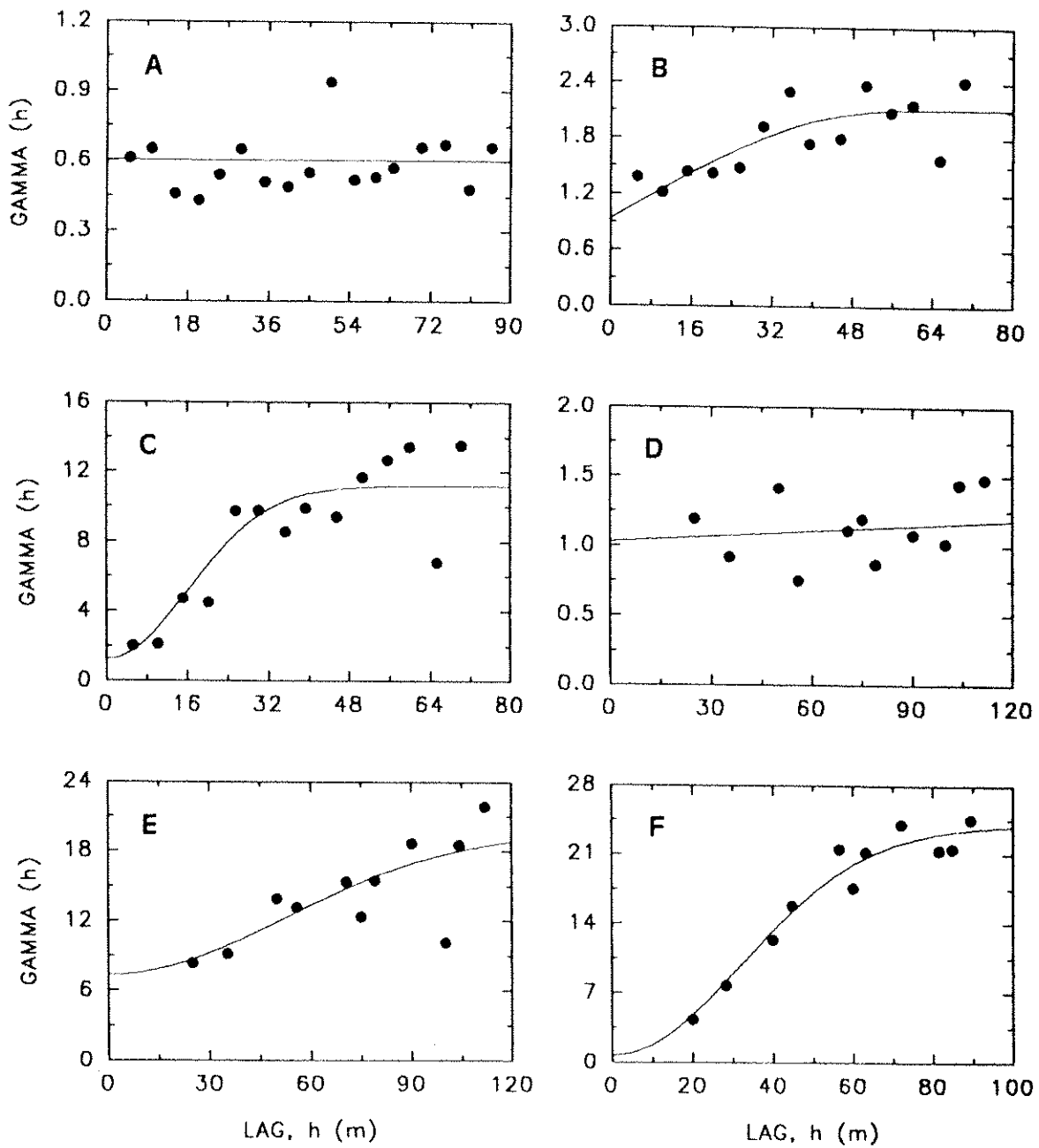


Fig. 13. Semivariogramas para el contenido de humedad (W) y el porcentaje de limo más arcilla (L+A) correspondientes a distintas profundidades y ensayos: (A) W, 0-20 cm, ensayo E1; (B) W, 20-40 cm, ensayo E2; (C) L+A, 0-20 cm, ensayo E2; (D) W, 20-40 cm, ensayo E3; (E) L+A, 0-20 cm, ensayo E3; (F) L+A, 20-40 cm, ensayo E4.

geoestadísticas no tiene sentido ya que éstas se basan en la dependencia espacial que existe entre pares de puntos cercanos y ésta es despreciable en los casos anteriores. Así, la variable W , para estos ensayos y profundidades, queda caracterizada adecuadamente a través de su media y varianza muestral; en el ensayo E3, a pesar de un comportamiento no estacionario, W también presenta un importante efecto pepita que, para la profundidad de 20 a 40 cm y para la máxima distancia considerada en el cálculo del semivariograma (112 m), supone un 88% de la semivarianza total (Fig. 13D).

La ausencia de autocorrelación espacial de W a distancias mayores que 5 y 25 m en E1 y E4, respectivamente, para los casos mencionados, es, claramente, consecuencia de la destrucción de la estructura natural del suelo debida a la labranza con vertedera y a otras prácticas culturales, tal como señalan Voltz y Bornand (1988). De hecho, el laboreo origina una importante variabilidad en la macroporosidad del suelo a cortas distancias (Cassel, 1983), lo cual puede enmascarar la variabilidad natural del suelo.

A diferencia de W , $L+A$ manifiesta en todos los casos autocorrelación espacial a la escala de muestreo considerada, con rangos (a) entre 27 y 127 m (Tabla 10). A excepción de E3, el efecto pepita no parece tener mucha importancia. Este o bien no existe (E1) o bien representa una mínima parte de la semivarianza total (4-11%). Por el contrario, en E3, C_0 supone casi un 40% de C ; no hay que olvidar que en este ensayo la mínima distancia de separación entre pares de puntos fue de 25 m y no existe certeza del comportamiento de esta propiedad a distancias menores. Asumimos que en el ensayo E3, $L+A$ presenta una importante variabilidad espacial a pequeñas distancias ya que el modelo gaussiano con efecto pepita fue el que mejores resultados ofreció en el proceso de validación.

Tal como se adelantó en el apartado 3.4.2.1., el efecto pepita tiene su origen en los errores experimentales y en la propia variabilidad de la propiedad a distancias inferiores a la mínima de muestreo. Webster y Burgess (1983) señalan que en muchos casos los errores de medida sólo representan una pequeña proporción del efecto pepita. En nuestro estudio, W y $L+A$ fueron determinados en las mismas muestras de suelo, por tanto, los posibles errores de muestreo deberían ser los mismos para una y otra propiedad. De la misma forma, cabría esperar un mayor error en las determinaciones en laboratorio de $L+A$, dada la mayor complejidad metodológica con relación a W . Sin embargo, el mayor efecto pepita en W no apoya la idea anterior por lo que puede considerarse que los errores experimentales, de existir, constituyen una pequeña parte de C_0 . Por tanto, se asume que en los casos con efecto pepita, éste refleja el porcentaje de aleatoriedad de la variabilidad total que muestra la propiedad a la escala de muestreo considerada en cada caso.

Según todo lo anterior, el diferente comportamiento espacial de las dos variables analizadas, W y $L+A$, se debe a su diferente naturaleza. Mientras que $L+A$, como componente textural, es una propiedad del suelo de carácter estático, W es el resultado de procesos de humectación y desecación que dependen, además de la textura del suelo, de su estructura y de otras características edáficas y topográficas.

Por otro lado, los semivariogramas direccionales indicaron anisotropía para W (0-20 cm) en E3 y para $L+A$ (0-20 y 20-40 cm) en E4. En la Figura 14 se muestran los semivariogramas calculados en la dirección de mayor y menor variación. En el caso de W ,

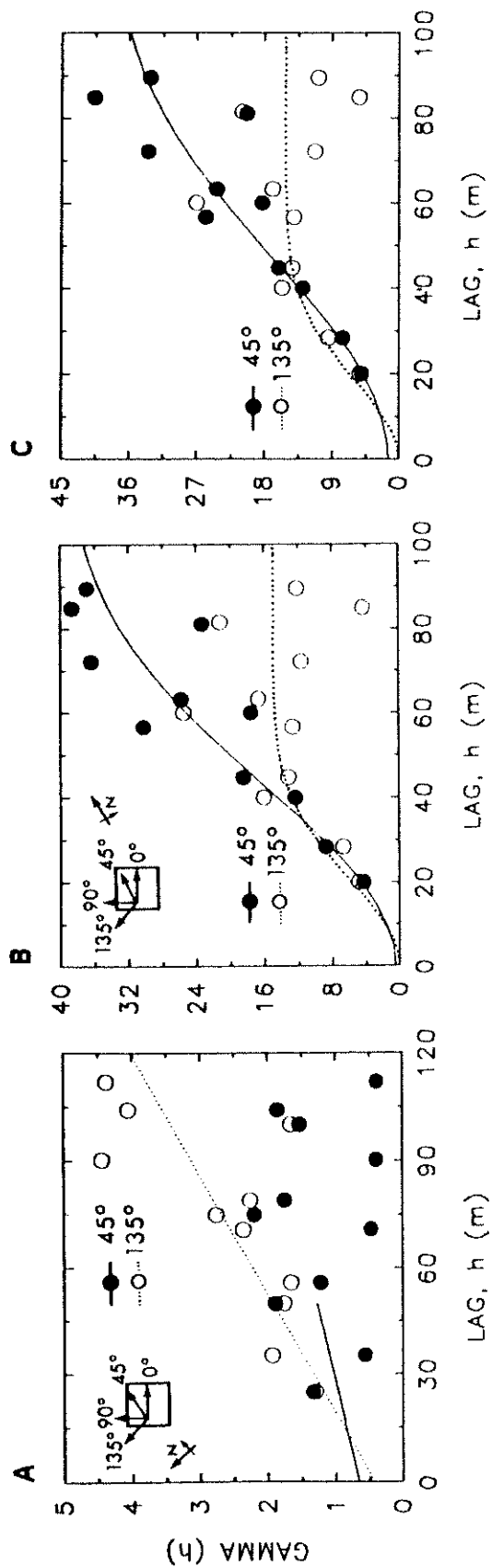


Fig. 14. Semivariogramas direccionales para los contenidos de humedad (W) y de limo más arcilla (L+A): (A) W, 0-20 cm, ensayo E3; (B) L+A, 0-20 cm, ensayo E4; (C) L+A, 20-40 cm, ensayo E4.

el semivariograma en la dirección N-S mostró una importante deriva (Fig. 14A), la cual queda reflejada en el modelo lineal sin meseta al que se ajustó el semivariograma experimental en este ensayo (Tabla 10). Quizá, una ligera pendiente en la dirección N-S explicaría esta tendencia. En el caso de L+A, la dirección de máxima variación fue, igualmente, la N-S y la de mínima la E-O (Fig. 14B-14C). En ambas direcciones el mejor ajuste correspondió al modelo gaussiano.

En los ensayos E3 y E4, L+A presentó rangos de dependencia bastante elevados (Tabla 10), llegando a superar la máxima distancia de cálculo del semivariograma, como ocurre en E3 para la profundidad de 20-40 cm. Una primera impresión del semivariograma experimental sería, quizá, la de un comportamiento próximo a la no estacionariedad, de tal modo que la disponibilidad de un mayor número de puntos de muestreo para las mayores distancias podría confirmar o no esta idea. Aún así, para la escala de estudio considerada y según los resultados obtenidos en la validación, el modelo de mejor ajuste fue el gaussiano y no el lineal sin meseta. Teniendo en cuenta que el objetivo último de este análisis geoestadístico es la obtención de los mapas de krigeado, el comportamiento del semivariograma a grandes distancias no es relevante en estos casos, ya que, al igual que en el caso de no estacionariedad de W en E3, el procedimiento de krigeado utilizado fue el de krigeado en un entorno, que considera el semivariograma únicamente para distancias inferiores a las del rango en las que se dispone de un mayor número de pares de puntos. Concretamente, para W y L+A en E3 el radio de búsqueda se fijó en 56 m y para L+A en E4 en 45 m.

La similitud, en términos globales, de las dos profundidades de suelo en cuanto a los parámetros que definen los semivariogramas teóricos (Tabla 10), pone de manifiesto, de nuevo, el efecto homogeneizador del laboreo en, al menos, los primeros 40 cm de profundidad.

4.1.3. Mapas de estimación por krigeado. Ubicación de las superficies de ensayo

A fin de conocer la distribución espacial de W y L+A para cada profundidad y ensayo, y haciendo uso de los semivariogramas de la Tabla 10, se estimaron dichos parámetros mediante krigeado en un entorno para W y L+A en el ensayo E3 y L+A en el E4, reduciendo el radio de búsqueda hasta, aproximadamente, unos 50 m, y krigeado ordinario en el resto de los casos. Los valores así estimados se muestran gráficamente en los mapas de contorno de las Figuras 15-18.

La pequeña diferencia entre las dos profundidades de suelo, que ya fue reflejada tanto por el análisis estadístico convencional como por el de estructura espacial, se confirmó en todos los ensayos al comparar los correspondientes mapas de contorno. No obstante, habría quizá que señalar como excepción el caso de W en E3 (Fig. 17A-17B); como puede verse, el mapa de la capa de suelo más profunda muestra, a diferencia del correspondiente a más superficial, contornos más irregulares, encerrando muchos de ellos pequeñas áreas, reflejo de las discontinuidades en la distribución espacial de W debidas a un importante efecto pepita (Webster and Burgess, 1983).

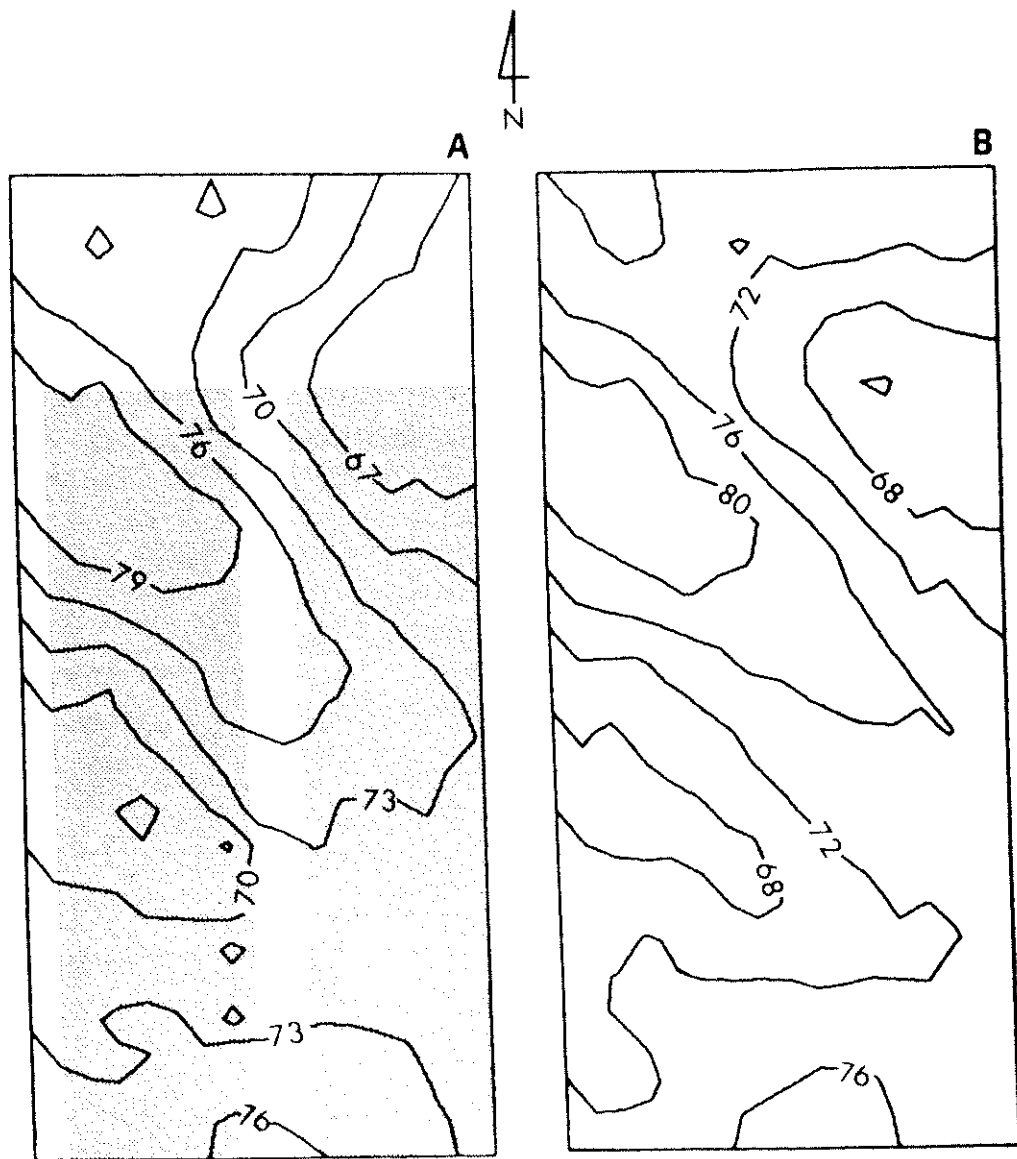


Fig. 15. Mapas de contorno de los valores del contenido de limo más arcilla estimados por krigado en el ensayo E1 de 0 a 20 cm (A) y de 20 a 40 cm de profundidad (B). El área sombreada corresponde a la superficie de ensayo.

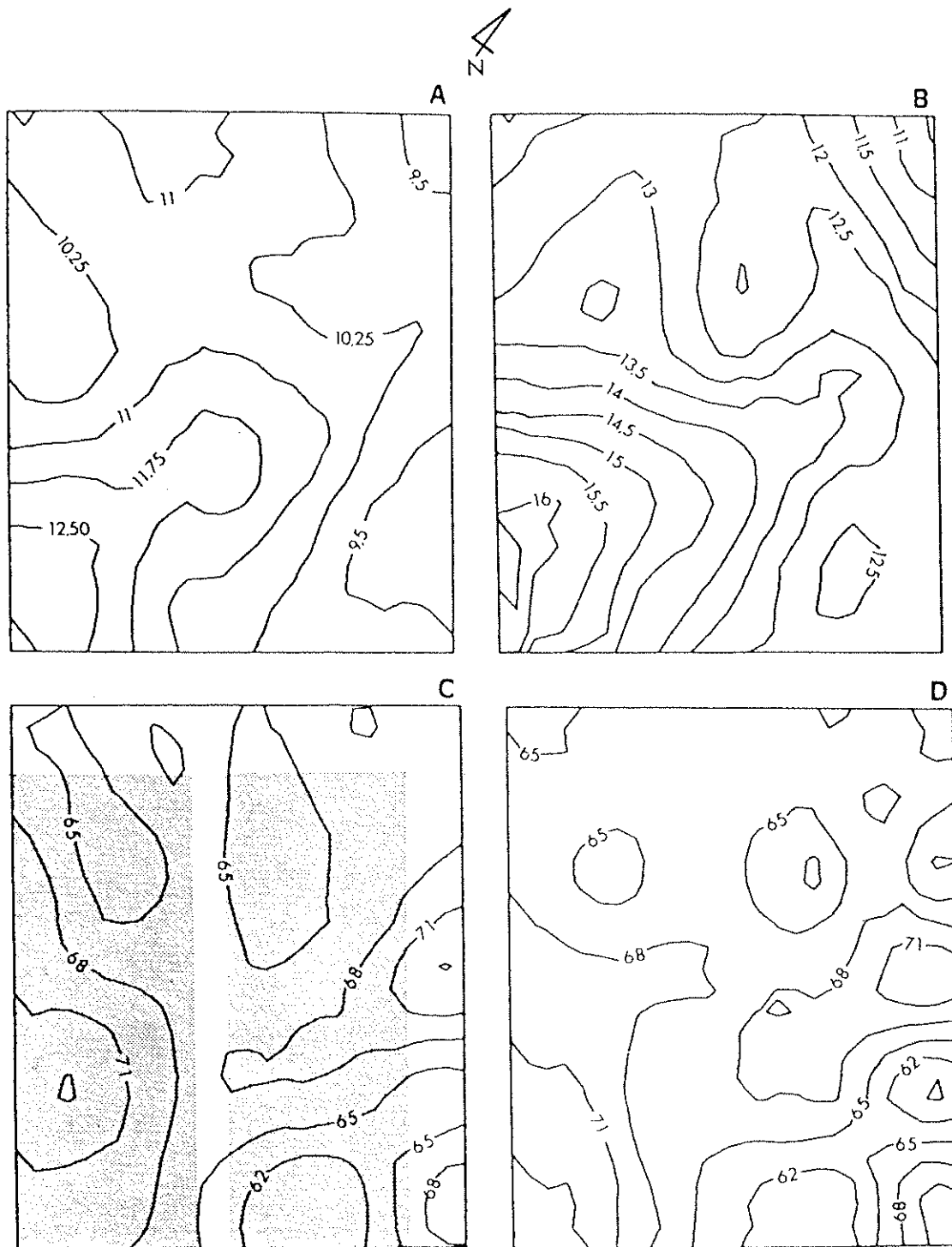


Fig. 16. Mapas de contorno de los valores de los contenidos de humedad (W) y de limo más arcilla (L+A) estimados por krigeado en el ensayo E2: (A) W, 0-20 cm; (B) W, 20-40 cm; (C) L+A, 0-20 cm; (D) L+A, 20-40 cm. El área sombreada corresponde a la superficie de ensayo.

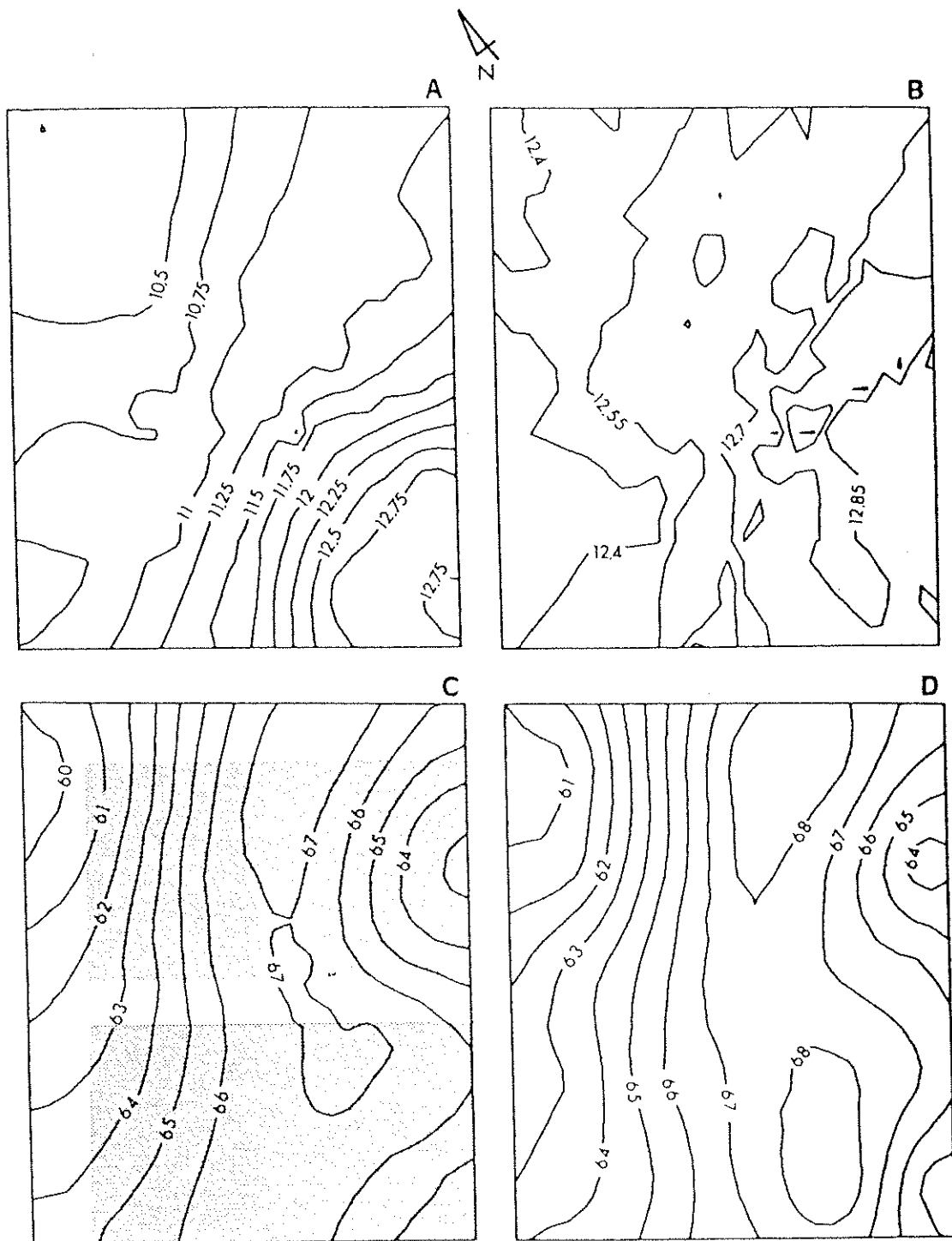


Fig. 17. Mapas de contorno de los valores de los contenidos de humedad (W) y de limo más arcilla (L+A) estimados por krigado en el ensayo E3: (A) W, 0-20 cm; (B) W, 20-40 cm; (C) L+A, 0-20 cm; (D) L+A, 20-40 cm. El área sombreada corresponde a la superficie de ensayo.

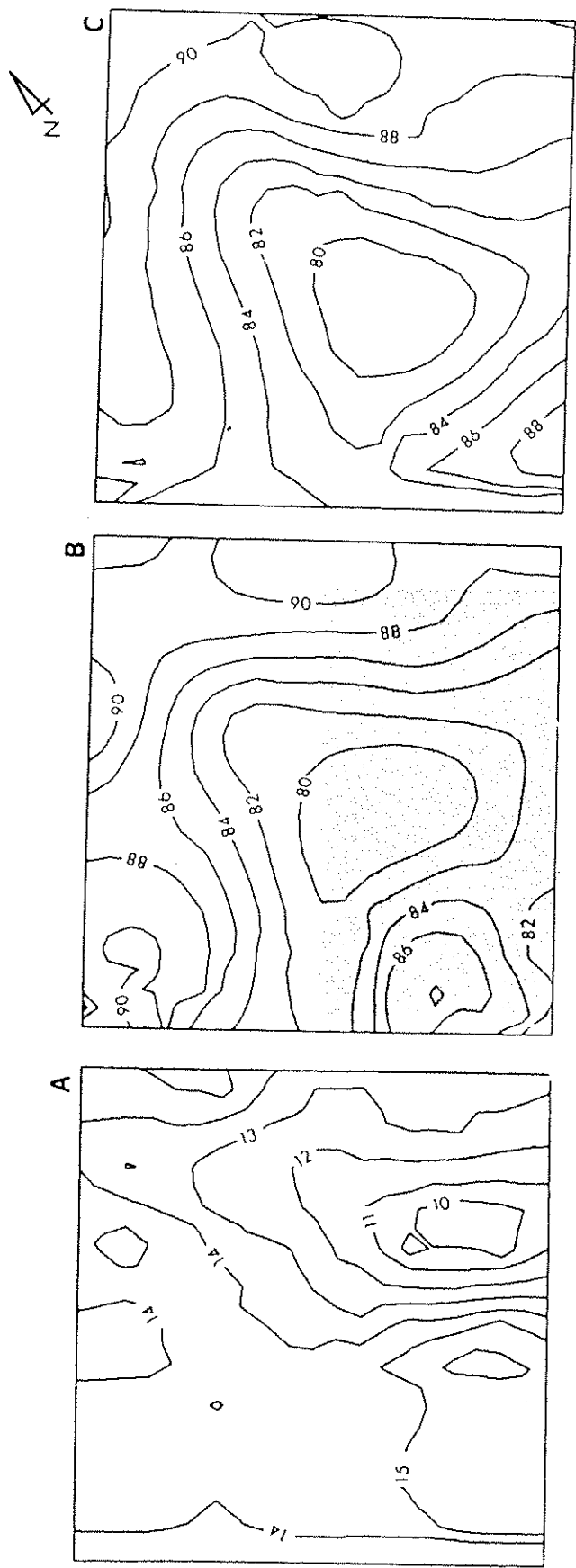


Fig. 18. Mapas de contorno de los valores de los contenidos de humedad (W) y de limo más arcilla (L+A) estimados por kriging en el ensayo E4: (A) W, 0-20 cm; (B) L+A, 0-20 cm; (C) L+A, 20-40 cm. El área sombreada corresponde a la superficie de ensayo.

En los diferentes ensayos, las superficies que ocuparon las parcelas elementales con los diferentes tratamientos de laboreo se establecieron en función de la heterogeneidad espacial detectada en estos mapas de contorno. El área sombreada sobre los mapas de contorno de L+A (0-20 cm) en cada uno de los ensayos indica la posición exacta de las superficies de ensayo (Figs. 15-18). Aunque en la ubicación definitiva de éstas se valoró tanto W como L+A, se dió más peso a esta última propiedad, ya que como componente textural, determinante de la capacidad de retención de humedad del suelo, debe presentar una mayor estabilidad temporal; este criterio se tuvo especialmente en cuenta en el ensayo E3 que presentaba, como ya se ha indicado, cierta deriva en la dirección N-S. En conjunto, el grado de variabilidad y los patrones de distribución espacial observados no supusieron dificultad especial alguna en la elección de las superficies de ensayo por lo que también se tuvo en cuenta el facilitar el acceso a las mismas de personal y maquinaria.

4.1.4. Evaluación de la estrategia de muestreo

El interés reciente en geoestadística por el diseño de esquemas óptimos de muestreo (Entz y Chang, 1991; Webster y Oliver, 1992) viene justificado por el gran número de puntos de medida necesarios para una adecuada caracterización de la variabilidad espacial de cualquier propiedad, con el consiguiente coste de esfuerzo y tiempo. Los variogramas y las técnicas de krigado pueden ser utilizados en la obtención de esquemas de muestreo que, con un mínimo número de puntos de observación, permitan describir acertadamente el grado de heterogeneidad del suelo.

En el plan de muestreo seguido en nuestro caso de estudio, la decisión de añadir dos transectos perpendiculares a la malla regular tenía como objetivo, tal como se expuso en la metodología, disponer de parejas de puntos a menores distancias (<20-25 m), además de incrementar el número de las establecidas por la malla. Efectuado el muestro según este esquema en los ensayos E1 y E2, y tras valorar el coste y esfuerzo del mismo, se planteó la posibilidad de muestrear en el resto de los ensayos siguiendo únicamente un tipo de muestreo, bien en malla bien en transectos, eliminando del esquema original parte de los puntos. Para decidir una u otra alternativa, se utilizaron los datos de L+A (0-20 cm) de E1 y se compararon los mapas de contorno obtenidos por krigado para los valores estimados y las correspondientes varianzas de estimación provenientes de tres esquemas de muestreo diferentes: a) malla más transectos; b) malla; y c) transectos.

Si el interés fuera conocer sólo la estructura espacial de la propiedad, el esquema de muestreo usado, malla más transectos, parecería, en principio, el más idóneo. Con este esquema se obtendrían pares de puntos cercanos y mayor precisión a mayores distancias. Por el contrario, la malla sin los transectos no definiría el semivariograma a distancias inferiores a 20 m y, quizá, el comportamiento global de éste no fuera adecuadamente descrito.

Sin embargo, la idea anterior no parece cumplirse al comparar los modelos de semivariogramas obtenidos con cada uno de los tres diseños de muestreo considerados (Tabla 11). Así, para malla más transectos y malla los valores de rango y meseta son muy similares, de lo que se deduce que en el segundo esquema el comportamiento del semivariograma a cortas distancias (0-20 m) es inferido por extrapolación del

comportamiento a mayores distancias (>20 m). Por tanto, la inclusión de los transectos no parece ser relevante ya que no aporta nueva información acerca de la estructura espacial a cortas distancias. Laslett y McBratney (1990) llegan a una similar conclusión al comparar diferentes métodos para predecir el pH del suelo. Estos autores señalan que la incorporación de dos mallas de 1 x 1 m a una malla cuadrada de 10 x 10 m fue innecesaria para definir el variograma a pequeños rangos (0-10 m).

Tabla 11. Parámetros de los modelos de semivariograma obtenidos para el contenido de elementos <50 μm en el suelo del ensayo E1, según diferentes esquemas de muestreo. (C₀: efecto pepita; C: meseta; a: rango).

Esquema de Muestreo	Modelo	C ₀	C	a (m)
Malla+Transectos	Esférico	0,00	20,00	43,98
Malla	Esférico	0,00	20,76	46,68
Transectos	Esférico	0,00	16,95	32,67

Los valores estimados de L+A (0-20 cm) para E1 y sus varianzas asociadas se muestran en la Figura 19. Cuando se eliminan los puntos de los transectos del esquema original el mapa de contorno de las estimaciones cambia muy poco (Fig. 19A y 19C), lo que supone que la mejora en las predicciones de L+A es mínima al añadir las parejas de puntos cercanos (5-15 m). Hay que señalar que la varianza del krigado para el diseño de malla es de la misma magnitud que para el diseño original (Fig. 19B y 19D) y sólo en la parte central del campo la presencia de los transectos incrementa ligeramente la precisión de las estimaciones. El análisis, tanto de los semivariogramas como de los mapas de krigado, parece indicar que la mejora esperada con la inclusión de los transectos no justifica el coste adicional de los mismos.

Por otro lado, es interesante señalar que el mapa de contorno obtenido sólo a partir del conjunto de puntos de los transectos (Fig. 19E) resulta claramente diferente al de los otros dos esquemas. La razón está en el pequeño número de puntos a distancias mayores de 20 m, lo que implica que el valor de la semivarianza a estas distancias pueda resultar no muy fiable. Esto podría explicar el menor valor del rango y de la meseta del semivariograma obtenido con este esquema (Tabla 11). La Figura 19F muestra el importante incremento de la varianza del krigado en áreas donde no hay observaciones, reflejando la pobre estimación de L+A en regiones del campo alejadas de los transectos. Estos resultados advierten de la inconveniencia de calcular los semivariogramas únicamente a partir de los datos de los transectos y de su utilización para efectuar estimaciones en la totalidad del campo.

Según todo lo anterior, puede asumirse que, para la finalidad del presente trabajo, el muestreo en malla regular constituye una estrategia eficiente para estimar por krigado valores de propiedades con estructura espacial. Por ello, éste fue el esquema seguido en los ensayos E3 y E4.

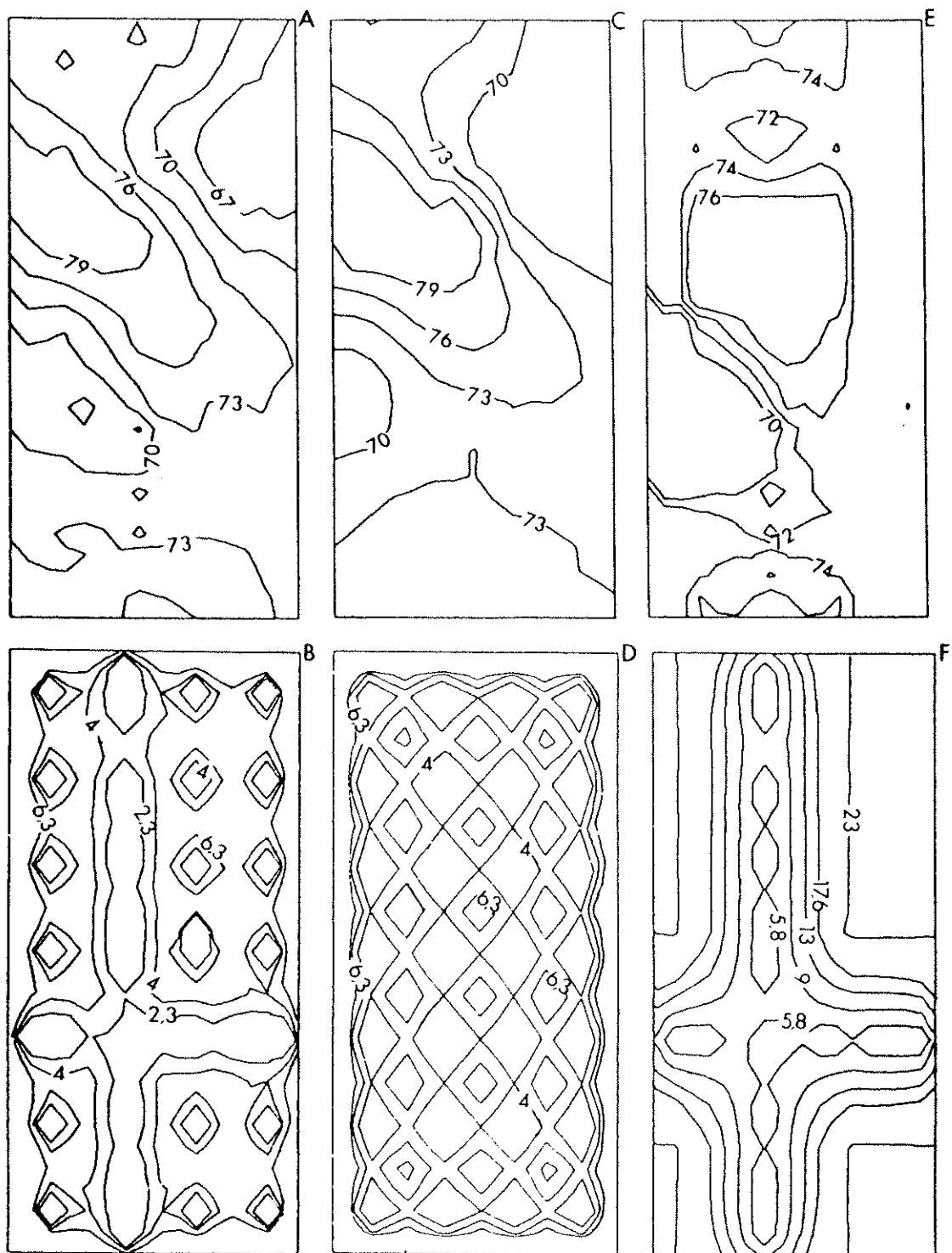


Fig. 19. Mapas de contorno de los valores del contenido de limo más arcilla de 0 a 20 cm de profundidad estimados por krigado en el ensayo E1 según los esquemas de muestreo en malla más transectos (A), malla (C) y transectos (E). En los gráficos B, D y F se muestran los mapas de las varianzas de krigado correspondientes a los mapas anteriores.

4.2. CLIMATOLOGIA DURANTE EL PERIODO EXPERIMENTAL

4.2.1. Precipitación y temperatura

En este apartado se presentan las condiciones meteorológicas que han caracterizado las campañas agrícolas a lo largo del período experimental en cada una de las zonas de ensayo. No se pretende realizar aquí un análisis pormenorizado de las mismas -ya otros autores han profundizado sobre la peculiaridad del clima en estas áreas (Liso y Ascaso, 1969; Ascaso y Cuadrat, 1981), sus condiciones agroclimáticas (De León et al., 1987, 1991a,b) y los factores condicionantes de la agricultura de secano en Aragón, con especial referencia al régimen pluviométrico (Cuadrat, 1986a,b)-, sino resaltar tan sólo las incidencias más sobresalientes en relación con las condiciones normales. La precipitación mensual y la temperatura media mensual del aire en cada uno de los sitios de ensayo para el año medio y los tres años que engloban las dos campañas experimentales (1990-91 y 1991-92) se recogen, respectivamente, en las Tablas 12 y 13. En la Figura 20 se muestra la evolución de la pluviometría en estos años, resaltándose los períodos de déficit de lluvia entre las fechas de siembra y recolección del cultivo de cebada.

A excepción de 1991 en el ensayo E3, con una pluviometría anual un 21% mayor que la del año medio, para los demás ensayos se ha registrado en el período 1990-92 una precipitación inferior a la normal del orden de un 15% a un 30%, según los años (Tabla 12 y Fig. 20). Desde el punto de vista agronómico, la lluvia registrada entre los meses de octubre y junio es prácticamente la normal en E3 mientras que en los otros ensayos representa una reducción media de un 25-30% para las dos campañas, con la excepción de la segunda campaña en E1 donde esta reducción llega a un 47%.

Por lo que respecta a la distribución de lluvias en este último período, cabe decir que en los meses de octubre a enero la precipitación es inferior a la del año medio en todos los casos: 30% y 50% menor para la primera y segunda campaña, respectivamente, en E1 y E2; 30% y 15% en E3; y 2% y 30% en E4. Hay que resaltar la importancia de este déficit de agua ya que se produce, precisamente, en un período de recarga de humedad en el perfil del suelo y de germinación y primeros estadios del desarrollo del cultivo tras la siembra.

En el período de febrero a abril, al final del cual el cultivo alcanzaría su máximo desarrollo, la pluviometría en el año medio supone aproximadamente el 30% de la recibida entre octubre y junio. En el caso de la primera campaña del período experimental esta cifra es superada en todos los ensayos, llegando al 60% en E3. Este hecho que, en principio, debería representar una situación favorable para un normal desarrollo del cultivo, está condicionado, sin embargo, por el déficit de humedad presente en la fase de recarga. La situación es aún peor en la segunda campaña donde la pluviometría entre febrero y abril representa tan sólo un 10-20% de la registrada entre octubre y junio, y donde un 40-50% de ésta corresponde a los meses de mayo y junio, cuando el cultivo ya ha iniciado su fase de espigado (Fig. 20).

En cuanto al régimen de temperaturas (Tabla 13), se puede destacar, en primer lugar, que, en conjunto, la temperatura media anual del aire en el período experimental, 1990-92, es 0,5°C más elevada que la del año medio. A este incremento contribuyen de

Tabla 12. Precipitación mensual y anual en el año medio y en el período experimental en cada uno de los sitios de ensayo.

Ensayo	Período	E	F	M	A	M	A	M	J	J	J	A	S	O	N	D	Anual
E1	1954-89	27,7	26,6	31,3	35,7	51,4	40,2	17,7	25,3	40,2	39,6	45,9	28,9	411			
	1990	0,0	0,0	2,8	25,2	72,9	38,2	25,0	3,0	45,9	46,5	24,2	18,3	302			
	1991	3,8	56,2	16,9	49,7	8,2	24,0	13,5	20,1	94,5	27,0	31,9	8,0	354			
	1992	0,5	9,1	5,3	7,0	36,7	46,6	7,0	42,7	42,0	81,2	2,5	16,7	297			
E2	1966-89	30,3	29,8	30,3	46,7	55,6	48,1	46,1	23,8	36,5	40,4	44,6	32,9	465			
	1990	26,0	0,0	1,0	23,7	56,2	57,7	31,0	18,5	24,8	51,1	27,5	15,0	333			
	1991	6,0	33,0	46,7	44,0	6,5	45,0	16,5	7,0	74,5	29,5	45,5	4,0	358			
	1992	10,0	6,0	7,1	21,0	45,5	77,8	6,5	65,0	34,5	67,5	2,0	32,5	375			
E3	1961-89	27,4	20,0	26,9	26,8	40,8	23,4	15,0	18,7	37,3	41,4	33,2	26,8	338			
	1990	28,0	0,0	0,0	16,0	69,0	28,0	0,0	24,0	38,5	65,0	8,0	0,0	277			
	1991	18,0	61,5	91,0	27,5	24,5	0,0	0,0	0,0	85,5	17,5	39,0	43,5	408			
	1992	10,0	8,0	2,5	17,5	85,0	45,0	0,0	13,0	35,5	24,0	24,0	36,0	301			
E4	1955-89	44,1	44,7	50,2	55,8	63,0	52,0	24,6	43,2	57,2	58,7	57,8	47,5	599			
	1990	3,0	13,5	0,0	40,0	50,0	34,0	13,0	14,0	91,0	116,0	64,0	14,0	453			
	1991	9,5	29,5	58,0	37,0	7,0	2,0	0,0	8,0	102,0	35,0	91,0	17,0	396			
	1992	10,0	10,0	21,0	23,5	62,5	67,4	17,1	81,4	77,4	104,2	3,2	33,3	511			

Tabla 13. Temperatura mensual y media anual en el año medio y en el periodo experimental en cada uno de los sitios de ensayo.

Ensayo	Periodo	°C												Media anual
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
E1	1954-89	6,0	7,5	10,4	12,8	16,7	20,8	23,8	23,2	20,3	15,2	9,6	6,4	14,4
	1990	5,9	11,3	11,3	12,5	19,1	22,5	25,7	24,9	22,5	16,6	10,1	3,6	15,5
	1991	5,6	6,9	12,1	11,5	15,8	21,8	25,3	26,6	21,4	13,6	9,0	6,7	14,7
	1992	2,3	7,1	10,7	14,1	18,8	18,0	24,2	24,7	20,4	13,9	10,7	6,9	14,3
E2	1966-89	5,6	6,3	8,8	11,8	15,3	19,9	23,4	23,4	20,5	14,9	9,3	5,6	13,7
	1990	6,0	10,1	11,1	10,1	17,4	20,3	23,5	22,2	19,9	14,3	9,6	3,6	14,0
	1991	5,4	4,9	10,3	8,5	12,4	19,1	23,5	24,8	21,0	11,6	7,9	6,6	13,0
	1992	4,9	5,4	8,5	11,8	15,9	15,6	22,6	21,8	18,1	12,0	10,0	5,8	12,7
E3	1961-89	5,2	6,8	7,3	11,7	15,3	15,8	26,9	22,0	15,6	11,6	8,7	5,6	12,7
	1990	5,8	11,2	10,5	11,7	17,5	21,1	24,4	24,1	21,2	15,4	9,9	4,4	14,8
	1991	5,5	6,4	11,3	10,6	14,0	20,4	24,3	25,8	21,0	12,4	8,7	6,5	13,9
	1992	2,3	6,4	9,9	13,2	20,2	16,9	23,3	24,3	19,2	13,4	10,5	6,8	13,9
E4	1955-89	4,7	6,4	8,9	11,6	15,7	19,4	21,8	22,9	19,6	14,6	8,6	5,2	13,3
	1990	4,6	11,0	11,4	10,9	18,2	20,3	24,6	24,5	21,0	14,8	8,6	3,2	14,4
	1991	5,4	5,8	10,6	10,1	14,6	20,5	24,5	26,3	20,9	12,5	8,2	6,2	13,8
	1992	1,8	6,3	9,6	13,0	17,8	16,4	23,6	24,0	19,0	11,8	10,2	5,9	13,3

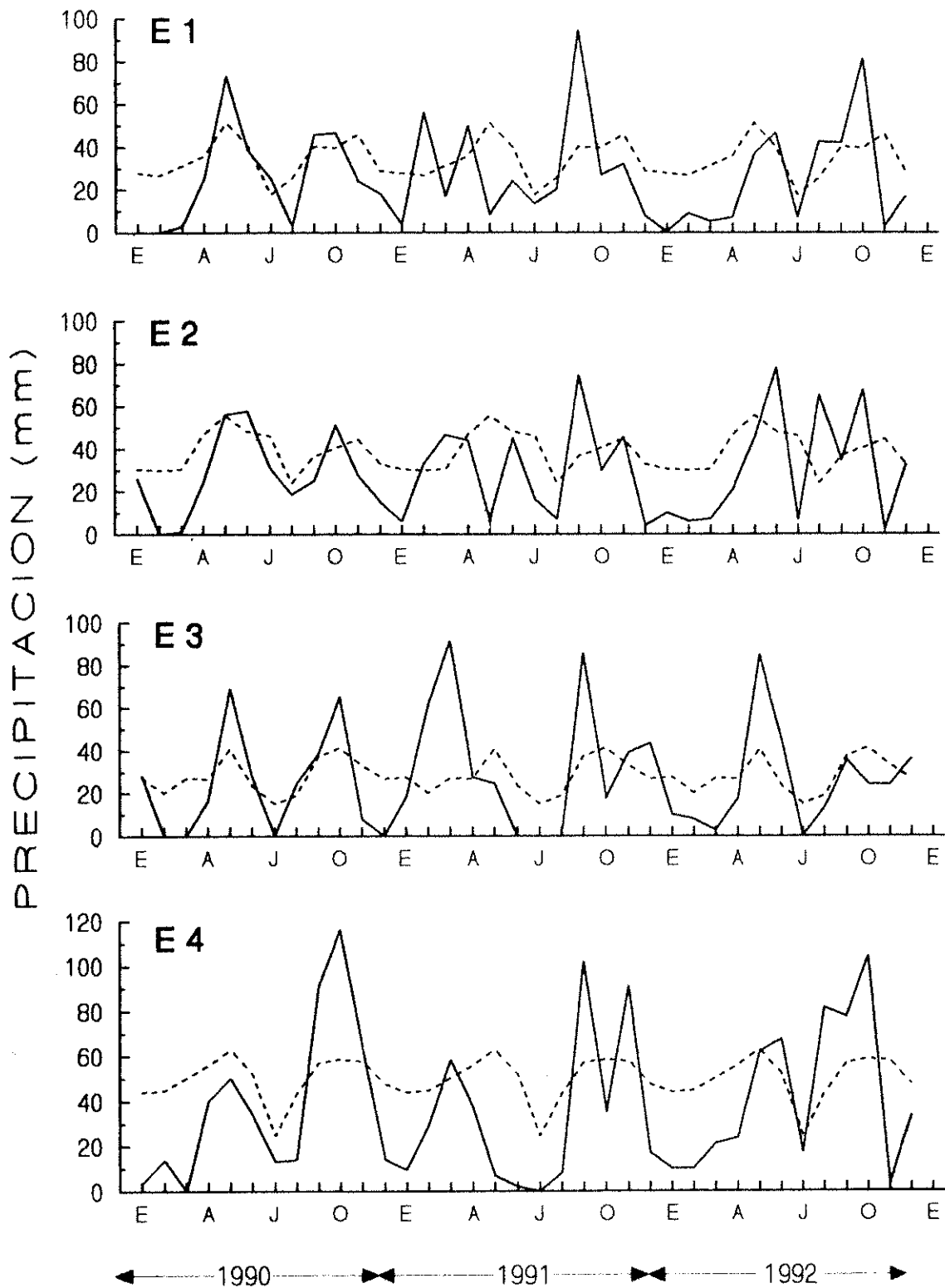


Fig. 20. Evolución de la precipitación media mensual durante el período experimental (línea continua) y la correspondiente al año medio (línea discontinua) en cada uno de los sitios de ensayo.



manera importante los elevados registros del año 1990. Considerando ahora las temperaturas medias estacionales y teniendo en cuenta diferencias superiores a 0,5°C con relación al año medio, podrían destacarse las siguientes circunstancias meteorológicas generales: un otoño (1990) y una primavera (1992) más cálidos y un invierno (1991-92) más frío de lo normal. En el primer caso, las mayores temperaturas pueden favorecer una mayor tasa de evaporación de agua del suelo, contribuyendo así a potenciar la situación de déficit hídrico creada, como hemos visto, por una menor pluviometría.

4.2.2. Clima del suelo: regímenes de humedad y temperatura

Los datos mensuales de precipitación y temperatura del aire (Tablas 12 y 13) han servido de base para la estimación de los regímenes de humedad y temperatura del suelo en cada uno de los sitios experimentales, tanto para el año medio como para cada uno de los años del período experimental, según el modelo matemático de Newhall (Van Wambeke et al., 1986), que asume la presencia de un suelo bien drenado, sin agua freática y sin riego, como en el caso de las condiciones de ensayo.

Básicamente, el modelo simula los movimientos del agua en el sistema aire-suelo-planta y establece un calendario del estado hídrico de la llamada "sección de control de humedad" (SCH) del suelo bajo ciertas condiciones de temperatura del suelo. A partir de este calendario se establecen los requisitos que deben satisfacer los distintos regímenes de humedad y temperatura del suelo. Para una mayor información sobre las asunciones, etapas de simulación, definición de las condiciones de humedad y temperatura del suelo, criterios de clasificación climática, etc., pueden consultarse los trabajos de Soil Survey Staff (1975), Tavernier y Van Wambeke (1976a) y Van Wambeke et al. (1986).

En la Tabla 14 se destacan aquellos parámetros que, además de servir como criterios de clasificación, presentan un claro interés agronómico. Según las estimaciones del modelo, a excepción de E4, el suelo raramente presenta contenidos de humedad por encima del correspondiente a "capacidad de campo". Esta circunstancia es más grave si se tiene en cuenta el número de días tras el solsticio de invierno, momento en el que el suelo debería presentar una reserva de agua suficiente para satisfacer la demanda del cultivo. Por el contrario, resulta muy elevado el número acumulado de días en los que el agua en el suelo se encuentra retenida a un potencial mátrico igual o superior a -1,5 MPa ("punto de marchitez permanente").

El modelo permite estimar también el número acumulado de días en los que la temperatura del suelo a 0,5 m de profundidad es superior a 5°C y dentro de éstos, aquéllos con la SCH completamente seca (S), parcialmente seca/parcialmente húmeda (H/S) y completamente húmeda (H). En la Tabla 14 se recogen únicamente las dos últimas situaciones, las cuales representan el período de crecimiento del cultivo, es decir, el número de días sin restricciones de humedad y temperatura (Soil Survey Staff, 1975; Jensen, 1984). Obviamente, el factor limitante es la falta de agua en el suelo. En los casos de régimen de humedad arídico no existe agua disponible en el suelo en más de la mitad del tiempo con temperaturas superiores a 5°C. No ocurre lo mismo en el resto de los casos en los que el período de crecimiento representa entre un 50% y un 90% de los días sin limitación de temperatura, y ello con independencia del régimen de humedad. Sin embargo,

Tabla 14. Características del régimen de humedad del suelo en cada uno de los sitios de ensayo correspondientes al año medio y al período experimental.

Ensayo	Período	N° acumulado de días con SCH ¹			N° máximo de días consecutivos con SCH		N° acumulado de días con Ts > 5°C ²		Régimen de Humedad	
		S ³	H/S ⁴	H ⁵	S tras solsticio de verano	H tras solsticio de invierno	Total	Con SCH: (período de crecimiento)	Total	%
		Total		Total		Total		Total		%
E1	1954-89	151	209	0	120	0	360	209	58,1	Ustico
	1990	341	19	0	120	0	325	19	5,8	Aridico
	1991	126	234	0	75	0	360	234	90,0	Ustico
	1992	202	158	0	105	0	316	114	36,1	Aridico
E2	1966-89	123	100	137	108	75	360	237	65,8	Xérico
	1990	179	181	0	105	0	326	147	45,1	Aridico
	1991	95	265	0	75	0	344	249	72,4	Ustico
	1992	158	202	0	46	0	341	183	53,7	Ustico
E3	1961-89	189	171	0	125	0	360	171	47,5	Aridico
	1990	204	156	0	105	0	334	130	38,9	Aridico
	1991	66	167	127	66	75	360	294	81,7	Xérico
	1992	241	119	0	120	0	313	72	23,0	Aridico
E4	1955-89	25	117	218	15	120	326	301	92,3	Ustico
	1990	71	56	233	71	120	309	238	77,0	Xérico
	1991	71	78	211	71	120	360	289	80,3	Xérico
	1992	50	72	238	37	120	305	255	83,6	Ustico

¹ Sección de control de humedad del suelo (Van Wambeke et al., 1986).

² Temperatura del suelo a 0,5 m de profundidad.

³ SCH completamente seca (agua retenida a $\geq 1,5$ MPa de succión, "punto de marchitez permanente").

⁴ SCH parcialmente húmeda o parcialmente seca (agua retenida entre "punto de marchitez permanente" y "capacidad de campo").

⁵ SCH completamente húmeda (agua retenida por encima de "capacidad de campo").

en estos casos hay que considerar su distribución a lo largo del año. En el apartado 4.3. se tendrá ocasión de analizar dicho reparto con relación al desarrollo del cultivo en las dos campañas de ensayo.

Con relación al régimen de humedad que presentan los suelos en cada uno de los ensayos, se observa una discrepancia entre el que corresponde al año normal y el de los años experimentales. El modelo es muy sensible a la distribución de las lluvias a lo largo del año por lo que no es de extrañar estas diferencias. En el caso de E1 el régimen de humedad para el año medio es ústico, al igual que para el año 1991, mientras que resulta ser arídico para 1990 y 1992 en concordancia con los resultados de Alberto et al. (1984). Según Tavernier y Van Wambeke (1976b), el régimen ústico en la península Ibérica se presenta como un pedoclima transicional entre tipos xéricos hacia regímenes arídicos o údicos; en el primer caso estaría el suelo de E1, que no recibe suficiente agua en invierno para que la SCH se humedezca completamente y cumpla con los requisitos del régimen xérico, y en el segundo el de E4, ya con una mayor pluviometría, cuya SCH no se seca completamente durante más de 45 días consecutivos después del solsticio de verano (Tavernier y Van Wambeke, 1976b).

El régimen de humedad en E2 que en el año medio es xérico, con un pluviometría en invierno propia de ambientes mediterráneos, en los años experimentales puede ser arídico o ústico, al igual que en E1. Por último, en E3 el régimen es marcadamente arídico, lo que significa que en esta zona se darían, en principio, las condiciones más limitantes para la producción de cultivos de secano.

Finalmente, el régimen de temperatura del suelo resulta ser térmico en todos los casos, confirmando los resultados de Arrúe et al. (1984) para la cuenca del Ebro.



4.3. DINAMICA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO

En este apartado se presentan los resultados relativos a la evolución del contenido de humedad en el suelo, observado en la profundidad efectiva considerada en el estudio (0-80 cm), según tratamiento de laboreo, sitio de ensayo y campaña experimental.

Si bien la densidad aparente del suelo es función del estado estructural de éste, y en suelos hinchables muy especialmente del contenido de humedad (Blake y Hartge, 1986), dada la textura y el carácter no hinchable de los suelos considerados en este estudio, se ha asumido que su densidad aparente no varía de modo apreciable durante los ciclos de humectación-desección y, por tanto, en el rango de humedad encontrado a lo largo de todo el período experimental. Así, si se considera la relación establecida por Martín Aranda et al. (1980) entre coeficiente de extensibilidad lineal, COLE (cambio de volumen del suelo desde la situación de máxima humectación a la de máxima desecación), y porcentaje de la fracción arcilla ($COLE = 0,218A - 2,595$; $r=0,847$), estos suelos presentarían un valor de COLE entre 0,1% y 4%; esta última cifra se aproxima a la máxima contracción (5%) observada en algunas muestras durante la determinación de la densidad aparente. En la Tabla 15 se presentan los valores medios de densidad aparente utilizados para la conversión en volumen del contenido de humedad determinado gravimétricamente, valores que corresponden a las determinaciones efectuadas en el momento de la descripción del perfil de los suelos.

Como valores de referencia para la discusión de los distintos estados de almacenamiento de agua encontrados, en la Tabla 15 se presentan también los contenidos de humedad de los suelos correspondientes a "capacidad de campo", CC (porcentaje de agua retenida a un potencial matricial de -33 kPa) y a "punto de marchitez permanente", PMP (porcentaje de agua retenida a un potencial matricial de -1,5 MPa). A pesar de las limitaciones que desde el punto de vista conceptual presentan estas constantes de retención de humedad (Gardner, 1972; Ritchie, 1981; Cassel y Nielsen, 1986), a partir de ellas, expresadas en mm de agua, se ha calculado, también como valor de referencia, la "capacidad de agua disponible", CAD ($CAD = CC - PMP$), tanto en la capa arable (de 0 a 40 cm de profundidad) como en todo el perfil del suelo (0-80 cm) (Tabla 16).

Aunque en el apartado 4.6. se dará cuenta de los resultados relativos al balance de agua y los cambios en la reserva de humedad entre las distintas fechas de determinación del perfil hídrico del suelo, conviene tener presente que cada una de estas fechas corresponde a un determinado estadio de desarrollo del cultivo (Anexo III), a saber: germinación, principios del encañado, espigado, formación de grano y maduración (cosecha).

La campaña agrícola 1989-90 sirvió de preparación del suelo para los posteriores ensayos de laboreo y puede considerarse, por tanto, como "campaña cero". Así, las fechas en las que se dieron las labores primarias, tras la cosecha de la mencionada campaña, se toman como punto de partida en el análisis de los efectos debidos a los tratamientos aplicados. Desde el punto de vista de la retención de agua en el suelo, presentamos a continuación la evolución de los perfiles hídricos, los patrones de extracción de humedad con la profundidad y la dinámica de la reserva de agua para las dos campañas del período experimental.

Tabla 15. Densidad aparente (Da) y contenidos de humedad del suelo a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) en cada uno de los sitios de ensayos.

Ensayo	Parámetro	Profundidad (cm)							
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
E1	Da (gr/cm ³)	1,36	1,49	1,46	1,45	1,59	1,57	1,60	1,61
	CC (% vol.)	27,59	30,23	29,62	26,77	29,35	28,98	22,46	22,60
	PMP (% vol.)	14,61	16,00	15,68	14,28	15,66	15,46	10,22	10,29
E2	Da (gr/cm ³)	1,22	1,34	1,37	1,33	1,42	1,50	1,50	1,50
	CC (% vol.)	24,91	27,36	27,98	27,16	32,06	33,87	33,87	33,87
	PMP (% vol.)	14,47	15,89	16,25	15,77	10,55	11,15	11,15	11,15
E3	Da (gr/cm ³)	1,48	1,60	1,49	1,44	1,49	1,48	1,50	1,51
	CC (% vol.)	23,07	24,94	23,23	28,43	29,41	29,22	29,61	29,81
	PMP (% vol.)	12,79	13,82	12,87	13,19	13,65	13,56	13,74	13,83
E4	Da (gr/cm ³)	1,61	1,77	1,76	1,70	1,66	1,65	1,65	1,64
	CC (% vol.)	31,86	35,03	34,83	33,64	35,14	34,93	34,93	34,72
	PMP (% vol.)	17,85	19,63	19,52	18,85	19,24	19,12	19,12	19,01

Tabla 16. Agua retenida a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de agua disponible (CAD) en el suelo de 0 a 40 cm y de 0 a 80 cm de profundidad en cada sitio de ensayo.

Ensayo	CC		PMP		CAD	
	0-40 cm	0-80 cm	0-40 cm	0-80 cm	0-40 cm	0-80 cm
	mm					
E1	114,21	217,60	60,57	112,28	53,64	105,40
E2	107,41	241,08	62,38	106,38	45,03	134,70
E3	99,67	217,72	52,67	107,45	47,00	110,27
E4	135,36	275,08	75,85	152,24	59,51	122,84

4.3.1. Campaña 1990-91

4.3.1.1. Perfiles hídricos

En primer lugar, parece oportuno considerar el estado de humectación que presentaba la capa arable el día de la siembra para cada uno de los tratamientos de laboreo y sitios de ensayo (Tabla 17). La variación entre ensayos del agua almacenada es resultado de la diferente distribución y cantidad de lluvia recibida entre el momento de las labores y la siembra (Fig. 20), del tiempo transcurrido entre ambas fechas (de dos a cuatro meses, según ensayo) y de las condiciones climáticas locales que han favorecido una mayor o menor pérdida de agua por evaporación. Así, la elevada reserva de agua útil en el ensayo E4 (un 93% de la capacidad total de agua disponible, tomando como referencia el tratamiento de laboreo tradicional) es consecuencia de una mayor pluviometría con anterioridad a la siembra. Lo contrario sucede en los ensayos E2 y E3 en los que una precipitación escasa e infrecuente obligó a realizar la siembra en unas condiciones de humedad del suelo mucho menos favorables (16% y 32% de la capacidad total de reserva de agua disponible).

Por lo que respecta a las diferencias entre tratamientos de laboreo, en E2 y en E4 el laboreo de conservación contribuye al almacenamiento de agua en la capa arable con una eficiencia similar al laboreo tradicional (Tabla 17). En los ensayos E1 y E3, en cambio, el agua disponible en el suelo bajo siembra directa es menor; la diferencia es significativa con respecto a vertedera y chisel en E1 y sólo frente a vertedera en E3.

En las Figuras 21 y 22 se presentan los perfiles de humedad hasta 80 cm de profundidad para cada uno de los tratamientos de laboreo y fechas consideradas en cada ensayo.

Si ya en el momento de la siembra las condiciones de humedad del suelo no eran muy favorables salvo en el ensayo E4, la escasa precipitación en las zonas más áridas durante los meses de noviembre y diciembre (Fig. 20 y Tabla 12) agrava esta situación en la 1ª fecha de determinación de los perfiles hídricos, los cuales alcanzan en los ensayos E2 y E3 el punto de marchitez permanente (Figs. 21 y 22).

La situación de los perfiles de humedad en la 2ª fecha de muestreo (de tres a cuatro meses después de la primera, ya ahijado el cultivo) fue la siguiente: en los ensayos E1, E2 y E4, con una lluvia que podríamos calificar de normal en el periodo transcurrido, se aprecia cierta extracción de agua en los primeros 40 cm del perfil; en el ensayo E3, en el que se recibió una lluvia excepcionalmente superior a la normal (Fig. 20), el perfil experimenta, por el contrario, una recarga importante. El bajo contenido de humedad observado en fechas anteriores en el tratamiento de siembra directa en el ensayo E1, en este momento se diferencia significativamente del que presentan el resto de tratamientos para los primeros 40 cm de profundidad (Fig. 21). En E4 la mayor recarga del perfil en siembra directa es consecuencia de la falta del cultivo y del consiguiente consumo de agua. La manifestación de un problema grave de fitotoxicidad en las parcelas de siembra directa tras la nascencia del cultivo condujo a una pérdida completa del mismo. De acuerdo con las investigaciones llevadas a cabo por el Servicio de Protección Vegetal de la Diputación General de Aragón y por el propio fabricante del herbicida (Monsanto, 1991), este hecho,

Tabla 17. Agua almacenada (S) y agua disponible (AD) de 0 a 40 cm de profundidad el día de la siembra en la campaña 1990-91 para cada tratamiento de laboreo y sitio de ensayo.

Ensayo	Tratamiento de laboreo	Agua almacenada S (mm)	Agua disponible AD (mm)
E1	V	97,63 a	37,06
	Ch	85,70 a	25,13
	SD	66,74 b	6,17
	DMS (0,05)	14,39	
E2	V	69,40 a	7,02
	Ch	77,23 a	14,85
	SD	68,83 a	6,45
	DMS (0,05)	ns	
E3	V	67,50 a	14,83
	Ch	61,93 ab	9,26
	SD	54,70 b	2,03
	DMS (0,05)	9,72	
E4	V	131,22 a	55,37
	Ch	130,13 a	54,28
	SD	130,29 a	54,44
	DMS (0,05)	ns	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para un mismo ensayo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

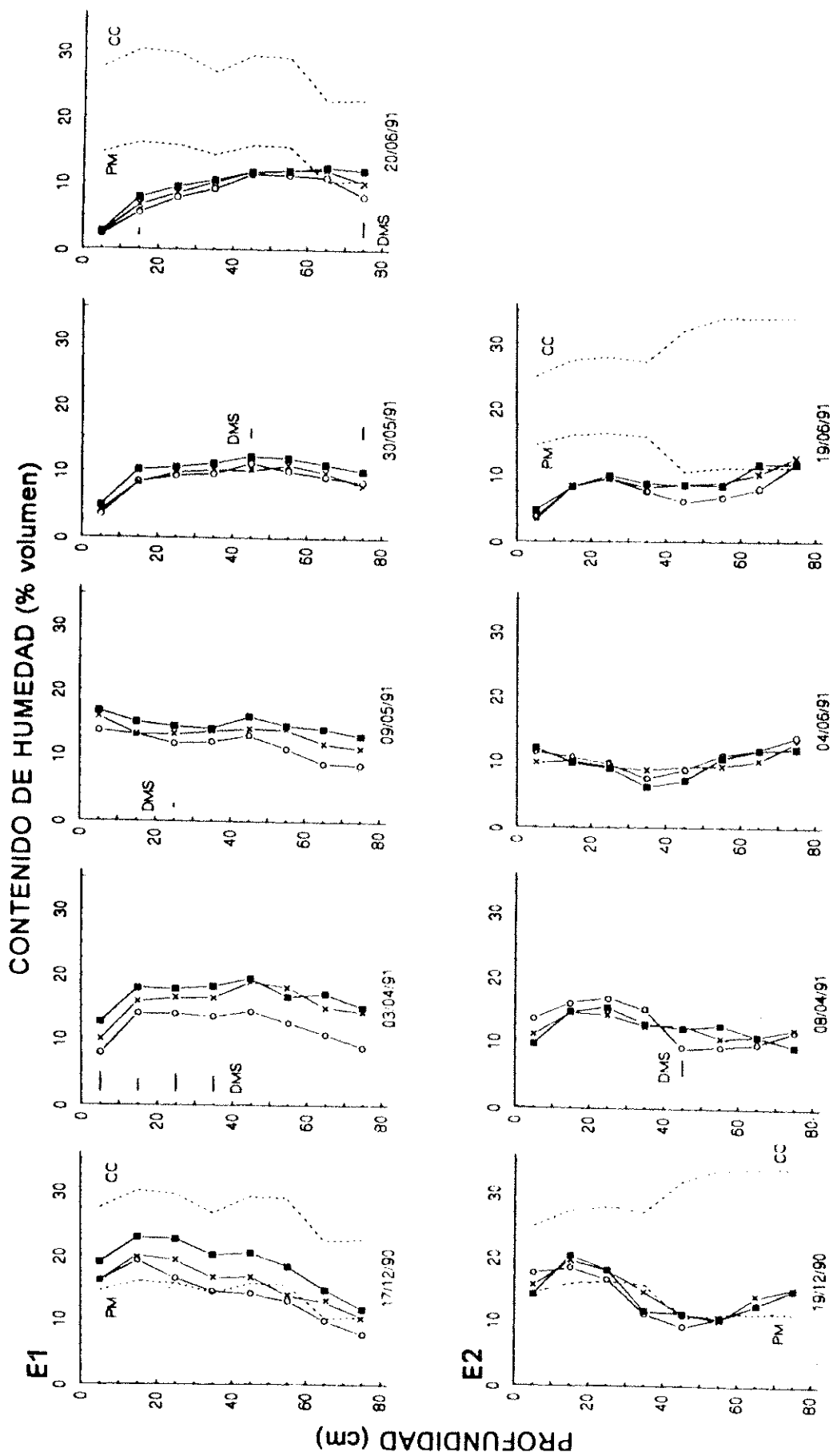


Fig. 21. Evolución del perfil hídrico del suelo en los ensayos E1 y E2 en la campaña 1990-91 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; ○, siembra directa). Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales. Los perfiles PM y CC, en trazo discontinuo, corresponden a punto de marchitez permanente y a capacidad de campo, respectivamente.

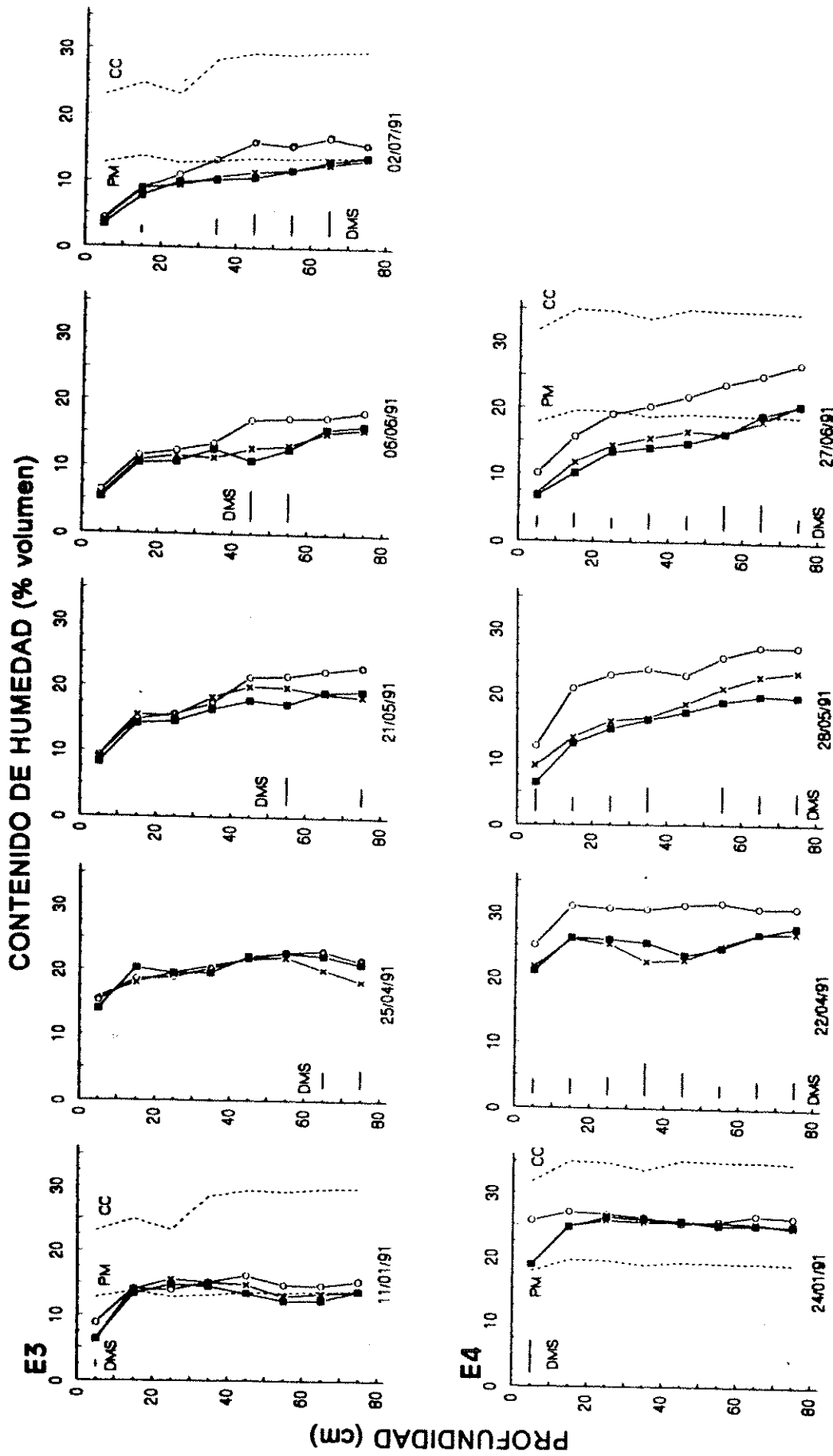


Fig. 22. Evolución del perfil hídrico del suelo en los ensayos E3 y E4 en la campaña 1990-91 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; ○, siembra directa). Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales. Los perfiles PM y CC, en trazo discontinuo, corresponden a punto de marchitez permanente y a capacidad de campo, respectivamente.

que afectó también a otras zonas de Aragón y, en particular, a la de este ensayo, fue debido, aparentemente, a una falta de selectividad del herbicida aplicado (glifosato). Según L.A. Douglas (comunicación personal al mencionado Servicio de Protección Vegetal), la persistencia del herbicida pudo haber sido favorecida por la concurrencia de bajas temperaturas y escasas lluvias durante el mes de diciembre de 1990 (inhibición de la actividad bacteriana del suelo) y, quizá, de un relativamente bajo porcentaje de arcilla (insuficiente adsorción del herbicida en el suelo).

La extracción de agua continúa de manera notoria en todo el perfil hasta la fase de espigado de cultivo (3ª fecha de control, efectuado sólo en los ensayos E1 y E3). En E1 el agotamiento no es tan evidente como en E3, especialmente en los primeros 30 cm, debido a un aporte importante de lluvia en el mes precedente; en este ensayo hay que destacar que el perfil alcanza ya la situación de punto de marchitez. En E3 la reserva de agua por debajo de 50 cm de profundidad es mayor en siembra directa, lo cual indica una menor profundidad de extracción de agua en este tratamiento.

Por lo que respecta a las dos últimas fechas de control (fase de formación de grano y día de la cosecha), el contenido de humedad presenta ya en todos los casos valores inferiores al del punto de marchitez. La falta de precipitaciones entre ambas fechas y una mayor demanda evaporativa explica el mayor agotamiento de agua observado el día de la cosecha en los horizontes del suelo más superficiales. En esta última fecha, el perfil hídrico en siembra directa en el ensayo E3 presenta, no obstante, un contenido de agua significativamente mayor que el de los demás tratamientos (Fig. 22). Finalmente, en el ensayo E4 se comprueba cómo la falta de cultivo mantiene hasta el final del ciclo una mayor reserva de agua en el tratamiento de siembra directa.

4.3.1.2. Patrones de extracción de humedad

A partir de los perfiles de humedad que delimitan el período de mayor extracción de agua por el cultivo, determinados durante las fases de germinación del cultivo (1ª fecha de control) y de formación del grano (3ª ó 4ª, según ensayos), se ha calculado el agua extraída a intervalos de 10 cm, con el fin de detectar e ilustrar mejor las posibles diferencias en el patrón de sustracción de humedad según los tratamientos de laboreo aplicados. La Figura 23 muestra los patrones de extracción de agua así obtenidos para los ensayos E1, E2 y E4. No se presentan los correspondientes al ensayo E3 debido a que la recarga del perfil como consecuencia de las importantes lluvias recibidas en los meses de marzo y abril no permite evidenciar con suficiente claridad la pauta de extracción correspondiente.

Si consideramos los patrones de extracción de agua como indicadores de la actividad radicular, la Figura 23 nos muestra cómo, de manera global para los tres ensayos considerados, la mayor densidad radicular se encontraría en los primeros 30-40 cm del perfil. Así, de los primeros 30 cm se extrae un 50-63% del total en los tratamientos con laboreo (vertedera y chisel) y un 74-83% para el de no laboreo. El gradiente de extracción con la profundidad, más o menos uniforme según tratamiento, que se observa en los ensayos E1 y E4, no se manifiesta tan claramente en el ensayo E2. En éste, a partir de 50 cm los niveles de extracción son mínimos, indicando un desarrollo radicular mucho más

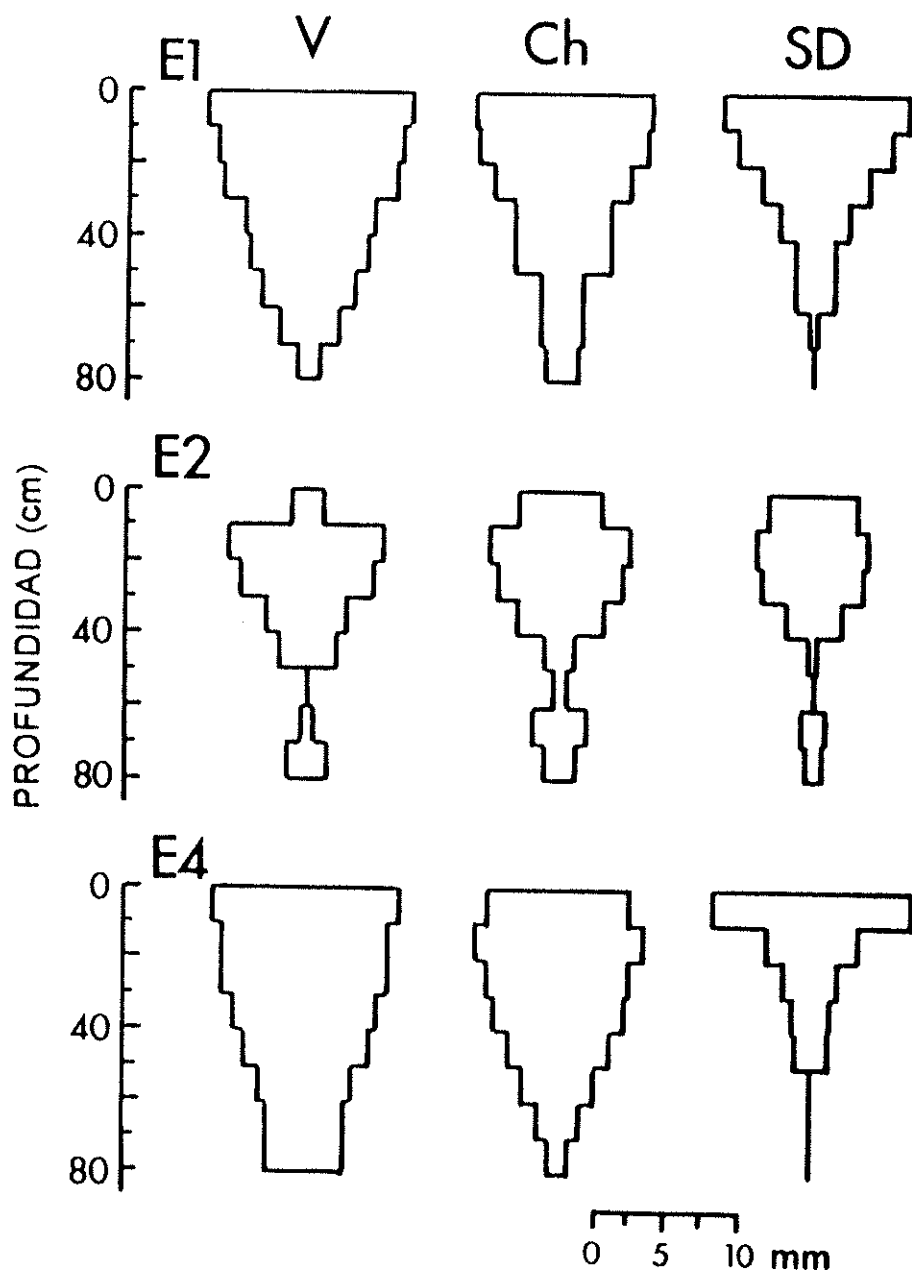


Fig. 23. Patrones de extracción de agua del suelo entre germinación y formación de grano del cultivo de cebada en la campaña 1990-91 según ensayo y tratamiento de laboreo (V: vertedera; Ch: chisel; SD: siembra directa).

superficial (conviene recordar que en este ensayo las condiciones de humedad fueron, comparativamente, mucho más desfavorables desde el inicio); las características físicas del perfil a esa profundidad descartan la presencia de una zona de impedancia mecánica para el desarrollo radicular.

En el ensayo E4 el modelo de extracción obtenido para el tratamiento de siembra directa refleja de nuevo la ausencia de cultivo y, por tanto, de un sistema radicular activo. La mayor extracción de agua en los primeros 10 cm es consecuencia de una tasa de evaporación más elevada, favorecida por la ausencia de cubierta vegetal.

4.3.1.3. Reserva de agua

A partir de los contenidos de humedad para cada profundidad y fecha de determinación se ha calculado para cada tratamiento y ensayo la reserva de agua en el perfil hasta 80 cm de profundidad (S). Este parámetro se representa gráficamente en la Figura 24 junto a las precipitaciones diarias recibidas a lo largo de la campaña. Con ello se pretende dar una visión global de la evolución de la reserva total de agua.

En las Tablas 18-21 se indican los niveles de reserva de agua que los valores de S representan frente al agua almacenada a -33 kPa. Este último contenido de humedad se considera como índice de referencia de valor 100 y el correspondiente a suelo seco a 105°C como índice 0. Según esta consideración y como referencia adicional, al agua retenida en punto de marchitez en los suelos de los ensayos E1, E2, E3 y E4 le corresponde un nivel de reserva de 51,6, 44,1, 49,4 y 55,3, respectivamente.

En primer lugar, habría que resaltar en el ensayo E1, aunque sin significación estadística, una reserva inicial de humedad más elevada en el tratamiento de laboreo tradicional; en el de siembra directa la situación de partida es de total agotamiento de la reserva de agua disponible. Las diferencias en contenido de humedad entre este último tratamiento y los demás se hacen más marcadas conforme crece el cultivo, primero frente al tratamiento de vertedera (a principios del encañado) y después también frente al de chisel, en la fase de espigado, momento en el que ha quedado prácticamente agotada la capacidad de agua disponible en los tres tratamientos. En los últimos estadios del cultivo, superado el período de máxima extracción de agua, la reserva alcanza un nivel máximo de agotamiento, sin diferenciación entre tratamientos.

La pauta de agotamiento de la reserva de humedad en el ensayo E2 es similar a la del ensayo E1. Ahora bien, en E2, con una fase de recarga inicial más desfavorable, el nivel de reserva de agua disponible es prácticamente nulo desde la primera fecha de control, no observándose diferencias entre tratamientos.

Tanto en E1 como en E2, el bajo almacenamiento inicial de agua en el suelo condiciona el patrón posterior de recarga y agotamiento, de tal modo que las precipitaciones recibidas entre enero y abril (Fig. 24 y Tabla 12), próximas a las normales, no contribuyen a mejorar el nivel de reserva de agua disponible sino que se destinan a compensar preferentemente las necesidades hídricas del cultivo en ese período.

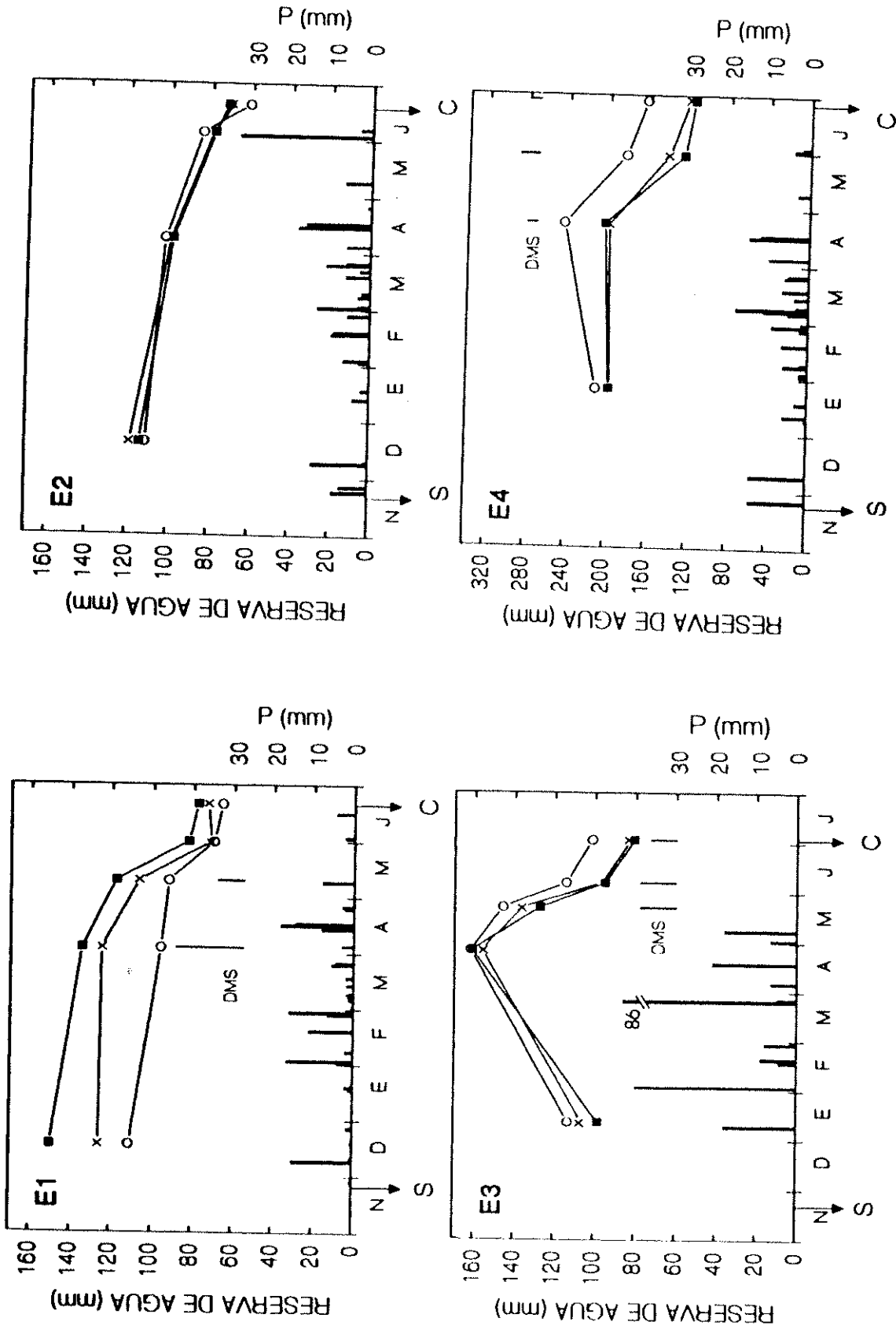


Fig. 24. Dinámica de la reserva de agua en el suelo (0-80 cm) según ensayo y tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; o, siembra directa) y precipitaciones diarias durante la campaña 1990-91. Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras verticales (S: siembra; C: cosecha).

Tabla 18. Agua almacenada (S) en el suelo hasta 80 cm de profundidad para cada tratamiento de laboreo y nivel de reserva frente a la capacidad de campo en las diferentes fechas de control de la campaña 1990-91 en el ensayo E1.

Fecha	Días desde la siembra	Tratamiento de laboreo	Agua almacenada S (mm)	Nivel de reserva
17/12/90	19	V	149,96 a	68,92
		Ch	125,61 a	57,73
		SD	110,63 a	50,84
		DMS (0,05)	ns	
03/04/91	128	V	134,65 a	61,88
		Ch	124,90 ab	57,40
		SD	95,70 b	43,98
		DMS (0,05)	33,32	
09/05/91	164	V	117,68 a	54,08
		Ch	106,41 a	48,90
		SD	91,94 b	42,25
		DMS (0,05)	12,85	
30/05/91	185	V	82,44 a	37,89
		Ch	71,28 a	32,76
		SD	69,89 a	32,12
		DMS (0,05)	ns	
20/06/91	206	V	77,84 a	35,77
		Ch	72,95 a	33,52
		SD	65,60 a	30,15
		DMS (0,05)	ns	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma fecha, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

Tabla 19. Agua almacenada (S) en el suelo hasta 80 cm de profundidad para cada tratamiento de laboreo y nivel de reserva frente a la capacidad de campo en las diferentes fechas de control de la campaña 1990-91 en el ensayo E2.

Fecha	Días desde la siembra	Tratamiento de laboreo	Agua almacenada S (mm)	Nivel de reserva
19/12/90	28	V	113,32 a	47,01
		Ch	117,97 a	48,93
		SD	110,59 a	45,87
		DMS (0,05)	ns	
08/04/91	138	V	98,18 a	40,73
		Ch	99,10 a	41,11
		SD	101,86 a	42,25
		DMS (0,05)	ns	
04/06/91	195	V	78,45 a	32,54
		Ch	79,43 a	32,95
		SD	84,30 a	34,97
		DMS (0,05)	ns	
19/06/91	210	V	72,02 a	29,87
		Ch	69,63 a	28,88
		SD	61,23 a	25,40
		DMS (0,05)	ns	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma fecha, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).



Tabla 20. Agua almacenada (S) en el suelo hasta 80 cm de profundidad para cada tratamiento de laboreo y nivel de reserva frente a la capacidad de campo en las diferentes fechas de control de la campaña 1990-91 en el ensayo E3.

Fecha	Días desde la siembra	Tratamiento de laboreo	Agua almacenada S (mm)	Nivel de reserva
11/01/91	49	V	98,17 a	45,09
		Ch	106,12 a	48,74
		SD	113,11 a	51,95
		DMS (0,05)	ns	
25/04/91	153	V	161,29 a	74,08
		Ch	156,23 a	71,76
		SD	161,96 a	74,39
		DMS (0,05)	ns	
21/05/91	179	V	127,15 a	58,40
		Ch	135,95 ab	62,44
		SD	145,64 b	66,89
		DMS (0,05)	17,88	
06/06/91	195	V	94,90 a	43,59
		Ch	96,47 a	44,31
		SD	114,27 b	52,48
		DMS (0,05)	17,79	
02/07/91	221	V	80,87 a	37,14
		Ch	82,60 a	37,94
		SD	101,31 b	46,53
		DMS (0,05)	12,60	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma fecha, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

Tabla 21. Agua almacenada (S) en el suelo hasta 80 cm de profundidad para cada tratamiento de laboreo y nivel de reserva frente a la capacidad de campo en las diferentes fechas de control de la campaña 1990-91 en el ensayo E4.

Fecha	Días desde la siembra	Tratamiento de laboreo	Agua almacenada S (mm)	Nivel de reserva
24/01/91	62	V	196,61 a	71,47
		Ch	196,01 a	71,26
		SD	209,41 a	76,13
		DMS (0,05)	ns	
22/04/91	150	V	202,63 a	73,66
		Ch	198,20 a	72,05
		SD	243,42 b	88,49
		DMS (0,05)	10,54	
28/05/91	186	V	125,21 a	45,52
		Ch	140,46 a	51,06
		SD	182,88 b	66,48
		DMS (0,05)	19,47	
27/06/91	216	V	115,67 a	42,05
		Ch	121,42 a	44,14
		SD	163,32 b	59,37
		DMS (0,05)	11,12	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma fecha, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

A diferencia de los ensayos anteriores, en E3, con unas condiciones de reserva inicial igualmente bajas en los tres tratamientos de laboreo, las importantes lluvias registradas en el periodo mencionado -aproximadamente el doble de la precipitación del año medio-recargan el perfil a principios del encañado hasta un 50% de la capacidad máxima de agua disponible. A partir de ese momento, la ausencia de lluvias y la sustracción de humedad por el cultivo explican la evolución posterior del agotamiento de la reserva de agua. Desde la fase de espigado (3ª fecha de control) hasta el día de la cosecha, el volumen de agua almacenada en el suelo en siembra directa es más elevado que en los otros tratamientos.

Por último, en el ensayo E4 las lluvias de febrero y abril mantienen el nivel de reserva inicial (mucho más alto que en los otros ensayos, tal como puede apreciarse en la Figura 24) hasta principios de encañado del cultivo en los tratamientos de vertedera y chisel. La mayor reserva de humedad en ese momento y hasta el final de la cosecha en el tratamiento de siembra directa es consecuencia de la falta de cultivo anteriormente señalada.

4.3.2. Campaña 1991-92

En esta campaña el seguimiento del contenido de humedad en el suelo se ha continuado en las mismas parcelas de siembra anual y en los ensayos E1, E2 y E3, además en parcelas de año y vez, mantenidas en barbecho en la campaña anterior (Fig. 10).

4.3.2.1. Perfiles hídricos

En la Tabla 22 se muestran los valores de agua almacenada hasta 40 cm de profundidad el día de la siembra. En el ensayo E1 el estado de humedad es menor que el que presentaba el suelo en ese momento de la campaña anterior. El alto grado de desecación del perfil tras la cosecha de dicha campaña (Fig. 21) y la escasez de lluvias hasta el mes de septiembre (Fig. 20 y Tabla 12) obligaron a retrasar las labores primarias hasta el día 20 de dicho mes. Desde esta fecha hasta el día de la siembra (18/11/91), período en el que la tasa de evaporación aún es importante, también una pluviometría limitada especialmente en el mes de octubre (33% y 43% inferior a la del año medio y a la del año anterior, respectivamente) explican esta desfavorable recarga de agua. Considerada esta situación en relación a los tratamientos de laboreo, en las parcelas anuales el tradicional conduce, al igual que en la campaña anterior, a un mayor almacenamiento de agua inicial, que en esta 2ª campaña se diferencia significativamente de los otros dos tratamientos (Tabla 22). En año y vez, en cambio, los tres sistemas de laboreo afectan por igual a esta recarga.

Las circunstancias indicadas concurren igualmente en el ensayo E4, por lo que también aquí la humedad del suelo es inferior a la del año anterior. Aunque el porcentaje de reserva de agua disponible (54%) es claramente más bajo que en la campaña anterior (92%), en términos absolutos la cantidad de agua almacenada, como consecuencia de una mayor pluviometría en esta zona de ensayo, representa, obviamente, una situación de recarga más favorable que en el caso de E1.

Tabla 22. Agua almacenada (S) y agua disponible (AD) de 0 a 40 cm de profundidad el día de la siembra en la campaña 1991-92 para cada tratamiento de laboreo, sistema de cultivo y sitio de ensayo.

Ensayo	Tratamiento de laboreo	Sistema de cultivo	Agua almacenada S (mm)	Agua disponible AD (mm)
E1	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	80,66 a	20,09
			66,56 b	5,99
			60,45 b	-
			12,48	-
	V Ch SD DMS (0,05)	Año-vez	66,66 a	6,09
			54,97 a 60,40 a ns	-
E2	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	68,11 a	5,73
			75,09 a	12,71
			72,63 a	10,25
			ns	-
	V Ch SD DMS (0,05)	Año-vez	67,74 a	5,36
			71,14 a 67,30 a ns	8,76 4,92
E3	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	87,78 a	35,11
			87,91 a	35,24
			79,66 a	26,99
			ns	-
	V Ch SD DMS (0,05)	Año-vez	104,38 a	51,71
			94,93 ab 85,34 b 14,70	42,26 32,67
E4	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	102,52 a	26,67
			109,66 a	33,81
			112,04 a	36,19
			ns	-

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para un mismo ensayo y sistema de cultivo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

En el ensayo de E2 la humedad del suelo en el momento de la siembra es similar a la del año anterior para los tres tratamientos.

A diferencia de los otros ensayos, en E3 la situación inicial de humedad mejora con respecto a la de la campaña 1990-91. La falta de condiciones de humedad en el suelo para una siembra adecuada obligó a retrasar ésta hasta el 12 de diciembre. En esta fecha el suelo refleja la recarga debida a las lluvias recibidas una semana antes, equivalentes a un 90% de la capacidad estimada de agua disponible en el suelo de la capa arable. Mientras que en las parcelas anuales el agua almacenada es similar en los tres tratamientos, en las de año y vez la reserva en siembra directa es inferior a la de vertedera (Tabla 22).

Con relación al almacenamiento de agua el día de la siembra según cultivo anual y cultivo de año y vez, aunque el análisis split-block no muestra diferencias significativas entre ambos sistemas (subtratamientos), ni interacciones significativas TxS (tratamiento x subtratamiento), sí se observa que la retención de agua tiende a ser menor en año y vez para los ensayos E1 y E2 (en este último especialmente en los tratamientos de laboreo de conservación), tendencia que se invierte en el ensayo E3 y de manera más notoria para el caso del laboreo tradicional.

Para un análisis de la evolución del contenido de humedad en el suelo en todo el perfil de control (0-80 cm), consideraremos los datos representados en las Figuras 25-28, comenzando por la 1ª fecha de determinación. En el intervalo de tiempo transcurrido desde la siembra hasta esta fecha, de una a tres semanas según ensayo, el contenido de humedad en los primeros 40 cm no experimenta cambios apreciables en los ensayos E1 y E3 como consecuencia de la escasa pluviometría en ese período. En E2, y especialmente en E4, unas lluvias más importantes mejoran el agua almacenada hasta esa profundidad.

Con relación a la reserva en todo el perfil, en el ensayo E1 los perfiles de humedad en las parcelas anuales muestran una distribución de contenidos de agua con la profundidad semejante a la de la campaña anterior y, de nuevo, aunque estadísticamente no se observan diferencias significativas entre tratamientos, se puede destacar que la vertedera retiene más agua en todo el perfil. En conjunto, en las parcelas año-vez se mantiene la situación de un menor almacenamiento de agua del día de la siembra, en torno al punto de marchitez.

En las parcelas anuales del ensayo E2, el tratamiento de siembra directa parece retener más humedad, hecho significativo para algunas profundidades a partir de 30 cm. En este ensayo, tras el año de barbecho, el contenido de humedad en las parcelas año-vez es significativamente más alto que en las de cultivo anual por debajo de 30 cm (Fig. 26), si bien en valor absoluto la cuantía de la reserva conseguida sigue siendo poco importante. En este sentido, hay que señalar que esta diferencia entre subtratamientos es debida, entre 30 y 70 cm, a un efecto acumulado de los incrementos en contenido de humedad encontrados en los tres tratamientos de laboreo y no a la existencia de diferencias significativas entre subtratamientos para un mismo tratamiento de laboreo. En cambio, de 70 a 80 cm el contenido de humedad en el tratamiento de chisel es significativamente más elevado que el que presenta en las parcelas anuales (Fig. 26), de ahí la interacción TxS encontrada a esa profundidad.

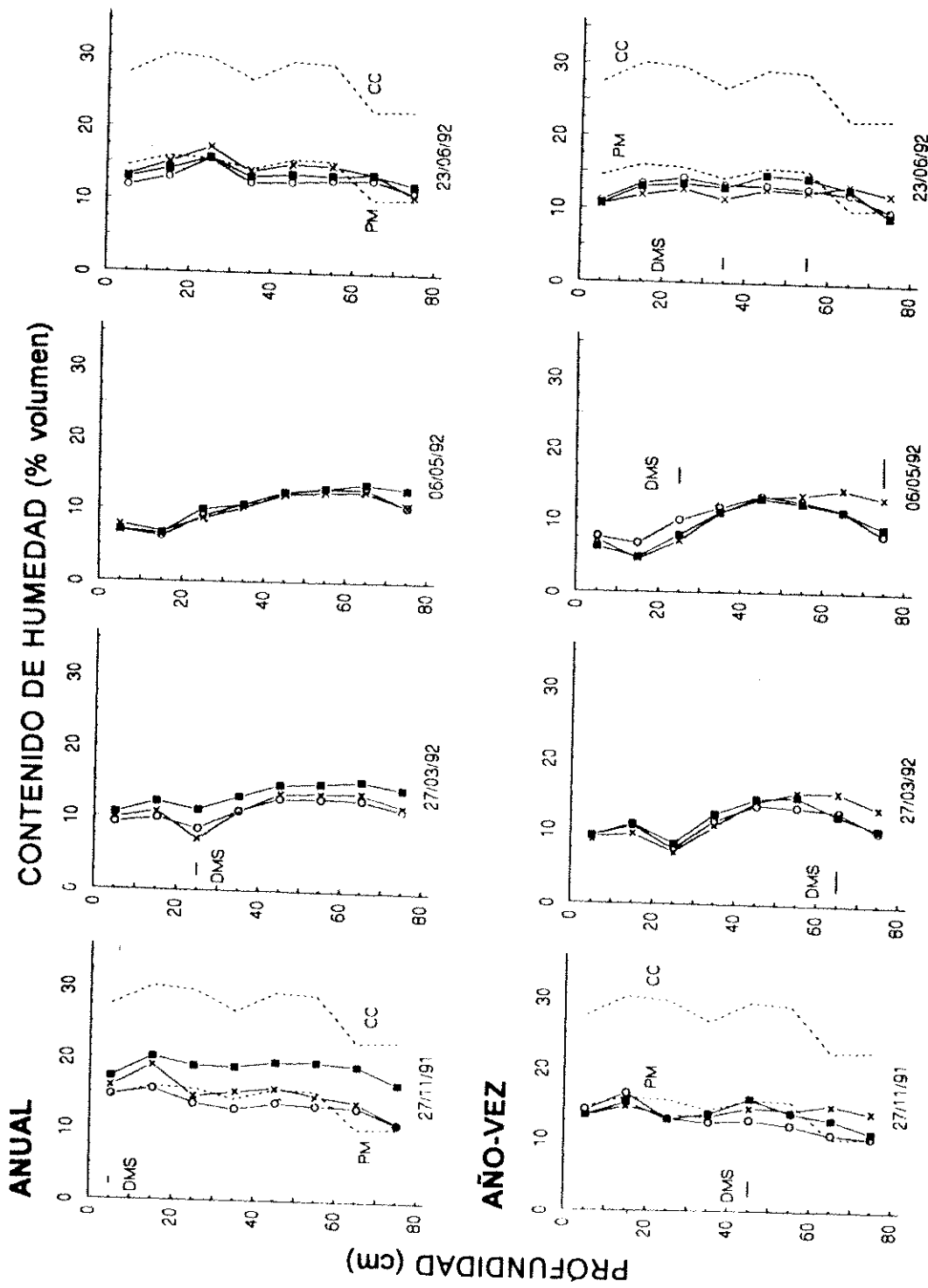


Fig. 25. Evolución del perfil hídrico del suelo en el ensayo El según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; ○, siembra directa) y sistema de cultivo en la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales. Los perfiles PM y CC, en trazo discontinuo, corresponden a punto de marchitez permanente y a capacidad de campo, respectivamente.

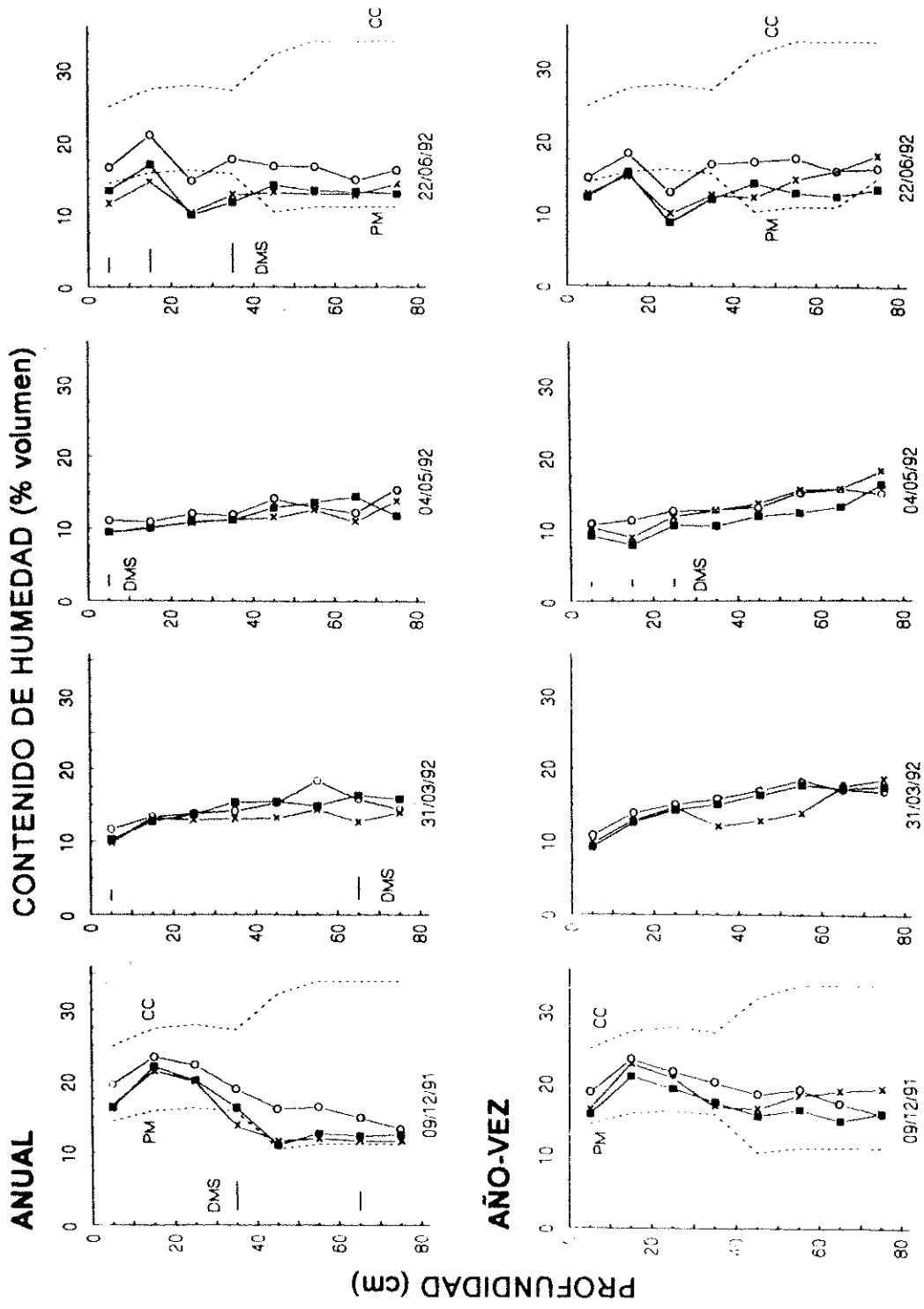


Fig. 26. Evolución del perfil hídrico del suelo en el ensayo E2 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; o, siembra directa) y sistema de cultivo en la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales. Los perfiles PM y CC, en trazo discontinuo, corresponden a punto de marchitez permanente y a capacidad de campo, respectivamente.

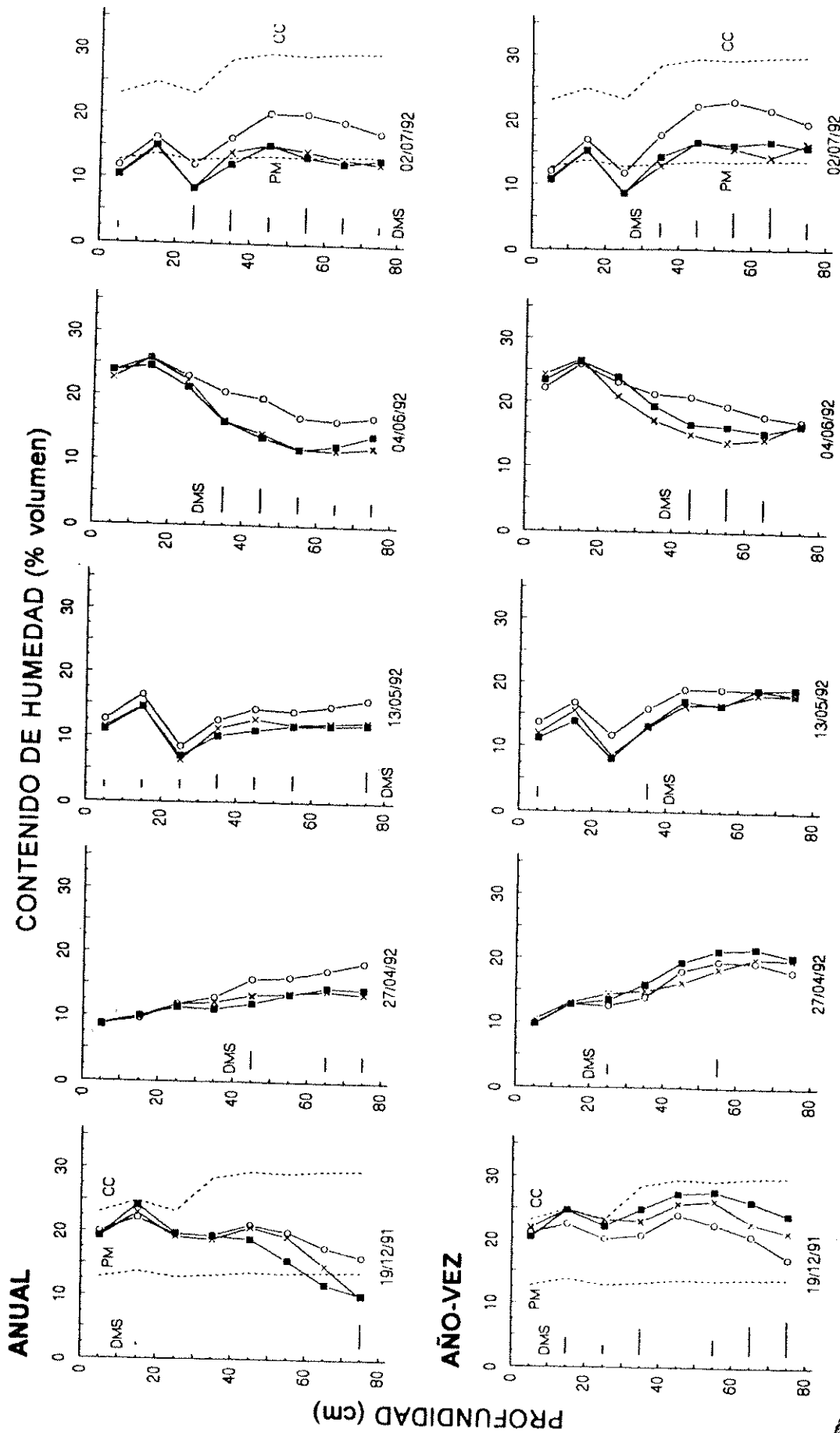


Fig. 27. Evolución del perfil hídrico del suelo en el ensayo E3 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; ○, siembra directa) y sistema de cultivo en la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales. Los perfiles PM y CC, en trazo discontinuo, corresponden a punto de marchitez permanente y a capacidad de campo, respectivamente.



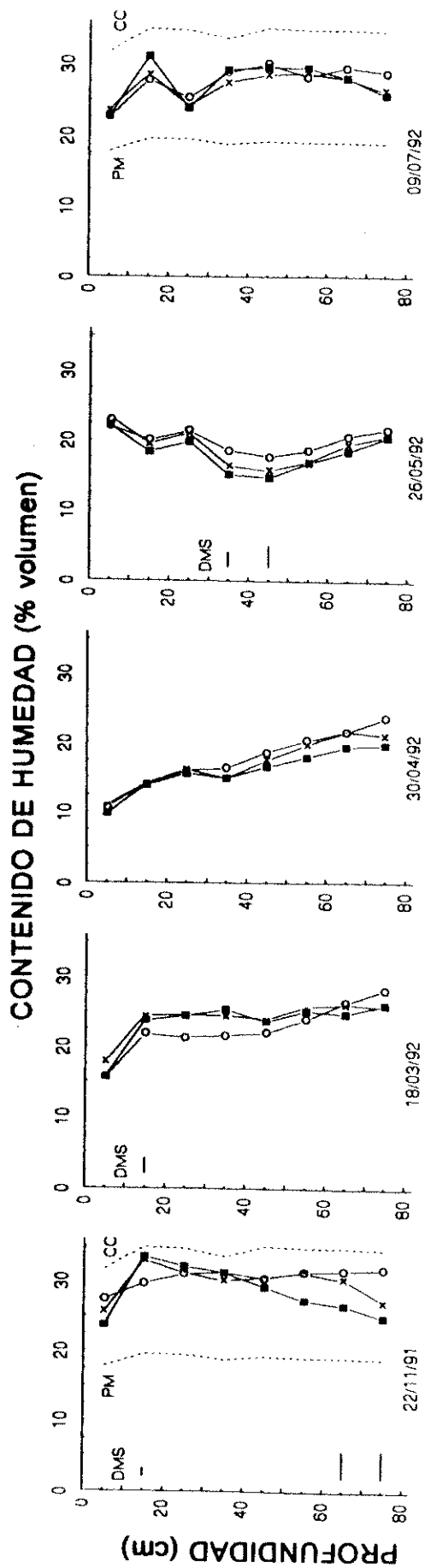


Fig. 28. Evolución del perfil hídrico del suelo en el ensayo E4 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; ×, chisel; ○, siembra directa) en la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales. Los perfiles PM y CC, en trazo discontinuo, corresponden a punto de marchitez permanente y a capacidad de campo, respectivamente.

El estado general de humectación del suelo en el ensayo E3 es claramente más favorable en este primer control del perfil hídrico, que el correspondiente a la campaña anterior, llegándose en los primeros 30 cm a una situación próxima a la de capacidad de campo (Fig. 27). Mientras que en las parcelas anuales no se aprecian diferencias destacables entre tratamientos, en año y vez la siembra directa muestra, prácticamente para todo el perfil, un contenido de humedad inferior al de los otros tratamientos, especialmente al de vertedera. Por debajo de los primeros 20 cm del perfil, los tratamientos de vertedera y chisel presentan bajo cultivo de año y vez contenidos de humedad significativamente más elevados que bajo cultivo anual (Fig. 27), lo que explica la diferencia obtenida entre subtratamientos.

Al igual que en el ensayo E3, en el E4 el contenido de humedad del suelo en todo el perfil supone una reserva de agua inicial favorable para el cultivo, tanto en su fase de germinación como para un posterior desarrollo del mismo. De 60 a 80 cm de profundidad esta reserva es más importante en siembra directa.

En el período transcurrido, tres a cuatro meses según ensayo, desde la 1ª fecha de control (diciembre-enero) hasta la 2ª (febrero-abril), la precipitación recibida en todos los ensayos fue prácticamente insignificante (Fig. 20): de un 60% (E3) a un 90% (E1) inferior con relación a la del año medio y de un 30% (E4) a un 90% (E1) con relación a la de la campaña anterior. Este déficit de lluvia va a determinar bajos niveles de humedad del suelo, prácticamente a lo largo de toda la campaña, y, con ello, la respuesta del cultivo. Así, a principios del encañado los perfiles hídricos indican en todos los ensayos un agotamiento sustancial de la reserva de agua en los primeros 40-50 cm. En los ensayos E2 y E3 el mayor contenido de humedad que se observaba en las parcelas año-vez se mantiene en menor grado en esta fecha (Figs. 26 y 27); en E3, por ejemplo, una interacción TxS, debida a los tratamientos de vertedera y chisel, sólo se manifiesta de 60 a 80 cm de profundidad. También habría que destacar en este último ensayo un mayor contenido de humedad en el tratamiento de siembra directa anual por debajo de 40 cm (Fig. 27).

El déficit pluviométrico mencionado continúa en los ensayos E1, E2 y E4 hasta la 3ª fecha de determinación (fase de espigado del cultivo), con más severidad en el ensayo E1 en el que la precipitación en el mes de abril fue de tan sólo de 7 mm frente a los 36 mm del año medio o los 50 mm del año anterior. En estos ensayos continúa la extracción de agua sin destacarse diferencias entre tratamientos y subtratamientos, a excepción de los primeros 30 cm en las parcelas año-vez del ensayo E2 donde aquella es mayor en vertedera y chisel (Fig. 26). En el ensayo E3, en cambio, los 33 mm recibidos en el mes de mayo, antes de la medida del perfil hídrico, explican el mayor contenido de humedad en los primeros 20 cm tanto en parcelas anuales como de año y vez. Por tratamientos, en parcelas anuales el mayor contenido de humedad corresponde a la siembra directa prácticamente en todo el perfil, con una diferencia más acusada frente al tratamiento de vertedera; este mismo comportamiento se presenta para algunas profundidades en las parcelas de año y vez. Aunque ya en esta fecha no existen diferencias significativas entre cultivo anual y cultivo de año y vez para ningún tratamiento en particular, todos ellos contribuyen a que en el sistema de año y vez siga observándose un mayor contenido de humedad por debajo de 30 cm (Fig. 27).

La 4ª determinación del perfil hídrico, realizada en E3 y E4 en la fase de formación de grano, refleja una recarga del perfil en los primeros 40-50 cm como consecuencia de las precipitaciones recibidas en el mes de mayo (Tabla 12). En el ensayo E3, la siembra directa conserva en esta fecha un mayor contenido de humedad por debajo de 30 cm tanto en parcelas anuales como en parcelas año-vez, en estas últimas con diferencia significativa únicamente en relación al tratamiento de chisel. Por otro lado, puede verse cómo en esta fecha prácticamente no existen ya diferencias entre sistemas de cultivo (Fig. 27).

La precipitación recibida en el mes de junio en los ensayos E3 y E4, excepcionalmente alta con respecto tanto al año medio como al año anterior (Tabla. 12), y superado el período de máxima demanda de agua por el cultivo, explica los perfiles de humedad obtenidos el día de la cosecha (Figs. 27 y 28), con contenidos de humedad en ambos casos superiores a los de los perfiles para la misma fecha de la campaña 1990-91. Esto mismo se puede apreciar en los ensayos E1 y E2, en los que también una mayor pluviometría en los meses de mayo y junio (dos y tres veces más alta que en el año anterior en E2 y E1, respectivamente), es responsable de un contenido final de humedad más alto; sin embargo, en estos casos no se llega a superar el punto de marchitez. Por último, hay que señalar un mayor contenido de humedad en el tratamiento de siembra directa de 0 a 40 cm en las parcelas anuales del ensayo E2, hecho que también se manifiesta en el ensayo E3 en las parcelas anuales para todo el perfil, y a partir de 30 cm en las parcelas de año y vez.

4.3.2.2. Patrones de extracción de humedad

La peculiar distribución de la precipitación a lo largo del ciclo del cultivo durante la campaña 1991-92, con concentración de lluvias al final del mismo y con lluvias infrecuentes y de escasa entidad entre la fase de germinación (1ª fecha de determinación del perfil hídrico) y la de espigado del cultivo (3ª fecha), permite establecer, entre estas fechas y para todos los ensayos, la distribución con la profundidad del agua extraída en cada uno de ellos según tratamiento de laboreo (Figs. 29 y 30). En esta campaña no se observan tan claramente como en la 1ª, patrones diferentes según tratamientos. Destacaremos, por tanto, sólo los resultados más relevantes de cada ensayo.

Así, en el tratamiento de vertedera bajo cultivo anual en el ensayo E1 (Fig. 29), el 52% de la extracción total de agua se produce en los primeros 30 cm frente a un porcentaje que en el resto de los casos, incluidos los patrones de las parcelas año y vez, oscila entre un 67% y un 87%.

En el ensayo E2 se puede destacar la mayor actividad radicular que por debajo de 30 cm parecen indicar los patrones de extracción en las parcelas de año y vez (Fig. 29). Así, mientras que en estas parcelas el agua sustraída en los 30 primeros centímetros representa un 63% del total, en las anuales este porcentaje alcanza un 81%. La Figura 29 también muestra cómo en los tratamientos de vertedera y chisel bajo cultivo anual no se aprecia extracción alguna por debajo de 40 cm, profundidad a partir de la cual los perfiles hídricos de partida en esos tratamientos se encontraban próximos al punto de marchitez (Fig. 26). Este hecho coincide con el observado en la 1ª campaña y confirma que la falta de actividad radicular a las profundidades señaladas es debida claramente a una deficiente

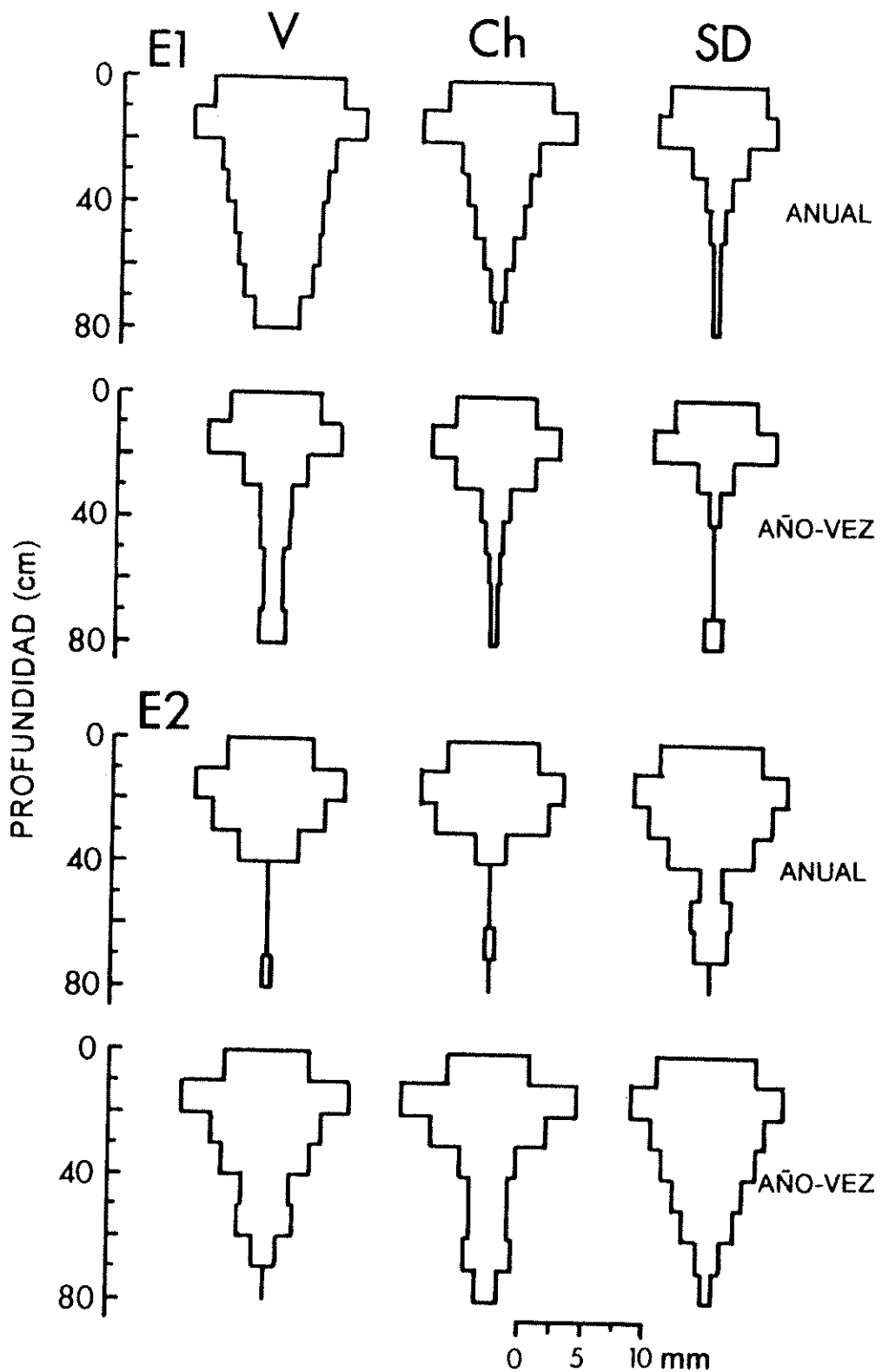


Fig. 29. Patrones de extracción de agua del suelo entre germinación y espigado del cultivo de cebada en la campaña 1991-92 según ensayo, tratamiento de laboreo y sistema de cultivo en los ensayos E1 y E2 (V: vertedera; Ch: chisel; SD: siembra directa).

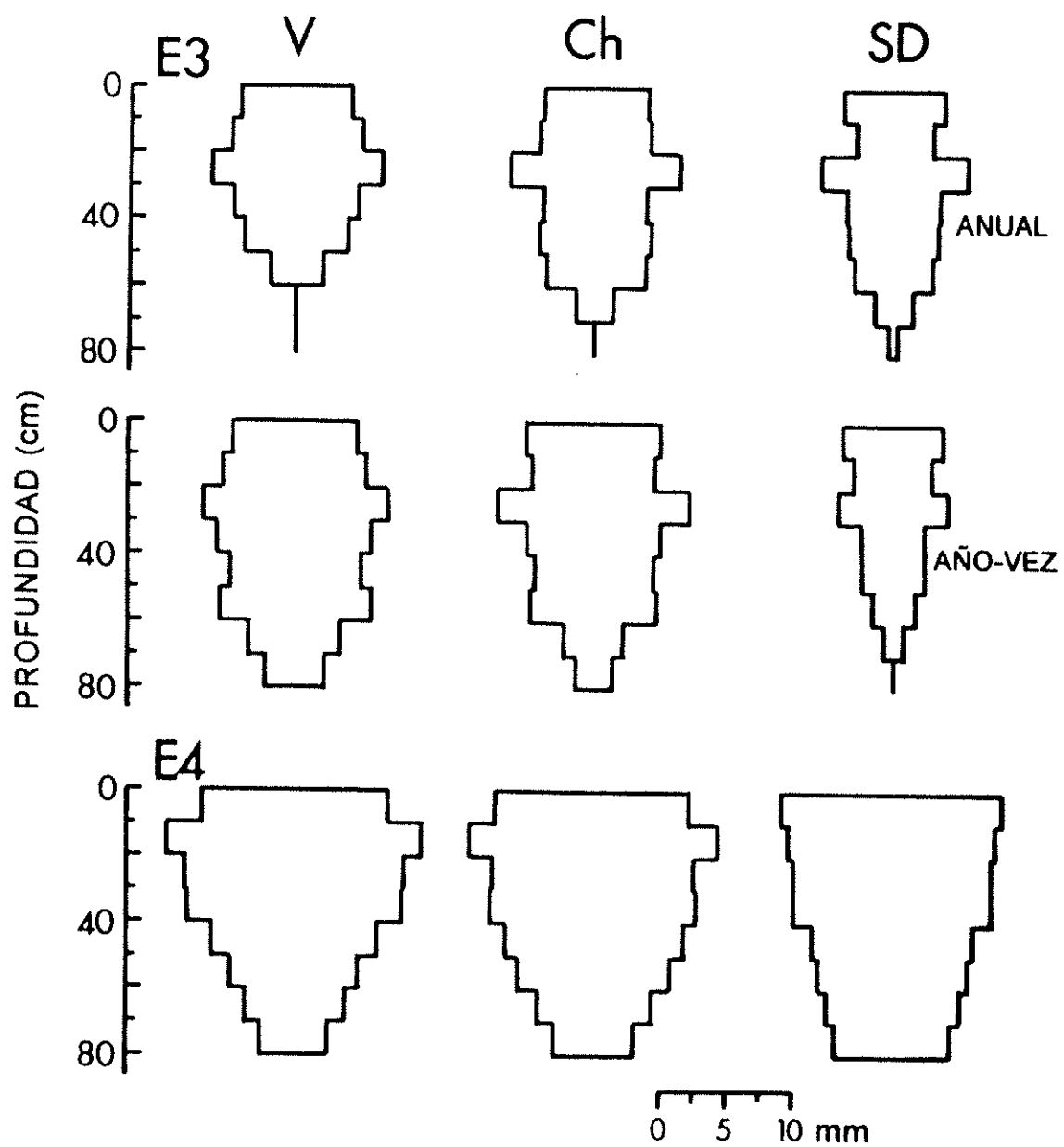


Fig. 30. Patrones de extracción de agua del suelo entre germinación y espigado del cultivo de cebada en la campaña 1991-92 según ensayo, tratamiento de laboreo y sistema de cultivo en los ensayos E3 y E4 (V: vertedera; Ch: chisel; SD: siembra directa).

recarga de humedad.

Al igual que en las parcelas año-vez del ensayo anterior, en las correspondientes al ensayo E3 los tratamientos de vertedera y chisel muestran los mayores volúmenes y profundidades de extracción (Fig. 30). Finalmente, frente al resto de los ensayos, al E4 corresponden en todos los tratamientos los modelos de sustracción que indican los mayores volúmenes de agua extraída y la mayor actividad radicular en profundidad (Fig. 30). En este ensayo, la extracción en los primeros 30 cm es inferior al 50%.

4.3.2.3. Reserva de agua

En las Figuras 31 y 32 se representan los cambios en el agua almacenada en el suelo hasta 80 cm de profundidad a lo largo de la 2ª campaña experimental y las precipitaciones diarias registradas durante la misma.

El suelo en las parcelas anuales del ensayo E1 parte de una reserva de agua similar en los tres tratamientos a la de la campaña anterior, correspondiendo el mayor almacenamiento al tratamiento de vertedera, aunque sin ser estadísticamente significativo, y el menor a la siembra directa, inferior en este caso a los 112 mm que corresponden al punto de marchitez; esto último sucede en las parcelas año-vez para los tres tratamientos (Tabla 23). Esta situación inicial de déficit hídrico continúa, por la falta de lluvias ya comentada (Fig. 31), hasta primeros de mayo, fecha en la que debería haber espigado el cultivo. Un período prolongado con el perfil en un estado de humedad por debajo de punto de marchitez permanente (nivel de reserva inferior a 51,6), provocó, como se detalla más adelante, el marchitamiento y pérdida de un cultivo muy poco desarrollado ya durante la fase de ahijado. En ningún momento a lo largo de la campaña se obtienen diferencias significativas entre tratamientos y subtratamientos (Tabla 23).

Con relación a la reserva de humedad inicial en el ensayo E2 hay que señalar un mayor almacenamiento de agua en el sistema de cultivo de año y vez, especialmente para el tratamiento de chisel (Tabla 24). También cabe destacar en el caso de las parcelas anuales una mayor reserva de agua en el tratamiento de siembra directa. En conjunto, la reserva de agua disponible tras la siembra en este ensayo es más favorable que en el ensayo E1, por lo que, a pesar de la baja pluviometría en el período diciembre-abril, el agotamiento de dicha reserva hasta el nivel de marchitamiento no tiene lugar hasta la fase de espigado del cultivo (3ª fecha de determinación). Durante este período desaparecen las diferencias observadas inicialmente entre tratamientos y subtratamientos. Las lluvias recibidas en mayo y junio, tras el período de máxima extracción de agua, recargan ligeramente el perfil, de manera más significativa en el tratamiento de siembra directa (Fig. 31).

Dado el similar régimen de lluvias, la evolución de la reserva de humedad en el ensayo E3 sigue la misma pauta que en los ensayos E1 y E2. En relación a los efectos de los diferentes tratamientos de laboreo sobre la reserva de agua inicial, la siembra directa se destaca en el sistema de cultivo anual por un mayor almacenamiento de agua y en año y vez por todo lo contrario (Tabla 25 y Fig. 32). En cuanto a las diferencias entre subtratamientos, la mayor reserva de agua inicial en el sistema de año y vez se debe fun-

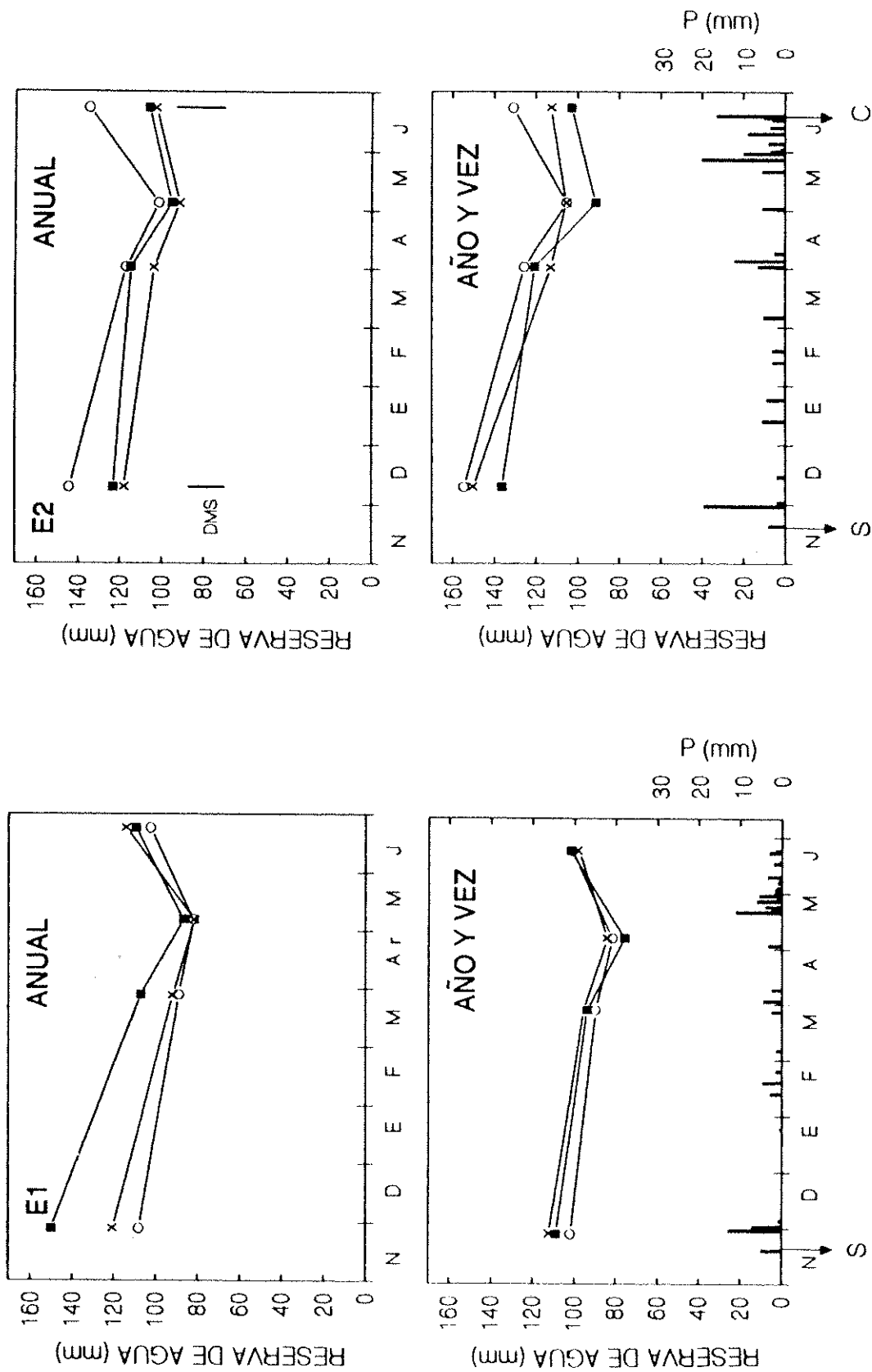


Fig. 31. Dinámica de la reserva de agua en el suelo (0-80 cm) según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; ●, siembra directa) y sistema de cultivo en los ensayos E1 y E2 y precipitaciones diarias durante la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras verticales (S: siembra; C: cosecha).

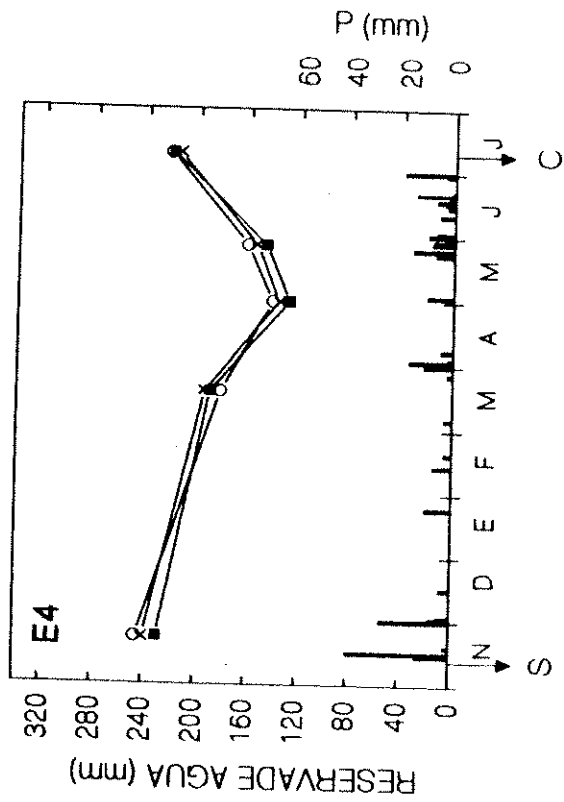
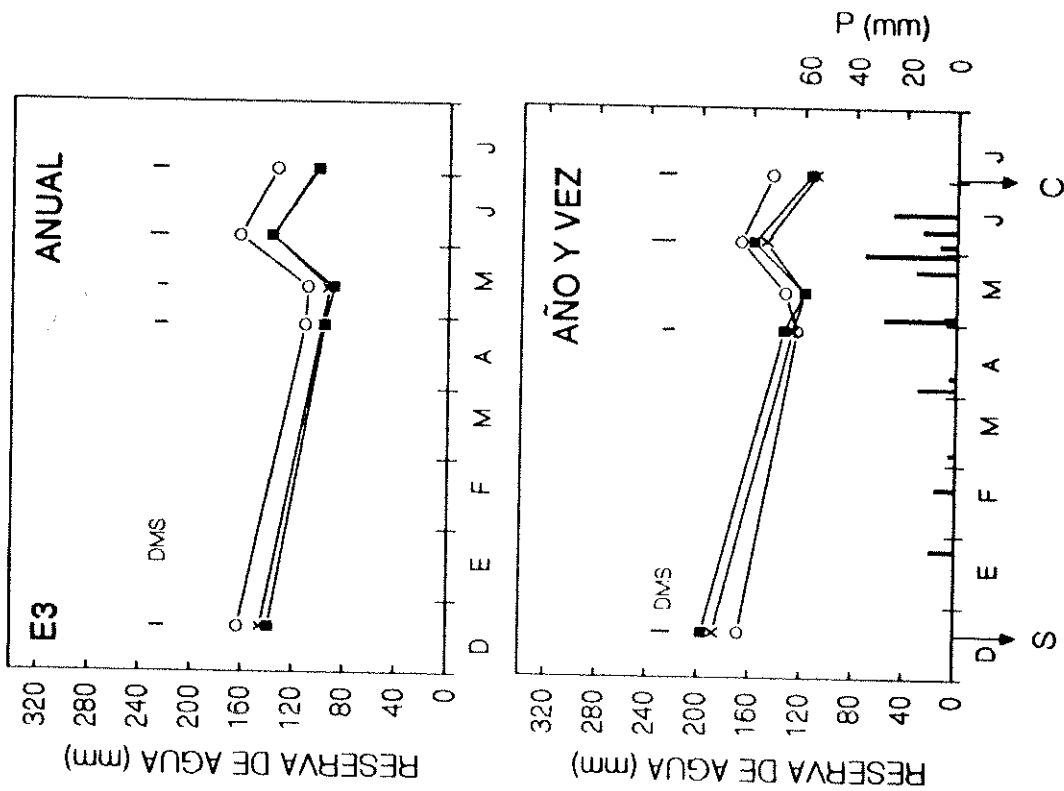


Fig. 32. Dinámica de la reserva de agua en el suelo (0-80 cm) según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; ○, siembra directa) y sistema de cultivo en los ensayos E3 y E4 y precipitaciones diarias durante la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras verticales (S: siembra; C: cosecha).

Tabla 23. Agua almacenada (S) en el suelo hasta 80 cm de profundidad para cada tratamiento de laboreo y sistema de cultivo, y nivel de reserva frente a la capacidad de campo en las diferentes fechas de control de la campaña 1991-92 en el ensayo E1.

Fecha	Días desde la siembra	Tratamiento de laboreo	Sistema de cultivo	Agua almacenada S (mm)	Nivel de reserva	
27/11/91	9	V	Anual	150,11 a	68,98	
		Ch		120,46 a	55,36	
		SD		108,06 a	49,66	
		DMS (0,05)		ns		
		V	Año-vez	108,88 a	50,04	
		Ch		112,38 a	51,65	
SD	102,00 a	46,88				
DMS (0,05)		ns				
27/03/92	130	V	Anual	107,01 a	49,18	
		Ch		91,58 a	42,09	
		SD		88,70 a	40,76	
		DMS (0,05)		ns		
		V	Año-vez	93,81 a	43,11	
		Ch		95,54 a	43,91	
SD	89,65 a	41,20				
DMS (0,05)		ns				
06/05/92	170	V	Anual	86,63 a	39,81	
		Ch		81,43 a	37,42	
		SD		81,98 a	37,67	
		DMS (0,05)		ns		
		V	Año-vez	75,53 a	34,71	
		Ch		83,88 a	38,55	
SD	81,50 a	37,45				
DMS (0,05)		ns				
23/06/92	218	V	Anual	109,51 a	50,33	
		Ch		113,97 a	52,38	
		SD		102,33 a	47,03	
		DMS (0,05)		ns		
		V	Año-vez	101,67 a	46,72	
		Ch		97,74 a	44,92	
SD	100,93 a	46,38				
DMS (0,05)		ns				
DMS (0,05)		27/11/91	27/03/92	06/05/92	23/06/92	
Tratamiento (T)		ns	ns	ns	ns	
Subtratamiento (S)		ns	ns	ns	ns	
Interacción TxS:						
S dentro del mismo T		ns	ns	ns	ns	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma fecha y sistema de cultivo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

Tabla 24. Agua almacenada (S) en el suelo hasta 80 cm de profundidad para cada tratamiento de laboreo y sistema de cultivo, y nivel de reserva frente a la capacidad de campo en las diferentes fechas de control de la campaña 1991-92 en el ensayo E2.

Fecha	Días desde la siembra	Tratamiento de laboreo	Sistema de cultivo	Agua almacenada S (mm)	Nivel de reserva
09/12/91	21	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	122,97 a	51,01
				118,06 a	48,97
				144,08 b	59,76
				17,01	
		V Ch SD DMS (0,05)	Año-vez	136,40 a	56,58
				150,39 a	62,38
				154,73 a	64,18
				ns	
31/03/92	134	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	114,79 a	47,61
				103,67 a	43,00
				116,97 a	48,52
				ns	
		V Ch SD DMS (0,05)	Año-vez	120,69 a	50,06
				112,84 a	46,81
				125,66 a	52,12
				ns	
04/05/92	168	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	95,22 a	39,50
				91,38 a	37,90
				101,37 a	42,05
				ns	
		V Ch SD DMS (0,05)	Año-vez	90,98 a	37,74
				105,72 a	43,85
				105,32 a	43,69
				ns	
22/06/92	217	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	106,11 a	44,01
				102,72 a	42,61
				134,74 b	55,89
				23,16	
		V Ch SD DMS (0,05)	Año-vez	102,99 a	42,27
				112,85 a	46,81
				131,02 a	54,35
				ns	
DMS (0,05)		09/12/91	31/03/92	04/05/92	22/06/92
Tratamiento (T)	ns	ns	8,28	15,11	
Subtratamiento (S)	9,87	ns	ns	ns	
Interacción TxS:					
S dentro del mismo T	ns	ns	ns	ns	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma fecha y sistema de cultivo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

Tabla 25. Agua almacenada (S) en el suelo hasta 80 cm de profundidad para cada tratamiento de laboreo y sistema de cultivo, y nivel de reserva frente a la capacidad de campo en las diferentes fechas de control de la campaña 1991-92 en el ensayo E3.

Fecha	Días desde la siembra	Tratamiento de laboreo	Sistema de cultivo	Agua almacenada S (mm)	Nivel de reserva	
19/12/91	7	V	Anual	139,00 a	63,84	
		Ch		144,84 a	66,53	
		SD		162,88 b	74,81	
		DMS (0,05)			10,80	
		V	Año-vez	196,67 a	90,33	
		Ch		188,02 a	86,36	
SD	168,16 b	77,24				
DMS (0,05)			14,59			
27/04/92	137	V	Anual	95,88 a	44,04	
		Ch		97,61 a	44,83	
		SD		111,04 b	51,00	
		DMS (0,05)			9,27	
		V	Año-vez	135,05 a	62,03	
		Ch		127,75 ab	58,68	
SD	124,66 b	57,26				
DMS (0,05)			9,07			
13/05/92	153	V	Anual	89,13 a	40,94	
		Ch		92,80 a	42,62	
		SD		109,00 b	50,06	
		DMS (0,05)			7,48	
		V	Año-vez	118,55 a	54,45	
		Ch		118,87 a	54,60	
SD	133,74 a	61,43				
DMS (0,05)			ns			
04/06/92	175	V	Anual	137,61 a	63,21	
		Ch		136,80 a	62,83	
		SD		162,74 b	74,75	
		DMS (0,05)			13,72	
		V	Año-vez	158,29 ab	72,70	
		Ch		149,74 a	68,78	
SD	168,45 b	77,37				
DMS (0,05)			18,31			
02/07/92	203	V	Anual	101,20 a	46,48	
		Ch		103,29 a	47,44	
		SD		133,76 b	61,44	
		DMS (0,05)			12,23	
		V	Año-vez	114,28 a	52,49	
		Ch		110,83 a	50,90	
SD	144,69 b	66,46				
DMS (0,05)			13,42			
DMS (0,05)		19/12/91	27/04/92	13/05/92	04/06/92	02/07/92
Tratamiento (T)		ns	ns	11,80	13,37	12,45
Subtratamiento (S)		31,23	25,47	16,93	ns	ns
Interacción TxS:						
S dentro del mismo T		35,08	28,30	ns	ns	ns

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma fecha y sistema de cultivo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

damentalmente a un almacenamiento de agua significativamente mayor en los tratamientos de vertedera y chisel (Tabla 25). Tanto las diferencias entre tratamientos de laboreo como entre subtratamientos se mantienen en la 2ª fecha de control, una vez ahijado el cultivo. En la 3ª fecha (fase de espigado), en cambio, las diferencias entre subtratamientos desaparecen para vertedera y chisel, aunque el sistema de año y vez sigue manteniendo, de forma global, un mayor almacenamiento de agua (Tabla 25). Si hasta esta fecha en parcelas año-vez la siembra directa presentaba los valores más bajos de reserva de agua, a partir de este momento y hasta el final de la campaña, este tratamiento se destaca por lo contrario, siguiendo la misma pauta que en las parcelas anuales (Tabla 25 y Fig. 32). En la 4ª fecha de control, el suelo en todos los tratamientos ve incrementada su reserva de agua por las lluvias extemporáneas recibidas a finales de mayo; desde esta fecha hasta la de la cosecha, desaparecen las diferencias entre subtratamientos hasta entonces observadas (Tablas 25).

Finalmente, la dinámica de la reserva de agua en el ensayo E4 a lo largo de la campaña es similar a la de los demás ensayos (Fig. 32), con la particularidad de que en éste el almacenamiento de agua inicial es claramente superior (Tabla 26). El nivel de agotamiento de la reserva alcanza el valor correspondiente a punto de marchitez (55,3) en la fase de espigado para, posteriormente, iniciar una recarga hasta alcanzar al final de la campaña niveles próximos a los iniciales. En ninguna fecha se observan diferencias significativas entre tratamientos de laboreo (Tabla 26).

Tabla 26. Agua almacenada (S) en el suelo hasta 80 cm de profundidad para cada tratamiento de laboreo y nivel de reserva frente a la capacidad de campo en las diferentes fechas de control de la campaña 1991-92 en el ensayo E4.

Fecha	Días desde la siembra	Tratamiento de laboreo	Agua almacenada S (mm)	Nivel de reserva
22/11/91	11	V	229,07 a	83,27
		Ch	239,77 a	87,16
		SD	245,23 a	89,15
		DMS (0,05)	ns	
18/02/92	128	V	189,48 a	68,88
		Ch	193,61 a	70,38
		SD	181,32 a	65,92
		DMS (0,05)	ns	
30/04/92	171	V	128,03 a	46,54
		Ch	136,38 a	49,58
		SD	141,41 a	51,41
		DMS (0,05)	ns	
26/05/92	197	V	147,05 a	53,46
		Ch	154,25 a	56,07
		SD	161,71 a	58,79
		DMS (0,05)	ns	
09/07/92	241	V	220,48 a	80,15
		Ch	216,17 a	78,58
		SD	221,96 a	80,69
		DMS (0,05)	ns	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma fecha, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

4.4. RESISTENCIA DEL SUELO A LA PENETRACION

En el presente apartado se da cuenta de los resultados relativos a la evolución, a lo largo del ciclo del cultivo, del estado de compactación del suelo en respuesta a los tratamientos de laboreo considerados.

Generalmente, el grado de compactación del suelo es caracterizado a través de la medida de diferentes parámetros de suelo tales como porosidad total y diferencial, permeabilidad al aire, conductividad hidráulica, densidad aparente, resistencia a la penetración, etc. Cada uno de estos métodos presenta sus ventajas e inconvenientes en cuanto a precisión, laboriosidad, grado de alteración del terreno y relación con otras variables de suelo y planta. Por la facilidad y rapidez de la medida, la determinación in situ de la resistencia del suelo a la penetración, mediante el empleo de penetrómetros, es una de las alternativas más habituales. La diferente configuración física del penetrómetro y del sistema radicular del cultivo (mayor diámetro, rigidez y velocidad de penetración del primero) constituye una de las principales objeciones a este método (Bowen, 1976; Cassel, 1982). Sin embargo, son diversos los estudios en los que se demuestra que la impedancia mecánica al crecimiento radicular, como parámetro físico del suelo modificado por el laboreo, puede ser caracterizado adecuadamente mediante la medida de la resistencia del suelo a la penetración (McAfee et al., 1989; Passioura, 1991). Rizvi et al. (1991), muestran, por otro lado, cómo la resistencia del suelo a la penetración es un indicador más sensible de la compactación del suelo por el laboreo que la densidad aparente. Por todo ello, este parámetro, al que en adelante se hará referencia como RP, ha sido el elegido para describir el estado de compactación del suelo en el presente estudio.

A continuación se presentan los datos correspondientes a los perfiles de RP, así como las ecuaciones que expresan la relación entre RP y contenido de humedad gravimétrico, densidad aparente y profundidad de suelo para cada uno de los cuatro suelos estudiados. Tal como se indica en el Anexo III, las determinaciones de RP se llevaron a cabo en las mismas fechas y, por tanto, en los mismos estadios de cultivo, que las correspondientes a los perfiles de humedad. Dado que la profundidad de las labores no superó en ningún caso los 40 cm, se ha considerado ésta como profundidad límite de referencia a efectos comparativos entre tratamientos.

4.4.1. Campaña 1990-91

Las medidas realizadas tras la siembra (primer control durante la fase de germinación del cultivo) muestran claramente en todos los ensayos el esponjamiento del suelo resultante de las labores en los tratamientos de vertedera y chisel. Dependiendo del tiempo transcurrido desde aquéllas y del estado de humedad del perfil del suelo en el momento de la determinación, las diferencias entre tratamientos varían según los distintos ensayos (Figs. 33 y 34). Considerando globalmente los valores de RP de los tres tratamientos, el menor grado de compactación inicial del suelo en los ensayos E1 y E4 coincide con un mayor contenido de agua en el suelo. Por otro lado, las mayores diferencias entre tratamientos con laboreo y siembra directa corresponden a los ensayos E2 y E3, en los que las labores primarias se dieron más recientemente (aproximadamente 3 meses) que en los otros dos ensayos (4 meses en E1 y 6 meses en E4).

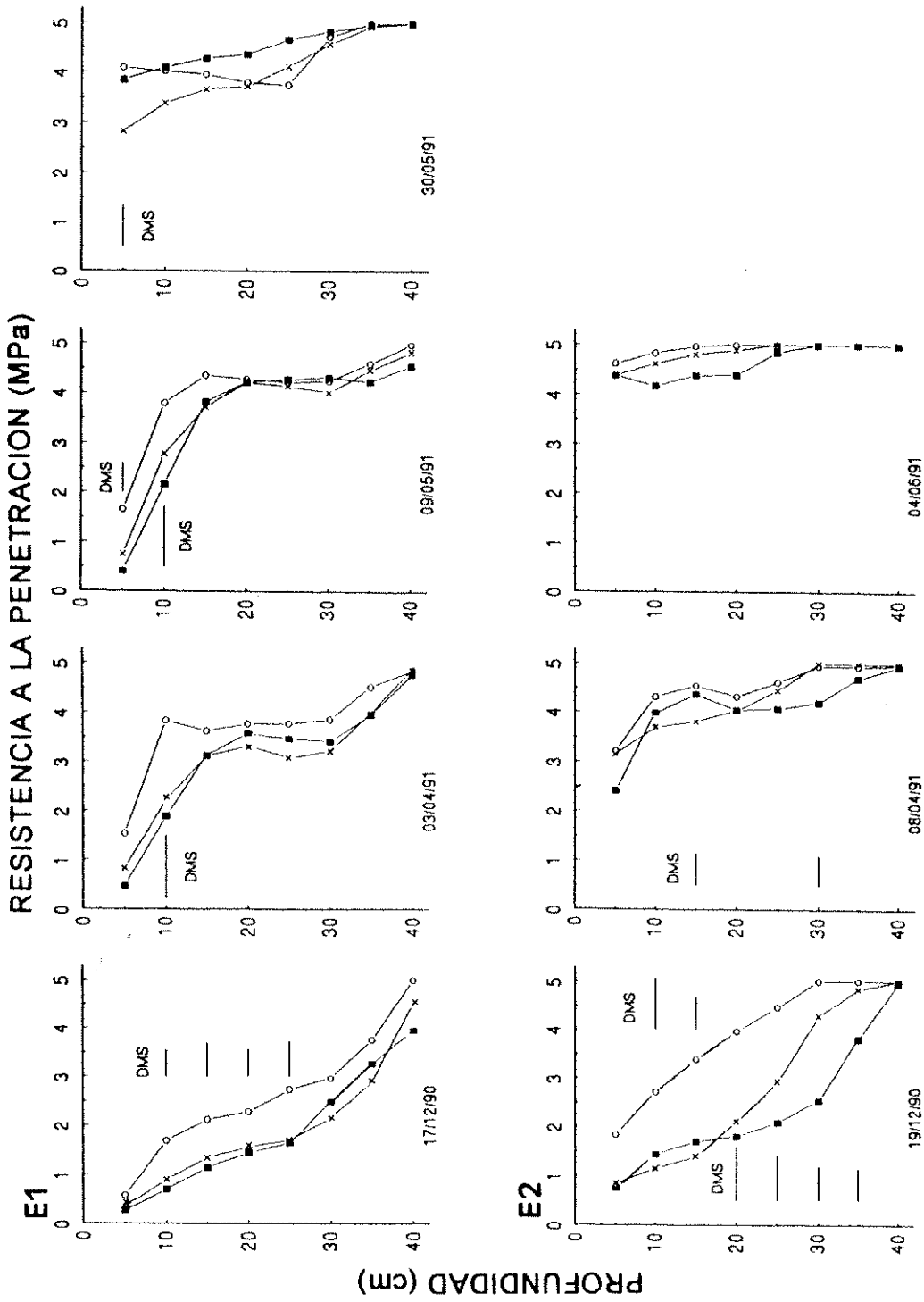


Fig. 33. Evolución de la resistencia del suelo a la penetración en los ensayos E1 y E2 en la campaña 1990-91 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; ○, siembra directa). Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales.

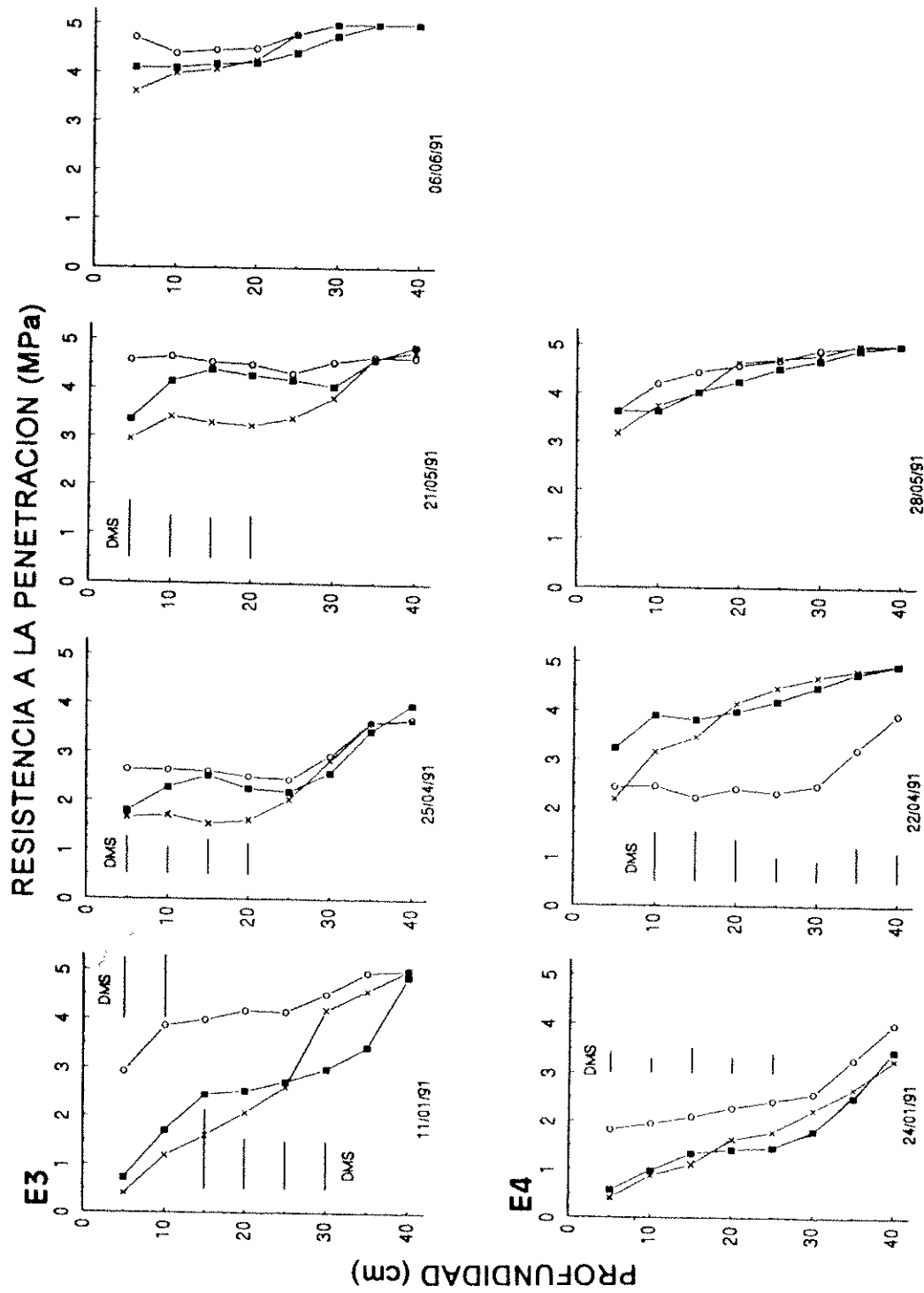


Fig. 34. Evolución de la resistencia del suelo a la penetración en los ensayos E3 y E4 en la campaña 1990-91 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; X, siembra directa; ○, siembra directa). Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales.

En todos los casos, la siembra directa mantiene, frente a los otros tratamientos, mayores valores de RP hasta una profundidad de 25 cm. A partir de esa profundidad o bien desaparecen estas diferencias entre tratamientos (E1 y E4) o sólo se mantienen con respecto al tratamiento de vertedera (E2 y E3); en este último caso, valores de RP inferiores en vertedera reflejan la acción de una labor más profunda que la del chisel y, por tanto, un esponjamiento del suelo a más profundidad. El hecho de que a 35-40 cm los valores de RP se aproximen en todos los tratamientos y ensayos, indica ausencia de efecto de las labores a partir de esas profundidades.

En la Tabla 27 se compara el estado de compactación que presentaba el suelo en su capa arable (0-40 cm) tras la siembra y a principios del encañado, intervalo del ciclo del cultivo en el que tienen lugar los cambios más importantes. En dicha Tabla se presenta la proporción de la capa arable asociada en cada fecha a determinados intervalos de RP. Se ha considerado, en primer lugar, el entorno de 0 a 2 MPa como el más apropiado en nuestro estudio para evaluar el grado de persistencia del esponjamiento del suelo y, por tanto, el efecto residual de las labores. El de 2 a 4 MPa engloba, como se indica más adelante, los valores críticos de RP limitantes del desarrollo radicular, mientras que por encima de 4 MPa, este desarrollo y, consecuentemente, el rendimiento del cultivo pueden resultar seriamente afectados.

Como puede verse en la Tabla 27, a los tratamientos de vertedera y chisel corresponden, en conjunto, los porcentajes más altos con RP inferior a 2 MPa (48-78%). En el tratamiento de no laboreo, sin embargo, el mayor porcentaje del perfil se encuentra entre 2 y 4 MPa en los ensayos E1 (58%) y E4 (72%) y por encima de 4 MPa en el ensayo E2 (49%) y E3 (62%).

Aproximadamente tres meses después del primer control de RP, la 2ª determinación, efectuada una vez ahijado el cultivo, muestra un aumento ostensible en el grado de compactación del suelo (Figs. 33 y 34). La excepción del ensayo E3 responde, al igual que sucedía con los perfiles de humedad, a una importante recarga de agua en el suelo, de tal modo que en ninguno de los tratamientos la RP supera los 4 MPa. En este caso, y a diferencia de lo observado en la 1ª fecha, un 91% del suelo en no laboreo presenta una RP entre 2 y 4 MPa (Tabla 27); además, el tratamiento de chisel mantiene hasta 20 cm de profundidad los valores más bajos de RP (Fig. 34), inferiores a 2 MPa en el 62% del perfil (Tabla 27). En los ensayos E1 y E2 han desaparecido, prácticamente, las diferencias iniciales entre tratamientos (Fig. 33), mientras que en E4 la menor compactación en no laboreo (Fig. 34) refleja la ausencia de cultivo en este tratamiento. En la Tabla 27 se muestra cómo en el ensayo E1 un 60-65% del perfil presenta una RP entre 2 y 4 MPa, mientras que en E2 y E4 es notable el porcentaje con RP superior a 4 MPa. Hay que destacar en E2 el menor valor de este último porcentaje en el tratamiento de chisel (50%) frente al de vertedera (75%) y al de no laboreo (78%). En el ensayo E4, la elevada proporción del suelo con RP entre 2 y 4 MPa (90%) y la ausencia de valores superiores a 4 MPa bajo no laboreo denotan falta de actividad radicular en este tratamiento.

En esta campaña las determinaciones continuaron hasta la fase de formación del grano, momento a partir del cual el estado de desecación del suelo impedía la medida de RP. En los ensayos E1 y E3 se realizó un control intermedio en la fase de espigado. Tal como puede verse en las Figuras 33 y 34, el estado de compactación evoluciona en estas

Tabla 27. Porcentaje del perfil del suelo hasta 40 cm de profundidad asociado a diferentes rangos de resistencia a la penetración (RP) en las dos primeras fechas de control en la campaña 1990-91 para cada tratamiento de laboreo y sitio de ensayo.

Ensayo	Fecha	RP (MPa)	Tratamiento de laboreo		
			V	Ch	SD
			———— % ————		
E1	17/12/90	0-2	68	72	33
		2-4	32	24	58
		> 4	0	4	9
	03/04/91	0-2	27	23	15
		2-4	61	65	63
		> 4	12	12	22
E2	19/12/90	0-2	58	48	15
		2-4	32	25	36
		> 4	10	27	49
	08/04/91	0-2	10	7	7
		2-4	16	43	15
		> 4	74	50	78
E3	11/01/91	0-2	30	48	9
		2-4	63	26	29
		> 4	7	26	62
	25/04/91	0-2	17	62	9
		2-4	83	38	91
		> 4	0	0	0
E4	24/01/91	0-2	78	68	28
		2-4	22	32	72
		> 4	0	0	0
	22/04/91	0-2	7	12	10
		2-4	43	41	90
		> 4	50	47	0

fases hasta alcanzar valores de RP mayores de 4 MPa en todos los ensayos y tratamientos, a excepción del tratamiento de chisel en el ensayo E3 que mantiene valores inferiores a 4 MPa hasta 30 cm. En la última fecha se superan en todos los ensayos, por debajo de 25-30 cm de profundidad, los 5 MPa, valor límite de registro del penetrógrafo utilizado.

4.4.2. Campaña 1991-92

El estado de compactación del suelo tras la siembra resultó ser también en esta 2ª campaña de ensayo función del contenido de humedad y del tiempo transcurrido desde las labores primarias. Así, según los resultados correspondientes a las parcelas anuales, en conjunto, el orden de los ensayos por su contenido de humedad inicial es inverso al que presentan según su grado de compactación inicial ($E4 < E3 < E2 < E1$). Este orden es el mismo que siguen teniendo en cuenta las diferencias en RP observadas entre no laboreo y tratamientos con laboreo (Figs. 35-38). En todos los casos al tratamiento de siembra directa corresponden los valores más altos de RP.

En el ensayo E4, las diferencias entre tratamientos, mayores incluso que las observadas en la campaña anterior, se deben, por un lado, a una mayor compactación en el tratamiento de siembra directa y, por otro, a una mayor persistencia del esponjamiento inicial del suelo ya que en este caso tan sólo han transcurrido 44 días desde las labores primarias (Fig. 38). Estas diferencias suponen que en no laboreo tan sólo el 9% de la capa arable presente valores de RP inferiores a 2 MPa, frente al 88% en el tratamiento de vertedera y al 63% en el de chisel (Tabla 28).

Como puede verse en la Figura 37, el efecto de las labores es también patente en el ensayo E3. Aquí, mientras que en los tratamientos de vertedera y chisel la mayor parte de la capa arable presenta valores de RP inferiores a 2 MPa, en no laboreo la mayor proporción del perfil se encuentra en el rango de 2-4 MPa (Tabla 28). En este ensayo, el estado de compactación en las parcelas de año y vez es similar al de las anuales para todos los tratamientos de laboreo (Tabla 28), a excepción del de laboreo con chisel al que hasta 15 cm de profundidad corresponden en las parcelas de año y vez valores de RP significativamente mayores que en las parcelas anuales (Fig. 37).

Aunque no de forma tan evidente como en los ensayos E3 y E4, también en el ensayo E2 se observan diferencias entre tratamientos de laboreo. En las parcelas anuales, los mayores valores de RP en siembra directa son significativos hasta 25 cm de profundidad, profundidad a partir de la cual las diferencias entre vertedera y chisel reflejan una diferente profundidad de labor (Fig. 36); este último hecho parece también detectarse en las parcelas anuales del ensayo E3 (Fig. 37). En este ensayo, tampoco se aprecian diferencias importantes entre sistemas de cultivo, si bien la distribución de los rangos de RP en el perfil del suelo parecen indicar una ligera mayor compactación en el sistema anual (Tabla 28). Así, sólo entre 15 y 20 cm todos los tratamientos muestran valores de RP más elevados en el sistema anual que en el de año y vez (Fig. 36).

Al ensayo E1 corresponde el estado inicial de compactación del suelo más desfavorable. Al contrario de lo que ocurría en los otros ensayos, en éste es menor el porcentaje de la capa arable con valores de RP inferiores a 2 MPa y mayor el correspon-

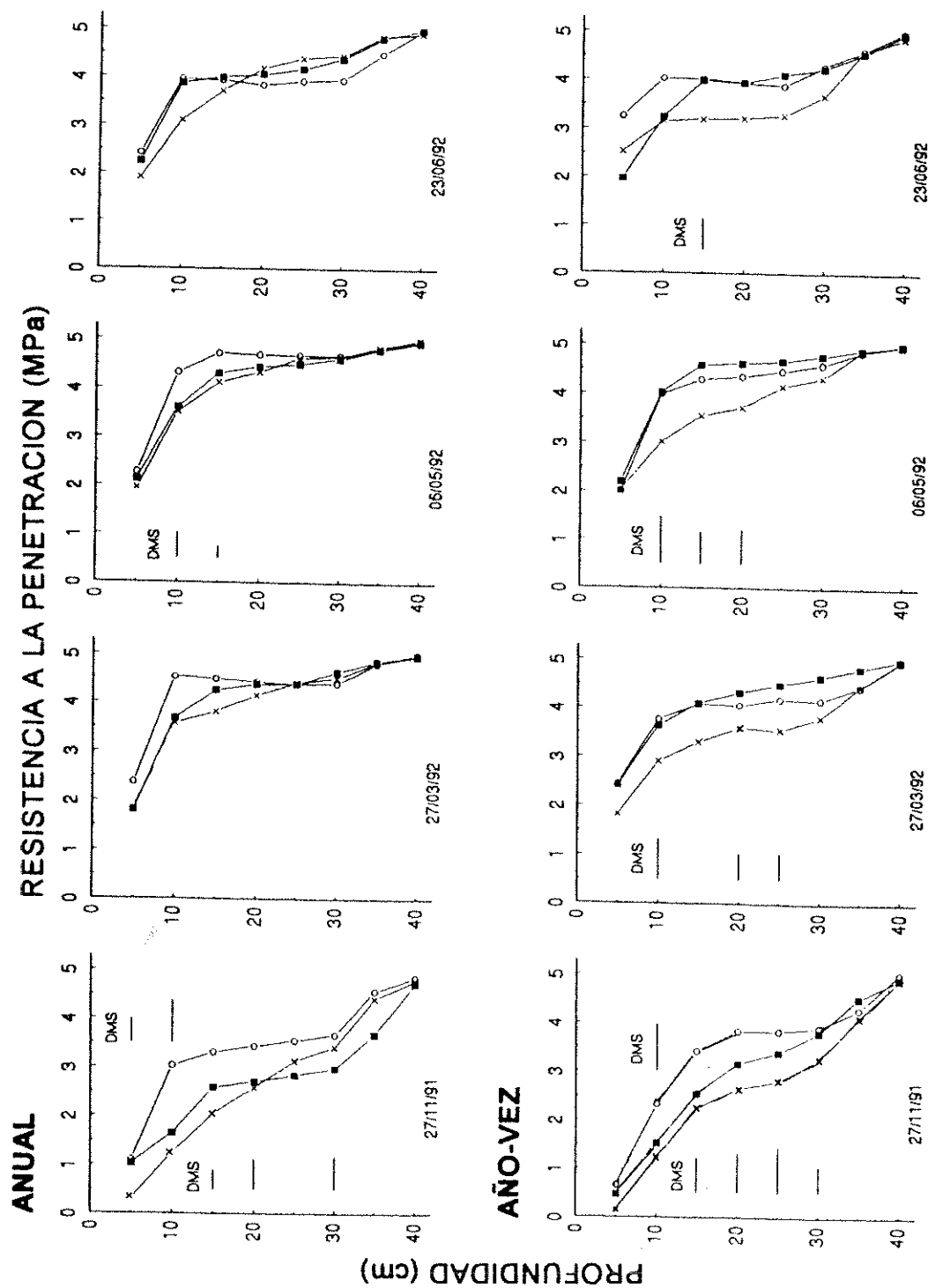


Fig. 35. Evolución de la resistencia del suelo a la penetración en el ensayo E1 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; X, chisel; ○, siembra directa) y sistema de cultivo en la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales.

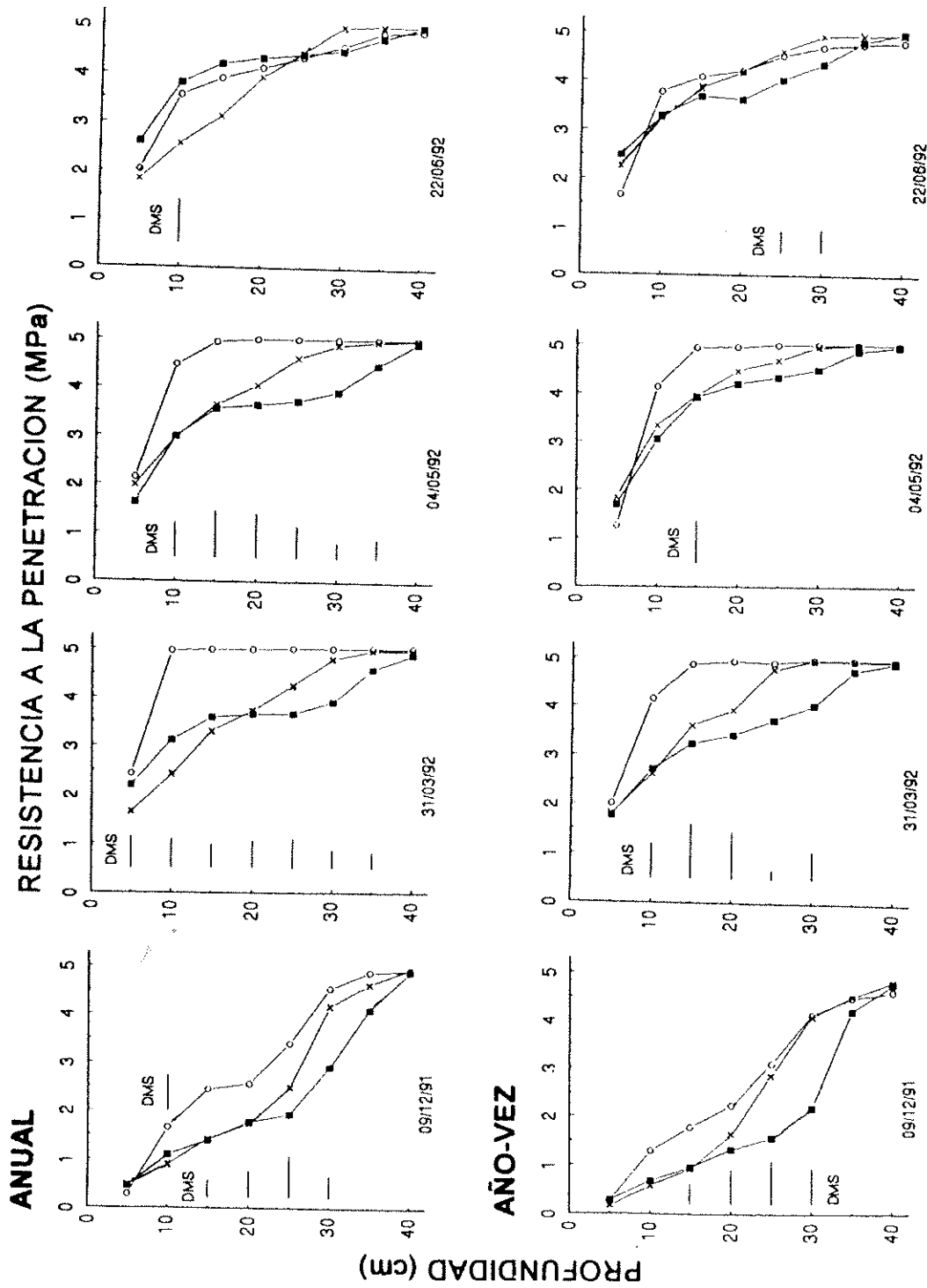


Fig. 36. Evolución de la resistencia del suelo a la penetración en el ensayo E2 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; o, siembra directa) y sistema de cultivo en la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales.



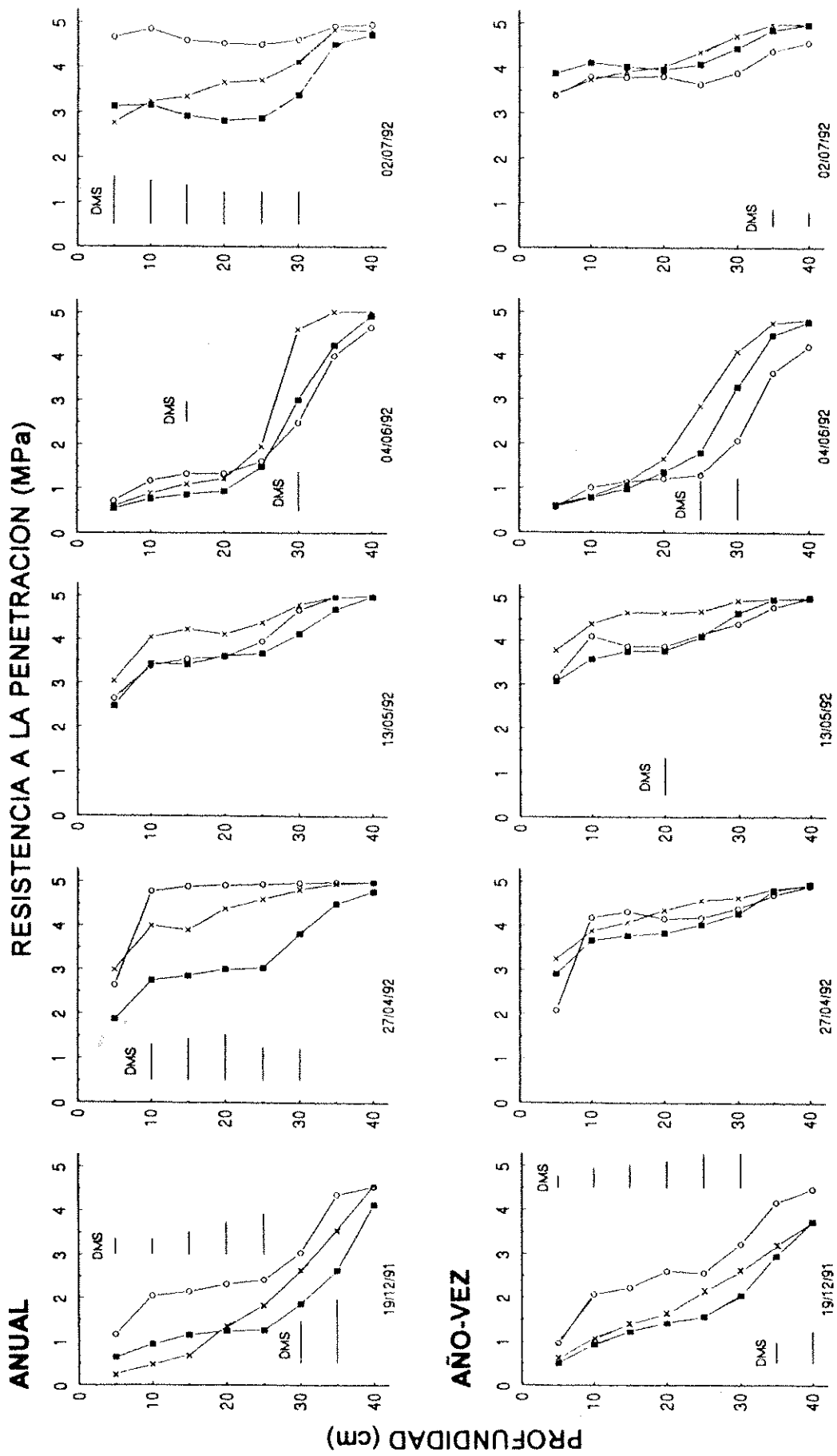


Fig. 37. Evolución de la resistencia del suelo a la penetración en el ensayo E3 según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; o, siembra directa) y sistema de cultivo en la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales.

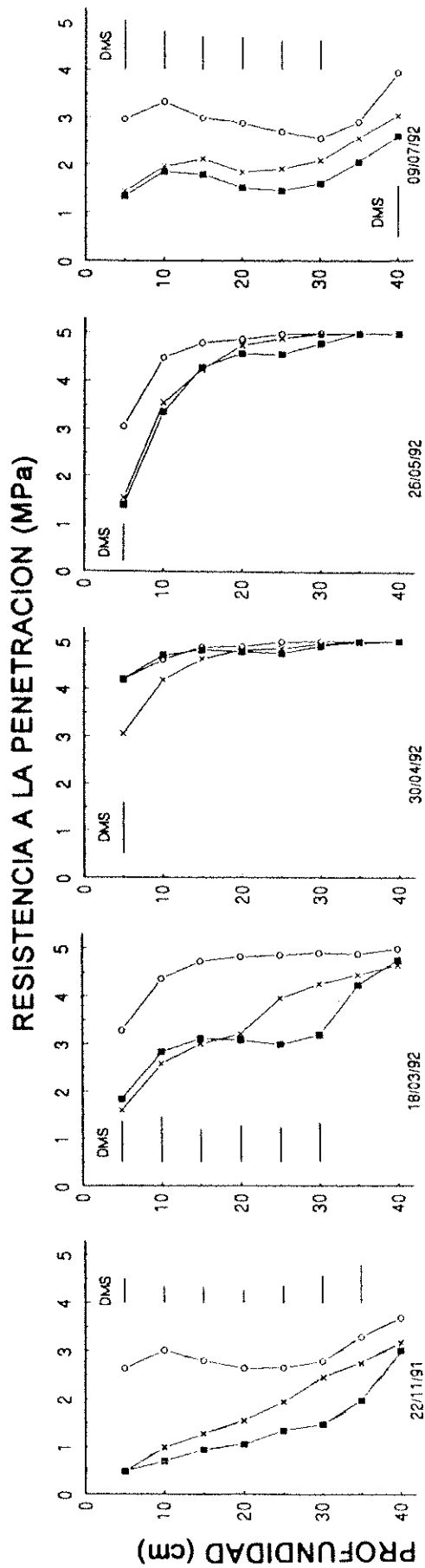


Fig. 38. Evolución de la resistencia del suelo a la penetración en el ensayo E4 según tratamiento de laboreo (■) vertedera; x, chisel; o, siembra directa) en la campaña 1991-92. Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras horizontales.

Tabla 28. Porcentaje del perfil del suelo hasta 40 cm de profundidad correspondiente a diferentes rangos de resistencia a la penetración (RP) en las dos primeras fechas de control en la campaña 1991-92 para cada tratamiento de laboreo, sistema de cultivo y sitio de ensayo.

Ensayo	Fecha	RP (MPa)	Tratamiento					
			Anual			Año y vez		
			V	Ch	SD	V	Ch	SD
			%					
E1	27/11/91	0-2	29	38	19	30	34	22
		2-4	63	45	62	49	53	57
		> 4	8	17	19	21	13	21
	27/03/92	0-2	13	13	11	10	14	10
		2-4	20	34	12	24	64	24
		> 4	67	53	77	66	22	66
E2	09/12/91	0-2	64	54	29	74	55	45
		2-4	24	19	41	15	21	30
		> 4	12	27	30	11	24	25
	31/03/92	0-2	11	17	18	16	16	12
		2-4	68	41	3	61	37	12
		> 4	21	42	79	23	47	76
E3	19/12/91	0-2	78	66	25	76	59	25
		2-4	21	27	60	24	41	62
		> 4	1	7	15	0	0	13
	27/04/92	0-2	14	8	9	9	8	12
		2-4	65	33	11	53	23	11
		> 4	21	59	79	38	69	77
E4	22/11/91	0-2	88	63	9			
		2-4	12	37	91			
		> 4	0	0	0			
	18/03/92	0-2	13	16	8			
		2-4	72	49	13			
		> 4	15	35	79			

diente al rango de 2-4 MPa, tanto en parcelas anuales como en parcelas año-vez (Tabla 28). Aunque la siembra directa mantiene los mayores valores de RP, las diferencias con respecto a los otros tratamientos ya no son tan marcadas como en los otros ensayos y, así, en las parcelas de año y vez sólo se diferencia del tratamiento con chisel (Fig. 35).

La evolución del grado de compactación en la capa arable sigue, de manera global, una pauta similar a la observada en la campaña 1990-91. El suelo del ensayo E1, que partía, como se acaba de comentar, de una situación de impedancia mecánica muy limitante, es cuatro meses después de la siembra, con el cultivo ya ahijado, aquél en el que primero desaparecen los efectos de las labores y en el que se alcanzan los niveles de compactación más elevados (Fig. 35). Más del 50% del espesor de la capa arable presenta en este momento valores de RP superiores a 4 MPa en todos los tratamientos y sistemas de cultivo, a excepción de las parcelas labradas con chisel en el sistema de año y vez (Tabla 28). Este tratamiento es por ello el responsable de la interacción TxS observada de 20 a 30 cm de profundidad. La mayor compactación en las parcelas anuales del tratamiento con chisel se mantiene en la 3ª fecha de control. Conviene recordar que la severa sequía que afectaba al cultivo ya en la fase de ahijado impidió finalmente su espigado. La reducción del grado de compactación en la última fecha de determinación (Fig. 35) guarda relación con la recarga de humedad en la capa arable por las lluvias recibidas al final de la campaña. Aunque no de forma significativa, el chisel sigue siendo el tratamiento que mantiene los menores valores de RP en las parcelas de año y vez.

En los demás ensayos también tiene lugar un incremento importante del grado de compactación en la 2ª fecha de control, especialmente en el tratamiento de siembra directa en el que prácticamente el 80% del suelo se encuentra compactado por encima de 4 MPa (Tabla 28). Sin embargo, a diferencia de lo observado en el ensayo E1, aún perduran los efectos de las labores, especialmente en las parcelas anuales. Así, en los ensayos E2 y E4 los tratamientos de vertedera y chisel presentan los valores más bajos de RP hasta una profundidad de 25 cm, por debajo de la cual chisel y siembra directa dejan de diferenciarse (Figs. 36 y 38). En las parcelas anuales del ensayo E3 (Fig. 37) el efecto de la labor con vertedera persiste con más claridad que en el caso del chisel: mientras que sólo un 21% del espesor de la capa arable en vertedera presenta valores de RP superiores a 4 MPa, en chisel este porcentaje alcanza ya un 60% (Tabla 28). Las diferencias observadas entre tratamientos de laboreo en las parcelas anuales desaparecen en las de año y vez; en estas últimas, el tratamiento de vertedera aumenta el nivel de compactación con respecto al del sistema anual y la siembra directa lo reduce (Fig. 37), explicándose así las interacciones TxS encontradas hasta 25 cm de profundidad.

Una vez ahijado el cultivo, la evolución del estado de compactación en cada uno de los ensayos va a depender, fundamentalmente, del contenido de humedad del suelo, condicionado en cada caso por el peculiar régimen de lluvias de la campaña. En el ensayo E2, se mantienen en la fase de espigado (3ª determinación) prácticamente los mismos niveles de RP y diferencias entre tratamientos hasta entonces observadas, desapareciendo éstas en las parcelas de año y vez (Fig. 36). Hasta el momento de la cosecha (4ª determinación) los valores de RP en los tratamientos de vertedera y chisel se mantienen sin cambios sustanciales. En ese momento no se observan diferencias importantes entre tratamientos de laboreo, tanto en parcelas anuales como en parcelas año-vez; habría que destacar, sin embargo, una mayor compactación entre 15 y 30 cm en el tratamiento de

vertedera de las parcelas anuales en comparación con las de año y vez (Fig. 36). La reducción de los valores de RP en el tratamiento de siembra directa, con relación a los de la anterior fecha de determinación, es debida a una mayor recarga de humedad en este tratamiento tras las lluvias recibidas antes de la cosecha.

Este último comportamiento en el tratamiento de siembra directa, en los dos sistemas de cultivo, también se comprueba en la 3ª determinación de RP en el ensayo E3 (Fig. 37). Aunque en este momento no se aprecian en este ensayo diferencias significativas entre tratamientos, las parcelas de año y vez presentan, en conjunto, un mayor grado de compactación hasta 20 cm de profundidad. Asimismo, los perfiles de RP correspondientes a la 4ª determinación (formación de grano) de este ensayo ponen de relieve la estrecha relación entre RP y contenido de humedad: la importante recarga de agua en el perfil hasta unos 40-50 cm de profundidad (Fig. 27), tras las lluvias recibidas en el mes de mayo, conlleva una reducción de la compactación en todos los tratamientos, hasta valores de RP inferiores, incluso, a los que presentaba el suelo tras la siembra, especialmente en el caso de la siembra directa. A partir de esa fecha tiene lugar un período de desecación de aproximadamente un mes hasta el día de la cosecha, momento en el que el suelo recupera el estado de compactación que presentaba en la 2ª fecha de determinación, con las mismas diferencias entre tratamientos y subtratamientos (Fig. 37).

Por último, en el ensayo E4 el elevado grado de compactación del suelo en la 3ª determinación (fase de espigado del cultivo), sin diferencias ya entre tratamientos, se alivia notablemente al final del ciclo. La reducción de RP que ya se observa en los primeros 15 cm en la 4ª fecha de determinación continúa hasta el día de la cosecha, momento en el que el estado de compactación se aproxima al que presentaba el suelo al inicio de la campaña, especialmente en el tratamiento de no laboreo (Fig. 38). A esta situación final de compactación se llega en este caso a través de un proceso de humectación y no de desecación como en el ensayo E3.

4.4.3. Relación entre resistencia a la penetración y parámetros de suelo

Como ha sido puesto de manifiesto en numerosos estudios, diversos parámetros físicos, químicos y mineralógicos del suelo (contenido de humedad, textura, densidad aparente, materia orgánica, etc.) influyen en las medidas de RP (Chancellor, 1976; Cassel, 1982; Stitt et al., 1982; Pérez y Díaz-Fierros, 1989). Si bien la determinación de RP resulta rápida en el campo, la alta variabilidad asociada a este parámetro (O'Sullivan et al., 1987; Hadas y Shmulewich, 1990; Perfect et al., 1990) requiere un gran número de medidas para que el valor final de RP resulte representativo. Esto llega a ser un claro inconveniente en determinadas circunstancias como, por ejemplo, en suelos con un alto grado de pedregosidad donde, además, es necesario acudir a un tratamiento especial de los datos (Glasbey y O'Sullivan, 1988). Para evitar estos inconvenientes, se han desarrollado modelos que, basados en las relaciones entre RP y parámetros de suelo, permiten una medida indirecta de RP. Canarache (1990) recopila algunos de los modelos propuestos hasta el presente.

Aunque en nuestras condiciones de trabajo la determinación de RP no ha supuesto ninguna dificultad especial, dada la estrecha dependencia que, como se ha señalado en los

apartados anteriores, parece existir entre este parámetro y el contenido de humedad, se creyó conveniente establecer la posible relación entre ambos parámetros, incluyendo además aquellos otros que, de acuerdo con la literatura, pueden contribuir a una mejor estimación de la RP. Ello permitiría una interpretación más adecuada de los resultados de RP obtenidos en el estudio.

Los datos de campo de las dos campañas experimentales han servido de base para llegar a fórmulas empíricas que expresan la RP en función del contenido de humedad gravimétrico, la densidad aparente y la profundidad de suelo en cada uno de los sitios de ensayo. Se excluyeron del análisis de regresión aquellos casos en los que al superarse los 5 MPa, límite de resolución del equipo, no era posible conocer el valor real de RP.

En todos los ensayos la RP está claramente relacionada con cada uno de los parámetros considerados como variables independientes. En la Tabla 29 se muestran aquellas regresiones múltiples que, por presentar coeficientes de determinación (r^2) más elevados y errores de estimación (S.E.) más bajos, expresan mejor estas relaciones. Así, el ajuste lineal resultó ser adecuado y significativo en los cuatro sitios experimentales con una clara relación negativa entre RP y contenido de humedad, y positiva con el resto de variables, salvo la establecida entre RP y profundidad en el ensayo E2. Tanto el propio ajuste como los coeficientes de regresión (salvo el coeficiente correspondiente a la variable profundidad en el ensayo E2) resultaron altamente significativos (valores de la F de Fisher y de la t de Student mayores que los requeridos para un nivel de significación de 0,001).

La regresión múltiple por etapas revela que el contenido de humedad explica el mayor porcentaje de la variación total de RP (31-43%), a excepción del ensayo E1 en el que es la profundidad el parámetro que contribuye de forma más importante a la predicción de RP (46%). Por otra parte, este método permite observar que en E2 la profundidad no contribuye de forma significativa a la estimación de RP; dada la fuerte correlación entre densidad aparente y profundidad ($r=0,945$), la inclusión de esta última duplica, en cierta medida, la información ya aportada por la densidad aparente.

Tabla 29. Ecuaciones de regresión múltiple entre resistencia del suelo a la penetración (RP, MPa) y contenido de humedad gravimétrico (W, % peso), densidad aparente (Da, g/cm³) y profundidad de suelo (Z, cm), obtenidas en cada sitio de ensayo. Se presenta, para cada una de las ecuaciones, el coeficiente de determinación (r²), el error típico de estimación (S.E.), el número de observaciones (n) y, entre paréntesis, los errores típicos de los coeficientes de regresión.

Ensayo	Ecuación de Regresión	r ²	S.E.	n
E1	RP = -9,46 - 0,208·W + 9,21·Da + 0,066·Z (0,0093) (0,656) (0,0030)	0,708	0,763	807
E2	RP = -14,55 - 0,237·W + 15,58·Da - 0,013·Z (0,0135) (2,009) (0,0161)	0,564	1,008	563
E3	RP = 1,61 - 0,279·W + 2,04·Da + 0,066·Z (0,0085) (0,550) (0,0031)	0,630	0,889	866
E4	RP = -2,97 - 0,249·W + 5,01·Da + 0,037·Z (0,0125) (0,797) (0,0056)	0,511	0,971	473

4.5. DESARROLLO Y CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE CEBADA

En los anteriores apartados se ha dado cuenta de la respuesta del suelo a los tratamientos de laboreo en términos de contenido de humedad y compactación. En ellos se ha aludido repetidas veces a la repercusión sobre el cultivo de cebada de distintas situaciones potencialmente limitantes. En este apartado se presentan los resultados más relevantes obtenidos en relación al crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo en las dos campañas experimentales. Esta información permitirá una interpretación más precisa de los balances de agua y consumo de ésta por el cultivo bajo los distintos sistemas de laboreo.

4.5.1. Campaña 1990-91

En la Tabla 30 se presentan los datos correspondientes al establecimiento del cultivo (índice y porcentaje de emergencia), profundidad de siembra y altura de la planta cuando ésta presentaba 1-2 hojas expandidas en los ensayos E1 y E3. Por lo que respecta al establecimiento del cultivo, el porcentaje final de plantas emergidas fue similar en los tres tratamientos de laboreo y en los dos sitios de ensayo; ahora bien, mientras que el tratamiento de laboreo no influyó en el tiempo requerido para una emergencia total del cultivo en el ensayo E1, sí lo hizo en el ensayo E3 con una emergencia más lenta en el tratamiento de siembra directa. También en este ensayo la profundidad de siembra y la altura de la planta bajo siembra directa son significativamente menores que las correspondientes a los tratamientos de laboreo con chisel y vertedera; estas diferencias son sólo patentes frente al laboreo con chisel en el ensayo E1.

La producción de biomasa aérea total y LAI, determinados en esta 1ª fecha de control, continuó en cuatro ocasiones más hasta el día de la cosecha (Figs. 39 y 40). A partir de la fase de espigado (3ª fecha de control inclusive) la biomasa de las espigas se determinó independientemente de la del tallo.

En el ensayo E1, no se aprecian hasta la 3ª fecha de control (fase de espigado) diferencias en el desarrollo del cultivo entre tratamientos. En ese momento, en el que se dan los valores más altos de materia seca (parte aérea sin espigas) y de LAI (Fig. 39A-39B), la producción de biomasa es significativamente mayor en vertedera que en siembra directa. Estas diferencias se mantienen hasta la fecha de recolección (Fig. 39A). En el caso del LAI las únicas diferencias entre tratamientos se dan en el momento de máximo desarrollo del cultivo, con valores significativamente mayores en el tratamiento de laboreo tradicional (Fig. 39B). Paralelamente al descenso del LAI que tiene lugar a partir de ese momento se produce un incremento de biomasa de espigas, con valores claramente mayores en vertedera y chisel, y que se mantienen en el día de la cosecha, con diferencias significativas entre vertedera y siembra directa (Fig. 39C).

Por lo que respecta al ensayo E3, las diferencias en la evolución de la biomasa entre tratamientos se manifiestan ya desde los primeros estadios de desarrollo del cultivo. La peor respuesta en cuanto a producción de materia seca (sin espigas) corresponde, a lo largo de todo el ciclo, al tratamiento de siembra directa, con diferencias significativas en todo momento con respecto al de vertedera (Fig. 40A). La evolución del LAI, igualmente en

Tabla 30. Porcentaje e índice de emergencia, profundidad de siembra y altura de la planta, en la campaña 1990-91, según tratamiento de laboreo en los ensayos E1 (11/02/91) y E3 (28/02/91).

Ensayo	Tratamiento	% de emergencia	Índice de emergencia	Profundidad de siembra	Altura
			— días —	cm	
E1	V	62,77 a	45,13 a	3,79 ab	7,68 ab
	Ch	63,65 a	45,84 a	4,51 a	8,12 a
	SD	57,19 a	45,81 a	2,67 b	6,65 b
	DMS (0,05)	ns	ns	1,36	1,28
E3	V	68,92 a	61,46 a	4,20 a	6,81 a
	Ch	62,46 a	59,65 a	4,59 a	6,88 a
	SD	73,19 a	86,77 b	2,03 b	3,56 b
	DMS (0,05)	ns	8,17	1,57	1,74

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para un mismo ensayo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

Tabla 31. Rendimiento en grano (peso seco), componentes del mismo e índice de cosecha, en la campaña 1990-91, según tratamiento de laboreo en los ensayos E1 y E3.

Ensayo	Tratamiento	Espigas por m ²	Granos por espiga	Peso del grano (mg)	Rendimiento grano (g/m ²)	Índice de cosecha
E1	V	637,33 a	21,59 a	17,81 a	245,02 a	0,32
	Ch	495,33 b	16,94 ab	18,12 a	152,03 b	0,28
	SD	494,67 b	15,91 b	18,19 a	143,19 b	0,31
	DMS (0,05)	102,65	5,60	ns	67,22	
E3	V	243,96 a	28,53 a	31,63 a	220,16 a	0,50
	Ch	281,67 a	27,15 a	28,85 a	220,60 a	0,54
	SD	289,56 a	19,96 b	32,17 a	185,92 a	0,55
	DMS (0,05)	ns	6,94	ns	ns	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para un mismo ensayo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

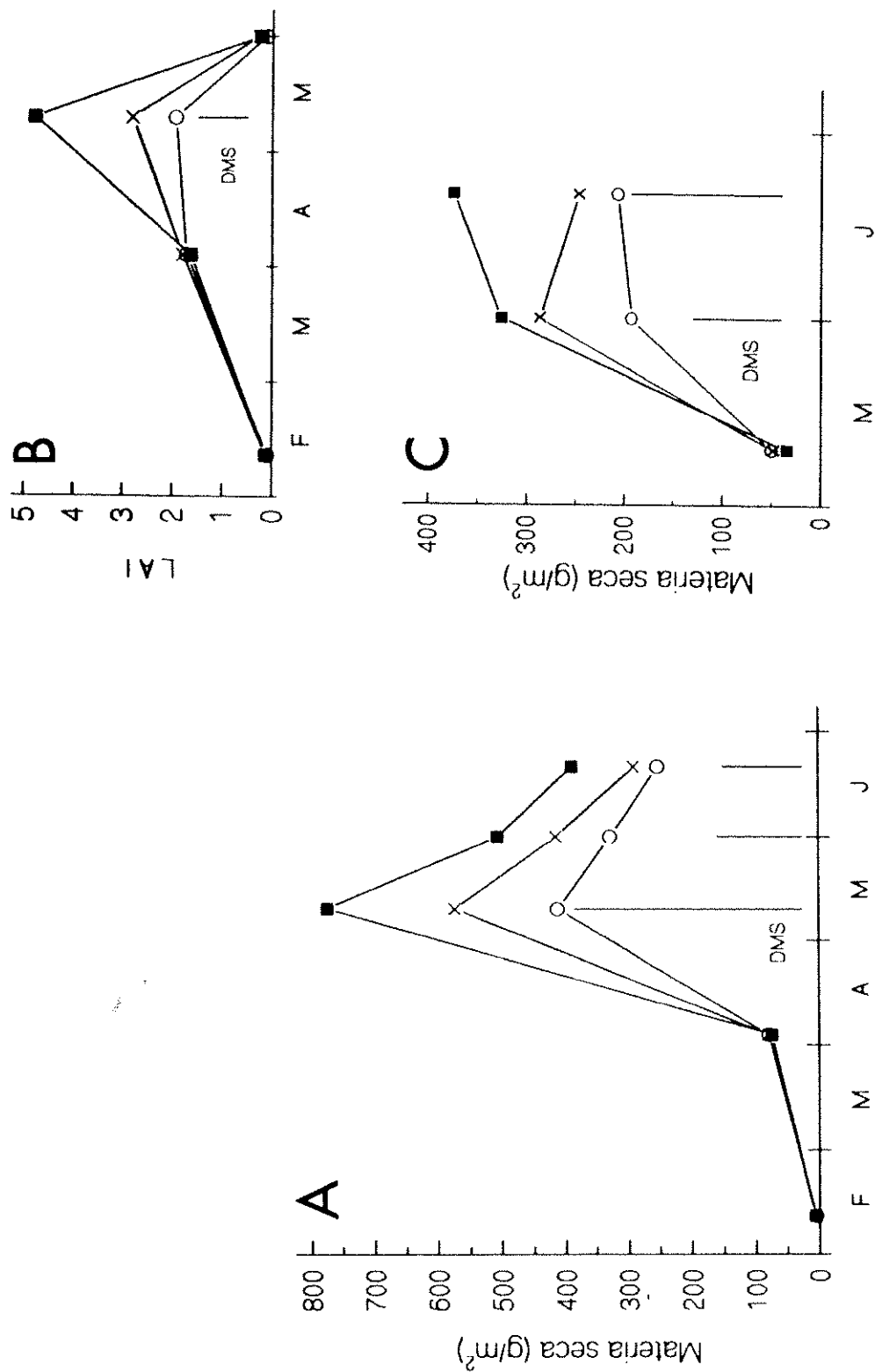


Fig. 39. Evolución de la producción de materia seca de la parte aérea, sin espigas (A), del índice de área foliar (B) y de las espigas (C) en el cultivo del ensayo E1 durante la campaña 1990-91, según tratamiento de laboreo (■) vertedera; x, chisel; o, siembra directa). Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras verticales.

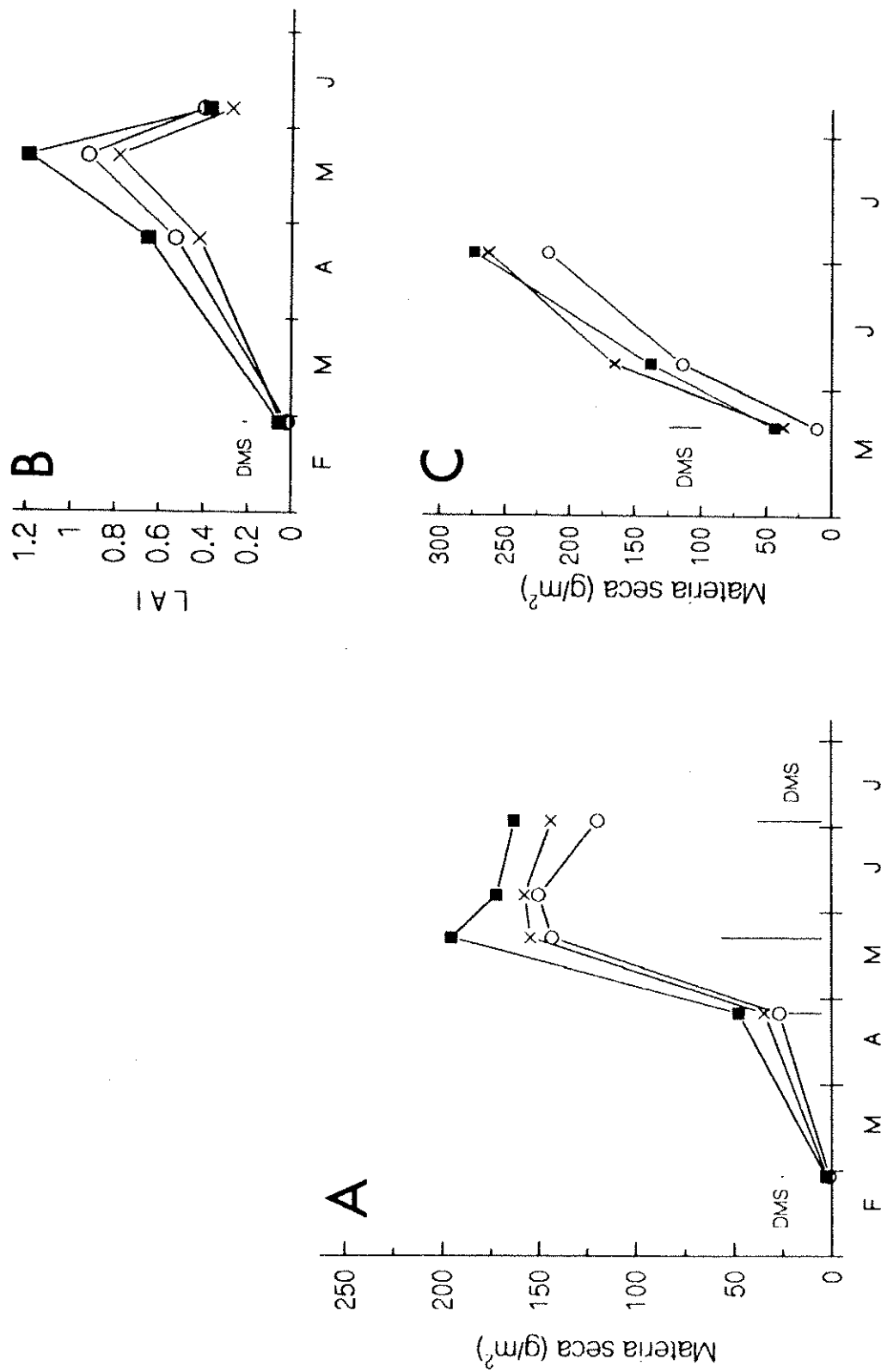


Fig. 40. Evolución de la producción de materia seca de la parte aérea, sin espigas (A), del índice de área foliar (B) y de las espigas (C) en el cultivo del ensayo E3 durante la campaña 1990-91, según tratamiento de laboreo (■, vertedera; X, chisel; O, siembra directa). Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras verticales.

este caso con un máximo en la fase de espigado del cultivo, no muestra un comportamiento diferente entre tratamientos (Fig. 40B). Por lo que atañe a la producción final de espigas, si bien las diferencias entre tratamientos no resultan estadísticamente significativas, sí se aprecia durante el período de formación y maduración de la espiga una menor biomasa en el tratamiento de siembra directa (Fig. 40C).

En la Tabla 31 se presentan los componentes del rendimiento en grano de los ensayos E1 y E3 en esta 1ª campaña experimental. En el primero, el mayor rendimiento en laboreo tradicional va asociado a un mayor número de espigas/m² y de granos/espiga, y no al peso unitario del grano, el cual no resulta afectado por el tratamiento de laboreo. El rendimiento final en los tratamientos de chisel y siembra directa supone una reducción de un 38% y de un 42%, respectivamente, con respecto al del tratamiento de vertedera. En el ensayo E3, aunque no existen diferencias estadísticamente significativas en la producción final, el menor rendimiento corresponde al tratamiento de siembra directa (aproximadamente un 16% inferior al obtenido en los tratamientos de chisel y vertedera); en este ensayo hay que destacar también en siembra directa una menor producción de granos/espiga. Tanto en el ensayo E1 como en el E3, los índices de cosecha son similares en los tres tratamientos; la diferente magnitud de este índice entre ensayos refleja la distribución de biomasa propia de las variedades de cebada utilizadas en cada ensayo.

Por lo que respecta al rendimiento en grano de los ensayos E2 y E4 (datos provenientes de recolección con cosechadora), no se observan diferencias significativas entre tratamientos. Así, en el ensayo E2, la producción en los tratamientos de vertedera, chisel y siembra directa fue 963, 810 y 860 kg/ha, respectivamente. En el ensayo E4 los rendimientos en vertedera y chisel fueron, respectivamente, de 3594 y 3547 kg/ha.

4.5.2. Campaña 1991-92

Al igual que en la primera, en esta 2ª campaña no se observan en el ensayo E1 diferencias entre tratamientos de laboreo en cuanto a nascencia del cultivo (Tabla 32); no obstante, podría destacarse un ligero retraso en el establecimiento final del cultivo en el tratamiento de siembra directa en el sistema de año y vez (1-2 días), lo que explica la interacción TxS encontrada para el índice de emergencia (Tabla 32). En cuanto a profundidad de siembra y altura de planta (en fase de 1-2 hojas expandidas), tampoco existen diferencias apreciables entre tratamientos de laboreo y sistemas de cultivo, a excepción de una menor profundidad de siembra en el tratamiento con chisel en las parcelas anuales.

En el ensayo E3, en el que no fue posible efectuar los desplazamientos necesarios para un correcto seguimiento de la nascencia del cultivo en esta campaña, se observa, a diferencia del ensayo E1, un efecto del tratamiento de laboreo en el porcentaje de emergencia final; este porcentaje en siembra directa supera de manera apreciable al de los tratamientos con laboreo en las parcelas anuales y sólo al de chisel en parcelas año-vez (Tabla 32). Por otro lado, mientras que no existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo en cuanto a profundidad de siembra y altura de planta en las parcelas anuales, en las de año y vez destacan los menores valores de estos parámetros en el tratamiento de chisel.

Tabla 32. Porcentaje e índice de emergencia, profundidad de siembra y altura de la planta, en la campaña 1991-92, según tratamiento de laboreo y sistema de cultivo en los ensayos E1 (26/12/91) y E3 (26/02/92).

Ensayo	Tratamiento de laboreo	Sistema de cultivo	% de emergencia	Índice de emergencia	Profundidad de siembra	Altura	
				— días —	cm		
E1	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	99,34 a	22,38 a	6,51 a	8,87 a	
			96,34 a	22,48 a	3,82 b	7,13 a	
			82,17 a	22,70 a	6,14 a	8,42 a	
				ns	ns	1,19	ns
	V Ch SD DMS (0,05)	Año-Vez	89,88 a	22,98 a	6,91 a	8,52 a	
			81,71 a	22,31 a	6,57 a	8,46 a	
			83,86 a	24,31 b	7,80 a	8,91 a	
			ns	1,13	ns	ns	
	DMS (0,05)						
	Tratamiento (T)			ns	0,64	0,73	0,69
	Subtratamiento (S)			ns	ns	ns	ns
	Interacción TxS:						
	S dentro del mismo T			ns	1,33	ns	ns
E3	V Ch SD DMS (0,05)	Anual	72,54 a	-	2,27 a	5,68 a	
			68,67 a	-	2,55 a	5,76 a	
			93,26 b	-	3,24 a	6,35 a	
			20,64	-	ns	ns	
	V Ch SD DMS (0,05)	Año-Vez	82,51 ab	-	2,97 ab	6,61 a	
			71,44 a	-	2,15 a	5,52 b	
			94,66 b	-	3,79 b	6,98 a	
			17,45	-	1,07	1,02	
	DMS (0,05)						
	Tratamiento (T)			20,45	-	ns	0,68
	Subtratamiento (S)			ns	-	ns	ns
	Interacción TxS:						
	S dentro del mismo T			ns	-	ns	ns

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para un mismo ensayo y sistema de cultivo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

La severa sequía que tuvo lugar durante la campaña agrícola 1991-92, y que afectó muy especialmente al cultivo en el ensayo E1 ya en la fase de ahijado, no permitió efectuar un seguimiento del desarrollo y maduración del cultivo en este ensayo tan completo como en la campaña anterior. No obstante, el seguimiento se extendió hasta principios de mayo en un intento de evidenciar una posible diferente respuesta al estrés según tratamientos. Ante esta circunstancia se creyó conveniente ampliar el estudio, dedicando un esfuerzo adicional, a la observación de la evolución del cultivo desde el espigado hasta la cosecha en el ensayo E4. Con ello se pretendió completar en este ensayo el conocimiento sobre la respuesta del cultivo al no laboreo, teniendo en cuenta la incidencia de la campaña anterior ya comentada.

La evolución de la biomasa de la parte aérea del cultivo y del LAI en el ensayo E1 se muestra en la Figura 41. El orden de magnitud de estos parámetros indica el efecto de las condiciones adversas señaladas. Hasta la fase del encañado, el desarrollo del cultivo (finales de marzo) transcurre según una pauta similar a la observada en la campaña anterior y es a partir de ese momento cuando se manifiesta el daño producido, más acusado en las parcelas año-vez, que llega a impedir la formación de la espiga (Fig. 41). La alta variabilidad de la respuesta del cultivo observada para un mismo tratamiento no permite revelar diferencias concluyentes entre tratamientos, aunque sí podría señalarse que en el tratamiento de vertedera el cultivo progresa con una ligera mayor producción de biomasa. Con relación al ensayo E4, únicamente habría que destacar que la respuesta del cultivo en la fase de formación y maduración de la espiga es similar en los tres tratamientos de laboreo considerados (Fig. 42).

Si se comparan los datos relativos a la producción de biomasa y LAI de las dos campañas experimentales en el ensayo E3, se pone de manifiesto cómo también en este ensayo el cultivo acusa en la 2ª campaña una pluviometría inferior a la normal entre enero y abril. Así, aunque la biomasa de la parte aérea alcanza en la fase de encañado valores similares a los de la 1ª campaña, a partir de ese momento el cultivo muestra un menor desarrollo, mucho más acusado bajo siembra directa y, en particular, en las parcelas de año y vez (Fig. 43A). Por el contrario, la producción de biomasa en vertedera y chisel es, frente al cultivo anual, más elevada en el sistema de año y vez. Este hecho también se manifiesta en la evolución del LAI (Fig. 43B), donde habría que destacar una senescencia más precoz de las hojas en el tratamiento de siembra directa. Todas estas diferencias entre tratamientos de laboreo y sistemas de cultivo se mantienen en la evolución de la materia seca de las espigas (Fig. 43C). Las interacciones TxS encontradas son debidas a que en el sistema de año y vez la respuesta del cultivo, con respecto al anual, es mejor en los tratamientos de vertedera y chisel y peor en el de siembra directa.

En la Tabla 33 se presentan los datos de rendimiento y componentes del mismo de la 2ª campaña. Con el fin de completar el análisis del efecto de los tratamientos de laboreo sobre la producción del cultivo en los cuatro sitios de ensayo, en dicha Tabla se incluyen también los correspondientes al ensayo E2. En este ensayo no se aprecian diferencias importantes ni entre tratamientos de laboreo ni entre sistemas de cultivo, salvo un mayor peso del grano en el tratamiento de siembra directa en relación al de vertedera en el sistema de año y vez. A pesar de que los rendimientos en grano son inferiores a los medios de la zona, se aprecia una mayor producción en los tratamientos de chisel y siembra directa en el sistema de cultivo de año y vez.

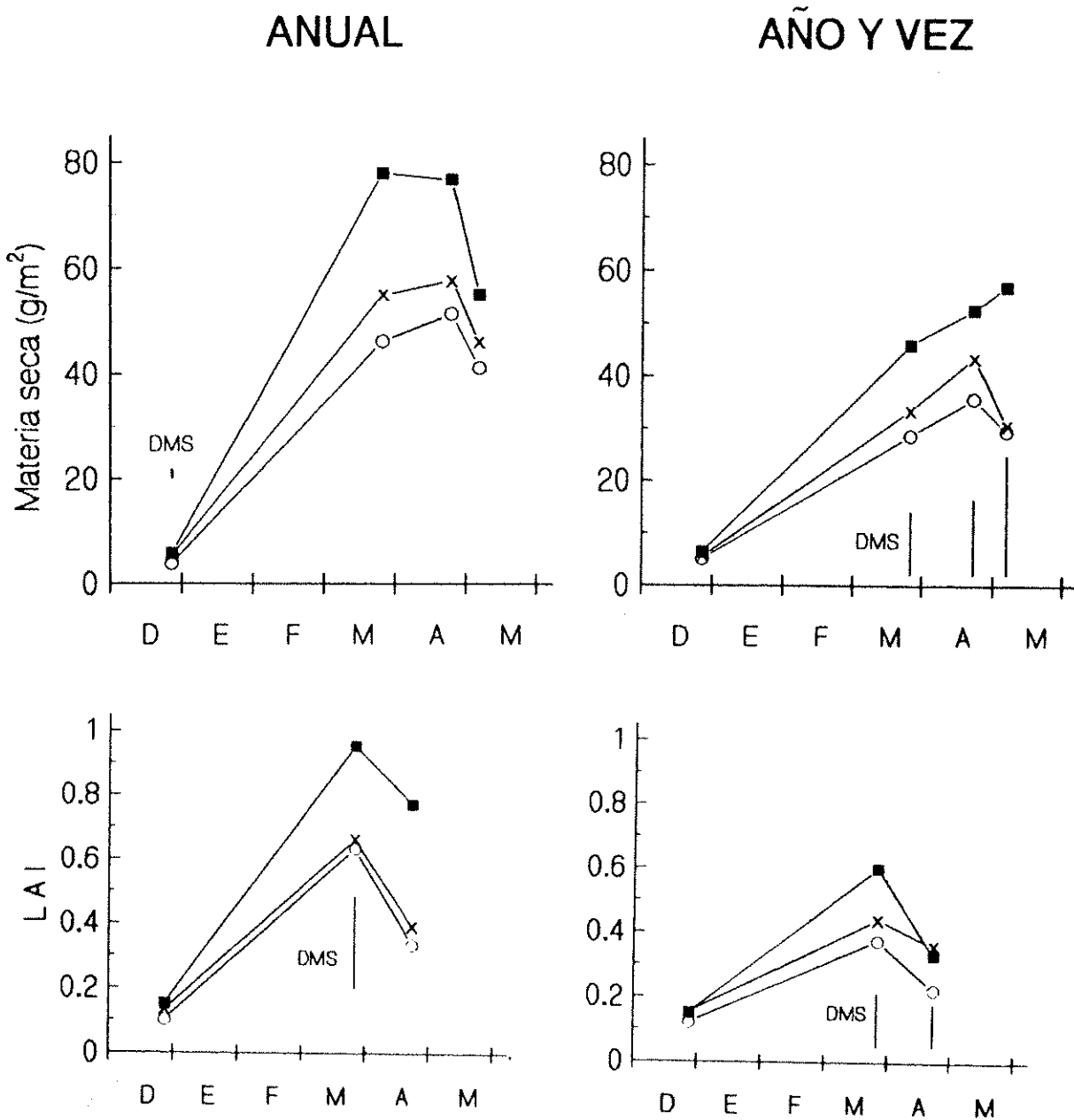


Fig. 41. Evolución de la producción de materia seca de la parte aérea, sin espigas, y del índice de área foliar en el cultivo del ensayo E1 durante la campaña 1991-92, según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; ○, siembra directa) y sistema de cultivo. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras verticales.

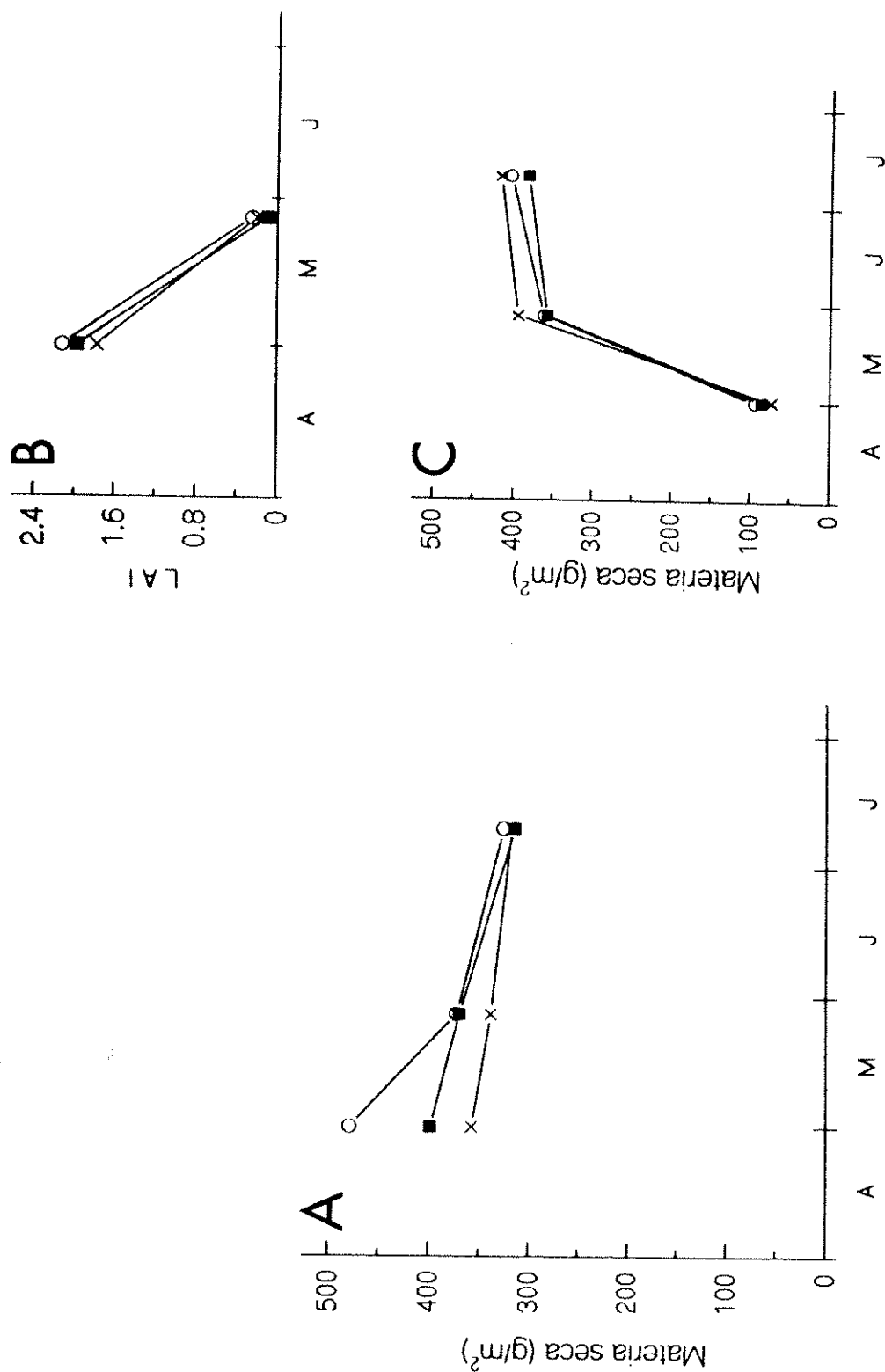


Fig. 42. Evolución de la producción de materia seca de la parte aérea, sin espigas (A), del índice de área foliar (B) y de las espigas (C) en el cultivo del ensayo E4 durante la campaña 1991-92, según tratamiento de laboreo (■, vertedera; X, chisel; O, siembra directa). Donde existen diferencias significativas los valores de DMS (0,05) se indican con barras verticales.



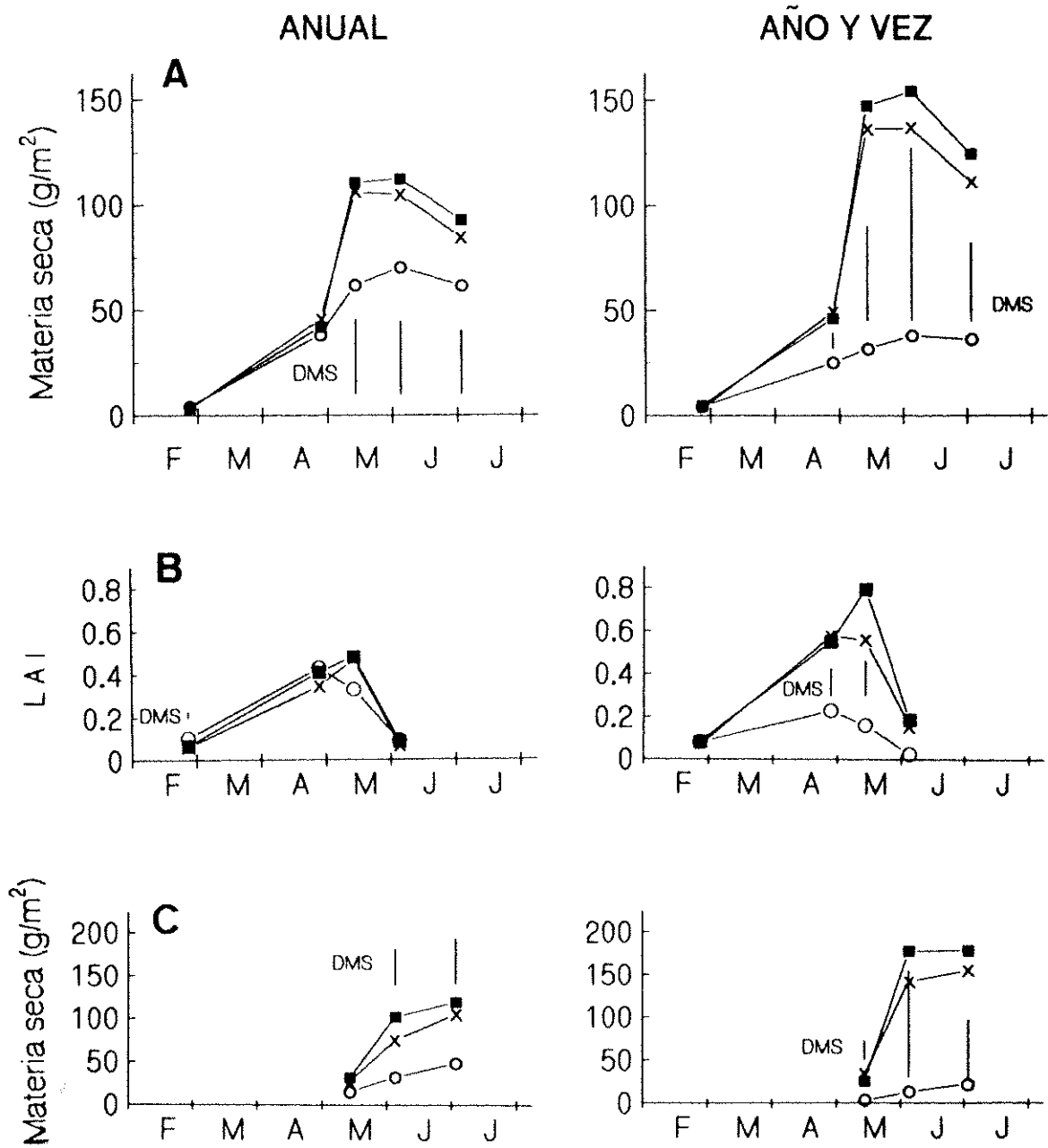


Fig. 43. Evolución de la producción de materia seca de la parte aérea, sin espigas (A), del índice de área foliar (B) y de las espigas (C) en el cultivo del ensayo E3 durante la campaña 1991-92, según tratamiento de laboreo (■, vertedera; x, chisel; ○, siembra directa) y sistema de cultivo. Donde existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo los valores de DMS (0,05) se indican con barras verticales.

Tabla 33. Rendimiento en grano (peso seco), componentes del mismo e índice de cosecha, en la campaña 1991-92, según tratamiento de laboreo y sistema de cultivo en los ensayos E2, E3 y E4.

Ensayo	Tratamiento de laboreo	Sistema de cultivo	Espigas por m ²	Granos por espiga	Peso del grano (mg)	Rendimiento grano (g/m ²)	Índice cosecha	
E2	V	Anual	157,31 a	10,90 a	25,78 a	44,20 a	0,36	
			Ch	171,11 a	8,77 a	25,92 a	38,89 a	0,36
			SD	131,58 a	11,61 a	27,71 a	42,33 a	0,35
			DMS (0,05)	ns	ns	ns	ns	
	V	Año-Vez	164,44 a	10,83 a	22,78 a	40,56 a	0,34	
			Ch	182,22 a	11,10 a	26,38 ab	53,36 a	0,42
			SD	177,20 a	12,08 a	27,26 b	58,35 a	0,39
			DMS (0,05)	ns	ns	4,47	ns	
	DMS (0,05)							
	Tratamiento (T)			ns	ns	1,33	ns	
	Subtratamiento (S)			ns	ns	ns	ns	
	Interacción TxS:							
S dentro del mismo T			ns	ns	ns	ns		
E3	V	Anual	241,67 a	13,00 a	30,98 a	97,34 a	0,46	
			Ch	252,33 a	11,74 a	28,51 a	84,47 a	0,44
			SD	210,53 a	5,74 b	29,82 a	36,04 b	0,33
			DMS (0,05)	ns	5,82	ns	44,12	
	V	Año-Vez	266,67 a	14,43 a	35,57 a	136,86 a	0,45	
			Ch	262,50 a	14,66 a	32,61 a	125,48 a	0,47
			SD	182,46 a	3,04 b	23,85 b	13,23 b	0,23
			DMS (0,05)	ns	7,40	3,70	57,47	
	DMS (0,05)							
	Tratamiento (T)			31,79	4,03	4,40	36,38	
	Subtratamiento (S)			ns	ns	ns	ns	
	Interacción TxS:							
S dentro del mismo T			ns	ns	3,93	38,52		
E4	V	Anual	593,72 a	22,62 a	23,08 a	310,02 a	0,44	
			Ch	696,27 a	23,08 a	21,37 b	343,42 a	0,47
			SD	644,74 a	19,52 b	25,79 c	324,63 a	0,44
			DMS (0,05)	ns	1,87	1,48	ns	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para un mismo ensayo y sistema de cultivo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

En el caso del ensayo E3, el rendimiento final en los distintos tratamientos y sistemas de cultivo refleja las diferencias de desarrollo señaladas en la Figura 43: menor rendimiento en siembra directa, especialmente en año y vez, y mayores rendimientos en este sistema de cultivo en los tratamientos de vertedera y chisel. En conjunto, la producción fue baja también en este ensayo, especialmente en el caso de la siembra directa; en las parcelas de año y vez el rendimiento en este tratamiento podría considerarse despreciable frente al de los tratamientos con laboreo, con cifras más aceptables. En cuanto a los componentes del rendimiento en este ensayo hay que destacar, en primer lugar, un menor número de granos/espiga en siembra directa, tanto en parcelas anuales como en parcelas año y vez. En segundo lugar, un peso del grano menor en el tratamiento de siembra directa de las parcelas año-vez con respecto a las anuales y, al mismo tiempo, mayor en los de vertedera y chisel (Tabla 33). En el ensayo E4, el menor número de granos/espiga en siembra directa va acompañado de un mayor peso unitario de grano. Aunque no se observan diferencias entre tratamientos en el rendimiento en grano, el incremento con respecto al tradicional en los tratamientos de chisel y siembra directa representa un 11% y un 5%, respectivamente.

Finalmente, con respecto al índice de cosecha habría que señalar que, mientras en los ensayos E2 y E4 no se observan efectos importantes del tratamiento de laboreo, en el E3 la siembra directa sí reduce este índice, especialmente en el sistema de cultivo de año y vez.

4.6. BALANCE DE AGUA Y EVAPOTRANSPIRACION

En este apartado se da cuenta del uso del agua en cada una de las campañas experimentales, según sistemas de laboreo, de la eficiencia en el uso del agua por el cultivo de cebada y, por último, de la contribución al mismo de los componentes de evaporación y transpiración en cada una de las zonas de ensayo. Antes de presentar esta información parece conveniente hacer ciertas consideraciones sobre las asunciones realizadas en el cálculo del balance hídrico.

Dada la baja pluviometría anual en las zonas de ensayo (Tabla 12), la pérdida de agua de la zona radicular por drenaje debe ser mínima, si no nula, al igual que lo señalado en otras zonas con condiciones de suelo y clima similares (Janssen, 1972; Cooper et al., 1987a; Papendick, 1987; Gregory et al., 1992a). De igual modo, la topografía plana de los sitios de ensayo y, en general, la baja intensidad de las lluvias justificarían también el considerar nulas las pérdidas de agua por escorrentía.

Durante el período experimental, el régimen de lluvias y la evolución de los perfiles de humedad del suelo reafirman estas asunciones. Considerando los cuatro sitios de ensayo y las dos campañas experimentales, el 76% de la precipitación total recibida durante el ciclo del cultivo corresponde a episodios inferiores a 10 mm, siendo 8 días el período medio entre días de lluvia. Es posible, por tanto, pensar que estas bajas precipitaciones se destinarán preferentemente a evapotranspiración y no a recargar el perfil, reduciéndose con ello la posibilidad de percolación por debajo de la zona radicular. El hecho de que en ninguna de las fechas de determinación del perfil hídrico del suelo se haya superado el contenido de humedad a capacidad de campo parece corroborar este último supuesto. No obstante, y según lo detectado en los perfiles hídricos y patrones de extracción, es posible que en algún momento determinado, tras períodos de excepcional pluviometría, hayan podido existir en algunos casos concretos cambios en el contenido de humedad a la profundidad radicular límite considerada, con el consiguiente efecto en el uso del agua en determinadas fases del cultivo, tal como se señala a lo largo de esta presentación.

4.6.1. Uso del agua por el cultivo

La evapotranspiración (ET) en los diferentes períodos del ciclo del cultivo se ha calculado, tal como se indicaba en el apartado 3.6.5. de Material y Métodos, a partir de la variación del agua almacenada (ΔS) entre las fechas que delimitan tales períodos (Tablas 18-21 y 23-26), añadiendo la precipitación (P) recibida en cada uno de ellos.

Aunque en las Tablas que se incluyen en este apartado sólo se muestran los valores de ET correspondientes a las fases de cultivo elegidas (Anexo III), también se irá dando cuenta de aquellos resultados más relevantes, correspondientes a períodos más amplios.

4.6.1.1. Campaña 1990-91

En la Tabla 34 se presentan los valores de ET correspondientes a la 1ª campaña

Tabla 34. Uso del agua (evapotranspiración, ET) y precipitación (P) en diferentes períodos del ciclo del cultivo en la campaña 1990-91, según tratamiento de laboreo y sitio de ensayo.

Ensayo	Período	P (mm)	ET			DMS (0,05)
			V	Ch	SD	
			mm			
E1	17/12/90-03/04/91	80	95 a	81 a	95 a	ns
	03/04/91-09/05/91	58	75 a	77 a	62 a	ns
	09/05/91-30/05/91	0	35 a	35 a	22 b	7
	30/05/91-20/06/91	7	12 a	5 a	11 a	ns
	Total	145	217 a	198 a	190 a	ns
E2	19/12/90-08/04/91	92	107 a	111 a	101 a	ns
	08/04/91-04/06/91	77	97 a	96 a	94 a	ns
	04/06/91-19/06/91	3	9 a	13 a	26 a	ns
	Total	172	213 a	220 a	221 a	ns
E3	11/01/91-25/04/91	198	135 a	148 a	149 a	ns
	25/04/91-21/05/91	25	59 a	45 ab	41 b	16
	21/05/91-06/06/91	0	32 a	40 a	32 a	ns
	06/06/91-02/07/91	0	14 a	14 a	13 a	ns
	Total	223	240 a	247 a	235 a	ns
E4	24/01/91-22/04/91	125	119 a	123 a	91 b	18
	22/04/91-28/05/91	3	80 a	61 a	63 a	ns
	28/05/91-27/06/91	6	16 a	25 a	26 a	ns
	Total	134	215 a	209 a	180 b	12

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; dentro de una misma fila, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

experimental. Un análisis del uso del agua por períodos nos indica, en primer lugar, que al comprendido entre germinación y principios del encañado -el de mayor duración (aproximadamente 100 días) y pluviometría- corresponden los volúmenes de ET más elevados. En este período, a excepción del ensayo E4 (en el que, como se recordará, se perdió el cultivo tras la nascencia en el tratamiento de siembra directa), no existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo. En el ensayo E3, el perfil hídrico en la 2ª fecha de control (Fig. 22) indica que las lluvias excepcionalmente altas del mes de marzo han supuesto una recarga del perfil en la zona radicular, con una posible percolación por debajo de 80 cm.

En el período comprendido entre principios del encañado y espigado, de menor duración (aproximadamente un mes) y con menor pluviometría que en el anterior, la ET, calculada sólo en los ensayos E1 y E3, es, sin embargo, relativamente importante, tal como corresponde a un período de alta demanda de agua por el cultivo. En este período, el uso del agua en siembra directa es en el ensayo E1 ligeramente inferior al de los otros tratamientos y significativamente menor que en vertedera en el E3 (Tabla 34), hecho que, en este último caso, resulta determinante del menor uso de agua en siembra directa entre principios del encañado y cosecha (DMS=11 mm; $p=0,05$). Por otro lado, la tendencia observada en el ensayo E1 se confirma entre espigado y formación de grano (fase lechosa), período responsable, en este caso, de la diferencia significativa en ET entre siembra directa y vertedera desde espigado a cosecha (DMS=11 mm; $p=0,05$).

Por lo que respecta a los ensayos E2 y E4, el tratamiento de laboreo no afecta al uso del agua para ninguno de los dos períodos analizados entre principios de encañado y cosecha (Tabla 34). No obstante, en E4, y en el comprendido entre germinación y formación de grano, el menor uso de agua en siembra directa (DMS=28 mm; $p=0,05$) responde a la falta de cultivo en este tratamiento.

Por último, los valores de ET entre formación de grano (fase lechosa) y cosecha son, en general, poco relevantes desde el punto de vista del uso total de agua y, básicamente, atribuibles al componente de evaporación. Salvo en el ensayo E4, por las razones que se acaban de exponer, en el resto de los ensayos no se observan diferencias significativas en el uso total de agua en esta 1ª campaña.

El efecto sobre la ET total de una posible pérdida de agua por drenaje en el ensayo E3 para el período entre germinación y principios del encañado, según lo antes señalado, puede verse compensado por un similar volumen de agua extraída en las fases siguientes del cultivo, tal como lo demuestra el similar contenido de humedad en el suelo a 75 cm de profundidad en los perfiles correspondientes a la primera y última fecha de determinación (Fig. 22). La observación en esta misma Figura de los perfiles de humedad primero y último del ensayo E4, indicaría, en cambio, una ligera extracción de agua por debajo de la máxima profundidad considerada en los tratamientos de vertedera y chisel. Así, asumiendo un uso de agua nulo a partir de la fase de formación de grano, se ha inferido, a partir de los patrones de extracción hasta esa fecha (Fig. 23), el volumen de agua subestimado en el correspondiente balance (4-7 mm), el cual supondría tan sólo un 2-3% de la ET total.

4.6.1.2. Campaña 1991-92

Los valores de ET correspondientes a los diferentes períodos del ciclo del cultivo en la campaña 1991-92 se muestran en la Tabla 35. Dado que el primer control del perfil hídrico en esta 2ª campaña estuvo más próximo al día de la siembra que en la 1ª, la duración media del período germinación-principios del encañado fue algo mayor, aproximadamente 120 días, y, sin embargo, la pluviometría media fue un 67% inferior a la del mismo período de la campaña anterior.

Tal como puede verse en la Tabla 35, el uso del agua en esta fase del cultivo no presenta diferencias ni entre tratamientos de laboreo ni entre sistemas de cultivo en el ensayo E1, aunque podría señalarse en cultivo anual un uso decreciente en el sentido $V > Ch > SD$ y, quizá, un uso de agua más elevado en los tratamientos con laboreo en cultivo anual -especialmente en el de vertedera- con respecto al de año y vez. En el ensayo E2 tampoco se observa un efecto claro del laboreo en el uso del agua, si bien en este caso también podría señalarse una mayor ET en el sentido $SD > Ch \approx V$ en el sistema de cultivo anual y en el sentido $Ch > SD > V$ en el de año y vez; la mayor ET en chisel en año y vez con relación a la ET de este tratamiento en cultivo anual determina la interacción TxS encontrada.

A diferencia de los anteriores, en los ensayos E3 y E4 sí se aprecian diferencias entre tratamientos, destacándose el de siembra directa con una menor ET en año y vez en E3 y mayor en E4. En el primero de ellos, se observa un uso del agua más elevado en cultivo de año y vez que en anual para los tratamientos de vertedera y chisel (Tabla 35).

Si consideramos ahora el período principios del encañado-espigado, habría que señalar, en primer lugar, la confirmación estadística en el ensayo E1 de la tendencia manifestada en el período anterior de un mayor uso del agua en el tratamiento tradicional con vertedera frente a los de laboreo de conservación en cultivo anual (Tabla 35); en segundo lugar, un desarrollo del cultivo que, limitado por la sequía, conduce en este ensayo a un uso del agua, en conjunto, escaso, dominado de manera creciente hasta la última determinación (fecha de la supuesta cosecha) por el componente de evaporación. En el ensayo E2 no se aprecian diferencias en ET ni entre tratamientos de laboreo ni entre sistemas de cultivo, pauta que continúa hasta la cosecha; en E3 se mantiene en este segundo período una menor ET en siembra directa de año y vez. Por último, en el ensayo E4, la siembra directa pasa a ser en este período el tratamiento con una ET significativamente menor, a diferencia de lo que ocurría en el período anterior.

De espigado a cosecha no se observan en ninguno de los ensayos diferencias en el uso del agua entre tratamientos y subtratamientos para ninguno de los dos períodos analizados en esta fase del ciclo (espigado-formación de grano y formación de grano-cosecha). Ahora bien, considerando el uso total en estos dos períodos (post-espigado), la siembra directa en cultivo de año y vez del ensayo E3 aparece como el tratamiento con una ET significativamente menor con relación a los de vertedera y chisel ($DMS=13$ mm; $p=0,05$). Este comportamiento de la siembra directa, que también tiene lugar en la fase de pre-espigado ($DMS=11$ mm; $p=0,05$), determina un menor uso del agua en este tratamiento para todo el ciclo del cultivo (Tabla 35). En el caso de cultivo anual de este mismo ensayo, el menor uso del agua en siembra directa desde encañado a

Tabla 35. Uso del agua (evapotranspiración, ET) y precipitación (P) en diferentes periodos del ciclo del cultivo en la campaña 1991-92, según tratamiento de laboreo, sistema de cultivo y sitio de ensayo.

Ensayo	Periodo	P (mm)	ET								
			Cultivo Anual				DMS (0,05)	Cultivo Año-Vez			DMS (0,05)
			V	Ch	SD	V		Ch	SD		
mm											
E1	27/11/91-27/03/92	35	78 a	64 a	54 a	ns	50 a	52 a	47 a	ns	
	27/03/92-06/05/92	11	31 a	21 b	18 b	5	29 a	23 a	19 a	ns	
	06/05/92-23/06/92	49	26 a	16 a	29 a	ns	23 a	35 a	30 a	ns	
	Total	95	135 a	101 b	101 b	28	102 a	110 a	96 a	ns	
DMS (0,05)			27/11/91- 27/03/92	27/03/92- 06/05/92	06/05/92- 23/06/92	Total					
Tratamiento (T)			ns	7	ns	ns					
Subtratamiento (S)			ns	ns	ns	ns					
Interacción TxS:											
S dentro del mismo T			ns	ns	ns	ns					
E2	09/12/91-31/03/92	23	31 a	37 a	50 a	ns	39 a	61 a	52 a	ns	
	31/03/92-04/05/92	27	47 a	39 a	42 a	ns	56 a	34 a	47 a	ns	
	04/05/92-22/06/92	81	70 a	70 a	48 a	ns	69 a	74 a	55 a	ns	
	Total	131	148 a	146 a	140 a	ns	164 a	169 a	154 a	ns	
DMS (0,05)			09/12/91- 31/03/92	31/03/92- 04/05/92	04/05/92- 22/06/92	Total					
Tratamiento (T)			ns	ns	16	ns					
Subtratamiento (S)			5	ns	ns	ns					
Interacción TxS:											
S dentro del mismo T			11	ns	ns	ns					
E3	19/12/91-27/04/92	38	81 a	85 a	90 a	ns	100 a	98 a	81 b	11	
	27/04/92-13/05/92	33	40 a	38 a	35 a	ns	49 a	42 a	24 b	11	
	13/05/92-04/06/92	59	11 a	15 a	5 a	ns	19 a	28 a	24 a	ns	
	04/06/92-02/07/92	38	74 a	72 a	67 a	ns	82 a	77 a	62 a	ns	
Total	168	206 a	210 a	197 a	ns	250 a	245 a	191 b	18		
DMS (0,05)			19/12/91- 27/04/92	27/04/92- 13/05/92	13/05/92- 04/06/92	04/06/92- 02/07/92	Total				
Tratamiento (T)			4	11	ns	ns	7				
Subtratamiento (S)			7	ns	8	ns	24				
Interacción TxS:											
S dentro del mismo T			12	ns	ns	ns	24				
E4	11/11/91-18/03/92	67	107 a	113 a	131 b	10					
	18/03/92-30/04/92	42	103 a	99 a	82 b	16					
	30/04/92-26/05/92	34	15 a	16 a	13 a	ns					
	26/05/92-09/07/92	96	23 a	34 a	36 a	ns					
Total	239	248 a	262 a	262 a	ns						

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; dentro de una fila, para un mismo sistema de cultivo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

cosecha (DMS=16 mm; $p=0,05$) no se refleja en la ET total. En cuanto a las diferencias entre sistemas de cultivo, hay que señalar un mayor uso de agua en año y vez para los tratamientos de vertedera y chisel (Tabla 35).

En el ensayo E1, si bien el uso de agua total no es resultado de un cultivo activo en todo el ciclo, la mayor ET en el tratamiento de vertedera en parcelas anuales es reflejo de una mejor respuesta del cultivo bajo este tratamiento en las primeras fases del mismo (Tabla 35).

En cuanto a los ensayos E2 y E4, una mayor ET hasta principios de encañado en el tratamiento anual de siembra directa, es compensado por un menor uso del agua desde ese momento hasta la cosecha (DMS=26 mm; $p=0,05$) en el primer ensayo y hasta la formación de grano (DMS=14 mm; $p=0,05$) en el segundo, lo que se traduce, finalmente, en ausencia de diferencias significativas en la ET total (Tabla 35). En el ensayo E2 podría señalarse, de manera global, un mayor uso de agua en las parcelas de año y vez.

Al igual que lo señalado en la 1ª campaña, los perfiles hídricos y patrones de extracción derivados podrían indicar en algunas situaciones de esta 2ª campaña, una posible extracción de humedad por debajo de la máxima profundidad considerada y, por tanto, una subestimación de la ET total. Este sería el caso del período germinación-espigado en el tratamiento anual de vertedera en el ensayo E1 (Fig. 25), el de los tratamientos de vertedera y chisel en el sistema de año y vez del E3 (Fig. 27) y de los tres tratamientos de laboreo en el E4 (Fig. 28). Efectuada una estimación, a través de los patrones de extracción correspondientes (Figs. 29 y 30), de estos posibles volúmenes de agua no considerados en el balance del período indicado, la escasa cuantía de los mismos (2-11 mm) implicaría una subestimación de la ET total entre un 1%, caso del tratamiento de chisel en el ensayo E3, y un 4%, siembra directa en E4, en el peor de los casos. Dado el orden de magnitud de estas diferencias, similar al de la 1ª campaña, permite asumir como válidos, sin grave error, los valores de ET obtenidos.

4.6.2. Eficiencia en el uso del agua

Una vez establecidas las diferencias entre tratamientos de laboreo en cuanto a producción de biomasa, rendimiento y uso del agua por el cultivo, parece oportuno evaluar los tratamientos desde el punto de vista de la eficiencia en el uso del agua, es decir, de la producción de materia seca por unidad de agua evapotranspirada. Así, a partir de la ET total de cada campaña se ha calculado esta eficiencia tanto para la producción de grano (EUAG) como de biomasa aérea total (EUAB) en los diferentes sitios de ensayo.

Tal como puede verse en la Tabla 36, tanto los valores de EUAB como los de EUAG son, en conjunto, más bajos en la 2ª campaña que en la primera. De acuerdo con los resultados obtenidos, puede decirse que al ensayo E4, situado en la zona de estudio de mayor pluviometría, corresponden las eficiencias más altas. Por otra parte, los datos correspondientes a la 2ª campaña, con un período vegetativo excepcionalmente seco en todos los ensayos, indican una correspondencia entre pluviometría durante el ciclo de cultivo y eficiencia en el uso del agua, siendo ésta mayor en el sentido $E4 > E3 > E2$.

Tabla 36. Eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca total de la parte aérea (EUAB) y de grano (EUAG) según tratamiento de laboreo, sistema de cultivo y sitio de ensayo, en las campañas 1990-91 y 1991-92.

Ensayo	Tratamiento	Campaña 1990-91		Campaña 1991-92			
		EUAB	EUAG	Cultivo Anual		Cultivo Año-Vez	
				EUAB	EUAG	EUAB	EUAG
kg/ha·mm							
E1	V	35,2	11,3	-	-	-	-
	Ch	27,2	7,7	-	-	-	-
	SD	24,2	7,5	-	-	-	-
E2	V	-	4,5 ¹	8,3	3,0	7,2	2,5
	Ch	-	3,7	7,5	2,7	7,4	3,2
	SD	-	3,9	8,5	3,0	9,6	3,8
E3	V	18,2	9,2	10,3	4,7	12,1	5,5
	Ch	16,5	8,9	9,1	4,0	10,9	5,1
	SD	14,3	7,9	5,6	1,8	3,0	0,7
E4	V	-	16,7 ¹	28,2	12,5	-	-
	Ch	-	17,0	28,0	13,1	-	-
	SD	-	-	27,9	12,4	-	-

¹ Dato calculado a partir del rendimiento obtenido con cosechadora.

A excepción del ensayo E1 en la 1ª campaña y del E3 en la segunda, no se observa efecto apreciable ni del tratamiento de laboreo ni del sistema de cultivo sobre la EUAB y la EUAG. En el primer caso, ambas eficiencias son inferiores en los tratamientos de laboreo de conservación; en el segundo, las menores eficiencias corresponden, de forma mucho más patente, al no laboreo, en particular en el sistema de año y vez (Tabla 36).

4.6.3. Estimación de los componentes de la evapotranspiración

En la agricultura de secano de regiones semiáridas la evaporación (E) puede ser el principal componente de la ET. Dado que la producción de materia seca es proporcional a la cantidad de agua transpirada (T), en los últimos años se han propuesto distintas estrategias encaminadas a modificar la relación E/T a fin de mejorar la eficiencia en el uso del agua en estos ambientes (Cooper y Gregory, 1987; Cooper et al., 1987a; Connor y Loomis, 1991).

Si bien la ET es determinada habitualmente a partir del balance hídrico o bien por otros métodos, como, por ejemplo, con lisímetros de pesada, las medidas directas tanto de E como de T son mucho menos frecuentes dada su mayor complejidad, por lo que también se han desarrollado modelos de estimación. Leuning et al. (1993) señalan cómo los modelos propuestos para la estimación de E, varían en complejidad, según se trate de aproximaciones empíricas (Cooper et al., 1983) o de modelos semi-analíticos (Ritchie, 1972; Tanner y Jury, 1976) y numéricos (Lascano y Van Bavel, 1986) y cómo el empleo de microlisímetros constituye el método más frecuentemente utilizado (Allen, 1990; Villalobos y Fereres, 1990) para la medida directa de E, necesaria, a su vez, para la validación de tales modelos.

Recientemente, algunos autores (Amir et al., 1991; Amir y Sinclair, 1991; McAneney y Arrúe, 1993) han calculado T a partir de la producción de materia seca, basándose en las conclusiones de Tanner y Sinclair (1983) según las cuales la eficiencia en el agua transpirada por un determinado cultivo es una característica propia del mismo y constante dentro de un amplio rango de condiciones.

La mayor parte de los estudios que relacionan el rendimiento de un determinado cultivo con el uso del agua muestran que el primero es directamente proporcional a ET o a T, si bien las relaciones encontradas son específicas de cada sitio y campaña agrícola (Wilson, 1985). Tanner y Sinclair (1983) revisan esta cuestión y, en base al análisis de Bierhuizen y Slatyer (1965), obtienen un modelo sencillo, pero con una sólida base física y fisiológica, que relaciona la producción de materia seca (Y) con la transpiración (T) y el déficit diario de presión de vapor ($e^* - e$), según la siguiente expresión:

$$Y = k \int T / (e^* - e) dt$$

donde k es un coeficiente empírico que caracteriza la eficiencia en el uso del agua del cultivo; la integración corresponde al período activo de acumulación de materia seca. Tanner y Sinclair (1983) comprueban este modelo con datos de muchos experimentos y diferentes cultivos y concluyen que k es un parámetro constante para cada cultivo.

Aunque esta ecuación se ha utilizado tradicionalmente para estimar la producción de materia seca a partir de medidas de balance de agua, también puede ser utilizada para estimar T a partir de datos de rendimiento, de más fácil obtención. En nuestro estudio el cálculo de T se ha realizado según la expresión:

$$T = MS (e^* - e)/k$$

siendo MS la materia seca de la parte aérea producida por unidad de superficie, $(e^* - e)$ el valor medio del déficit de presión de vapor diurno para el período de crecimiento del cultivo y k el coeficiente para el cultivo de cebada.

Los primeros valores de k para el cultivo de cebada que se mencionan en la literatura consultada se remontan al trabajo de Jamieson y Wilson (1985) en Nueva Zelanda, quienes dan un valor de 3,8 Pa. Posteriormente, Day et al. (1987), en Gran Bretaña, obtienen un valor inferior, 2,9 Pa, igual al registrado recientemente en Siria (Gregory et al., 1992b) y del mismo orden que los encontrados por Gregory et al. (1992b) en la región de Australia Occidental trabajando con diferentes variedades de cebada (2,8-3,2 Pa). En nuestro trabajo se ha considerado un valor de 3,1 Pa, promedio de las cifras anteriores.

Para el cálculo de $(e^* - e)$ se ha tenido en cuenta el período activo de acumulación de biomasa, desde que el cultivo presenta 1-2 hojas hasta la fase lechosa/pastosa de formación de grano. En los ensayos E1, E2 y E4 este período abarca los meses de febrero a mayo y en el E3, con un cultivo más retrasado en los primeros estadios, los meses de marzo a mayo. Los valores de $(e^* - e)$ en la Tabla 37 representan el valor medio de los mensuales para dichos períodos. En los ensayos E1 y E4, en los que se disponía de datos horarios de temperatura (T) y humedad relativa del aire (HR), los valores medios mensuales de $(e^* - e)$ se han calculado a partir de las expresiones recogidas por Sánchez-Toribio (1992):

$$(e^* - e) = [e^*(T_{\max}) + e^*(T_{\min})]/2 - e$$

siendo

$$e^* = 0,6108 \exp [17,27T/(T+237,3)]$$

donde T es bien la temperatura media mensual de las máximas (T_{\max}) o la de las mínimas (T_{\min}) y

$$e = e^*(T_{\text{med}}) (HR_{\text{med}}/100)$$

donde T_{med} y HR_{med} son los valores medios mensuales de temperatura y humedad relativa. En el ensayo E1 se han considerado los valores diarios de T y HR para el período comprendido entre las 6:00 y las 18:00 horas solares y en el caso de la HR en el ensayo E4 los valores medios de tres lecturas diarias, a las 7:00, 13:00 y 18:00 horas.

En los ensayos E2 y E3, sin datos de HR, se ha utilizado la expresión:

$$(e^* - e) = 2/3 [e^*(T_{\max}) - e^*(T_{\min})]$$

Tabla 37. Agua transpirada por el cultivo (T) en las dos campañas experimentales, según tratamiento del laboreo, sistema de cultivo y ensayo, estimada a partir del déficit de presión de vapor (e^*-e) y de la materia seca de la parte aérea (MS), y eficiencia de la misma para la producción de grano (EATG). (En el texto se detallan los criterios seguidos para la determinación de (e^*-e), T y ET).

Ensayo	Tratamiento de laboreo	Sistema de cultivo	(e^*-e) (Pa)	ET (mm)	MS (g/m ²)	T (mm)	T/ET (%)	EATG (kg/ha·mm)
Campaña 1990-91								
E1	V	Anual	590	205	764	145	71	16,9
	Ch		193	538	102	53	14,9	
	SD		179	459	87	49	16,5	
E2	V	Anual	501	204	260	42	21	22,9
	Ch		207	219	35	17	23,1	
	SD		195	232	37	19	23,2	
E3	V	Anual	753	226	437	106	47	20,8
	Ch		233	407	99	42	22,3	
	SD		222	337	82	37	22,7	
E4	V	Anual	612	199	817	161	81	22,3
	Ch		184	755	149	81	23,8	
	SD		-	-	-	-	-	
Campaña 1991-92								
E2	V	Anual	555	88	124	22	25	20,1
	Ch		86	109	20	23	19,0	
	SD		102	120	22	22	19,2	
	V	Año-Vez		105	119	21	20	19,3
	Ch		105	126	23	22	23,2	
	SD		109	148	26	24	22,4	
E3	V	Anual	936	132	213	64	48	15,2
	Ch		138	190	57	41	14,8	
	SD		130	110	33	25	10,9	
	V	Año-Vez		168	303	91	54	15,0
	Ch		168	266	80	48	15,7	
	SD		129	58	18	14	7,4	
E4	V	Anual	708	225	699	160	71	19,4
	Ch		228	735	168	74	20,4	
	SD		226	731	167	74	19,4	

de acuerdo con McAneney y Arrúe (1993), en la que T_{max} y T_{min} son las temperaturas medias mensuales de las máximas y las mínimas diarias, asumiendo que la temperatura del aire en el punto de rocío es igual a la temperatura mínima y se mantiene constante a lo largo del día. El factor de 2/3 se introduce para hacer corresponder el déficit de presión de vapor, así obtenido, al periodo diario con radiación neta positiva para nuestras condiciones climáticas (Tanner y Sinclair, 1983).

En la Tabla 37 se presentan los datos de T estimados según la formulación anterior, el porcentaje que representan con respecto a la ET (T/ET) y la eficiencia de transpiración para la producción de grano (EATG). Se ha considerado el valor de ET correspondiente al período comprendido entre la primera determinación del perfil hídrico tras la siembra y la correspondiente a la fase de formación de grano, momento a partir del cual se asume que la evaporación del suelo es el único componente de la ET. Hay que tener presente al analizar estos resultados que en el intervalo comprendido entre la 1ª determinación del perfil hídrico y la emergencia del cultivo el suelo permanece desnudo y, aunque la demanda evaporativa no sea en ese momento importante, cabe esperar ciertas pérdidas de agua por evaporación. Por otro lado, hay que señalar que en los ensayos E2 y E4 de la 1ª campaña los valores de MS se han estimado asumiendo los índices de cosecha de la 2ª campaña.

Como puede verse en la Tabla 37, durante la 1ª campaña los valores de T oscilan dentro de un amplio rango, entre los 161 mm en el tratamiento de vertedera en el ensayo E4 y los 35 mm en el de chisel del ensayo E2. En todos los casos, la mayor T corresponde al tratamiento de vertedera, aunque sólo con diferencias apreciables con respecto a los otros tratamientos -especialmente al de siembra directa- en el ensayo E1 y, quizá, también en el E3. En la 2ª campaña, con valores de $(e^* - e)$, en conjunto, mayores que en la primera, la T en los ensayos E2 y E3 experimenta una apreciable reducción, a diferencia del ensayo E4 que mantiene valores próximos a los de la 1ª campaña (Tabla 37). En esta 2ª campaña sólo cabe destacar como diferencias entre tratamientos de laboreo la menor T en el de siembra directa del ensayo E3, especialmente en las parcelas año-vez, y como diferencias entre sistemas de cultivo los mayores valores de T en año y vez para los tratamientos de vertedera y chisel en este último ensayo (Tabla 37).

El porcentaje de ET que representan los anteriores valores de T, se mueve, igualmente, dentro de un amplio rango de valores: en la 1ª campaña, desde un 17% (E2) hasta un 81% (E4) y en la segunda desde un 74% (E4) a un 14% (E3), manteniéndose similares diferencias entre tratamientos de laboreo y sistemas de cultivo que las ya comentadas para el volumen de agua transpirada.

Por último, ni el tratamiento de laboreo ni el sistema de cultivo parecen afectar en ambas campañas a la EATG, con la única salvedad de los menores valores en el tratamiento de siembra directa en el ensayo E3, especialmente en el sistema de año y vez (Tabla 37). Exceptuando este caso, los valores de EATG oscilan, en ambas campañas, entre 15 y 24 kg/ha.mm, apreciándose un ligero descenso en los correspondientes a la 2ª campaña. Con relación a la eficiencia de transpiración para la producción de biomasa aérea (EATB), constante para cada sitio de ensayo y campaña experimental, los valores obtenidos son los siguientes: 52,7 (E1), 62,4 (E2), 41,2 (E3) y 50,7 kg/ha.mm (E4), para la 1ª campaña y 55,6 (E2), 33,3 (E3) y 43,7 kg/ha.mm (E4), para la 2ª campaña.

4.7. CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Aunque no es previsible que tras dos años de prácticas de laboreo de conservación tenga lugar una modificación importante en la estructura del suelo, sí es posible que comiencen ya a manifestarse determinadas tendencias en algunos de los parámetros que la caracterizan. Por ello, se han llevado a cabo una serie de determinaciones puntuales, complementarias de los resultados hasta aquí presentados, encaminadas a evidenciar estas posibles tendencias. Por un lado, se ha procedido a la medida del estado de agregación del suelo en los cuatro sitios de ensayo tras la cosecha de la 2ª campaña. Por otro, y teniendo en cuenta que el laboreo y la compactación afectan en mayor medida a la macroporosidad del suelo que a la microporosidad (Onstad y Voorhees, 1987), se ha caracterizado la primera, bien mediante observación in situ (ensayo E4), bien a través de medidas de campo de la conductividad hidráulica a saturación (ensayo E1). La observación a lo largo de la experiencia de una mayor actividad biológica en el suelo y la buena respuesta del cultivo al laboreo de conservación en E4 fueron determinantes de la elección de este ensayo para la medida directa de macroporos. Por el contrario, en E1, donde tiene lugar la peor respuesta del suelo y cultivo y donde apenas se observa actividad biológica, se consideró más apropiado estimar la continuidad y estabilidad de los macroporos en la capa arable a través de medidas de conductividad hidráulica a saturación, parámetro adecuado para comparar el efecto de distintos sistemas de laboreo (Carter, 1988b; Wu et al., 1992). El tiempo requerido por todas estas determinaciones limitó el estudio a las parcelas anuales, en las que, en principio, cabría esperar mayores diferencias entre tratamientos de laboreo.

4.7.1. Distribución de tamaños de agregados

Dadas las características climáticas de las zonas de ensayo, lluvias erráticas y de baja cuantía y vientos frecuentes y de gran intensidad ("cierzo"), cabe pensar que la erosión eólica sea el principal factor degradante del suelo. Por ello, se ha elegido el tamizado en seco, frente al húmedo, como método más apropiado para caracterizar la distribución de agregados de suelo según tamaño.

Como ya se indicó en el apartado 3.6.3.1., tres fueron las profundidades de suelo (0-5, 5-10 y 10-20 cm) y siete las clases de tamaños (<0,25, 0,25-0,50, 0,50-0,84, 0,84-1, 1-2, 2-4 y 4-8 mm de diámetro) consideradas. Las distribuciones de agregados obtenidas no mostraron, en general, diferencias con la profundidad. En la Figura 44 se presentan los valores medios correspondientes a la profundidad de 0 a 20 cm para cada tratamiento de laboreo y sitio de ensayo. En dicha figura, no se aprecia un efecto claro del tratamiento de laboreo, aunque sí es posible diferenciar fácilmente los ensayos, en particular por la proporción de agregados <0,84 mm. El ensayo E4 se distingue del resto por un menor porcentaje de agregados <0,50 mm y, por consiguiente, por un porcentaje más elevado de agregados de mayor diámetro, especialmente de 4 a 8 mm. Aunque en el resto de los ensayos se sigue una pauta de distribución similar, podría destacarse una mayor proporción de agregados <0,25 mm en el ensayo E3.

En la Tabla 38 se presentan los datos correspondientes al diámetro medio ponderado de los agregados (DMP), el índice de agregación (IA) y el porcentaje de agregados >0,84

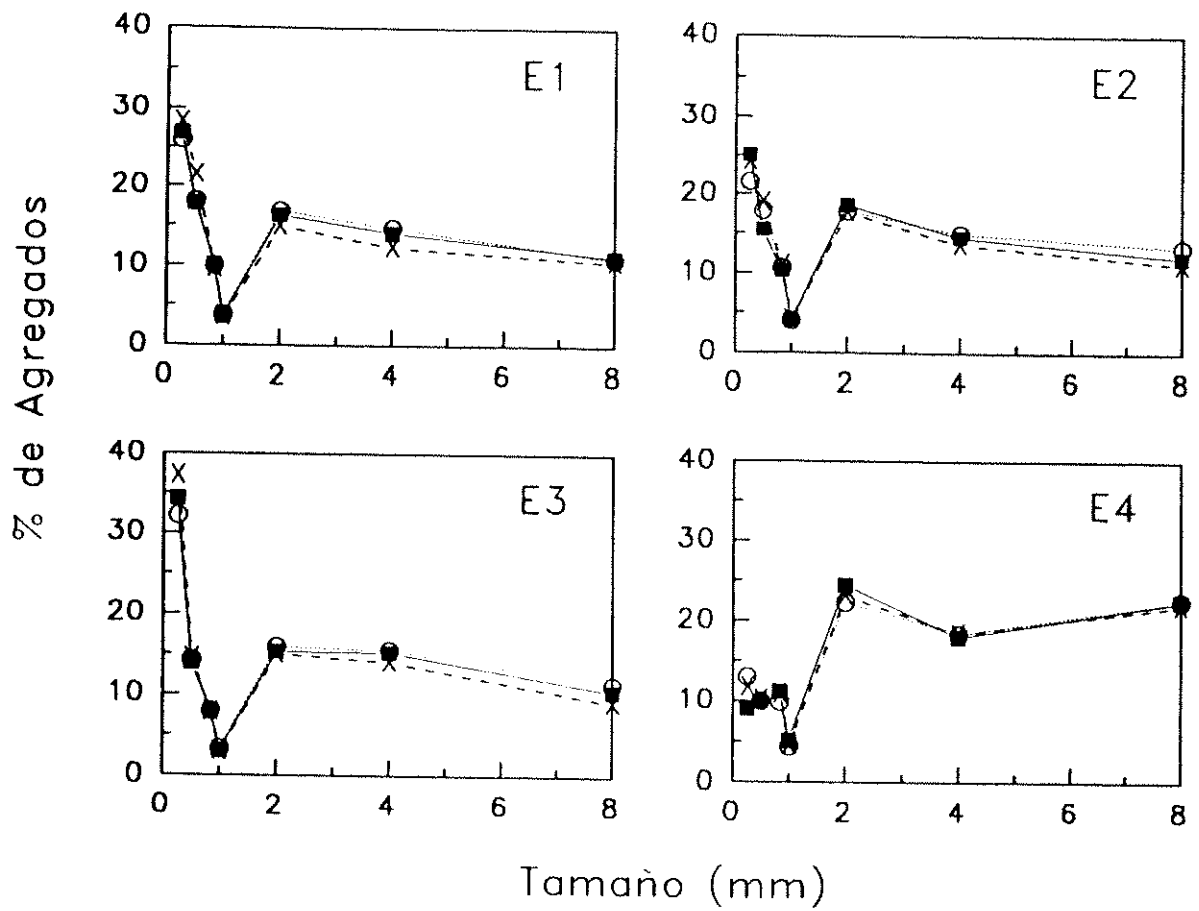


Fig. 44. Distribución de agregados de suelo, en los 20 primeros centímetros de la capa arable, según sitio de ensayo y tratamiento de laboreo (—■—, vertedera; - -x- -, chisel; ...○..., siembra directa). Esta distribución, obtenida por tamizado en seco, corresponde al estado del suelo tras la cosecha de la campaña 1991-92.

Tabla 38. Diámetro medio ponderado de agregados de suelo (DMP), índice de agregación (IA) y porcentaje de agregados >0,84 mm de diámetro, según profundidad, tratamiento de laboreo y sitio de ensayo (parcelas de cultivo anual), tras la cosecha de la campaña 1991-92.

Ensayo	Tratamiento	DMP				IA				Agregados >0,84 mm			
		0-5		10-20 cm		0-5		10-20 cm		0-5		10-20 cm	
		mm								%			
E1	V	1,21 a	1,34 a	1,25 a	427 a	440 a	421 a	44,04 a	47,21 a	44,25 a			
	Ch	1,06 a	1,12 a	1,33 a	395 b	399 b	417 a	37,63 b	40,41 a	44,96 a			
	SD	1,27 a	1,24 a	1,32 a	439 a	428 ab	449 a	45,40 a	44,43 a	48,13 a			
	DMS (0,05)	ns	ns	ns	18	34	ns	4,58	ns	ns			
E2	V	1,34 a	1,34 a	1,38 a	446 a	459 a	455 a	48,01 a	49,62 a	50,06 a			
	Ch	1,12 a	1,32 a	1,40 a	432 a	464 a	439 a	42,15 a	48,08 a	48,57 a			
	SD	1,34 a	1,51 a	1,48 a	459 a	458 a	468 a	45,66 a	51,93 a	52,47 a			
	DMS (0,05)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns			
E3	V	1,31 a	1,21 a	1,15 a	409 ab	394 a	400 a	45,82 a	43,09 a	42,90 a			
	Ch	1,05 b	1,17 a	1,12 a	379 a	393 a	377 a	39,29 b	42,24 a	40,78 a			
	SD	1,31 a	1,37 a	1,16 a	439 b	412 a	388 a	48,00 a	46,98 a	42,15 a			
	DMS (0,05)	0,20	ns	ns	32	ns	ns	4,29	ns	ns			
E4	V	1,59 a	2,14 a	2,39 a	580 a	551 a	556 a	64,19 a	70,28 a	75,26 a			
	Ch	1,81 a	2,04 a	2,13 b	540 a	553 a	541 a	64,06 a	69,14 a	69,80 ab			
	SD	1,68 a	2,11 a	2,11 b	541 a	544 a	518 a	64,54 a	69,94 a	67,47 b			
	DMS (0,05)	ns	ns	0,23	ns	ns	ns	ns	ns	6,28			

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma profundidad y ensayo, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

mm de diámetro como fracción no erosionable (Skidmore, 1988). Del análisis de estos resultados se pueden hacer las siguientes observaciones. En primer lugar, los valores de DMP, IA y fracción de agregados $>0,84$ mm permiten diferenciar el E4 del resto de los ensayos, al igual que lo señalado en el párrafo anterior. Así, el DMP en este ensayo alcanza los 2 mm mientras que en el resto se mantiene entre 1,11 (E3) y 1,44 mm (E2). De la misma manera, el IA en E4 es 547 frente a un valor mínimo de 383 (E3) y un máximo de 462 (E2). Igualmente, al ensayo E4 corresponde el mayor porcentaje de agregados $>0,84$ mm, aproximadamente un 68%, mientras que este porcentaje en el resto de ensayos oscila entre un 41% y un 50%.

Por otro lado, los resultados de la Tabla 38 no evidencian un efecto apreciable de los distintos tratamientos de laboreo sobre el estado de agregación de los diferentes suelos. No obstante, habría que destacar cómo, de forma sistemática, en los ensayos E1, E2 y E3 los menores valores de los parámetros arriba señalados corresponden al tratamiento de chisel. Esta tendencia se ve apoyada estadísticamente en algunos ensayos y especialmente en superficie (0-5 cm), como, por ejemplo, en el caso del ensayo E3 para los tres parámetros (Tabla 38).

Finalmente, y considerando globalmente los resultados expuestos, el orden de los ensayos en cuanto a una mejor estructura del suelo sería el siguiente: E4 \gg E2 $>$ E1 = E3.

4.7.2. Macroporosidad

A pesar de que la identificación in situ de macroporos menores de 2 mm lleva implícito un cierto error, dada la limitación impuesta por la capacidad de resolución del ojo humano (0,2 mm, según Smart, 1975), las estimaciones realizadas pueden considerarse, en conjunto, satisfactorias. En la Figura 45 se muestra el número medio de macroporos por m^2 según diámetro (<2 , 2-5 y >5 mm) y tratamiento de laboreo para cada una de las profundidades consideradas (5, 15 y 25 cm).

Si se tiene en cuenta, en primer lugar, el número total de macroporos en las tres profundidades, el laboreo de conservación proporciona una mayor macroporosidad en la capa arable, con un incremento, con respecto al laboreo tradicional, del 13% en el caso del chisel y del 17% en el de siembra directa. En el primer caso, el incremento se debe a los macroporos <5 mm, especialmente la fracción de 2 a 5 mm, y en el de la siembra directa a los >2 mm, en particular los >5 mm (Fig. 45), asociados en este último caso a bioporos de lombrices. Si ahora consideramos la distribución con la profundidad, el mayor número de macroporos >2 mm en siembra directa es mucho más patente a 5 cm, con una disminución gradual hasta 25 cm. Esta pauta, inversa a la que también tiene lugar en este tratamiento para los macroporos <2 mm, no se repite de forma tan marcada en los tratamientos con laboreo (Fig. 45).

En términos de área ocupada por los macroporos, la distribución de la misma con la profundidad, así como las diferencias entre tratamientos, siguen básicamente el mismo comportamiento que el ya señalado para el número de macroporos. En la Figura 46 se muestra el porcentaje que representa el área total ocupada por macroporos en cada una de

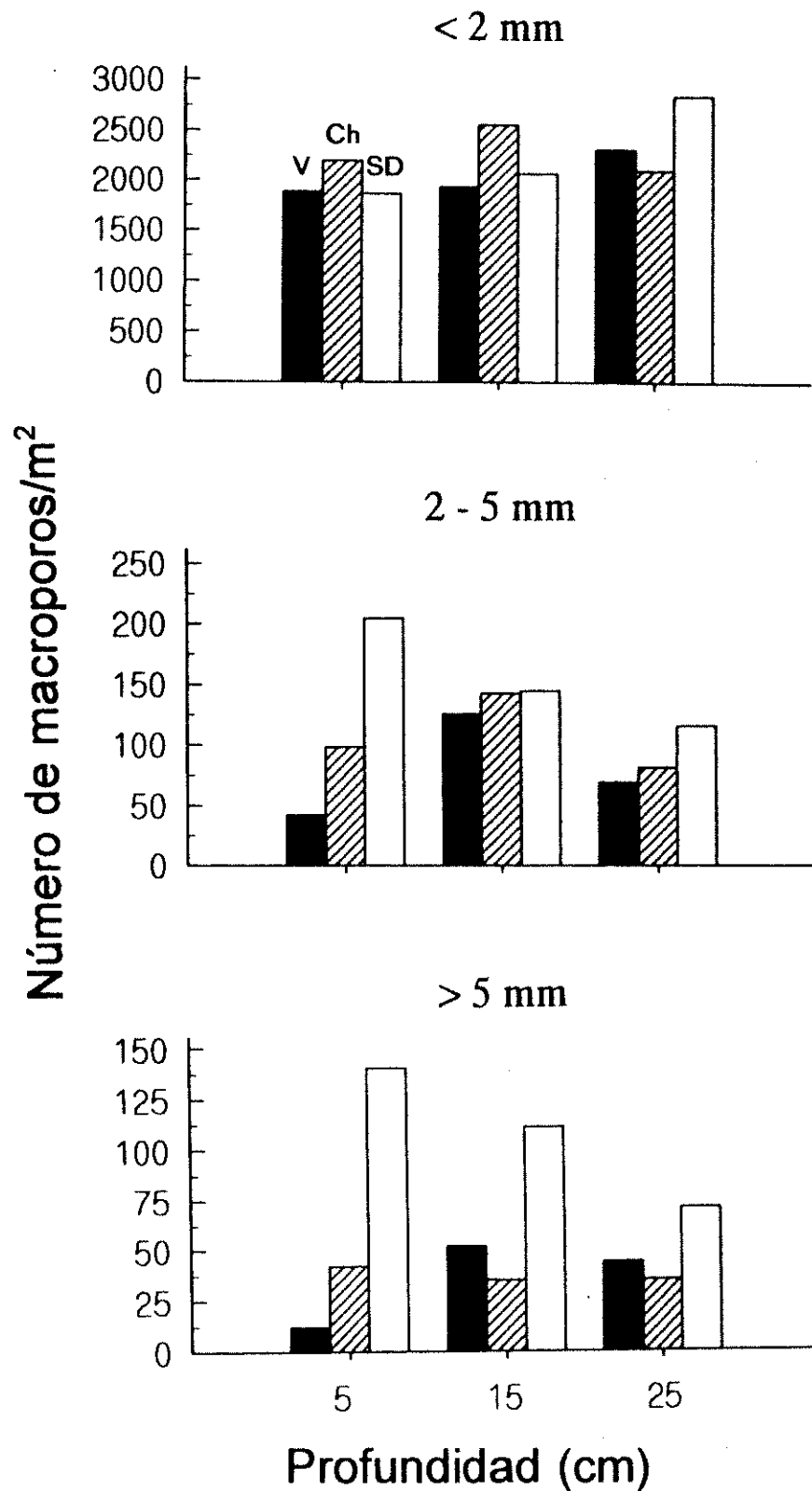


Fig. 45. Número total de macroporos de diferente diámetro a distintas profundidades de la capa arable según tratamiento de laboreo en el ensayo E4 (V: vertedera; Ch: chisel; SD: siembra directa), tras la cosecha de la campaña 1991-92.

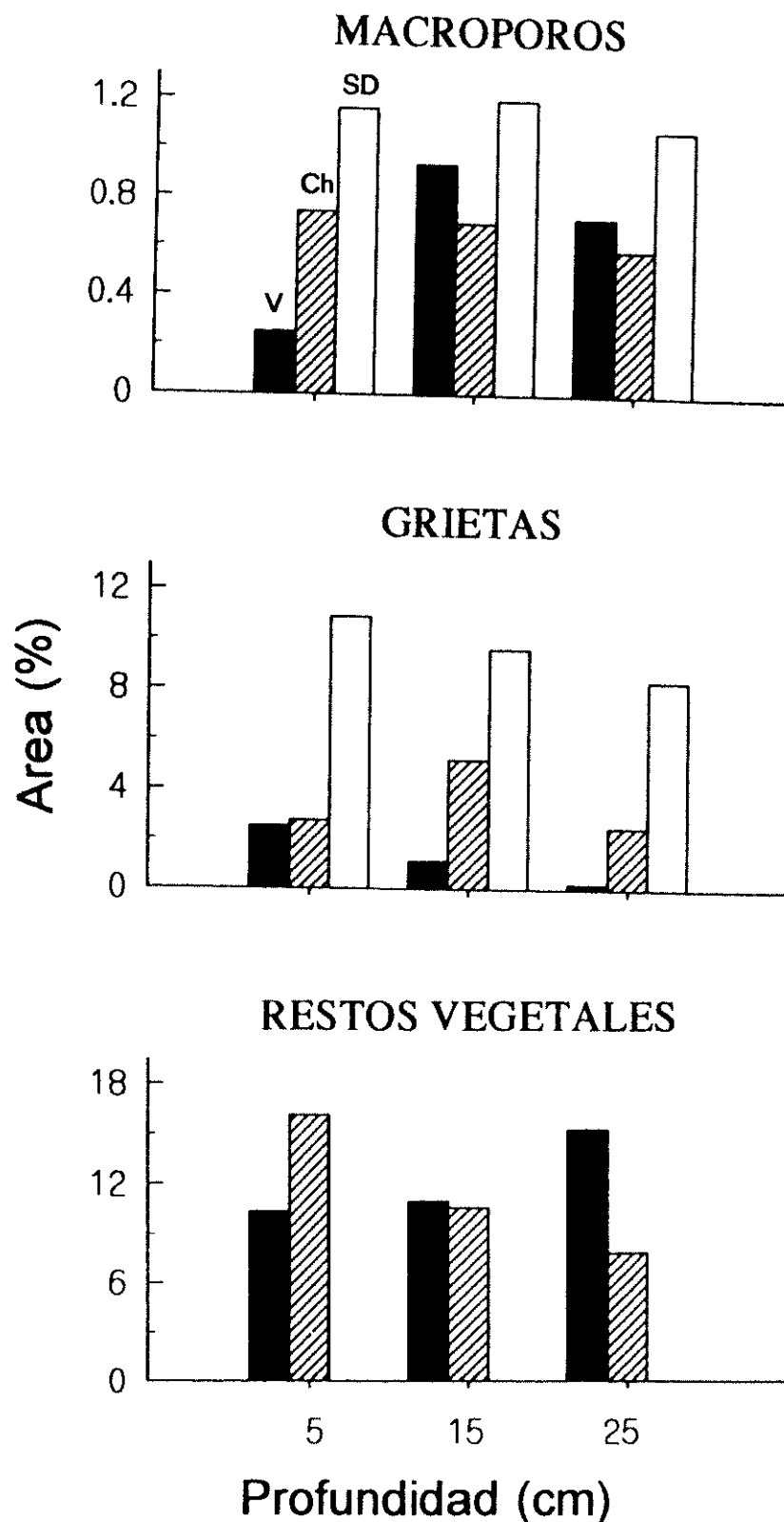


Fig. 46. Porcentaje de área ocupada por macroporos, grietas y restos vegetales a distintas profundidades de la capa arable según tratamiento de laboreo en el ensayo E4 tras la cosecha de la campaña 1991-92 (V: vertedera, Ch: chisel; SD: siembra directa).

las profundidades exploradas. Como puede verse, el mayor número de macroporos en siembra directa se traduce también en una mayor área total, que se mantiene, al igual que en el caso del chisel, más o menos constante con la profundidad. Si se tiene en cuenta el valor medio de los tres horizontes analizados, el área ocupada por macroporos en siembra directa y en laboreo con chisel representa, frente al laboreo con vertedera, un incremento de un 81% en el primer caso y de un 7% en el segundo. Comparando estos porcentajes con los correspondientes al incremento en el número de poros antes señalado, se pone de relieve en el caso de la siembra directa la especial contribución de los macroporos >5 mm al área total y en el caso del chisel la de los comprendidos entre 2 y 5 mm.

En la Figura 46 también se representan para cada profundidad los porcentajes de la superficie total ocupada por grietas y por restos vegetales enterrados en la capa de labor. En el caso de las grietas, la mayor presencia corresponde claramente al no laboreo, con porcentajes que van desde un 11% a 5 cm hasta un 8% a 25 cm. Por el contrario, en el tratamiento tradicional, dichos porcentajes, mucho menores, oscilan entre un 2% a 5 cm y un 0,2% a 25 cm. Por último, en el tratamiento de no laboreo no se encontraron restos vegetales enterrados en la capa arable, mientras que sí fue notoria su presencia en los tratamientos con laboreo, en los que representa, por término medio, un 12% de la superficie total, con un aumento con la profundidad en el caso de la vertedera y un descenso en el del chisel.

4.7.3. Conductividad hidráulica a saturación y sortividad

En general, la determinación de la conductividad hidráulica del suelo a saturación en condiciones de campo (K_{fs}) es más apropiada que la determinación en laboratorio (K_s). Al ser el volumen de suelo sobre el que se efectúa la medida normalmente más elevado, ésta resulta más representativa. Por otro lado, si bien el proceso de infiltración de agua en el campo conlleva cierto grado de insaturación, debido al aire ocluido en el suelo, los valores de K_{fs} son preferidos a los de K_s por aproximarse más a las condiciones naturales de saturación (Reynolds et al., 1983).

Frente a otros métodos de medida de K_{fs} (Amoozegar y Warrick, 1986), la técnica del permeámetro de pozo de carga constante (permeámetro de Guelph), utilizada en el presente estudio, parece más idónea en casos como el nuestro, en los que K_{fs} puede estar dominada tanto por la macroporosidad como por la matriz del suelo (Lee et al., 1985). Estos autores señalan, además, cómo con este método los valores de K_{fs} se caracterizan por menores coeficientes de variación que los resultantes con otro tipo de permeámetros. Esto implicaría un menor número de repeticiones para la determinación de un parámetro que presenta, como es sabido, una elevada variabilidad espacial (Warrick y Nielsen, 1980; Vauclin, 1983). A esto habría que añadir un carácter menos destructivo al no requerir la remoción de un gran volumen de suelo.

Teniendo en cuenta que a las dificultades propias de estos métodos se añade la que impone el carácter inestable de la estructura de un suelo labrado, las determinaciones de K_{fs} en el ensayo E1 se llevaron a cabo a 20 cm de profundidad y en dos momentos de cada una de las dos campañas experimentales: a mitad de campaña, una vez reconsolidado el suelo tras el establecimiento del cultivo, y tras la cosecha (Anexo III).

En la Tabla 39 se muestran los valores de K_{fs} y de sortividad (S) obtenidos en cada una de las fechas y sistemas de laboreo. Considerando que, en general, los valores de K_{fs} y de S siguen una distribución log-normal (Vauclin, 1983), los análisis de varianza correspondientes se llevaron a cabo con los datos transformados logarítmicamente ($\ln K_{fs}$; $\ln S$). Los resultados de estos análisis fueron los mismos que los obtenidos con los datos sin transformar, por lo que en la Tabla 39 se presentan estos últimos.

Los tratamientos con laboreo pasan de tener los valores de K_{fs} más altos, aunque sin significación estadística, en la 1ª fecha de determinación a los más bajos tras la cosecha de la 1ª campaña. Aunque la siembra directa mantiene, a partir de entonces, los valores más altos de K_{fs} , éstos parecen disminuir ligeramente con el tiempo, reduciéndose las diferencias con relación a los tratamientos con laboreo, los cuales parecen experimentar simultáneamente un ligero incremento de K_{fs} . El coeficiente de variación (CV) de K_{fs} oscila entre un 13% y un 142%, correspondiendo al tratamiento de vertedera los mayores CV en todas las fechas de determinación.

En cuanto a los valores de S , hay que recordar que este parámetro depende del potencial de flujo matricial (ϕ_m). El hecho de que este potencial pueda presentar valores negativos es atribuido a la heterogeneidad del medio poroso, por presencia de canales de raíces, lombrices, etc., tal como se indicó en el apartado 3.6.3.3. En nuestro caso se obtuvieron valores negativos de ϕ_m en un 56% de las determinaciones, dentro del rango (27-83%) encontrado en la bibliografía (Salverda y Dane, 1993). Ello obligó a recalcular ϕ_m según el análisis de Gardner (v. apartado 3.6.3.3.). Ya que el cálculo según esta solución requiere una única altura de agua, H , se eligió la de 10 cm al implicar un mayor volumen de suelo (Amoozegar y Warrick, 1986). Además, esta elección se consideró satisfactoria al comprobarse en la 1ª fecha de determinación que el valor medio de α (K_{fs}/ϕ_m), $11,8 \text{ m}^{-1}$, resultó coincidente con el valor de 12 m^{-1} sugerido por Elrick et al. (1989) para suelos de textura y estructura similares a las del ensayo E1.

Los valores de S , calculados según lo expuesto en el párrafo anterior, se presentan en la Tabla 39 junto a sus CV correspondientes. Aunque el tratamiento de no laboreo a partir de la 1ª fecha de determinación muestra los valores más altos de S , indicando cierto paralelismo con la tendencia observada para K_{fs} , las diferencias entre tratamientos no son tan marcadas. En cuanto a la evolución de S con el tiempo y teniendo en cuenta que, en conjunto, las cifras encontradas se mueven dentro de un estrecho margen, podría decirse que, si bien entre la 1ª y la 2ª fecha de control se detecta cierto incremento de S en siembra directa y un descenso en vertedera, al final del periodo experimental los valores de S para un mismo tratamiento no experimentan un cambio sustancial con respecto a los iniciales. Los CV, en general más bajos que los obtenidos para K_{fs} , varían entre un 6% y un 66%, correspondiendo los mayores valores al tratamiento de vertedera y los menores al de siembra directa.

Tabla 39. Conductividad hidráulica a saturación (K_{fs}) y sortividad (S) del suelo en el ensayo E1 (parcelas anuales), y respectivos coeficientes de variación (CV), para distintas fechas del período experimental según tratamiento de laboreo.

Fecha	Tratamiento	K_{fs} ($\text{cm/s} \cdot 10^{-3}$)	CV (%)	S ($\text{cm/s}^{1/2} \cdot 10^{-2}$)	CV (%)
Campaña 1990-91					
25/03/91	V	1,539 a	30,05	6,340 a	21,72
	Ch	1,505 a	12,61	7,210 a	13,56
	SD	0,805 a	28,56	6,197 a	13,25
	DMS (0,05)	ns		ns	
09/07/91	V	0,419 a	102,58	4,862 a	65,67
	CH	0,556 a	66,84	7,233 a	40,33
	SD	1,933 b	33,92	8,727 a	10,30
	DMS (0,05)	0,750		ns	
Campaña 1991-92					
21/02/92	V	0,275 a	69,34	3,617 a	41,53
	Ch	0,665 a	37,37	5,537 ab	32,35
	SD	1,324 b	24,83	8,057 b	25,70
	DMS (0,05)	0,408		2,920	
08/07/92	V	0,681 a	142,05	4,807 a	57,72
	Ch	0,928 a	33,52	5,473 a	15,06
	SD	1,407 a	34,10	6,227 a	5,56
	DMS (0,05)	ns		ns	

DMS: diferencia mínima significativa para $p=0,05$; para una misma fecha, cifras seguidas por la misma letra no se diferencian significativamente (ns).

5. DISCUSSION

5.1. ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO Y LABOREO DE CONSERVACION

Tal como se indicaba en la Introducción, a través de su acción sobre los distintos procesos edáficos, el laboreo determina el régimen de humedad del suelo. Los cambios en la estructura del suelo (modificación en el estado de agregación y en la distribución de los tamaños de poros) afectan a las propiedades hidrofísicas (características de retención y transporte de agua en el perfil, profundidad del frente de humectación y desecación) y, en definitiva, a la reserva de agua y patrones de extracción de ésta por el cultivo.

En condiciones de secano, especialmente en aquellas regiones de clima semiárido con lluvias escasas y poco frecuentes, conseguir un óptimo almacenamiento del agua de lluvia es el principal objetivo del laboreo. Ahora bien, mantener una distribución óptima de poros de drenaje y almacenamiento no es siempre posible dado el carácter transitorio del efecto de las labores (Hoogmoed, 1989; Zhai et al., 1990).

Con respecto al laboreo de conservación, son numerosas las referencias en las que se ha demostrado cómo este sistema de manejo mejora la reserva de agua en el suelo frente al laboreo tradicional. Griffith et al. (1986) y Lal (1989), entre otros, han revisado estas experiencias, realizadas fundamentalmente en regiones tropicales y templadas. Por el contrario, son escasas las referencias en zonas semiáridas de regiones templadas.

Con respecto a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se observa, en primer lugar, cómo en todos los sitios de ensayo, campañas y sistemas de cultivo, tanto en el momento de la siembra como a lo largo del ciclo del cultivo, el efecto del laboreo reducido (arado con chisel) no parece diferenciarse de forma sustancial del producido con vertedera en cuanto a almacenamiento de agua en el suelo. En principio, y sin tener en cuenta los datos de rendimiento del cultivo, estos resultados permitirían plantear la sustitución del arado de vertedera por el arado chisel para la realización de las labores primarias en las zonas de ensayo y en aquellas otras de condiciones locales similares. Esta posibilidad es un hecho, desde hace años, en distintas regiones de secano de EE.UU. donde se ha comprobado que el laboreo con chisel conlleva un mejor aprovechamiento del agua de lluvia, tanto frente al laboreo con vertedera (Burwell et al., 1968) como frente al no laboreo (Lindstrom et al., 1974). El laboreo del suelo con chisel es, asimismo, práctica habitual en la agricultura de secano australiana, tanto en zonas de lluvias de invierno como de verano (Cornish y Pratley, 1987).

A diferencia de lo señalado para el tratamiento con chisel, la reserva de humedad bajo no laboreo, al inicio del ciclo del cultivo, varía según ensayo, campaña agrícola y sistema de cultivo. Así, considerando en primer lugar el sistema de cultivo anual, hay que recordar cómo en el ensayo E1 y en las dos campañas experimentales esta reserva tiende a ser la menor de los tres tratamientos. En los demás sitios, el almacenamiento inicial de agua bajo no laboreo es similar al de los tratamientos con laboreo en la 1ª campaña y en la 2ª sólo más favorable en los ensayos E2 y E3. De estas observaciones se deduce que en nuestras condiciones de ensayo, y a diferencia de lo que cabría esperar según la literatura, en términos generales, la siembra directa en cultivo anual no supone una mejora en el aprovechamiento del agua de lluvia con respecto a los tratamientos con laboreo. Dos pueden ser las razones que concurren en esta falta de respuesta: unas condiciones de

estructura del suelo aún insuficientes y una escasa presencia en superficie de restos vegetales del cultivo anterior.

En no laboreo, la mejora de la estructura del suelo sólo es apreciable a largo plazo (Lal, 1989). Según la experiencia de Dickey et al. (1989), se requieren de cinco a seis años, por término medio, para que esta mejora se manifieste en un aumento en la capacidad de almacenamiento de agua. En nuestro caso, en sólo dos años de tratamiento, puede ser prematuro evidenciar estos cambios de estructura y porosidad. Por otro lado, es previsible que la baja producción de biomasa en nuestros ensayos, especialmente en los más áridos, impida mantener una adecuada cubierta de paja y rastrojo tras la cosecha y, por lo tanto, reducir pérdidas de agua por evaporación. En áreas de pluviometría similar, diversas experiencias de comparación de sistemas de laboreo y manejo de residuos, tanto en sorgo (Thomas et al., 1990; Gibson et al., 1992) como en trigo (Radford et al., 1992) y cebada (Nyborg y Malhi, 1989), han puesto de manifiesto que la mayor reserva de humedad en el momento de la siembra corresponde al no laboreo cuando son retenidos los restos vegetales del cultivo anterior y la menor, precisamente, al no laboreo cuando éstos son retirados. En este sentido, el mayor contenido de humedad en el suelo observado en siembra directa bajo cultivo anual al inicio de la 2ª campaña experimental en los ensayos E2 y E3, junto a una recarga más efectiva en este tratamiento tras un período de lluvias importantes al final de la misma, podría atribuirse, en principio, a unas mejores condiciones estructurales del suelo y a un incremento en la cantidad de residuos ya tras dos años de ensayo.

Ahora bien, si en las condiciones de nuestros ensayos el no laboreo no proporciona un aumento de la reserva de agua con respecto a los tratamientos de laboreo propiamente dichos, cabe preguntarse porqué tampoco éstos mejoran la disponibilidad de agua el día de la siembra. Dadas las características del régimen de lluvias encontradas a lo largo del periodo experimental (precipitaciones generalmente bajas y erráticas), el momento de las labores primarias es un factor de crucial importancia en la eficiencia del almacenamiento de agua, posiblemente más importante que el propio sistema de preparación de la tierra (Lindstrom et al., 1974). Fischer (1987) clasifica la importancia relativa de los efectos directos del laboreo sobre los procesos que determinan el almacenamiento de agua en el suelo (evaporación, transpiración de malas hierbas, infiltración, escorrentía y drenaje), de tal modo que según el momento de las labores cada uno de estos procesos se manifestará en mayor o menor grado.

En nuestro caso de estudio, y considerando los valores medios de los cuatro sitios y de las dos campañas de ensayo, en el período transcurrido entre las labores primarias y el día de la siembra en el cultivo anual (aproximadamente dos meses y medio), la precipitación media recibida fue de 109 mm, suficientes, en teoría, para recargar el perfil hasta un 92% de su máxima capacidad de agua disponible. Sin embargo, sólo un 8% de esta lluvia se recibe durante el mes siguiente a las labores; después de este período, que representa un 35% del total hasta la siembra, es cuando comienzan a registrarse lluvias cuya cuantía y frecuencia pueden resultar efectivas en la recarga del perfil hídrico. Parece obvio, por tanto, que tras las labores (Fig. 9) tenga lugar una pérdida de agua sustancial por evaporación, especialmente en el tratamiento de vertedera, con inversión del suelo, la cual podría ser acentuada aún más en caso de coincidir con episodios de viento local (cierzo) de cierta intensidad. Esta hipótesis, y el carácter transitorio de las labores ya

comentado, explicaría el menor aprovechamiento del agua de lluvia observado en los tratamientos de vertedera y chisel en la 2ª campaña de los ensayos E2 y E3 anuales. Así, en el mes que siguió a las labores en E2 se recibieron tan sólo 7 mm y en E3, en los dos meses siguientes, 18 mm.

Analizados los efectos de los diferentes tratamientos de laboreo sobre la captación de agua de lluvia en el sistema de cultivo anual, podría evaluarse, de igual modo, los correspondientes al sistema de año y vez (E1, E2 y E3) y, con ello, la eficiencia del año de barbecho (Fig. 9). Si se compara la reserva de agua que presentaba el suelo al inicio de la 2ª campaña (1991-92), pocos días después de la siembra, en las parcelas de cultivo anual con la correspondiente a la de las parcelas de año y vez, se obtienen resultados diferentes según sitio experimental (Tabla 40). Así, en el ensayo E1 el año de barbecho no ha supuesto una mejora en el aprovechamiento del agua de lluvia, sino todo lo contrario, un menor almacenamiento, especialmente en el tratamiento de vertedera. Desde el punto de vista agronómico, esta menor eficiencia en este ensayo no justificaría su práctica, si se atiende únicamente a la finalidad del barbecho como sistema de conservación de agua. En nuestro estudio se ha definido la eficiencia del barbecho como el porcentaje que la ganancia o pérdida de agua almacenada en el sistema de año y vez representa sobre la precipitación recibida desde el momento de las labores primarias en las parcelas anuales (agosto-septiembre de 1990) hasta la siembra de la campaña 1991-92. La fecha de las labores primarias en las parcelas anuales representa el momento de la primera modificación de la capa arable con respecto al sistema de año y vez y, por lo tanto, el inicio del período en el que se deberá poner de manifiesto la diferente capacidad para conservar agua de ambos sistemas de cultivo.

En los ensayos E2 y E3, sin embargo, sí se observa en año y vez un efecto positivo en el almacenamiento inicial de agua en el suelo tras 15 meses de barbecho. En E2, esta mayor reserva, fundamentalmente por debajo de 30 cm de profundidad, sólo es destacable en el tratamiento de chisel; en este caso la ganancia neta (32 mm) supone, en términos de eficiencia, que en las parcelas año-vez se ha almacenado un 7% más de agua de lluvia (Tabla 40). En E3, hay que destacar, además de la del tratamiento de chisel, la mayor eficiencia del de vertedera (12%).

En síntesis, el no laboreo en el sistema de cultivo año y vez no da lugar, en nuestras condiciones de ensayo, a una mejora apreciable en la conservación del agua. Por el contrario, el laboreo con chisel, a excepción del ensayo E1, sí conduce a una ganancia de agua relativamente importante tras el año de barbecho. Por último, la respuesta dispar obtenida en el tratamiento de laboreo tradicional con vertedera puede ser resultado del efecto favorable o desfavorable, según ensayo, de los diferentes factores determinantes de la eficiencia del barbecho (presencia de restos vegetales en superficie hasta el momento de las labores primarias, distribución de lluvias y oportunidad de las labores, control efectivo de malas hierbas, etc.).

El hecho de que el tratamiento con chisel de lugar a un almacenamiento eficiente de la precipitación durante el barbecho en dos de los ensayos podría estar relacionado, de acuerdo con lo observado por Lindstrom et al. (1974), con una modificación en la estructura del suelo. Este cambio favorecerá, al no existir inversión del suelo con la labor, un flujo preferencial de agua descendente y, por tanto, una mayor acumulación en profun-

Tabla 40. Eficiencia del barbecho en el almacenamiento del agua de lluvia en el sistema de cultivo año-vez, con respecto al sistema de cultivo anual, según tratamiento de laboreo y sitio de ensayo.

Ensayo	Precipitación en el período de barbecho ¹ (mm)	Tratamiento	$S_{AV} - S_A$ ² (mm)	Eficiencia del barbecho (%)
E1	471	V	-41	-8,7
		Ch	-8	-1,7
		SD	-6	-1,3
E2	457	V	13	2,8
		Ch	32	7,0
		SD	11	2,4
E3	481	V	58	12,0
		Ch	43	8,9
		SD	5	1,0

¹ Lluvia entre la fecha de las labores primarias en el sistema de cultivo anual, tras la cosecha de la campaña 1989-90, y la siembra de la campaña 1991-92.

² Diferencia en el agua almacenada (de 0 a 80 cm de profundidad) entre sistemas de cultivo (S_{AV} : cultivo año-vez; S_A : cultivo anual) en la siembra de la campaña 1991-92.



didad, tal como se observa por debajo de 30 cm en el ensayo E2; de esta manera, el agua así acumulada quedaría menos disponible para la evaporación. Allmaras et al. (1977) muestran cómo un menor contenido de humedad y una menor difusividad en los primeros 40 cm de un suelo labrado con chisel limita las pérdidas de agua por evaporación con respecto a un suelo no labrado. Por otro lado, los residuos en superficie y los incorporados parcialmente en los primeros centímetros del suelo favorecen el transporte de agua hacia el interior de la capa labrada en condiciones de saturación (Onstad y Voorhees, 1987).

Dada la duración del período de barbecho en el sistema de año y vez, la oportunidad de las labores, tanto primarias como secundarias en los tratamientos con laboreo, y el mantenimiento de residuos vegetales, especialmente en no laboreo, adquieren en este sistema más importancia que en el cultivo anual como factores determinantes de la eficiencia en el aprovechamiento del agua (Fischer, 1987; Sallaway et al., 1990; Thorburn, 1992). En relación con el primero de estos factores, French (1978a) subraya que el éxito del barbecho en las condiciones de Australia del Sur depende de la pluviometría de los meses de invierno y, en particular, de la de aquéllos próximos al momento de las labores primarias, para la que señala una cifra óptima de 100 mm. En nuestras condiciones, dichos meses corresponden a febrero y marzo (Fig. 9) y en el año de la experiencia, la precipitación total en los mismos fue de 73, 80 y 153 mm en los ensayos E1, E2 y E3, respectivamente. Como puede verse, el orden de los ensayos según estas cifras es el mismo que siguen según la eficiencia del barbecho obtenida (Tabla 40) y, precisamente, sólo en el ensayo E3 se supera el umbral señalado por French (1978a). Además, en este ensayo la precipitación de febrero y marzo representó, aproximadamente, el 40% de la total recibida entre las labores primarias en el barbecho y la siembra, mientras que en los ensayos E1 y E2 representó tan sólo un 20%.

Las cifras de eficiencia de barbecho encontradas en otros trabajos llevados a cabo en regiones semiáridas representan el porcentaje de la precipitación almacenada en el suelo desde la cosecha del cultivo anterior hasta la siembra del siguiente, transcurrido el correspondiente período de barbecho (Greb, 1979). Según la revisión de McDonald y Fischer (1991), estas cifras, para barbechos de larga duración, como en nuestro caso de estudio, pueden oscilar entre 1% y 75%, según regiones y sistemas de manejo. Con el fin de hacer comparativas estas eficiencias con las obtenidas en nuestro estudio, es necesario recalcular éstas según la mencionada definición. Así, asumiendo que el estado de agotamiento de la reserva de agua en el suelo al final de la campaña no varía sustancialmente de año en año (Janssen, 1972), el contenido de humedad que presentaba el suelo en las parcelas anuales con vertedera en el momento de la cosecha de la campaña 1990-91 puede ser considerado similar al de la campaña 1989-90 y punto de partida del período de almacenamiento de agua en las parcelas de año y vez. Las eficiencias medias así calculadas son de un 6% en el ensayo E1, un 14% en el E2 y un 19% en el E3, sin apreciarse diferencias importantes entre tratamientos de laboreo. En conjunto, estas cifras, que en algunos casos están en torno a los valores medios (15-20%) más frecuentemente referidos en la literatura, quedan aún lejos de las que se están obteniendo en los últimos años con técnicas de laboreo de conservación, superiores al 40% (McDonald y Fischer, 1991), de acuerdo con las previsiones efectuadas por Greb (1979).

De todo lo anterior, y siempre desde el punto de vista de la conservación del agua de lluvia, podría concluirse que el manejo del suelo durante el barbecho en el sistema de

cultivo año y vez debe ser revisado en nuestras zonas de ensayo. López y Giráldez (1992), en un análisis de la eficiencia del barbecho en dos áreas españolas de clima mediterráneo, mediante la aplicación de un modelo de balance de agua, cuestionan la eficiencia de dicha práctica al no observar una mejora apreciable en la reserva de agua en el suelo. Con respecto a las prácticas de laboreo de conservación en el barbecho, el manejo de los residuos y el control de las malas hierbas deben ser los principales aspectos a considerar. Sólo un cambio drástico en los actuales usos y aprovechamientos ganaderos de las superficies en barbecho podría facilitar tanto un manejo adecuado de los residuos como una optimización en la aplicación de las labores.

Tal como se señaló en el apartado correspondiente del capítulo de Resultados, la evolución de los perfiles de humedad permite apreciar hasta qué profundidad tiene lugar el mayor agotamiento de la reserva de agua y, por tanto, obtener una información indirecta de la actividad y distribución radicular del cultivo.

Si se observan, de nuevo, los patrones de sustracción de humedad obtenidos en la 1ª campaña de ensayo (Fig. 23), los correspondientes a los tratamientos de vertedera y chisel de los ensayos E1 y E4 responden tanto al modelo clásico de Shockley (citado por McAneney y Kerr, 1984) como al de Gardner (1978). Recordemos que el primero de estos modelos establece que en el primer 25% de la zona de exploración radicular se produce el 40% de la extracción de agua total, mientras que en los sucesivos cuartos se extrae el 30%, 20% y 10% restantes. Por lo que respecta al tratamiento de siembra directa, el sistema radicular parece concentrarse mucho más superficialmente, ya que un 85-89% del volumen total de agua extraído proviene de los primeros 40 cm, frente a un 64-78% en vertedera y chisel. Por otro lado, si se toma como punto de referencia, a efectos comparativos, la profundidad media hasta la cual se extrae el 50% del agua total, tal como sugiere Gardner (1978), se observa en todos los ensayos cómo esta profundidad aumenta con la intensidad del laboreo; así, para el tratamiento de siembra directa dicha profundidad se encuentra, aproximadamente, a 18-20 cm, para el de chisel entre 25 y 27 cm y, finalmente, para el de vertedera entre 27 y 31 cm.

Con relación a la 2ª campaña, el almacenamiento de agua que presentaba el suelo tras la siembra fue en todos los casos el principal factor determinante de los correspondientes patrones de extracción (Figs. 29 y 30). Así, a situaciones más favorables de humedad inicial corresponden modelos que denotan mayores volúmenes de agua sustraída y también mayores profundidades de extracción, con una distribución porcentual más próxima a la de los modelos indicados. Este mismo hecho explicaría la profundidad media a las que tiene lugar el 50% de la extracción total en los diferentes ensayos; en el E4, con la mayor reserva de humedad inicial, esta profundidad se sitúa, aproximadamente, a 32 cm, frente a los 17 cm y 19 cm en las parcelas año-vez del ensayo E1 y parcelas anuales del E2, respectivamente, con una reserva inicial mucho más desfavorable en ambos casos.

Las anteriores observaciones permiten, además, reafirmar la idea de que en los ensayos E1, E2 y E3 el sistema radicular del cultivo no debe haber sustraído agua por debajo de la profundidad efectiva considerada en el estudio (80 cm). Sin embargo, en el ensayo E4, es posible que en la segunda campaña haya tenido lugar cierta extracción por debajo de esa profundidad.

Finalmente, habría que señalar cómo a lo largo del período experimental la reserva de humedad en los suelos de los ensayos raramente se acerca a la capacidad máxima de almacenamiento definida por el valor de "capacidad de campo". Igualmente, el contenido de humedad del suelo se encuentra con frecuencia por debajo del "punto de marchitez permanente", lo que indicaría que la extracción de agua por el cultivo puede tener lugar más allá de $-1,5$ MPa. Ello confirma las limitaciones de estas constantes de humedad para definir el agua disponible para el cultivo en condiciones de secano (French, 1978b) y, de ahí, la conveniencia de definir el uso del agua a través de los cambios en el contenido total de agua entre dos fechas determinadas del ciclo del cultivo, tal como ha sido considerado en el presente estudio.



5.2. EFECTO DEL LABOREO SOBRE EL GRADO DE COMPACTACION DEL SUELO

La estrecha relación observada entre resistencia del suelo a la penetración (RP) y contenido de humedad pone de relieve que el régimen de humedad del suelo es factor determinante no sólo de la reserva de agua sino también del grado de persistencia del efecto de las labores y del nivel de compactación que puede alcanzarse en nuestras condiciones de ensayo.

En general, los suelos que al comienzo del ciclo del cultivo presentan una baja reserva de agua disponible también manifiestan los estados de compactación más desfavorables y a la inversa. Esta correspondencia se comprueba fácilmente en todos los sitios de ensayo al contrastar el agua almacenada tras la siembra en las dos campañas experimentales con los correspondientes niveles de RP.

El espesor de suelo con valores de RP inferiores a 1,5 MPa es considerado en la literatura como parámetro de referencia para evaluar tanto la eficiencia relativa de un determinado tratamiento de laboreo en el esponjamiento del suelo (O'Sullivan et al., 1987; Carter, 1988a) como el mantenimiento de este efecto en el tiempo (Carter, 1988a). En nuestro estudio, dado el tiempo transcurrido desde las labores primarias y el espectro de valores de RP registrados en ambas campañas, se ha considerado la cifra de 2 MPa como el valor de referencia que mejor puede informar acerca del efecto residual del laboreo. Desde el punto de vista del establecimiento del cultivo, la diferencia entre tratamientos debe venir marcada por el espesor de suelo con valores de RP inferiores a la cifra señalada. Sin tener en cuenta otros factores, un valor del 50% (primeros 20 cm del suelo con RP inferior a 2 MPa) podría considerarse como la condición mínima para una nascencia y un enraizamiento adecuados. Así, pues, esta condición se cumple después de la siembra en todos los casos en los tratamientos con laboreo, a excepción de la vertedera en el ensayo E3 de la 1ª campaña y de la vertedera y chisel en el ensayo E1 de la 2ª. Por el contrario, el estado inicial de compactación en siembra directa no alcanza en ningún caso el valor del 50% indicado, por lo que, claramente, el no laboreo es el tratamiento que conduce a la situación de impedancia mecánica más desfavorable.

Los valores críticos de RP que se indican en la literatura como limitantes del crecimiento radicular varían según tipo de suelo y cultivo. Según la clasificación de Canarache (1990), por debajo de 2,5 MPa no habría ningún tipo de limitación para el crecimiento radicular mientras que por encima de 10 MPa éste no sería posible. En general, puede decirse que los valores de RP limitantes se mueven entre 2 y 3 MPa, siendo este último valor el indicado para trigo (Dexter, 1986a) y cebada (Willatt, 1986); otros autores dan valores más elevados, como el de 4,2 MPa que Veen y Boone (1990) mencionan como límite para una inhibición completa del crecimiento radicular en maíz, o los valores de 4,6-5,1 MPa que Taylor et al. (1966) encuentran en el horizonte Ap no labrado de un suelo de loess. En nuestro caso, es precisamente el tratamiento de siembra directa en el que una proporción importante del suelo muestra valores iniciales de RP entre 2 y 4 MPa, claramente dentro del rango de valores críticos. Sin embargo, también al inicio de la campaña, se registran en los tratamientos con laboreo valores limitantes de RP a 35-40 cm de profundidad, cuya persistencia a comienzos del encañado del cultivo podría sugerir un escaso desarrollo radicular por debajo de esa profundidad en todos los ensayos, lo que explicaría los modelos de extracción de agua encontrados.

La reconsolidación natural del suelo, la desecación del mismo y la acción de un sistema radicular activo son factores responsables del aumento progresivo del grado de compactación del suelo a lo largo del ciclo del cultivo observado en todos los ensayos en las dos campañas de estudio. Así, el esponjamiento del suelo debido a las labores, que persistía tras la siembra, desaparece una vez ahijado el cultivo tanto en el tratamiento de vertedera como en el de chisel, no llegándose prácticamente en ningún caso a valores de RP inferiores a 2 MPa por debajo de 10 cm. Niveles de RP superiores a 4-5 MPa, registrados en varias fechas de las dos campañas, corresponden a situaciones de muy bajo contenido de humedad en el suelo, lo que confirma la fuerte influencia de este parámetro. Karlen et al. (1991) ponen de manifiesto cómo en condiciones de una gran desecación del perfil la RP puede alcanzar 7 MPa en suelo labrado y hasta 9 MPa en suelo no labrado.

En conjunto, las condiciones iniciales de humedad fueron más favorables en la 2ª campaña experimental, en la que, además, el desarrollo del cultivo fue menor. Los altos valores de RP que ya se alcanzaban en los tres tratamientos tres meses después de la siembra en la 1ª campaña, frente a los más bajos que en la misma fase del cultivo se daban en la 2ª, denotan una menor transitoriedad del efecto de las labores en la 2ª campaña. Si a todo ello se añade el hecho de que al comienzo de esta última campaña han transcurrido dos años sin labrar el suelo en el tratamiento de siembra directa, puede entenderse porqué se detectan valores de RP más altos en este tratamiento, especialmente en el ensayo E4. Con la excepción del ensayo E1 ya comentada, el resultado final de todas estas circunstancias es la mayor persistencia de las diferencias en RP entre tratamientos con laboreo y no laboreo observada en la 2ª campaña. El proceso de humectación-desecación del suelo tras las lluvias recibidas al final de la 2ª campaña, conduce en el ensayo E4 y en las parcelas anuales del E3 a una situación de compactación el día de la cosecha que evidencia cómo tras un ciclo completo de cultivo persisten los efectos de las labores en los tratamientos de vertedera y chisel (Figs. 37 y 38). Contenidos de humedad similares en esa fecha en los tres tratamientos del ensayo E4, e incluso mayores en el de siembra directa en E3, pueden explicar porqué las diferencias de RP entre tratamientos son resultado de los cambios estructurales debidos a las labores y no del efecto del contenido de agua.

En definitiva, podría decirse que las diferentes pautas de compactación del suelo observadas a lo largo del ciclo del cultivo en las dos campañas de ensayo responden, fundamentalmente, a una distinta evolución de la reserva de humedad, consecuencia, a su vez, de un régimen de lluvias y de un desarrollo del cultivo también diferentes.

Los mayores niveles de compactación, así como la tendencia a aumentar con el tiempo, encontrados en nuestro estudio en el tratamiento de no laboreo coinciden, básicamente, con los resultados obtenidos en otras experiencias tanto españolas como extranjeras. Así, Sánchez-Girón et al. (1991), en un estudio comparativo de laboreo convencional con vertedera y laboreo de conservación en un suelo franco-arcilloso, encuentran en el tratamiento de siembra directa una mayor RP en el lecho de siembra (0-20 cm) tras la nascencia de un cultivo de cebada de primavera; estos mayores valores de RP, observados el primer año de la experiencia, continúan en el tercer año de estudio. En una experiencia similar, con un suelo de textura franco-arcillo-arenosa y una rotación trigo-girasol, Pelegrín et al. (1990) señalan un incremento importante de RP en no laboreo desde la siembra del trigo hasta la fase de encañado del mismo, especialmente en los

primeros 30 cm del suelo. En suelos de textura arcillosa, Muriel et al. (1991) también indican, tras cuatro años de rotación cereal-girasol-leguminosa, la existencia de una mayor compactación en siembra directa. Igualmente, son numerosos los trabajos llevados a cabo en otras regiones mundiales en los que se ha observado, a corto y medio plazo, una mayor RP en no laboreo (Bauder et al., 1981; Hamblin et al., 1982; Pierce et al., 1992). Sin embargo, también aparecen en la literatura referencias en las que los niveles de compactación en no laboreo resultan comparables a los que se obtienen bajo laboreo convencional (Coote y Malcolm-McGovern, 1989; Unger y Fulton, 1990).

Ahora bien, la valoración de la susceptibilidad de un determinado suelo a la compactación bajo no laboreo pasa por la observación de los efectos de esta práctica a largo plazo. Desde este punto de vista, los resultados son dispares según las condiciones de suelo y clima. Así, tras 8 años de ensayo con diferentes tratamientos de laboreo, incluida la siembra directa, y con diferentes sistemas de rotación cereal-barbecho, en un suelo franco de las Praderas Canadienses y una pluviometría media anual de 330 mm, Chang y Lindwall (1992) encuentran bajos niveles de compactación y escasas diferencias entre tratamientos. En cambio, en suelos de textura gruesa, con bajos contenidos de materia orgánica y pobre estructura, la susceptibilidad a la compactación es mayor y pueden aparecer zonas compactadas en superficie cuando el no laboreo se practica de forma continuada. Radcliffe et al. (1988), tras 10 años de no laboreo en rotación trigo-soja, detectan una RP superior a 4 MPa de 10 a 20 cm de profundidad. Igualmente, Hill (1990) observa, tras 11-12 años de experimentación en tres sitios de ensayo con suelos de textura franco-limosa y cultivo de maíz, una compactación significativamente mayor en no laboreo. Por último, en suelos de textura arcillosa, con problemas reales de compactación derivados del empleo de una maquinaria agrícola cada vez más pesada y de un tráfico intenso, la regeneración de la estructura del suelo sólo a través de procesos naturales, como sería el caso de la siembra directa, no siempre es posible. Duval et al. (1989) evalúan en un suelo arcilloso los efectos residuales de distintos tratamientos de laboreo y compactación a los 10 años de su aplicación y muestran que la persistencia de la compactación inicial es mayor en no laboreo.

A tenor de lo observado en estas experiencias a largo plazo, es previsible que en nuestras condiciones de ensayo las pautas de compactación del suelo en respuesta a los tratamientos de laboreo impuestos sólo podrán ser contrastadas definitivamente después de transcurrido un tiempo mínimo de ensayo, que en cada caso vendrá condicionado por los resultados que se obtengan en sucesivas campañas. En la literatura se indica que los cambios en las propiedades físicas del suelo debidos a la sustitución del laboreo con vertedera por sistemas de laboreo de conservación son lentos, necesitándose al menos 3-4 años de seguimiento para evidenciar cambios en la estructura del suelo (Voorhees y Lindstrom, 1984).

En cuanto a los efectos asociados al laboreo con chisel, puede decirse que, al margen de una menor profundidad inicial de esponjamiento del suelo, éstos no se diferencian en términos generales de los producidos por el tratamiento de vertedera. No obstante, y tal como se ha señalado, en algunos ensayos se observa un menor aumento de la compactación durante el ciclo del cultivo en el tratamiento de chisel (E3, 1ª campaña; E2, 2ª campaña, parcelas año-vez). Una mayor persistencia del esponjamiento producido por el laboreo con chisel, en relación al tradicional con vertedera, ha sido también observado

en suelos de textura franco-arenosa con cultivo de soja (Cassel et al., 1978) y en suelos de textura arenosa-franca con cultivo de cebada (Sommer y Zach, 1992). Igualmente, Pidgeon y Soane (1977) encontraron un grado de compactación similar entre chisel y vertedera en un suelo de textura entre franco-arenosa y franco-arcillo-arenosa bajo monocultivo de cebada. Desde el punto de vista de la influencia del laboreo sobre la impedancia mecánica del suelo, el laboreo reducido con chisel podría ser considerado, en principio, como una posible alternativa al laboreo tradicional con vertedera en las condiciones de ensayo del presente estudio.

En cuanto a los menores valores de RP que, en general, se dan en el ensayo E4, éstos podrían explicarse, además de por un mayor contenido de agua en el suelo, por una textura más fina, una mayor presencia de residuos del cultivo anterior y también, quizá, por una mejor estructura del suelo, tal como denota la mayor actividad biológica observada, y un estado de agregación del suelo más favorable. La ausencia de cultivo en el tratamiento de siembra directa en este ensayo durante la 1ª campaña pone de manifiesto la importante participación del sistema radicular del cultivo en el proceso de compactación del suelo. Aparte de una acción de compresión del suelo en la proximidad de las raíces (Dexter, 1986b), la sustracción de agua por el sistema radicular disminuye el contenido de humedad en el suelo lo que se traduce en un aumento de la impedancia mecánica (Boone, 1988). Así, en el caso señalado, mientras que la RP en los tratamientos con laboreo aumentó entre la 1ª y la 2ª fecha de control en 2,4 MPa (valor medio en los primeros 40 cm del perfil), la RP en siembra directa lo hizo únicamente en 0,1 MPa.

El grado de compactación en el sistema de cultivo de año y vez no difiere sustancialmente del observado en el cultivo anual. La mayor compactación que deberían haber mostrado las parcelas de año y vez al comienzo de la 2ª campaña, debido a un mayor tiempo transcurrido desde la aplicación de las labores primarias, puede haber sido contrarrestada por un mayor contenido de humedad en el suelo. El hecho de que las diferencias entre tratamientos de laboreo desaparezcan en las parcelas año-vez antes que en las anuales refleja un menor efecto residual de las labores en este sistema de cultivo.

Por último, y con respecto a las relaciones establecidas entre RP y parámetros de suelo, habría que hacer las siguientes consideraciones. En general, los modelos de predicción de RP se desarrollan a partir de datos provenientes de un mismo suelo u horizonte, para un determinado rango de humedad (incluso para una única constante de humedad) y requieren, además, la medida previa de determinadas propiedades del suelo. Todo ello limita, por tanto, sus posibilidades de aplicación. En nuestro caso, aunque los valores de los coeficientes de determinación de las ecuaciones obtenidas no sean muy elevados (0,511-0,708), éstos pueden considerarse satisfactorios ya que las regresiones se han basado en medidas de campo, donde la variabilidad es mayor que en condiciones de laboratorio. De hecho, modelos obtenidos a partir de medidas en laboratorio, con valores de r^2 mucho más altos, no han resultado eficaces en su aplicación a suelos agrícolas en condiciones de compactación natural (Sánchez-Girón, 1986). La aplicación potencial de las ecuaciones obtenidas en el presente estudio debería limitarse a condiciones de suelo similares, especialmente en cuanto a textura, profundidad (<35-40 cm) y rango de contenido de humedad (2-21% en peso).

5.3. RESPUESTA DEL CULTIVO AL LABOREO DE CONSERVACION

En general, la influencia del laboreo en el desarrollo y crecimiento del cultivo puede ser muy variable no sólo cuando se comparan diferentes sitios, sino también cuando para un mismo sitio se contrasta la respuesta en diferentes años. Los factores responsables de esta variabilidad son tan numerosos, y las interrelaciones entre los mismos tan complejas, que en ocasiones es difícil identificar aquéllos realmente limitantes para el cultivo bajo un determinado sistema de laboreo (Boone, 1988). En el presente trabajo, la diferente respuesta del cultivo en las dos campañas de estudio podría explicarse a través de la dinámica del estado estructural del suelo asociada a los diferentes tratamientos de laboreo y al particular régimen de lluvias y temperatura de cada campaña.

En primer lugar, el mejor establecimiento del cultivo de cebada observado en la 2ª campaña (% de emergencia más elevado y menor índice de emergencia) estaría, en principio, relacionado con unas condiciones ambientales más favorables durante la fase de germinación. Así, por un lado, las bajas temperaturas y el elevado número de días de helada que caracterizaron el mes de diciembre de 1990 (basta indicar, como ejemplo, que la temperatura mínima media de dicho mes en el ensayo E1 fue $-1,3^{\circ}\text{C}$) pudieron retardar la nascencia del cultivo en la 1ª campaña. Por otro lado, el mayor contenido de humedad y menor compactación del suelo al inicio de la 2ª campaña en el ensayo E3 pudieron ser también determinantes del mayor éxito en la nascencia del cultivo, especialmente en el sistema de año y vez.

Por lo que respecta a las diferencias entre tratamientos de laboreo durante el desarrollo temprano del cultivo, la tendencia observada en siembra directa a un mayor retraso en dicho desarrollo (menor altura, biomasa y LAI) en la 1ª campaña, podría estar relacionada con la mayor compactación del suelo en la cama de siembra (0-10 cm) en ese tratamiento. Esta observación es más patente en el ensayo E3, en el que una RP superior a 2 MPa en los primeros 5 cm del suelo, ya en la fase de germinación, pudo ser causa del retraso (25-27 días) en la nascencia final del cultivo en siembra directa. Masle (1992) demuestra cómo en trigo y cebada el desarrollo del área foliar y la tasa de transpiración se reducen, durante los primeros estadios de la fase vegetativa, como consecuencia de altos niveles de impedancia mecánica. Esta reducción, inicialmente independiente del estado hídrico y nutricional de la planta, parece responder a señales enviadas por las raíces para controlar los procesos metabólicos en el tallo (Masle y Passioura, 1987). En experiencias sobre respuesta del trigo al no laboreo también se ha comprobado que el menor desarrollo inicial del cultivo bajo este tratamiento está asociado a altos niveles de compactación (Chan et al., 1987) y que ello puede suponer una reducción del 33% en la producción de materia seca (Cornish y Lymbery, 1987).

A diferencia de lo observado en la 1ª campaña, en la 2ª no se aprecian diferencias entre tratamientos en el desarrollo inicial del cultivo. El hecho de que esto tenga lugar cuando la compactación del suelo bajo siembra directa es mayor que en la 1ª campaña (tanto en E1 como en E3), hace pensar que la compactación no es el único factor determinante de la respuesta del cultivo. Así, si consideramos los datos de las dos campañas se observa cómo una menor profundidad de siembra va acompañada de un menor desarrollo del cultivo. Esto es especialmente evidente bajo siembra directa, tratamiento en el que la mayor profundidad de siembra en la 2ª campaña podría haber

compensando el efecto negativo de la mayor impedancia mecánica detectado en la 1ª. En la literatura, profundidades de siembra menores en no laboreo se asocian, entre otros factores, a un aumento en la compactación, mayor presencia de restos vegetales y superficie de suelo irregular en el momento de la siembra (Erbach et al., 1986; Christian y Bacon, 1990; Thomas et al., 1990). En nuestro caso, dada la baja producción de residuos vegetales, el rango de profundidades de siembra registrado podría ser atribuido a una acción conjunta de los otros dos factores mencionados.

A la vista de los resultados obtenidos, el establecimiento y/o desarrollo inicial del cultivo parece ser menos favorable para profundidades de siembra inferiores a 3 cm. Una localización más superficial de la semilla sometería a ésta más directamente a la acción de condiciones ambientales adversas (deseccación, congelación, depredación, etc.). En las zonas más áridas de este estudio, tales factores resultarían potenciados por efecto del viento (cierzo), en particular en el caso de la siembra directa, en el que, además, los niveles más altos de compactación dificultarían el desarrollo radicular y, con ello, el acceso al agua y nutrientes disponibles a mayor profundidad. En dichas condiciones, un emplazamiento muy profundo de la semilla también podría ser desfavorable para un óptimo establecimiento y posterior desarrollo del cultivo: podría, por un lado, limitar el crecimiento de las raíces secundarias (Lambert et al., 1990) y, por otro, conducir a un debilitamiento de la plántula una vez establecida por un mayor gasto energético durante la fase de emergencia (Klaj y Hoogmoed, 1993). Estos últimos autores señalan una profundidad de siembra de 3 a 5 cm como la óptima para el establecimiento de un cultivo de mijo. En el caso del trigo, podría señalarse el trabajo de da Silva (1992) en el que se indica una menor emergencia del cultivo para profundidades de siembra superiores a 5,8 cm. En nuestro estudio, si bien los datos obtenidos no permiten establecer una profundidad máxima limitante, el hecho de que el retraso de 1-2 días observado en la emergencia del cultivo en el tratamiento de siembra directa, en las parcelas año y vez del ensayo E1 de la 2ª campaña, coincida con la mayor profundidad de siembra registrada, permite suponer que para profundidades superiores a 8 cm el cultivo podría, quizá, verse también afectado.

En general, se ha comprobado que los sistemas de laboreo que conducen a mejores rendimientos tienden a ser aquéllos en los que el desarrollo temprano del cultivo es más favorable (Erbach et al., 1986). Ahora bien, en nuestro estudio, y al igual que lo observado en otras experiencias (Erbach, 1982), las diferencias en producción entre años son mayores que las encontradas entre tratamientos de laboreo, lo que indica la importancia de las condiciones climáticas de cada campaña agrícola. Así, a pesar de que las condiciones de establecimiento del cultivo fueron mejores en la 2ª que en la 1ª campaña (ensayos E1 y E3), la ausencia de lluvias durante el período vegetativo en la 2ª condujo a una merma importante del rendimiento en el ensayo E3 e, incluso, a una falta de cosecha en el E1.

Según nuestras observaciones, el cultivo bajo siembra directa parece ser el más afectado por condiciones ambientales adversas. La restricción al desarrollo radicular que supondría una mayor compactación inicial del suelo en este tratamiento estaría potenciada, en mayor o menor grado, por la distribución de las lluvias durante la fase vegetativa del cultivo. En el caso del ensayo E1, si bien estas lluvias permitieron en la 1ª campaña un normal crecimiento del cultivo hasta la fase de espigado, el menor desarrollo (menor

producción de biomasa y LAI) y rendimiento final en siembra directa reflejan que no fueron lo suficientemente efectivas como para superar el efecto negativo inicial de una menor reserva de agua disponible y de una mayor compactación. Este último factor determinaría un desarrollo radicular más superficial y, con ello, una menor accesibilidad de la planta al agua y nutrientes disponibles en profundidad (Lipiec et al., 1991; Oussible et al., 1992), tal como parecen apoyar los modelos de extracción de agua obtenidos.

A diferencia del ensayo E1, la oportunidad y cuantía de las lluvias durante el ahijado del cultivo en el ensayo E3 de la 1ª campaña permite, por un lado, reducir los altos niveles de compactación iniciales bajo no laboreo, favoreciendo, quizá, una mayor profundidad de enraizamiento, y, por otro, aumentar la reserva de agua disponible para el cultivo en la fase de espigado. Todo ello se traduce en unas diferencias en desarrollo del cultivo entre tratamientos de laboreo mucho menores que las encontradas en el ensayo E1 y, en definitiva, en rendimientos similares. El hecho de que, como en nuestro caso, pueda tener lugar un normal desarrollo de la parte aérea del cultivo incluso después de un crecimiento radicular posiblemente afectado por la compactación, tal como indican Taylor y Brar (1991), ha sido también observado por otros autores en un cultivo de cebada bajo no laboreo (Malhi et al., 1992). En la 2ª campaña, en cambio, la ausencia de lluvias cortaron las expectativas de un buen rendimiento en siembra directa tras un muy favorable establecimiento del cultivo en este tratamiento. En esta 2ª campaña, una mejor reserva inicial de agua en el ensayo E3, con respecto al E1, fue, sin duda, el factor determinante de que el cultivo llegara a espigar y, con ello, a dar un cierto rendimiento en grano.

De lo referido hasta ahora podría concluirse, al igual que en otros estudios (Cox et al., 1990; Kirkegaard et al., 1992), que la respuesta del cultivo a la compactación en las condiciones de aridez de los ensayos E1 y E3 dependerá de la distribución de lluvias a lo largo de la campaña, de tal modo que, en años con déficit de agua durante la fase vegetativa, la compactación del suelo potenciará en el cultivo los efectos asociados al estrés hídrico.

La ausencia de diferencias en rendimiento entre tratamientos en los ensayos E2 y E4 en ambas campañas indicaría que la mayor compactación inicial en siembra directa no supone un factor limitante para la producción final. A tenor de la mayor actividad biológica observada en estos ensayos a lo largo de la experimentación, es posible que parte del sistema radicular del cultivo en siembra directa pudiera haberse desarrollado a través de un sistema de bioporos creados por lombrices, raíces en descomposición del cultivo anterior, etc. (Ehlers, 1989), no siempre detectados por el penetrógrafo.

En cuanto a las diferencias entre los sistemas de cultivo anual y cultivo de año y vez, hay que destacar la estrecha relación que en todos los casos guarda el desarrollo y rendimiento del cultivo con la eficiencia en el aprovechamiento del agua de lluvia durante el año de barbecho. Así, en el ensayo E2, a pesar de los bajos rendimientos obtenidos, una reserva de agua ligeramente mayor al inicio del ciclo en las parcelas año y vez, por debajo de 40 cm de profundidad, se refleja en una también ligera mayor producción en este sistema de cultivo. En el E3, con mayores diferencias entre sistemas de cultivo, un mejor desarrollo y producción final en las parcelas año-vez de los tratamientos de vertedera y chisel está asociado a una reserva inicial de agua más favorable en dichos tratamientos.

En la Figura 47 se presenta la relación obtenida por French (1978b) entre el agua adicional en el suelo, en el momento de la siembra, debida al barbecho y el incremento de rendimiento en trigo, en una rotación cereal-barbecho similar a la nuestra. Representados en dicha figura nuestros resultados, puede observarse cómo éstos siguen una distribución paralela a la de French, aunque por debajo de la curva de ajuste encontrada por el autor. Según lo ya comentado, la importancia que French (1978a) atribuye a las lluvias recibidas en los meses próximos al momento de las labores primarias del barbecho como factor determinante de la eficiencia de esta práctica y, en definitiva, del rendimiento final, también podría considerarse en nuestras condiciones experimentales. Así, en el ensayo E3, la ganancia de agua en los tratamientos de vertedera (58 mm) y chisel (43 mm) se aproxima a la que French (1978b) obtiene como valor medio (53 mm) para aquellos casos en los que las lluvias mencionadas superan los 100 mm, hecho que también se cumple en el ensayo E3. En este caso, y tal como muestra la situación de nuestros valores experimentales en la gráfica de la Figura 47, el aumento de la producción en las parcelas de año y vez (403 kg/ha) es inferior al valor medio de 605 kg/ha obtenido por French (1978b); esta menor respuesta podría atribuirse a una estación de crecimiento particularmente seca en la campaña 1991-92.

Una vez analizada la eficiencia del barbecho en el aprovechamiento del agua de lluvia y en la respuesta del cultivo, cabría cuestionarse, de nuevo, la idoneidad del sistema de año y vez en los secanos semiáridos de Aragón. La ausencia de una estación de lluvias bien definida, a diferencia de otras regiones áridas y semiáridas, y la incertidumbre asociada a la irregularidad de la distribución de las lluvias son factores que, en principio, no justificarían la conveniencia del barbecho como sistema de conservación de agua (McAneney y Arrúe, 1993).

Aún cuando los resultados del presente estudio son todavía insuficientes para establecer unas conclusiones definitivas a este respecto, a tenor de los obtenidos en el ensayo E3, podrían, no obstante, hacerse las siguientes consideraciones. Partiendo de la base de que la reserva de agua disponible en el suelo en el momento de la siembra se debe a la recarga que tiene lugar durante el barbecho, preferentemente por la precipitación acumulada en los meses de febrero y marzo, y que ésta en 1991 fue excepcionalmente elevada (153 mm) y de repetición muy poco probable (tan sólo en dos años del periodo 1961-89 se alcanzaron los 100 mm), cabe pensar, de igual modo, que la probabilidad de un incremento de producción superior al encontrado será también muy baja. Por otro lado, y de acuerdo con lo observado por French (1978b), en campañas agrícolas con una pluviometría más próxima a la normal durante el período vegetativo del cultivo el aumento en el rendimiento final ya no estaría tan estrechamente asociado a la reserva de agua en el momento de la siembra. El manejo del barbecho con sistemas de laboreo de conservación, tal como ha sido propuesto por otros autores para el secano aragonés (Costa, 1989; Fereres, 1989), por el momento sólo parece viable, al menos en las condiciones del ensayo E3, con técnicas de laboreo reducido y no a través del no laboreo.

En cualquier caso, la decisión sobre la conveniencia o no del barbecho debería basarse no sólo en aspectos relacionados con el balance de agua sino también en otros concernientes al control de malas hierbas, producción y manejo de residuos, riesgos de erosión, aprovechamiento ganadero, costes de producción, fertilidad y estado sanitario del suelo. Con respecto a este último aspecto, en el desierto de Negev, Israel, Amir et al.

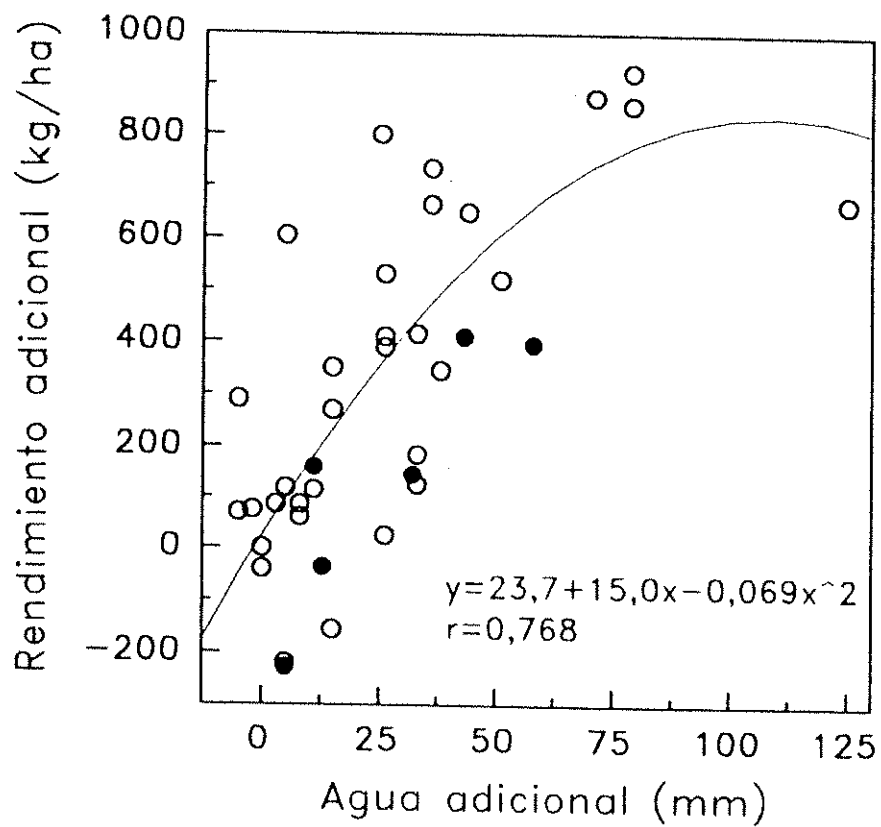


Fig. 47. Relación entre el agua adicional almacenada en el suelo el día de la siembra por efecto del barbecho y el correspondiente incremento en rendimiento encontrada por French (1978b) para un cultivo de trigo (o). En la gráfica se incluyen los resultados obtenidos en el presente estudio para un cultivo de cebada (●).

(1991) encuentran que el mayor rendimiento en trigo tras el año de barbecho está asociado a un mayor control de los patógenos del suelo y no a un mejor aprovechamiento del agua de lluvia; en este estudio, el contenido de agua disponible en el suelo el día de la siembra fue nulo en 8 de 10 años de experiencia, recibándose durante el periodo de crecimiento del cultivo, prácticamente, los 231 mm de precipitación anual.

Si, tal como indicábamos al comienzo de esta discusión, son numerosos y complejos los factores ambientales que afectan al cultivo, no menos compleja es la respuesta del rendimiento en grano a dichos factores, función de las variaciones en sus componentes (Fischer, 1983). La cuantificación de estas variaciones podría facilitar la interpretación de dicha respuesta a las modificaciones de las propiedades del suelo inducidas por el laboreo en nuestro estudio. En este sentido, se ha tratado de identificar qué componentes del rendimiento son responsables de las diferencias de producción encontradas entre tratamientos de laboreo y sistemas de cultivo.

Con este objetivo, se establecieron relaciones entre los diferentes componentes de la producción (rendimiento en grano, espigas/m², granos/espiga y peso del grano) y otras variables asociadas (biomasa aérea total, plantas/m² e hijuelos/planta). Dada la aparente relación entre el LAI máximo y el rendimiento, tal como demuestran Agenbag y Maree (1991) en trigo en una experiencia de laboreo, se tuvo en cuenta, también, el LAI correspondiente a la fase de espigado. En la Tabla 41 se presentan las matrices de correlación obtenidas para los ensayos E1 (1ª campaña) y E3 (1ª y 2ª campañas). Estas correlaciones se han establecido conjuntando los datos de los tres tratamientos de laboreo tras comprobar que la respuesta del rendimiento en grano a las diferencias en aquellos componentes más relacionados era similar en los tres casos. Aunque en el ensayo E3 no se obtuvieron en la 1ª campaña diferencias significativas en producción entre tratamientos, se ha considerado oportuno incluirlo en el análisis con el fin de poder contrastar los resultados de las dos campañas experimentales.

El análisis realizado pone de manifiesto, en primer lugar, que en todos los casos el rendimiento en grano está correlacionado positivamente con el número de espigas/m² y, especialmente, con el número de granos/espiga. Así, la mayor producción en el tratamiento de vertedera en el ensayo E1 de la 1ª campaña se explica por el valor más elevado de ambos parámetros en ese tratamiento (Tabla 31). De igual modo, el menor rendimiento de la siembra directa en la 2ª campaña del ensayo E3, tanto en anual como en año y vez, es debido a un menor número de espigas/m² y, en particular, a un menor número de granos/espiga (Tabla 33). Por tanto, cabe pensar que el número de granos/m² (granos/espiga x espigas/m²) sea el principal factor determinante de las diferencias en producción entre tratamientos. Así lo demuestra la estrecha relación entre el número de granos/m² y el rendimiento en grano (Fig. 48). En la 1ª campaña, mientras en el ensayo E1 la distribución de puntos permite diferenciar el tratamiento de vertedera de los tratamientos de laboreo de conservación, en el ensayo E3 esto no es posible. En cambio, en la 2ª campaña de este último ensayo se aprecia muy claramente la respuesta menos favorable de la siembra directa; en esta gráfica los puntos situados en la parte superior corresponden a los tratamientos de vertedera y chisel en el sistema de año y vez, explicando, de nuevo, cómo las mayores producciones en estos casos son debidas a un mayor número de granos/m² (Tabla 33).

Tabla 41. Matrices de correlación entre rendimiento en grano, componentes del mismo y otras variables asociadas en los ensayos E1 y E3.

	Rendimiento en grano	Granos por espiga	Espigas por m ²	Plantas por m ²	Hijuelos por planta	Peso del grano	Biomasa aérea total	LAI ¹
Ensayo E1, Campaña 1990-91.								
Rendimiento en grano	1							
Granos por espiga	0,758 **	1						
Espigas por m ²	0,571 **	ns	1					
Plantas por m ²	ns	ns	ns	1				
Hijuelos por planta	ns	0,345 *	ns	-0,370 *	1			
Peso del grano	ns	ns	-0,334 *	ns	ns	1		
Biomasa aérea total	0,707 **	0,473 **	0,584 *	ns	0,363 *	ns	1	
LAI	0,555 **	0,430 **	ns	ns	0,397 **	ns	0,766 **	1
Ensayo E3, Campaña 1990-91.								
Rendimiento en grano	1							
Granos por espiga	0,627 **	1						
Espigas por m ²	0,505 **	ns	1					
Plantas por m ²	ns	-0,391 **	0,751 **	1				
Hijuelos por planta	0,506 **	0,327 *	ns	ns	1			
Peso del grano	ns	ns	ns	ns	ns	1		
Biomasa aérea total	0,460 **	0,514 **	ns	ns	ns	ns	1	
LAI	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1
Ensayo E3, Campaña 1991-92.								
Rendimiento en grano	1							
Granos por espiga	0,902 **	1						
Espigas por m ²	0,622 **	ns	1					
Plantas por m ²	ns	ns	0,613 **	1				
Hijuelos por planta	ns	ns	ns	ns	1			
Peso del grano	0,808 **	ns	0,462 **	ns	ns	1		
Biomasa aérea total	0,977 **	0,866 **	0,645 **	ns	ns	0,817 **	1	
LAI	0,631 **	0,639 **	0,332 *	ns	ns	0,662 **	0,642 **	1

¹LAI correspondiente a la fase de espigado del cultivo.

* significativo para p<0,05

** significativo para p<0,01

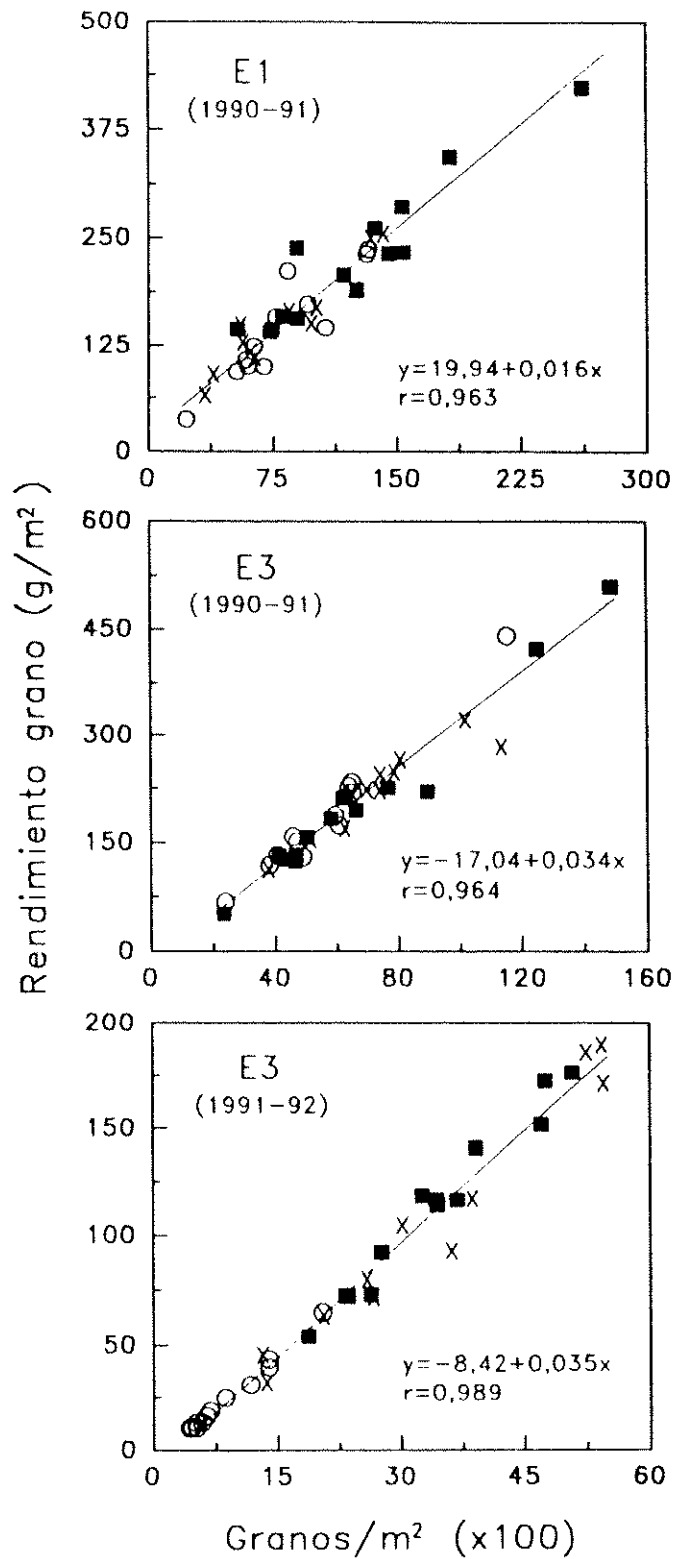


Fig. 48. Relación entre número de granos y rendimiento en grano del cultivo de cebada en los ensayos E1 y E3 (■, vertedera; x, chisel; ○, siembra directa).

Por otro lado, sólo en la 2ª campaña el rendimiento en grano aparece correlacionado positivamente con el peso del grano en el ensayo E3 (Tabla 41). Este componente, junto al número de granos/espiga y de espigas/m², contribuye al menor rendimiento en grano observado en el tratamiento de siembra directa en el sistema de año y vez (Tabla 33).

De las distintas revisiones que se han realizado hasta la fecha sobre la influencia de los factores ambientales en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de cereales, habría que destacar la de Gallagher et al. (1983), dedicada específicamente al cultivo de cebada. En esta revisión se pone de relieve cómo una situación de déficit hídrico reduce tanto el número de granos/espiga como el de espigas/planta y, en cambio, no afecta (caso de la 1ª campaña), reduce (2ª campaña) e, incluso, aumenta el peso del grano. Una de las razones de la respuesta dispar de este último componente del rendimiento puede estar en la capacidad de la planta para utilizar sus reservas de carbohidratos, almacenadas principalmente en el tallo (Gallagher et al., 1983). En campañas secas de climas templados, Austin et al. (1980) señalan cómo estas reservas pueden ser responsables de casi la mitad del peso del grano; más recientemente, Richards y Townley-Smith (1987) estiman que en condiciones de déficit hídrico antes de la antesis, el 60% de la masa del grano en trigo proviene de las reservas presentes en la planta en antesis. En cualquier caso, la influencia de la sequía sobre este componente depende de la intensidad de la misma y del momento del ciclo en que tiene lugar. NeSmith y Ritchie (1992) observan cómo el rendimiento de un cultivo de maíz es afectado negativamente por un déficit hídrico antes de la antesis a través de una reducción en el número de granos bien desarrollados.

Gallagher et al. (1983) señalan la importancia de la producción de hijuelos por su contribución al crecimiento del cultivo (mayor área foliar y, por tanto, mayor intercepción de radiación) y al rendimiento en grano (mayor producción de espigas/planta). En el presente estudio, en general, no se ha obtenido una relación clara entre el número de hijuelos/planta y el rendimiento en grano (Tabla 41), lo que es debido a que no todos los hijuelos llegan a producir espigas. Mientras que no se observaron diferencias entre tratamientos de laboreo en cuanto a número de hijuelos/planta, sí fue diferente el porcentaje de los finalmente fértiles. Así, en el ensayo E1 de la 1ª campaña, con un valor medio de 2,3 hijuelos/planta, el número de los fértiles representó un 72% en el tratamiento de vertedera y un 29% en el de siembra directa. En el E3, mientras que en la 2ª campaña se observó una menor producción de hijuelos/planta (0,14 y 0,24 en los sistemas anual y año y vez, respectivamente), con un porcentaje de abortos del 100% en todos los tratamientos, en la 1ª, con un mayor número de hijuelos/planta (0,46), el porcentaje de abortos se redujo al 54%. La peor respuesta del cultivo en la 2ª campaña hay que atribuirle, de nuevo, a la ocurrencia de una temprana sequía y confirma el efecto negativo que un déficit hídrico severo tiene sobre el número máximo de hijuelos/planta y la tasa de abortos (Gallagher et al., 1983). Diferencias en este tipo de respuesta entre campañas y tratamientos de laboreo, para una misma variedad de trigo, también han sido observadas por Chevalier y Ciha (1986). Por último, la correlación negativa obtenida entre hijuelos/planta y plantas/m² (E1, 1ª campaña) indicaría un cierto grado de compensación entre estas dos variables en la respuesta del cultivo a las condiciones ambientales, al igual que la que puede tener lugar entre espigas/m² y peso del grano (E1, 1ª campaña) y entre plantas/m² y granos/espiga (E3, 1ª campaña).

Otro aspecto a destacar es la relación existente entre el LAI máximo y el rendimiento

en grano en los ensayos en los que se obtuvieron diferencias en producción (Tabla 41). Así, en la 1ª campaña del ensayo E1 el mayor rendimiento en vertedera se corresponde con el LAI más elevado (Fig. 39B); de la misma manera, en la 2ª campaña del ensayo E3, el menor rendimiento en siembra directa, especialmente en año y vez, coincide con un menor LAI (Fig. 43B). Algunos autores (Anderson, 1992; Connor et al., 1992), han encontrado en trigo una relación lineal entre la biomasa total de la parte aérea en antesis y el número de granos/m² ($r^2=0,53-0,69$). Relaciones similares también se han obtenido en el caso de E1, entre número de granos/m² y biomasa en espigado ($r^2=0,39$; $p<0,01$) y LAI ($r^2=0,32$; $p<0,01$); en E3, estas relaciones se mejoran a través de expresiones potenciales, tanto en el caso de la biomasa ($r^2=0,56$) como en el del LAI ($r^2=0,57$). Estos resultados confirman que el LAI máximo puede considerarse, en cierto modo, como indicador de las diferencias en producción, a través, en nuestro caso, del número de granos/m², componente más determinante del rendimiento final.

Según Fischer (1987), la traducción de los efectos del laboreo sobre la producción de biomasa en efectos sobre rendimiento final podría explicarse a través de los efectos sobre el índice de cosecha. Se ha comprobado, en el caso de cereales de secano, que este índice depende en gran medida del agua disponible para el cultivo justo antes y después de la antesis (Richards y Townley-Smith, 1987). En el presente estudio, los valores del índice de cosecha estarían, en principio, de acuerdo con la evolución de la reserva de agua disponible en el suelo en ambas campañas experimentales. Así, en el ensayo E3, índices de cosecha en torno a 0,5 en la 1ª campaña reflejarían condiciones de disponibilidad de agua adecuadas con anterioridad a la antesis en todos los tratamientos de laboreo. En cambio, en la 2ª campaña en este mismo ensayo, condiciones de déficit hídrico desde el inicio del período de crecimiento se traducen en un descenso del índice de cosecha, especialmente en el caso de la siembra directa. Salvo en este último caso, los valores del índice de cosecha en la 2ª campaña no reflejan, hasta el grado que cabría esperar, el efecto de unas condiciones muy limitantes; hay que tener en cuenta que la sequía afectó al cultivo en su fase vegetativa, con una reducción importante de su biomasa ya antes del espigado.

5.4. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA POR EL CULTIVO SEGUN SISTEMA DE LABOREO

En conjunto, no se observan diferencias importantes entre tratamientos de laboreo en cuanto al agua evapotranspirada (ET) entre siembra y cosecha, y ello, a pesar de las diferencias en desarrollo y rendimiento de cultivo ya comentadas para algunos de los ensayos. Ahora bien, restringiendo el análisis a períodos más cortos, las diferencias en ET entre tratamientos sí están de acuerdo, en términos generales, con las distintas pautas de crecimiento observadas. Así, en los casos con mayores diferencias en rendimiento (E1 y E3), es a partir de principios de encañado cuando los menores valores de ET en siembra directa comienzan a ser significativos, lo que podría reflejar la ineficacia de este tratamiento para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo en una fase de máximo desarrollo del mismo, posiblemente por una menor disponibilidad de agua inicial y/o un menor desarrollo radicular, tal como se discutió en el apartado anterior. En la literatura existen ejemplos de esta respuesta en no laboreo, tanto por problemas de impedancia mecánica, caso del maíz (Sharma, 1991), como por una escasa disponibilidad de agua ya desde la siembra -asociada a una falta de residuos del cultivo anterior en superficie-, en estudios realizados con sorgo (Thomas et al., 1990).

De todo lo anterior se deduce la importancia que tiene la distribución del uso del agua a lo largo del ciclo del cultivo sobre el rendimiento del mismo. Son diversos los autores que analizan esta relación, con especial hincapié en la ET correspondiente a los períodos anterior y posterior a la fecha de antesis (French y Schultz, 1984; Anderson, 1992; Gregory et al., 1992b). Para ambientes en los que el agua es un factor limitante, Passioura (1983) sugiere que la ET pre-antesis debe ser al menos el doble que la ET post-antesis para optimizar el rendimiento en grano. En el presente estudio, en un intento de aproximación a esta relación, se ha establecido la razón ET pre-espigado/ET post-espigado, tanto para la 1ª campaña (E1 y E3) como para la 2ª (E2 y E3). Las cifras obtenidas, similares entre tratamientos de laboreo y ensayos, permiten asignar a cada una de las campañas un valor medio de esta proporción: 4,1:1 para la 1ª campaña y 1,4:1 para la 2ª. La diferente distribución en el uso del agua, permite evidenciar claramente, una vez más, las desfavorables condiciones de la 2ª campaña, en la que no se alcanza el cociente óptimo propuesto por Passioura (1983). Este cociente cobra mayor importancia si se tiene en cuenta su relación con la reserva de carbohidratos en antesis. Anderson (1992) obtiene una clara relación entre la contribución de esta reserva a la producción de grano y el índice de Passioura. En este sentido, los aceptables rendimientos obtenidos en la 1ª campaña, a pesar de una falta de lluvias tras espigado, pueden ser debidos a una mayor disponibilidad de carbohidratos en antesis y, por tanto, a una mayor contribución a la producción de grano. Por el contrario, una ET en pre-espigado marcadamente inferior en la 2ª campaña permite suponer una baja reserva de carbohidratos y, consecuentemente, una contribución de éstos a la formación de grano también muy baja. En este caso, tampoco las lluvias recibidas tras espigado han resultado eficaces para un buen rendimiento final. Para un cultivo de trigo, French y Schultz (1984) no encuentran ninguna relación entre rendimiento en grano y uso del agua tras antesis y concluyen que en sus condiciones de ensayo, con tasas de evaporación de 5-6 mm/día desde antesis hasta la fase pastosa-blanda del grano y superiores hasta la cosecha, el principal factor determinante del rendimiento es el crecimiento y el uso del agua por el cultivo antes de antesis. Esta sería la conclusión a la que podríamos llegar en nuestro caso, con condiciones climáticas similares a las del

estudio de French y Schultz (1984). Ello estaría apoyado por la relación entre ET hasta espigado (X, mm) y rendimiento en grano (Y, Mg/ha) encontrada en el ensayo E3, para el que se dispone de la información más completa, conjuntando los datos de las dos campañas experimentales ($Y = -1,73 + 0,020X$; $r=0,826$).

El mayor uso del agua en el sistema de cultivo de año y vez corresponde a aquellos casos en los que, precisamente, se consiguieron los mayores rendimientos; tal como se discutió anteriormente, éstos están asociados a una mayor reserva de agua en el suelo en el momento de la siembra tras el año de barbecho. En el caso del ensayo E3, en el que existen diferencias significativas entre tratamientos de laboreo y sistemas de cultivo, la menor ET corresponde al tratamiento de no laboreo en año y vez. A este mismo resultado llegan otros autores (Thomas et al., 1990; Gibson et al., 1992; Radford et al., 1992) quienes, en ensayos sobre comparación de sistemas de manejo de barbecho, asocian el menor uso del agua por el cultivo bajo no laboreo a un menor almacenamiento de agua en la siembra, consecuencia de una insuficiente presencia de residuos en superficie. Los resultados obtenidos en el presente trabajo subrayan la importancia que tiene, como complemento a la lluvia estacional, una adecuada reserva de agua en el momento de la siembra, más efectiva para el desarrollo del cultivo al estar sometida en menor grado a pérdidas por evaporación.

Desde el punto de vista de la eficiencia en el uso del agua en sistemas agrícolas de secano, Cooper y Gregory (1987) señalan tres vías posibles para mejorar tal eficiencia en la región mediterránea: aumento de la eficiencia en la transpiración, reducción de las pérdidas de agua por evaporación e incremento de la cantidad de agua disponible para la planta. Ahora bien, ya que no es previsible que pueda alterarse de manera sustancial la eficiencia de la transpiración, salvo a través de un rápido desarrollo y crecimiento del cultivo en los meses de invierno, con bajos valores de déficit de presión de vapor (Cooper et al., 1987a), el laboreo de conservación podría mejorar la eficiencia en el uso del agua a través de las dos últimas opciones: reducción de la evaporación por una mayor presencia de restos vegetales en superficie y aumento de la reserva de agua en el suelo a través de una mejora en la capacidad de infiltración. De igual modo, y siempre que suponga un eficiente aprovechamiento del agua de lluvia, el barbecho constituiría otra práctica agrícola de interés desde este punto de vista.

De los dos sistemas de laboreo de conservación ensayados en el presente estudio, sólo el laboreo con chisel mantiene en todos los ensayos niveles de eficiencia en el uso del agua -tanto para la producción de materia seca total (EUAB) como de grano (EUAG)- comparables a los obtenidos con laboreo tradicional. En cambio, la respuesta al no laboreo varía según los ensayos; tras dos campañas experimentales, la siembra directa podría considerarse viable tan sólo en dos de los sitios de ensayo, E2 y E4, si bien el carácter provisional de esta observación es mucho más marcado en el primer caso, dados los bajos valores de eficiencia obtenidos. Por otra parte, la práctica del barbecho, cuestionada ya desde el punto de vista del aprovechamiento del agua de lluvia, no conduce a una mejora en la eficiencia en el uso del agua, tanto bajo manejo tradicional como con laboreo de conservación.

El rango de valores de EUAB (3,0-35,2 kg/ha.mm) como de EUAG (0,7-17,0 kg/ha.mm) encontrado en el presente estudio es consistente con los valores señalados en

la literatura. Así, Gregory et al. (1992b), trabajando con tres variedades diferentes de cebada, encuentran un rango de valores de EUAB y EUAG de 21,3-30,3 kg/ha.mm y 8,7-13,7 kg/ha.mm, respectivamente. En Australia del Sur, French (1978b), con una sola variedad de trigo ensayada durante cinco campañas y en cinco localidades con muy diferentes condiciones climáticas y edáficas, obtiene valores de EUAB comprendidos entre 4,2 y 33,5 kg/ha.mm y de EUAG entre 0,8 y 11,4 kg/ha.mm. Por último, también podría citarse el rango de 4,5-15,8 kg/ha.mm para EUAG señalado por Perry (citado por Gibson et al., 1992) para cereales en general, tanto en Australia como en otras regiones.

Según lo hasta aquí expuesto, podría afirmarse que la ET total no permite evidenciar tan claramente como la eficiencia en el uso del agua los efectos debidos a los distintos tratamientos de laboreo, sitios de ensayo e, incluso, campañas experimentales. Por ello, para poder comparar con más objetividad los valores de eficiencia obtenidos es necesario considerar, en cada caso, el orden de magnitud de los dos componentes del uso del agua, E y T. Esta información permitirá, además, evaluar la capacidad del laboreo de conservación para reducir las pérdidas de agua por evaporación en las condiciones ambientales de los distintos sitios de estudio.

Los valores de T y de E, deducidos estos últimos a partir de ET y T (Tabla 37) muestran una importante variabilidad no sólo entre tratamientos de laboreo sino también entre ensayos y campañas experimentales. Una primera valoración del conjunto de estos resultados permite distinguir tres situaciones diferentes. En primer lugar, la que representaría el ensayo E4, donde coinciden una cantidad de agua transpirada más elevada y una menor pérdida de agua por evaporación, que en ningún caso supera el 30% de la ET, tal como cabría esperar de unas condiciones climáticas y edáficas más favorables en esa zona de ensayo. Una segunda situación correspondería a los ensayos E1 y E3, en los que la T se reduce considerablemente y la E representa ya, por término medio, un 40% de la ET en el primer ensayo (campaña 1990-91) y un 60% en el segundo. Por último, la tercera situación sería la del ensayo E2, en la que un menor desarrollo del cultivo en ambas campañas y, consecuentemente, una mayor superficie de suelo desnudo han podido favorecer aún más las pérdidas de agua por evaporación, que en este caso alcanzan un 80%. Hay que tener en cuenta que en este último ensayo, aparte de una menor fertilización en la 1ª campaña y ninguna en la 2ª, el desarrollo del cultivo se vió limitado en la 2ª campaña por las condiciones de sequía que la caracterizaron y en la 1ª por la ausencia de lluvias efectivas tras la siembra durante un período de tiempo prolongado.

En general, las cifras de E obtenidas, que incluyen la evaporación del agua interceptada por el cultivo y la transpiración por malas hierbas, están dentro de las señaladas por otros autores en ambientes comparables a los nuestros. Así, el rango de valores de E/ET correspondientes a las dos primeras situaciones antes señaladas estaría próximo al mencionado por Gregory et al. (1992b) para ambientes de tipo mediterráneo en Australia (35-60%). En este trabajo, en un ensayo de cebada y una pluviometría media anual de 380 mm, estos autores obtienen valores de E que oscilan entre un 40% y un 52%. No obstante, estas cifras pueden superarse en otras regiones semiáridas. Así, Cooper et al. (1987b) estiman en un 75% las pérdidas por evaporación en un cultivo de cebada sin fertilización en el norte de Siria, cifra próxima a las obtenidas en el presente estudio para el ensayo E2. Este mismo autor señala que en zonas con producciones medias de 600-800 kg/ha, el valor de T/ET puede ser tan sólo de un 15%, cifra, de nuevo, próxima a las

obtenidas en el ensayo E2. En otros estudios, también se ha puesto de manifiesto cómo la aplicación de fertilizantes puede reducir la relación E/ET y, por tanto, aumentar la eficiencia en el uso del agua, tanto en ambientes semiáridos como húmedos. En el primer caso, podría citarse el trabajo de Allen (1990) quien, en una experiencia en el norte de Siria, con cebada de secano en rotación año y vez y una precipitación media anual de 283 mm, estima que un valor de E/ET de un 77% en ausencia de fertilizante se reduce a un 67% con fertilizante. Como ejemplo del segundo caso, podría citarse la experiencia llevada a cabo en Suecia por Johnsson y Jansson (1991), también con cebada en cultivo anual y una pluviometría media anual de 600 mm (próxima a la del ensayo E4), quienes obtienen valores de E/ET del 43% y 60% con y sin fertilización, respectivamente.

Los resultados encontrados en el presente estudio muestran, claramente, cómo en los ensayos más áridos la E puede ser el principal componente de la ET. Globalmente, y a excepción del ensayo E4, la E en la 1ª campaña representó un 60% de la ET estimada hasta la fase de formación de grano y un 70% en la 2ª. Estas cifras están de acuerdo con las estimaciones recientes de McAneney y Arrúe (1993), quienes, utilizando, al igual que en nuestro caso, la aproximación de Tanner y Sinclair (1983), cifran en un 70% las pérdidas por evaporación para el cultivo de trigo en sistema de año y vez, en una zona de la comarca de Monegros (Zaragoza) situada geográficamente entre los ensayos E1 y E3.

El valor medio de E/ET representa en nuestros ensayos más áridos una pérdida de agua por evaporación de 101 mm, lo que significaría que para poder obtener alguna producción se debería disponer de un volumen de agua superior a dicha cantidad. Esta coincide con las señaladas por otros autores para otras regiones cerealistas en las que el agua también constituye un factor limitante. Así, para el cultivo de trigo, Campbell et al. (1992), en el suroeste de Saskatchewan (Canadá), encuentran un valor umbral de 100 mm y French y Schultz (1984), en el sur de Australia, de 110 mm; en nuestra región, 100 mm es también la cifra estimada por McAneney y Arrúe (1993).

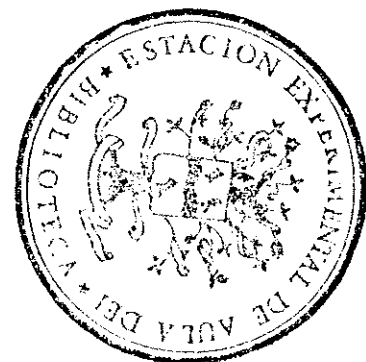
Ampliando el período del uso del agua hasta la cosecha, la E apenas modifica su contribución a la ET (63%) en la 1ª campaña, mientras que sí lo hace en la 2ª, en la que alcanza el 80%. Esta observación refleja cómo las lluvias recibidas al final del ciclo del cultivo en la 2ª campaña resultaron ineficaces para el rendimiento final, al ser perdidas por evaporación.

Por otro lado, los valores de eficiencia del agua transpirada para la producción de grano (EATG) no parecen mostrar las diferencias entre tratamientos de laboreo, sitios de ensayo e, incluso, campañas experimentales evidenciadas por la eficiencia en el uso del agua total (EUAG). Ello confirma el carácter conservativo de la eficiencia en la transpiración ya comentado, la cual sólo se verá afectada cuando concurren otros factores limitantes, como pueden ser, por ejemplo, problemas de impedancia mecánica que impidan un suministro normal a la planta no sólo de agua sino también de nutrientes, tal como se ha comentado con anterioridad. Esta podría ser la explicación de los bajos valores de EATG encontrados para el tratamiento de siembra directa en el ensayo E3 de la 2ª campaña.

En conjunto, los valores de EATG (7,4-23,8 kg/ha.mm) y EATB (33,3-62,4 kg/ha.mm) son del mismo orden que los indicados por otros autores. Así, para EATG,

Gregory et al. (1992b) señalan para cebada un rango de 17,9-23,1 kg/ha.mm; en el caso del trigo, podría citarse también el trabajo de French y Schultz (1984), quienes recogen valores de 15,8 a 23,4 kg/ha.mm, y, más recientemente, el de Connor et al. (1992), con un rango de 8,6-32,5 kg/ha.mm. Asimismo, los valores de EATB son consistentes con los encontrados para cebada en la literatura consultada (Cooper y Gregory, 1987; Day et al., 1987; Gregory et al., 1992b), los cuales oscilan entre 33 y 60 kg/ha.mm.

Finalmente, y de acuerdo con los valores de E estimados en cada caso, podría concluirse que el laboreo de conservación no puede considerarse como estrategia para la mejora de la eficiencia en el uso del agua en nuestras condiciones de ensayo ya que no consigue reducir las pérdidas de agua por evaporación, llegando incluso a aumentarlas en no laboreo. A igual conclusión podría llegarse en el caso de la práctica del barbecho en el sistema de año y vez, tanto bajo laboreo tradicional como de conservación. Desde este punto de vista, una mayor eficacia del laboreo de conservación y del barbecho vendría, quizá, a través de una mejora de las prácticas agronómicas a ellos asociadas, tales como control de residuos, aplicación correcta de fertilizantes, utilización de variedades de desarrollo más temprano, densidad de siembra y espacio entre líneas óptimos, entre otros. Sin embargo, dado que una gran proporción de los residuos vegetales son utilizados como alimento del ganado, un mantenimiento adecuado de los mismos en la superficie del suelo sólo podría plantearse a través de una conveniente reforma de los actuales sistemas de cultivo.



5.5. EVALUACION DEL ESTADO ESTRUCTURAL DE LA CAPA ARABLE TRAS EL PERIODO EXPERIMENTAL

Históricamente, un buen estado físico del suelo para la producción agrícola ha estado frecuentemente asociado a un laboreo intensivo. Si bien el laboreo puede suponer a corto plazo una mejora de dicho estado físico, a largo plazo puede conducir a una degradación de la estructura del suelo (Karlen et al., 1990). De ahí el interés de comprobar en qué medida las técnicas de laboreo de conservación pueden asegurar, en suelos susceptibles a la erosión, el mantenimiento de un buen estado estructural.

Tras un período experimental de dos años, en ninguno de los cuatro sitios de ensayo el laboreo de conservación ha supuesto modificación significativa alguna en el **estado de agregación** del suelo -caracterizado a través de la distribución de tamaños de agregados, del diámetro medio ponderado (DMP) y del índice de agregación (IA)-, ni en su estratificación en la capa arable. A una tasa lenta de mineralización de la materia orgánica, especialmente en las zonas de ensayo de mayor aridez, hay que añadir una baja producción y acumulación de residuos vegetales en esas zonas, por lo que es lógico pensar que el aumento de carbono orgánico debido a las prácticas de laboreo de conservación sea aún insuficiente como para inducir cambios en el estado de agregación del suelo. En ambientes más húmedos, con un contenido de materia orgánica en el suelo superior al 3%, Weill et al. (1988) señalan que son necesarios al menos 3-4 años de laboreo de conservación para apreciar un incremento en dicho contenido y, por tanto, una mejora en el estado de agregación y estabilidad de agregados. Por otra parte, para un mismo período de ensayo, la influencia del clima es decisiva en la modificación de la estructura del suelo. Así, por ejemplo, mientras en una experiencia de 10 años de laboreo de conservación, con una pluviometría anual de 650 mm, dicha práctica aumenta el contenido de materia orgánica y, con ello, el DMP (Hermawan y Cameron, 1993), en otra, también con 10 años de ensayo pero en un ambiente más árido, el incremento de carbono orgánico fue mínimo, con muy pequeñas diferencias en la estabilidad de agregados (Carter y Mele, 1992).

La tendencia observada en el tratamiento con chisel hacia menores valores de DMP y de IA en los ensayos más áridos, especialmente en los primeros 5 cm, estaría relacionada con la formación de terrones y agregados de suelo de menor tamaño que los producidos con vertedera. Este supuesto estaría apoyado por los resultados de una experiencia llevada a cabo en parcelas contiguas a las del ensayo E1, en la que se comprobó que el diámetro medio de los terrones de suelo inferiores a 44 mm obtenidos tras una labor con vertedera fue 12,4 mm mientras que con chisel fue 10,2 mm. En este mismo sentido, en un estudio sobre la influencia de la precipitación y el laboreo en la distribución de tamaños de agregados, Zobeck y Popham (1990) encuentran, en un suelo de textura gruesa, cómo el arado de chisel conduce en todos los ensayos a un tamaño medio de agregados significativamente menor que el correspondiente al arado de vertedera. En el presente estudio, el tratamiento con chisel es, asimismo, el que, aparentemente, puede dar lugar a un mayor porcentaje de agregados <0,84 mm y, por lo tanto, a un estado estructural del suelo más susceptible a la erosión eólica. Por ello, sería del mayor interés poder confirmar a más largo plazo esta tendencia. Si así fuera, habría que valorar este efecto, en principio negativo, frente al positivo que supone una respuesta de suelo y cultivo (reserva de humedad, resistencia a la penetración, rendimiento y eficiencia en el uso del agua) similar a la del laboreo tradicional y mejor que la encontrada en no laboreo, tal como se ha ido

señalando en anteriores apartados.

Ahora bien, un menor porcentaje de agregados $>0,84$ mm en un determinado tratamiento de laboreo no significa, necesariamente, que las pérdidas de suelo por erosión eólica deban ser mayores si existe una adecuada cubierta de residuos en la superficie (Unger y Cassel, 1991). En nuestro caso de estudio, y al margen del comportamiento ya señalado para el chisel, el hecho de que en los ensayos más áridos dicho porcentaje sea, aproximadamente, un 34% inferior al del ensayo E4, confirma la mayor fragilidad de los suelos en dichos ensayos y la necesidad en los mismos de un adecuado manejo de residuos. La mejor condición de la estructura del suelo en el ensayo E4, caracterizada, además, por los valores más altos de DMP y de IA y por cierta estratificación de los mismos con la profundidad, estaría asociada a una mayor pluviometría, un suelo de textura más fina y una mayor producción e incorporación anual de residuos vegetales.

Los mismos factores determinantes en el ensayo E4 de unas condiciones de agregación más favorables frente a los otros ensayos, son los que también favorecen una mayor actividad biológica, especialmente bajo laboreo de conservación. El estudio de **macroporosidad** realizado en ese ensayo ha puesto de manifiesto cómo, efectivamente, dos años de laboreo de conservación han sido suficientes para mostrar tal comportamiento. El hecho de que en los tratamientos de laboreo de conservación se haya registrado el mayor número y área de macroporos hay que atribuirlo, sin duda, a la acción de la fauna del suelo. En el caso del tratamiento de siembra directa el incremento de porosidad se debe a la fracción de macroporos >5 mm, lo que permite afirmar, casi con toda seguridad, que ello es debido a una mayor actividad de lombrices. En el caso del chisel, en el que el incremento de macroporosidad es debido a poros de 2 a 5 mm, se observó una menor presencia de lombrices, por lo que otro tipo de fauna (hormigas, arañas, etc.) puede estar también involucrado en la formación de estos bioporos.

Una mayor población de lombrices en laboreo de conservación ha sido comprobado también en otros estudios, tanto desde el punto de vista de su biomasa (Haukka, 1988) como del número de macroporos a ellas asociados, en particular en no laboreo (Ehlers, 1975; Edwards et al., 1988). En este caso, el mayor número de macroporos y la también mayor continuidad de los mismos determinan un incremento en la tasa de infiltración de agua (Ehlers, 1975), que puede oscilar entre 2 y 15 veces más, de acuerdo con los ejemplos recogidos por Edwards et al. (1988). Por otro lado, Ehlers (1989) señala cómo en no laboreo las raíces pueden aprovechar los canales de lombrices y extraer agua a más profundidad. En nuestro caso de estudio, aunque no se determinó la continuidad de los macroporos >5 mm, la gradual reducción del número de éstos con la profundidad, así como la observación in situ de canales verticales, permite suponer que la mayor parte de los contabilizados a 25 cm tenían conexión con la superficie. Esto explicaría porqué el volumen de agua almacenada a lo largo de la 2ª campaña fue similar en los tres tratamientos de laboreo, a pesar de una mayor compactación en el de siembra directa. Asimismo, tal como se comentó anteriormente, el sistema radicular en este tratamiento, posiblemente y gracias a estos bioporos, pudo superar esta mayor compactación, alcanzando un grado de desarrollo menos limitado que en otros ensayos.

A diferencia de lo señalado para los macroporos >2 mm, en lo que atañe a la fracción entre 2 y 0,2 mm, responsable también de la aireación y del drenaje rápido y

medio, no se observaron diferencias tan marcadas entre tratamientos. Asumiendo que esta fracción está formada de manera importante por canales de raíces, la similitud entre tratamientos podría explicarse por un período de ensayo aún insuficiente para que se genere este tipo de macroporos en los tratamientos de laboreo de conservación, en los que la mínima o nula alteración del suelo favorecerá la formación de canales estables a partir de raíces en descomposición; a ello hay que añadir el hecho de que en la 1ª campaña experimental no hubo cultivo bajo siembra directa. Sin embargo, es previsible que, conforme transcurran más campañas agrícolas, las diferencias entre tratamientos se hagan mayores. Dada la contribución de estos macroporos al flujo de agua en suelos no alterados (Meek et al., 1992), sería del mayor interés comprobar si el aumento de los mismos que pudiera tener lugar en el tratamiento de siembra directa se traduce en un incremento de la infiltración.

A tenor de la bibliografía consultada, la densidad de macroporos encontrada en el suelo del ensayo E4 parece ser, en conjunto, menor que la registrada en otras condiciones de suelo, clima y cultivo. Así, el número de macroporos >5 mm/m² encontrado por Edwards et al. (1988) en un suelo franco-limoso y con un cultivo continuo de maíz tras 20 años de no laboreo, fue aproximadamente de 300 frente a los 100 contabilizados en el presente estudio. En dicho trabajo se señala para el rango de poros de 0,4 a 5 mm una densidad de 9731/m², aproximadamente cuatro veces más elevada que en nuestro caso. En cuanto a poros >2 mm, el rango de macroporos/m² encontrado por Ehlers (1975) oscila entre 300 y 900 en no laboreo y entre 70 y 900 en laboreo tradicional con vertedera; para este mismo tamaño de macroporos, las cifras obtenidas en el presente estudio (261/m² en siembra directa y 115/m² en vertedera) se situarían, pues, próximas al límite inferior de los rangos encontrados por Ehlers (1975). No obstante, las cifras que pueden obtenerse en la capa arable son muy variables; así, considerando un suelo no labrado, la densidad de macroporos puede variar entre, por ejemplo, los 14500/m² que Edwards et al. (1988) contabilizan para el rango de 0,4 a 5 mm de diámetro y los 500/m² que Logsdon et al. (1990) encuentran para macroporos $>0,4$ mm, pasando por los 2500/m² del presente estudio y los 1500/m² de Shipitalo y Protz (1987), en ambos casos para macroporos $>0,2$ mm.

Por otro lado, el mayor número de bioporos observado en siembra directa puede acelerar, en principio, el proceso de evaporación y desecación del suelo al final de la campaña y, por tanto, favorecer una formación más temprana de grietas y fisuras. Igualmente, el proceso natural de contracción-expansión del suelo en ausencia de laboreo confiere a las grietas un carácter más estable, mientras que en los otros tratamientos éstas desaparecen con las labores. Así, pues, en no laboreo, en donde el área ocupada por grietas y fisuras es mayor, se favorecerán los procesos de transferencia de agua, por lo menos hasta la profundidad máxima de 25 cm analizada y, con ello, la recarga de humedad en el perfil.

Es interesante destacar, asimismo, cómo la presencia o ausencia de restos vegetales de cultivos anteriores y su distribución con la profundidad reflejan claramente el tipo de labor en el primer caso y la falta de labor en el segundo. Mientras que en laboreo convencional con vertedera la inversión del suelo conlleva un enterramiento de los restos vegetales a mayor profundidad, como lo demuestra la mayor superficie de éstos a 25 cm, el laboreo vertical con chisel implica un grado de enterramiento menor y una mayor concentración de restos en superficie. Según Onstad y Voorhees (1987), una concentración

de residuos a una determinada profundidad puede afectar a la redistribución de agua como si se tratara de una capa de suelo muy permeable sobre otra menos permeable; en condiciones de saturación el movimiento no se verá retardado por la presencia de estos restos vegetales, los cuales actuarán como una capa impermeable si el flujo tiene lugar en condiciones de insaturación.

Dada la elevada variabilidad que caracteriza a las propiedades hidrodinámicas del suelo (Vauclin, 1983), el hecho de haber considerado una sola determinación de **conductividad hidráulica a saturación** (K_{fs}) y **sortividad** (S) por parcela elemental, obliga a interpretar con prudencia los resultados obtenidos en el ensayo E1. No obstante, los CV encontrados se sitúan próximos a los valores inferiores del rango encontrado en la literatura. Así, ciñéndonos exclusivamente a aquellos trabajos en los que se ha utilizado el permeámetro de Guelph, los CV para K_{fs} parecen variar con la textura del suelo. En suelos de textura media, el rango de valores oscila entre un 40% y un 200%, superándose con frecuencia el 100% (Lee et al., 1985; Logsdon et al., 1990; Mohanty et al., 1991), y en suelos de textura fina pueden alcanzarse valores superiores al 300% (Elrick et al., 1989) e, incluso, al 600% (Lee et al., 1985). En nuestro caso, sólo en dos ocasiones el CV superó el 100%, manteniéndose en el resto de los casos entre un 13% y un 70%.

Por lo que respecta a S , los CV fueron, según lo esperado, inferiores a los de K_{fs} . De acuerdo con la revisión de Vauclin (1983), los CV de S , parámetro que el autor clasifica como de variabilidad media, se mueven entre un 8% y un 49%. En nuestro estudio, variaron entre un 6% y un 66%, con un valor medio de un 30%, próximo al 35% señalado por Starr (1990).

Además de la variabilidad espacial asociada a los parámetros K_{fs} y S , hay que tener en cuenta también la variabilidad temporal ligada al carácter inestable del suelo labrado. Dicha variabilidad dificulta una correcta evaluación de las propiedades hidráulicas del suelo y es responsable, con frecuencia, de la inconsistencia de los resultados encontrados en la literatura con relación a los efectos del laboreo de conservación sobre la estructura del suelo (Zhai et al., 1990; Khakural et al., 1992).

Antes de pasar a considerar la evolución de K_{fs} en las dos campañas experimentales, hay que indicar que, en conjunto, los valores encontrados ($0,28 \cdot 10^{-3}$ - $1,93 \cdot 10^{-3}$ cm/s) podrían clasificarse de medios a bajos, de acuerdo con la textura del suelo y el método de determinación empleado (Klute y Dirksen, 1986).

El carácter dinámico de K_{fs} es evidente en la 1ª campaña experimental. Por un lado, el hecho de que los valores de K_{fs} fueran ligeramente más altos en los tratamientos con laboreo a mediados de dicha campaña podría interpretarse como una muestra de la persistencia de las labores y del efecto favorable de las mismas sobre la macroporosidad. Por otro, este efecto desaparece conforme se reconsolidada la matriz del suelo (Sauer et al., 1990), con una disminución progresiva del tamaño medio de los poros, lo que explicaría el descenso de K_{fs} en los tratamientos mencionados al final de la campaña. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, dada la frágil naturaleza de los macroporos en la superficie del suelo y dependiendo de las circunstancias climáticas, el efecto de las labores sobre la infiltración puede incluso desaparecer a las pocas semanas (Starr, 1990). Con relación al

tratamiento de no laboreo, el hecho de que el incremento de la compactación del suelo durante la campaña no se traduzca en una pérdida de la capacidad de infiltración, podría asociarse al mantenimiento de una estructura de macroporos continuos más estables. En este caso, la formación de estos macroporos estaría relacionada no con la actividad de lombrices, tal como veíamos en el ensayo E4, sino con la de otra fauna allí observada (hormigas, arañas, etc.). Esta especulación estaría apoyada por las conclusiones a las que llegan Logsdon et al. (1990) y Wu et al. (1992), quienes relacionan K_{fs} y macroporosidad en condiciones de suelo y tratamientos de laboreo semejantes a las nuestras.

La menor K_{fs} a mitad de la 2ª campaña en los tratamientos de vertedera y chisel podría deberse a una reconsolidación de la capa arable mucho más rápida que en la 1ª campaña, tal como atestigua la mayor RP observada ya al comienzo del ciclo, con una probable pérdida de macroporos de circulación de agua. En esta 2ª campaña las lluvias de mayo y junio, con temperaturas del suelo elevadas, pudieron favorecer la descomposición de las raíces del cultivo, marchito ya tras la fase de ahijado, y, con ello, la formación de canales de raíces, que en todos los tratamientos pudieron constituir vías preferenciales de circulación de agua (Meek et al., 1992).

Si bien tras dos años de ensayo no se aprecia un empeoramiento en la capacidad de infiltración de agua bajo laboreo de conservación, será necesario comprobar su evolución a más largo plazo. Tal como muestra la literatura, la respuesta en suelos de similar textura al nuestro puede ser muy diversa. Así, Packer et al. (1992) encuentran mayor K_s en laboreo de conservación sólo después de 5 años de ensayo. Por el contrario, Pikul et al. (1990), tras 19 años, no observan diferencias en K_{fs} entre laboreo tradicional y no laboreo; de igual modo, Lal y VanDoren (1990) señalan cómo tras 25 años de no laboreo y laboreo con chisel y vertedera la capacidad de infiltración es similar en todos los tratamientos.

Como último comentario en relación con la K_{fs} , habría que destacar que los mayores CV en el tratamiento tradicional con vertedera reflejan, en principio, una mayor heterogeneidad en la capa arable en este tratamiento. Este resultado contrasta con el de Sauer et al. (1990) quienes, para un cultivo de maíz, asocian la mayor variabilidad en no laboreo a la red de macroporos creada por la descomposición de residuos vegetales en superficie. En nuestro caso, esto no sería fuente de variabilidad en siembra directa, dada la baja producción de biomasa del cultivo de cebada en la zona de ensayo. Sin embargo, en el tratamiento de vertedera una de las causas de la heterogeneidad aludida podría ser, precisamente, la presencia de restos vegetales enterrados en la capa arable que alteran los procesos de transferencia de agua en la misma (Onstad y Voorhees, 1987).

Finalmente, y como complemento de las determinaciones de K_{fs} , habría que discutir los resultados relativos al efecto de los tratamientos de laboreo en la capacidad del suelo para absorber agua determinada a través de las medidas de sortividad, parámetro que contiene información sobre la conductividad hidráulica, el potencial hídrico y la difusividad del agua en el suelo (White y Perroux, 1987).

Aunque la dinámica de S a lo largo del periodo experimental resulta semejante a la de K_{fs} , el efecto del sistema de laboreo no se refleja en la misma medida que en el caso de K_{fs} . El paralelismo existente entre ambos parámetros, establecido teóricamente en 1982 por Youngs (citado por Sharma et al., 1987), viene apoyado en el presente estudio por la

significación de la regresión obtenida ($\ln S = 0,270 \ln K_{fs} - 0,885$; $r=0,798$, $p=0,05$), similar a la encontrada por Sharma et al. (1987) en un estudio sobre distribución espacial de K_{fs} y S .

El hecho de que S dependa estrechamente del contenido de humedad inicial del suelo (Philip, 1969; Sauer et al., 1990), explicaría, en parte, la diferencia significativa entre el tratamiento de vertedera y el de siembra directa encontrada en la 3ª fecha de determinación (Tabla 39); en ese momento, el contenido de humedad en el suelo en vertedera y siembra directa fue $0,223$ y $0,157 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, respectivamente. Aunque parece observarse una tendencia a una mayor capacidad de absorción de agua en laboreo de conservación, en particular bajo no laboreo, es prematuro afirmar la existencia de un efecto debido al laboreo. Hay que tener presente que, a diferencia de K_{fs} , que nos informa de cambios en la macroporosidad, S caracteriza, además, el flujo de agua en la matriz del suelo y no es previsible que ésta haya resultado afectada en el período experimental. En este sentido, habría que mencionar el trabajo de Starr (1990), quien, estudiando la variabilidad espacial y temporal de K_{fs} y S bajo laboreo tradicional y de conservación a lo largo de una campaña agrícola, no encuentra diferencias entre tratamientos en la dinámica de S pero sí en la de K_{fs} .

Por otro lado, la variabilidad en S se asocia a la heterogeneidad impuesta por los macroporos, de tal modo que un pequeño volumen de éstos es suficiente para afectar de forma sustancial a la absorción y transporte de agua (Clothier y White, 1981). Con esta premisa, menores CV de S que de K_{fs} , según lo anteriormente señalado, indicarían una importante contribución de la matriz del suelo en nuestro caso de estudio.

A tenor de los valores de S al final del período experimental, el laboreo de conservación no parece afectar de forma negativa a la capacidad del suelo para absorber agua. Aunque en ese momento S en siembra directa fue 1,3 veces mayor que en vertedera, sólo a largo plazo será posible evaluar esta mejora, tal como parecen indicar los resultados de otras experiencias. Así, en un suelo franco-arcilloso y tras 10 años de no laboreo, Chan y Heenan (1993) encuentran una S aproximadamente 4 veces mayor que en laboreo convencional, mientras que sólo fue 2 veces mayor en el estudio de Lal y VanDoren (1990), tras 25 años de ensayo en un suelo franco-limoso. En ambos casos, los autores atribuyen los valores más elevados de S en no laboreo a una mayor densidad de macroporos como consecuencia de una actividad biológica más intensa.

5.6. EFICIENCIA DEL DISEÑO DE BLOQUES INCOMPLETOS PROPUESTO

Una vez concluido el trabajo experimental, de cuyos resultados se ha dado cuenta en apartados anteriores, se creyó oportuno llevar a cabo un análisis de la eficiencia del diseño de bloques incompletos (BI) utilizado. Tal como se expuso en el apartado 3.5.3., la aplicación de este diseño no impide tratar los datos según el clásico de bloques completos al azar (BC); para ello basta con excluir del análisis BI la última parcela (10V) y sustituir los datos correspondientes por otros obtenidos en la primera (1V). Así, es posible comparar ambos diseños y calcular la eficiencia del BI frente al de BC. La fórmula utilizada ha sido la de eficiencia relativa (ER) propuesta por Cochran y Cox (1950) para la comparación de dos diseños con pocos tratamientos:

$$ER = \frac{(n_I + 1)(n_C + 3) CME_C}{(n_C + 1)(n_I + 3) CME_I}$$

donde CME_I y CME_C son los cuadrados medios del error de BI y BC, respectivamente, y n_I y n_C sus grados de libertad. En nuestro caso, los diferentes grados de libertad de los errores experimentales de ambos diseños determinan un factor de ajuste de 1,12.

Esta ER, expresada generalmente como porcentaje, será mayor cuanto menor sea CME_I frente a CME_C , lo que significará una mayor precisión del diseño BI y, en principio, una mayor sensibilidad de éste para apreciar diferencias entre tratamientos. En el presente estudio, se ha calculado ER con los datos de cada uno de los ANOVAS realizados a lo largo de la experiencia, obteniéndose finalmente una ER media por propiedad y ensayo. Estos valores medios, presentados en la Tabla 42 como ER1, son en todos los casos superiores al 100%, lo que supone, sin entrar en los detalles que serán comentados más adelante, una precisión del diseño BI sustancialmente mayor que la del BC; considerando el valor medio de todas las eficiencias calculadas, la reducción de un 33% en el CME que se obtiene al pasar de BC a BI se traduce en una ganancia de ER1 de un 66%.

El cálculo de ER según la fórmula de Cochran y Cox (1950) es el procedimiento habitual de comparación de dos diseños experimentales cualquiera (Sokal y Rohlf, 1979; Steel y Torrie, 1985). Ahora bien, profundizando más en la comparación de los diseños BI y BC de nuestro caso particular, hay que recordar que en BI la suma de cuadrados debida a los tratamientos, al estar ajustada a los bloques, refleja los efectos puros de los tratamientos y está libre de los de los bloques (v. apartado 3.7.). En este sentido, Li (1969) y Scheffé (1970) indican que, en teoría, la proporción de información que se conserva en la suma de cuadrados ajustada de los tratamientos, en relación a la de BC, es:

$$\epsilon = \frac{rk - r + \lambda}{rk} = \frac{t(k - 1)}{k(t - 1)}$$

donde r es el número de repeticiones por tratamiento, k el número de tratamientos asignados a cada bloque, λ el número de veces que cada par de tratamientos aparecen juntos en el mismo bloque y t el número de tratamientos.

Tabla 42. Eficiencia del diseño de bloques incompletos utilizado relativa al de bloques completos (ER1 y ER2), reducción del cuadrado medio del error (CME) y número de casos con diferencias significativas entre tratamientos de laboreo detectadas por uno y otro análisis, según ensayo y variable. (En el texto se detalla el cálculo de ER1 y ER2).

Ensayo	Variable	ER1	Reducción del CME		Número de casos con diferencias significativas entre tratamientos	
			ER2	%	Bloques Incompletos	Bloques Completos
E1	W	210	47	158	17	11
	RP	149	25	112	27	15
	Cultivo	125	10	94	30	22
	S	194	42	145	2	1
	ET	175	36	131	4	2
	Media	171	32	128	Total 80	51
E2	W	189	41	142	12	12
	RP	135	17	101	39	35
	Cultivo	128	13	96	0	1
	S	136	18	102	2	2
	ET	135	17	101	1	1
	Media	145	21	108	Total 54	51
E3	W	174	36	131	54	38
	RP	191	41	143	47	37
	Cultivo	139	19	104	54	44
	S	195	43	146	12	9
	ET	166	33	125	12	11
	Media	173	34	130	Total 179	139
E4	W	206	46	154	30	26
	RP	153	27	114	34	32
	Cultivo	126	11	95	3	2
	S	211	47	158	3	4
	ET	169	34	127	6	6
	Media	173	33	130	Total 76	70
	Media	166	33	124	Total 389	311

W: contenido de humedad en el suelo; RP: resistencia del suelo a la penetración; Cultivo: variable que incluye todos aquellos parámetros de planta y cultivo determinados a lo largo del período experimental; S: reserva de agua en el suelo; ET: evapotranspiración.

El valor ϵ , conocido como factor de eficiencia de un diseño BI, en nuestro caso toma el valor $3/4$ (75%). Esta cifra indica el límite inferior de la eficiencia del diseño propuesto relativa al uso de BC y se basa en la suposición de que, para bloques de tamaño t , la varianza del error es de la misma magnitud que para bloques de tamaño k . En la práctica, si los bloques incompletos de tamaño reducido son más homogéneos que los bloques grandes, la eficiencia será mucho mayor que ϵ .

Según la consideración anterior, en cualquier comparación de medias de tratamientos en un diseño BI, la varianza del error debe multiplicarse por el recíproco de ϵ (Scheffé, 1970; Mead, 1988), siendo el mayor CME resultante el que debe utilizarse para hacer comparables los diseños BI y BC (Li, 1969). Es momento de recordar que, en realidad, la expresión utilizada para el cálculo del DMS en BI se diferencia de la de BC únicamente en que el CME_i queda multiplicado por $4/3$ (apartado 3.7.).

Así, teniendo en cuenta ϵ en el cálculo de ER1, y siguiendo los ejemplos dados por Cochran y Cox (1950) y Anderson y Bancroft (1952), se ha obtenido una segunda eficiencia, ER2, más acertada para la comparación de los diseños. Volviendo a la Tabla 42, y considerando, en primer lugar, el valor medio de ER2 de cada ensayo, hay que destacar que la ganancia de eficiencia en el ensayo E2 es tan sólo de un 8% frente al 28-30% en el resto de los ensayos. El ensayo E2 se ha caracterizado a lo largo del período experimental por un comportamiento muy uniforme y, aunque las variables de la Tabla 42 no fueron las consideradas en el estudio de variabilidad espacial -recordemos que W se determinó sólo hasta 40 cm de profundidad-, el análisis geoestadístico mostró cómo, en conjunto, este ensayo presentaba los menores valores de la semivarianza y en el caso de L+A también las menores distancias de autocorrelación. Por tanto, cabe pensar que en este ensayo los bloques incompletos de tamaño reducido no resultan ser mucho más homogéneos que los bloques completos de mayor tamaño. Con una ganancia de ER2 de un 30%, el caso contrario al de E2 lo encontramos en los ensayos E3 y E4. En estos ensayos, el análisis geoestadístico indicó rangos de dependencia espacial bastante elevados para L+A, así como anisotropías; en E3, además, presencia de deriva espacial, consecuencia, posiblemente, de una ligera pendiente (apartado 4.1.).

Recientemente, van Es y van Es (1993) demuestran experimentalmente cómo en el diseño BC el efecto negativo asociado al diferente grado de precisión de los contrastes entre tratamientos no resulta tan serio si la variable considerada se caracteriza por una débil estructura espacial o por presentar pequeños rangos de autocorrelación. Por el contrario, si la variable muestra una importante dependencia espacial y grandes distancias de autocorrelación o, incluso, deriva espacial, una inadecuada comparación de tratamientos puede cuestionar el resultado final del experimento.

En cuanto a la ER2 obtenida para las diferentes variables (Tabla 42), habría que destacar la del cultivo. Esta eficiencia, que representa el valor medio de las correspondientes a cada uno de los parámetros de planta y cultivo determinados en cada ensayo a lo largo del período experimental (Anexo III), toma en todos los casos los valores más bajos, lo que supone, a excepción del ensayo E3, una pérdida de eficiencia de un 4-6%. Ello es debido, quizá, a que el cultivo no refleje el mismo grado de variabilidad y estructura espacial que las propiedades de suelo sobre el que se asienta. Asimismo, no

hay que olvidar que en muchos de los muestreos realizados la caracterización de los distintos parámetros de cultivo se basó en un número de observaciones por parcela que duplicaba las de suelo. Esta última consideración parece confirmarse al comparar las ER2 de la 1ª y 2ª campañas experimentales en los ensayos E1 y E3; así, mientras en la 1ª, con cuatro determinaciones por parcela elemental, los valores de ER2 fueron tan sólo de un 77% y un 95% en E1 y E3, respectivamente, en la 2ª, con sólo dos repeticiones, alcanzaron un 110% y un 113%. Esta idea es apoyada igualmente por el resultado en el ensayo E4, en el que, siempre con doble número de repeticiones para cultivo que para suelo, la ER2 fue tan sólo de un 95%.

Aunque el aumento del número de repeticiones en un diseño BC no elimina el problema que supone la comparación de tratamientos separados por distintas distancias, si lo reduce; esto es así porque aunque la distancia media de comparación se mantiene, su varianza, en cambio, se reduce (van Es y van Es, 1993), lo que conllevará, presumiblemente, un aumento en la eficiencia de dicho diseño.

En conjunto, la utilización del diseño BI ha supuesto, con respecto al diseño BC, una ganancia media de ER2 de un 24%. Mientras que el valor medio de CME_I ha resultado ser un 33% inferior al de CME_C , el del cuadrado medio de los tratamientos se ha mantenido prácticamente constante (2707,65 y 2761,60 en BI y BC, respectivamente). Estos resultados sugieren que el diseño BC tiende a subestimar los efectos debidos a los tratamientos frente a un mayor término de error, lo que se traduce, finalmente, en una menor capacidad de este diseño para detectar diferencias significativas entre tratamientos. Así, la Tabla 42 muestra cómo con el diseño BI el número total de casos con diferencias entre tratamientos es un 25% más elevado que el obtenido con BC. Tal incremento varía con los ensayos, oscilando entre 3 casos más en el ensayo E2 y 40 en el E3.

van Es et al. (1989), utilizando datos de producción de trigo provenientes de un área relativamente homogénea y aplicando, asimismo, un diseño BI de tamaño 2, consiguen una reducción del CME de un 44% respecto al de BC y una eficiencia relativa de un 121%, muy próxima a la obtenida en el presente estudio. Dado que los cuatro sitios de ensayo se eligieron inicialmente por su aparente uniformidad, confirmada posteriormente con el estudio de variabilidad espacial realizado, en principio, no cabría esperar grandes valores de eficiencia relativa con el diseño BI, por lo que la expresión de ésta según ER2 parece más acertada que según ER1, con la que se obtienen eficiencias bastante más altas.

Según lo hasta aquí expuesto, se podría concluir este apartado señalando la idoneidad del diseño BI de tamaño 2 propuesto, en el que las ventajas de su aplicación parecen superar los posibles inconvenientes. Así, el mayor mérito del diseño se debe a las pequeñas distancias de separación entre puntos de observación en las que se basa la comparación de tratamientos; con ello se consigue reducir el efecto negativo de la variabilidad del suelo. Además, al mantenerse siempre la misma distancia de separación entre pares de observaciones, se asegura que todas las comparaciones se hagan con igual precisión. También es de destacar la relativa simplicidad del diseño y del análisis posterior de los datos. En cuanto a las posibles desventajas, habría que señalar, quizá, la necesidad de incorporar una parcela más al final de la serie con el objetivo de equilibrar el diseño. En este sentido, el hecho de haber dispuesto en nuestro caso de un dato diferente según el análisis BI y BC (provenientes de las parcelas 10V y 1V, respectivamente) no ha supuesto

ninguna limitación para una comparación adecuada de ambos diseños, manteniéndose prácticamente igual la suma de cuadrados total (42386,08 y 41769,34 como valores medios del total de ANOVAS realizados según BI y BC, respectivamente). Otra desventaja del diseño BI aparece cuando es mayor el número de tratamientos a comparar ya que, a medida que éstos aumenten se requerirá un mayor número de bloques y, con ello, una mayor superficie de ensayo, no siempre disponible.

Por último, a tenor de los resultados aquí obtenidos, la recomendación del diseño BI en ensayos de campo, tanto para medidas de suelo como de cultivo, adquiere un mayor interés en aquellos casos con elevada heterogeneidad espacial, en los que es previsible, tal como señalan van Es et al. (1989), que la eficiencia de tal diseño se incremente de forma sustancial.

6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el presente estudio sobre la respuesta del suelo y del cultivo de cebada al laboreo de conservación en distintas áreas del secano aragonés caben destacarse las siguientes conclusiones:

1. El seguimiento del **contenido de humedad en el suelo** a lo largo del ciclo del cultivo de cebada ha permitido observar, en primer lugar, cómo en los cuatro sitios de ensayo (E1: E.E.A.D.; E2: El Vedado; E3: Híjar; E4: Banastás), en las dos campañas experimentales (1990-91 y 1991-92) y para los dos sistemas de cultivo considerados (anual y año-vez), el efecto del laboreo reducido (labor primaria con arado chisel) sobre el almacenamiento de agua no se diferencia, en términos generales, del producido con el laboreo tradicional (arado de vertedera).
2. A diferencia de lo señalado para el laboreo reducido, la reserva de humedad en el suelo bajo no laboreo al inicio del ciclo varía según ensayo, campaña agrícola y sistema de cultivo, pudiendo ser inferior, igual o superior a la de los tratamientos con laboreo. En general, la siembra directa no supone una mejora en el aprovechamiento del agua de lluvia, consecuencia, quizá, de cambios insuficientes en la estructura del suelo y escasa presencia en superficie de restos vegetales del cultivo anterior.
3. Desde el punto de vista de la eficiencia del barbecho (sistema de cultivo de año y vez), la conservación de agua, y en relación al sistema de cultivo anual, sólomente el laboreo reducido parece conducir a una ganancia de agua relativamente importante tras el año de barbecho. Por el contrario, la eficiencia de la siembra directa resulta prácticamente nula en todos los sitios de ensayo y la del tratamiento tradicional positiva o negativa según sitio de ensayo.
4. La baja disponibilidad de agua en el suelo en los tratamientos con laboreo, observada en la mayoría de los casos el día de la siembra, estaría relacionada con la ausencia en las zonas de ensayo de una estación de lluvias bien definida y unas precipitaciones generalmente bajas y erráticas -tal como se ha puesto de manifiesto durante el período experimental- que impiden la realización de las labores primarias en el momento más oportuno para una óptima recarga del perfil. Esta circunstancia, junto al carácter transitorio de las labores, adquiere más trascendencia en el sistema de cultivo de año y vez, tal como indica la correspondencia encontrada entre la pluviometría recibida en los meses de febrero y marzo, próximos al momento de las labores primarias, y la eficiencia del barbecho.

Estas observaciones permiten concluir que la oportunidad de las labores primarias en los ambientes del secano aragonés estudiados constituye un factor clave en la conservación del agua, posiblemente más relevante que el propio método de preparación de la tierra.

5. La evolución de la **resistencia del suelo a la penetración**, parámetro determinado

simultáneamente al contenido de humedad, ha mostrado cómo el tratamiento de no laboreo conduce a la situación de impedancia mecánica más desfavorable. Con este tratamiento el suelo presenta ya en la fase de germinación del cultivo más del 50% del espesor de la capa arable (0-40 cm) con valores entre 2 y 4 MPa que pueden resultar limitantes para un normal desarrollo radicular.

6. El aumento progresivo del grado de compactación del suelo a lo largo del ciclo del cultivo, observado en todos los casos, se acentúa más en las parcelas labradas, lo que evidencia el carácter transitorio del efecto de las labores. De acuerdo con el régimen de lluvias y el desarrollo del cultivo, la resistencia a la penetración en las parcelas labradas se aproxima a la de las no labradas bien en las fases de encañado-espigado bien al final de la campaña.

En general, si bien las diferencias entre tratamientos de laboreo desaparecen en las parcelas año y vez antes que en las anuales, no es posible diferenciar ambos sistemas de cultivo según los niveles de compactación encontrados.

7. Con independencia de un esponjamiento del suelo menos profundo en laboreo reducido, la resistencia a la penetración en este tratamiento no se diferencia, en términos generales, de la detectada en el tradicional. No obstante, habría que señalar la tendencia observada en algunos casos a una mayor persistencia de la labor en el tratamiento con chisel.
8. El análisis de los perfiles de humedad y compactación del suelo ha facilitado la interpretación de la **respuesta del cultivo** al laboreo de conservación. Así, el cultivo bajo siembra directa es el más afectado por condiciones ambientales adversas en los ensayos más áridos (E1 y E3), de tal modo que en situaciones de déficit de agua durante el período vegetativo la mayor compactación inicial del suelo en este tratamiento potenciará los efectos asociados al estrés hídrico y con ello un menor desarrollo y rendimiento final.

La ausencia de diferencias en rendimiento entre tratamientos de laboreo en los ensayos con un régimen de humedad del suelo menos árido (E2 y E4) indicaría que la mayor compactación inicial en siembra directa no resulta ser factor limitante para la producción. La mayor actividad biológica observada en estos ensayos permite suponer la formación de un sistema de macroporos que favorecerá un mayor desarrollo radicular.

9. La compactación y el estado de humedad del suelo no son, en nuestras condiciones de ensayo, los únicos factores condicionantes de la respuesta del cultivo. El seguimiento de éste en sus primeros estadios ha permitido comprobar que, con independencia del tratamiento de laboreo, la profundidad de siembra está relacionada con la nascencia y el desarrollo temprano del cultivo (altura, biomasa, LAI), fases que resultan desfavorecidas para profundidades de siembra inferiores a 3 cm y también, posiblemente, superiores a 8 cm.
10. La respuesta del cultivo en el sistema de año y vez guarda estrecha relación con la eficiencia en el aprovechamiento del agua de lluvia durante el barbecho. De los

resultados obtenidos se infiere que el incremento de producción, con respecto al sistema de cultivo continuo, sólo es relevante cuando la pluviometría en los meses próximos al momento de las labores primarias (febrero-marzo) supera los 100 mm.

11. Los balances hídricos establecidos en cada uno de los ensayos y campañas experimentales han permitido estimar el **uso del agua** por el cultivo en cada uno de los tratamientos de laboreo. Mientras que el uso del agua entre siembra y cosecha no ha puesto de manifiesto las diferencias en desarrollo y rendimiento encontradas entre tratamientos, sí lo ha hecho para períodos concretos del ciclo del cultivo. Así, en los ensayos más áridos (E1 y E3), con rendimientos más bajos en siembra directa, el menor uso del agua en este tratamiento comienza a ser significativo a partir de principios de encañado; ello podría interpretarse como una incapacidad del sistema de no laboreo para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo en el momento de máxima demanda, bien por una menor reserva inicial de agua en el suelo, bien por un menor desarrollo radicular.

El uso del agua en el sistema de cultivo de año y vez sólo supera al del sistema anual en los casos en los que se dan también los mayores rendimientos (tratamientos de vertedera y chisel en el ensayo E3).

12. Los rangos de **eficiencia en el uso del agua** para la producción de materia seca, EUAB (3,0-35,2 kg/ha.mm) y de grano, EUAG (0,7-17,0 kg/ha.mm) están en consonancia con los registrados en la literatura para condiciones de clima y suelo similares. En todos los ensayos, el laboreo reducido mantiene niveles de EUAB y EUAG comparables a los del laboreo tradicional. Desde este punto de vista, la siembra directa sólo sería viable en los ensayos menos áridos (E2 y E4), si bien esta observación debe ser tomada con precaución en el primero de ellos dados sus bajos valores de eficiencia.

Ni el laboreo tradicional ni el de conservación, como prácticas de manejo del barbecho, conducen en el sistema de año y vez a una mejora en la eficiencia del uso del agua con respecto al sistema de cultivo anual.

13. La estimación de la evaporación (E) y de la transpiración (T) ha permitido comprobar cómo en los ensayos más áridos (E1, E2 y E3) la E puede ser el principal componente de la evapotranspiración (ET). Mientras que en dichos ensayos el valor medio de este componente representa un 65% de la ET del cultivo, en el ensayo menos árido (E4) no supera el 30%.

Dado que con el laboreo de conservación las pérdidas de agua por evaporación no sólo no se reducen sino que aumentan, tal como se ha observado bajo no laboreo en la mayoría de los casos, podría concluirse que, en nuestras condiciones de ensayo, esta práctica no puede considerarse como alternativa al laboreo tradicional para la mejora de la eficiencia en el uso del agua.

14. Los valores de la eficiencia de la transpiración para la producción de grano, EATG (7,4-23,8 kg/ha.mm) y para la de biomasa aérea, EATB (33,3-62,4 kg/ha.mm) son del mismo orden que los señalados por otros autores para cultivos de cereal bajo

condiciones de agua limitantes. El hecho de que los valores de EATG no muestren las diferencias entre tratamientos de laboreo, sitios de ensayo e, incluso, campañas experimentales evidenciadas por los de EUAG, confirmaría el carácter estable de la eficiencia en la transpiración.

15. El **estado de agregación del suelo** -caracterizado a través de la distribución de tamaños de agregados en seco, del diámetro medio ponderado y del índice de agregación- y su estratificación en la capa arable bajo laboreo de conservación no difieren significativamente, tras el período experimental, de los del laboreo tradicional en ninguno de los ensayos.

El hecho de que en los ensayos más áridos (E1, E2 y E3) el porcentaje de agregados $>0,84$ mm de diámetro sea, aproximadamente, un 34% inferior al obtenido en el ensayo E4, confirma la mayor fragilidad de los suelos en dichos ensayos y su mayor susceptibilidad a la erosión eólica.

16. El estudio de **macroporosidad** realizado al final del período experimental en el ensayo E4 ha puesto de manifiesto cómo el laboreo de conservación permite una actividad biológica más intensa que el tradicional. El mayor número y área de macroporos registrado en los tratamientos de no laboreo y laboreo reducido hay que atribuirlo a la acción de la fauna del suelo, especialmente a una mayor densidad de lombrices; en no laboreo el incremento de macroporosidad tiene lugar a expensas de bioporos >5 mm de diámetro y en el caso del chisel de la fracción de 2 a 5 mm.

17. La caracterización de la **conductividad hidráulica a saturación**, K_{fs} , y de la **sortividad**, S , en la capa arable del suelo en el ensayo E1 a lo largo de la experiencia ha mostrado, en primer lugar, la variabilidad espacial de estos parámetros y la variabilidad temporal asociada al carácter inestable del suelo labrado. En síntesis, no se aprecia un empeoramiento en la capacidad de infiltración (K_{fs}) ni en la de absorción de agua (S) bajo laboreo de conservación. La tendencia observada en no laboreo a presentar valores de K_{fs} y S ligeramente más altos debe tomarse con precaución y confirmarse a más largo plazo.

18. El **diseño de bloques incompletos** de tamaño 2 aplicado en el presente estudio ha sido, como promedio, un 24% más eficiente que el diseño clásico de bloques completos y ha permitido detectar un mayor número de situaciones con diferencias significativas entre tratamientos de laboreo.

El estudio de variabilidad espacial del suelo en los cuatro sitios de ensayo, realizado con anterioridad al establecimiento de las parcelas experimentales, y la utilización del diseño experimental propuesto, haciendo uso en ambos casos de los principios de la geoestadística, han constituido una metodología de trabajo satisfactoria y, por tanto, recomendable en experiencias de campo que conlleven medidas de parámetros de suelo y cultivo, en particular en suelos de heterogeneidad espacial elevada.



Finalmente, y como síntesis de las conclusiones arriba enumeradas, podrían hacerse las siguientes consideraciones. Mientras que el laboreo reducido puede contemplarse como una alternativa válida al laboreo tradicional en los agrosistemas estudiados, el no laboreo no parece viable en los ambientes más áridos, donde la respuesta está fuertemente condicionada por el régimen de lluvias y por los niveles de compactación en el suelo que tal práctica conlleva. El hecho de que el laboreo de conservación no mejore la eficiencia del barbecho en el aprovechamiento del agua de lluvia -cuestionable también bajo laboreo tradicional-, ni tampoco la eficiencia en el uso del agua por el cultivo, sugiere que tanto el manejo de residuos, limitado por su baja producción y por el actual sistema de aprovechamiento ganadero, como el control de malas hierbas son aspectos que deben ser revisados para la mejora de los sistemas de cultivo en el secano aragonés.

La información adquirida en este trabajo proviene de un período experimental concreto y de unas condiciones de clima y suelo determinadas, por lo que una valoración definitiva del alcance agronómico de las conclusiones anteriores sólo podrá establecerse a través de resultados a más largo plazo. En este sentido, el estudio ha servido de base para el planteamiento de las experiencias que se siguen en la actualidad, en las que, además de abordarse los aspectos arriba señalados de manejo de restos vegetales y control de malas hierbas, especialmente desde el punto de vista de la conservación de agua y suelo (erosión eólica y movilidad de herbicidas), y el estudio in situ del desarrollo radicular del cultivo, se continúa evaluando los cambios de estructura asociados al laboreo de conservación y su repercusión sobre las propiedades hidráulicas del suelo.

7. BIBLIOGRAFIA

- Agenbag, G.A. and P.C.J. Maree. 1991. Effect of tillage on some soil properties, plant development and yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in stony soil. *Soil & Tillage Research* 21: 97-112.
- Alberto, F., J.L. Arrúe y J. Machín. 1984. El clima de los suelos de la Cuenca del Ebro. I. Regímenes de humedad. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei* 17: 17-20.
- Alberto, F. y J. Machín. 1978. Delimitación de áreas de suelos con régimen de humedad árido en la depresión media del Ebro. *Trabajos Compostelanos de Biología* 6: 29-45.
- Alberto F., J. Machín, J.A. Cuchi y M.R. Poza. 1979. Memoria y Guía de las Excursiones Científicas. VIII Reunión Nacional de Suelos, Estación Experimental de Aula Dei, Zaragoza.
- Alegre, J.C., D.K. Cassel, and E. Amezquita. 1991. Tillage systems and soil properties in Latin America. *Soil & Tillage Research* 20: 147-163.
- Allen, S.J. 1990. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in northern Syria. *Agricultural and Forest Meteorology* 49: 291-309.
- Allmaras, R.R., R.W. Rickman, L.G. Ekin, and B.A. Kimball. 1977. Chiseling influences on soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal* 41: 796-803.
- Amir, J., J. Krikun, D. Orion, J. Putter, and S. Klitman. 1991. Wheat production in an arid environment. 1. Water-use efficiency, as affected by management practices. *Field Crops Research* 27: 351-364.
- Amir, J. and T.R. Sinclair. 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research* 28: 59-69.
- Amoozegar, A. and A.W. Warrick. 1986. Hydraulic conductivity of saturated soils: field methods. p. 735-770 In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd edn.*, Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI.
- Anderson, W.K. 1992. Increasing grain yield and water use of wheat in a rainfed mediterranean type environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 43: 1-17.
- Anderson, R.L. and T.A. Bancroft. 1952. *Statistical theory in research*. McGraw-Hill, New York.
- Arnal, P. 1985. Siembra directa de cereales. Experimentación en Navarra. p.42-47. En: II Jornadas Técnicas sobre Cereales de Invierno, Tomo I, Pamplona, Dpto. Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Navarra.
- Arnal, P. 1990a. Ensayos de siembra directa en cereales de invierno en Navarra. Resultados de la campaña 1988/1989. p. 199-206. En: Jornadas Técnicas sobre "El Agua y el Suelo: Laboreo de Conservación". Colección: Congresos y Jornadas N° 17/1990, Junta de Andalucía, Sevilla.

- Arnal, P. 1990b. "No laboreo" (siembra directa) en cultivos extensivos en Navarra. *El Campo. Boletín de Información Agraria* 117: 39-41.
- Arnal, P. 1990c. Análisis económico de distintos sistemas de laboreo. *El Campo. Boletín de Información Agraria* 117: 64-66.
- Arnal, P. 1992. El "no laboreo" ahorra tiempo y dinero. *Navarra Agraria*, Septiembre-Octubre, p. 32-36.
- Arrúe, J.L. 1992. Prácticas agrarias y medio ambiente: el laboreo de conservación. *ITEA* 12: 109-130.
- Arrúe, J.L., F. Alberto y J. Machín. 1984. El clima de los suelos de la Cuenca del Ebro. II. Regímenes de temperatura. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei* 17: 21-32.
- Arrúe, J.L. y M^aV. López. 1991. Laboreo de conservación: tendencias y prioridades de investigación. *Suelo y Planta* 1: 555-564.
- Ascaso, A. y J.M. Cuadrat. 1981. El Clima. p. 93-139. En: *Geografía de Aragón*, Tomo I, Guara Ed., Zaragoza.
- Austin, R.B., C.L. Morgan, M.A. Ford, and R.D. Blackwell. 1980. Contributions to grain yield from pre-anthesis assimilation in tall and dwarf barley phenotypes in two contrasting seasons. *Annals of Botany* 45: 309-319.
- Ball, B.C. 1989. Reduced tillage in Great Britain: practical and research experience. p. 29-40. In: K. Bäumer and W. Ehlers (eds.), *Energy saving by reduced soil tillage*, Commission of the European Communities, EUR 11258, Luxembourg.
- Ballesteros, L. y S. Guerrero. 1986. Resultados de siembra directa y mínimo laboreo en Castilla-La Mancha. p. 209-227. En: *Ponencias y Comunicaciones, I Simposium sobre Mínimo Laboreo en Cultivos Herbáceos*, Universidad Politécnica de Madrid.
- Bauder, J.W., G.W. Randall, and J.B. Swann. 1981. Effect of four continuous tillage systems on mechanical impedance of a clay loam soil. *Soil Science Society of America Journal* 45: 802-806.
- Bierhuizen, J.F. and R.O. Slatyer. 1965. Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves. *Agricultural Meteorology* 2: 259-270.
- Blake, G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. p. 363-375. In: A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*, Part 1, 2nd edn., Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI.
- Boone, F.R. 1988. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil & Tillage Research* 11: 283-324.

- Bowen, H.D. 1976. Correlation of penetrometer cone index with root impedance. Paper No. 76-1516. American Society of Agricultural Engineers.
- Burgess, T.M., and R. Webster. 1980a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science* 31: 315-331.
- Burgess, T.M., and R. Webster. 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging. *Journal of Soil Science* 31: 333-341.
- Burwell, R.E., L.L. Sloneker, and W.W. Nelson. 1968. Tillage influences water intake. *Journal of Soil and Water Conservation* 23: 185-187.
- Campbell, C.A., R.P. Zentner, B.G. McConkey, and F. Selles. 1992. Effect of nitrogen and snow management on efficiency of water use by spring wheat grown annually on zero-tillage. *Canadian Journal of Soil Science* 72: 271- 279.
- Canarache, A. 1990. PENETR - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil & Tillage Research* 16: 51-70.
- Cantero, C. and J.M. Vilarrosa. 1993. Effect of different tillage systems in fallow and continuous crop of barley on soil water conservation in mediterranean conditions. III Wye International Conference in Sustainable Agriculture, Wye College, U.K.
- Carter, M.R. 1988a. Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening in tillage studies. *Canadian Journal of Soil Science* 68: 657-668.
- Carter, M.R. 1988b. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil & Tillage Research* 12: 37-51.
- Carter, M.R. and P.M. Mele. 1992. Changes in microbial biomass and structural stability at the surface of a duplex soil under direct drilling and stubble retention in North-Eastern Victoria. *Australian Journal of Soil Research* 30: 493-503.
- Casallo, A. 1964. Barbecho y cereales en zonas áridas. Revisión bibliográfica de sistemas y experiencias. Zaragoza.
- Cassel, D.K. 1982. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. p. 45-67. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Special Publication No. 44. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Cassel, D.K. 1983. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand. *Soil Science Society of America Journal* 47: 196-201.
- Cassel, D.K., H.D. Bowen, and L.A. Nelson. 1978. An evaluation of mechanical impedance for three tillage treatments on Norfolk sandy loam. *Soil Science Society of America Journal* 42: 116-120.

- Cassel, D.K. and D.R. Nielsen. 1986. Field capacity and available water capacity. p. 901-926. In: A. Klute (ed.), *Methods of soil analysis, Part 1*, 2nd edn., Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI.
- Cavero, J. 1989. Estrategias ante la situación actual de la empresa cerealista de secano en Aragón. p. 23-46. En: *Jornadas sobre "El Futuro del Secano Aragonés"*, D.G.A., Zaragoza.
- CSPV. 1992. Nuevas variedades de cereales para las zonas áridas de Aragón. Su evaluación y desarrollo. Centro de Semillas y Protección Vegetal, D.G.A., Zaragoza.
- CTTPV. 1992. Orientaciones para las siembras de otoño-invierno. Influencia de la Política Agraria Comunitaria. Centro de Transferencia Tecnológica en Producción Vegetal. *Informaciones Técnicas 3/92*, Dpto. Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Aragón.
- Clothier, B.E. and I. White. 1981. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. *Soil Science Society of America Journal* 45: 241- 249.
- Cochran, W.G. and G.M. Cox. 1950. *Experimental designs*. 2nd edn., John Wiley & Sons, New York.
- Connor, D.J. and R.S. Loomis. 1991. Strategies and tactics for water-limited agriculture in low rainfall mediterranean climates. p. 441-465. In: E. Acevedo, E. Fereres, C. Giménez and J.P. Srivastava (eds.), *Improvement and Management of Winter Cereals under Temperature, Drought and Salinity Stresses*. Colección: Monografías I.N.I.A. Núm. 76, Madrid.
- Connor, D.J., S. Theiveyanathan, and G.M. Rimmington. 1992. Development, growth, water-use and yield of a spring and a winter wheat in response to time of sowing. *Australian Journal of Agricultural Research* 43: 493-516.
- Cooper, P.J.M. and P.J. Gregory. 1987. Soil water management in the rain-fed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use and Management* 3: 57-62.
- Cooper, P.J.M., P.J. Gregory, J.D.H. Keatinge, and S.C. Brown. 1987b. Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in Northern Syria. 2. Soil water dynamics and crop water use. *Field Crops Research* 16: 67-84.
- Cooper, P.J.M., P.J. Gregory, D. Tully, and H.C. Harris. 1987a. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Experimental Agriculture* 23: 113-158.
- Cooper, P.J.M., J.D.H. Keatinge, and G. Hughes. 1983. Crop evapotranspiration - a technique for calculation of its components by field measurements. *Field Crops Research* 7: 299-312.

- Coote, D.R. and C.A. Malcolm-McGovern. 1989. Effects of conventional and no-till corn grown in rotation on three soils in eastern Ontario, Canada. *Soil & Tillage Research* 14: 67-84.
- Cornish, P.S. and J.R. Lymbery. 1987. Reduced early growth of direct drilled wheat in southern New South Wales: causes and consequences. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 27: 869-880.
- Cornish, P.S. and J.E. Pratley (eds.). 1987. *Tillage: New Directions in Australian Agriculture*. Inkata Press, Melbourne, Australia.
- Costa, H. 1989. Nuevas técnicas de laboreo en secano. p. 109-119. En: *Jornadas sobre "El Futuro del Secano Aragonés"*. D.G.A., Zaragoza.
- Costa, J. y J.M. Marfull. 1985. Laboreo de conservación. Ensayos Monsanto en cebada de primavera 1985. p. 95-103. En: *II Jornadas Técnicas sobre Cereales de Invierno, Tomo I*, Pamplona, Dpto. Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Navarra.
- Cox, W.J., R.W. Zobel, H.M. van Es., and D.J. Otis. 1990. Tillage effects on some soil physical and corn physiological characteristics. *Agronomy Journal* 82: 806-812.
- Cuadrat, J.M. 1986a. La agroclimatología aragonesa: aspectos condicionantes del secano y del regadío. p. 11-33. En: *El Sistema Agrario Aragonés. Perspectivas y problemas*. Institución Fernando el Católico, Zaragoza.
- Cuadrat, J.M. 1986b. Distribución y régimen de las precipitaciones en Aragón. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*.
- Chan, K.Y. and D.P. Heenan. 1993. Surface hydraulic properties of a red earth under continuous cropping with different management practices. *Australian Journal of Soil Research* 31: 13-24.
- Chan, K.Y., J.A. Mead, and W.P. Roberts. 1987. Poor early growth of wheat under direct drilling. *Australian Journal of Agricultural Research* 38: 791-800.
- Chancellor, W.J. 1976. Compaction of soil by agricultural equipment. *Univ. Calif. Coop. Ext. Bull.* 1881.
- Chang, C. and C.W. Lindwall. 1992. Effects of tillage and crop rotation on physical properties of a loam soil. *Soil & Tillage Research* 22: 383-389.
- Chevalier, P.M. and A.J. Ciha. 1986. Influence of tillage on phenology and carbohydrate metabolism of spring wheat. *Agronomy Journal* 78: 296-300.
- Christian, D.G. and E.T.G. Bacon. 1990. A long-term comparison of ploughing, tine cultivation and direct drilling on the growth and yield of winter cereals and oilseed rape on clayey and silty soils. *Soil & Tillage Research* 18: 311-331.

- da Silva, D.B. 1992. Wheat sowing depth in the Cerrados Region. 1. Seedling emergence. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 27: 1311-1317.
- David, M. 1977. Geostatistical ore reserve estimation. *Developments in Geomathematics* 2, 4th edn., Elsevier, New York.
- Day, W., D.W. Lawlor, and A. T. Day. 1987. The effect of drought on barley yield and water use in two contrasting years. *Irrigation Science* 8: 115- 130.
- De León, A., A. Arriba y M^aC. de la Plaza. 1987. Caracterización agroclimática de la provincia de Zaragoza. M.A.P.A., Madrid.
- De León, A., A. Arriba y M^aC. de la Plaza. 1991a. Caracterización agroclimática de la provincia de Teruel. M.A.P.A., Madrid.
- De León, A., A. Arriba y M^aC. de la Plaza. 1991b. Caracterización agroclimática de la provincia de Huesca. M.A.P.A., Madrid.
- Delgado, I. 1989. Alternativas al aprovechamiento ganadero del secano. p.95-106. En: *Jornadas sobre "El futuro del secano aragones"*, D.G.A., Zaragoza.
- Delgado, I., J. Folch, D. Gabiña y T. Treacher. 1987. Ideas para un programa de investigación sobre los secanos de Aragón. Documento para debate. Informe, Campus de Aula Dei, Zaragoza.
- de los Rios, F. 1982. Informe sobre Los Monegros, *Geographicalia*, Serie Monográfica 2 . Institución Fernando el Católico, Publicación N° 850, Zaragoza.
- Dexter, A.R. 1986a. Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted subsoil. 1. Effects of seed-bed aggregate size and sub-soil strength on wheat roots. *Plant and Soil* 95: 123-133.
- Dexter, A.R. 1986b. Compression of soil around roots. *Plant and Soil* 97: 401-406.
- Díaz-Fierros, F. 1979. Análisis estadístico y sociométrico de la ciencia del suelo. *Anales de Edafología y Agrobiología* 38: 331-347.
- Dickey, E.E., D.J. Eckert, W.E. Larson, R. Johnson, J. Mannering, J. Kinsella, I. Wikner, and R.M. Cruse. 1989. To till or not to till during drought. *Journal of Soil and Water Conservation* 44: 117-120.
- Dickey, E.C., P.J. Jasa, and D.P. Shelton. 1986. Estimating residue cover. *NebGuide G86-793*, University of Nebraska, Lincoln.
- DPT. 1989. Actuaciones 1988. *Boletín Informativo Excma. Diputación Provincial de Teruel*, Año VIII, n° 43.
- Dobrzanski, B., B. Witkowska, and R. Walczak. 1975. Soil-agregation and water-stability

- index. Polish Journal of Soil Science 8: 3-8.
- Duval, J., G.S.V. Raghavan, G.R. Mehuys, and S. Gameda. 1989. Residual effects of compaction and tillage on the soil profile characteristics of a clay-textured soil. Canadian Journal of Soil Science 69: 417-423.
- Edwards, W.M., L.D. Norton, and C.E. Redmond. 1988. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil. Soil Science Society of America Journal 52: 483-487.
- Ehlers, W. 1975. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. Soil Science 119: 242-249.
- Ehlers, W. 1989. Water regime of tilled and untilled soils. p. 105-116. In: K. Bäumer and W. Ehlers (eds.), Energy saving by reduced soil tillage, Commission of the European Communities, EUR 11258, Luxemburgo.
- Elrick, D.E., W.D. Reynolds, and K.A. Tan. 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well permeameter analyses. Ground Water Monitoring Review 9: 184-193.
- Entz, T., and C. Chang. 1991. Evaluation of soil sampling schemes for geostatistical analyses: A case study for soil bulk density. Canadian Journal of Soil Science 71: 165-176.
- Erbach, D.C. 1982. Tillage for continuous corn and corn-soybean rotation. Transactions of the ASAE 25: 906-918.
- Erbach, D.C., R.M. Cruse, T.M. Crosbie, D.R. Timmons, T.C. Kaspar, and K.N. Potter. 1986. Maize response to tillage-induced soil conditions. Transactions of the ASAE 29: 690-695.
- FAO. 1977. Guías para la descripción de perfiles de suelos. Pub. FAO., Roma.
- FAO. 1989. Mapa mundial de suelos. Leyenda revisada. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 60, Roma.
- Fereres, E. 1989. Alternativas a los cultivos herbáceos en secano. p. 89-92. En: Jornadas sobre "El Futuro del Secano Aragonés". D.G.A., Zaragoza.
- Fernández-Quintanilla, C. 1988. Laboreo de conservación de cultivos herbáceos. Hoja Divulgadora nº 2/88 HD, MAPA. Madrid.
- Fischer, R.A. 1983. Wheat. p. 129-154. In: Proceedings of the Symposium on Potential Productivity of Field Crops under Different Environments, Sept. 1983. IRRI Los Baños, Philippines.
- Fischer, R.A. 1987. Responses of soil and crop water relations to tillage. p. 194-221. In:

- P.S. Cornish and J.E. Pratley (eds.), *Tillage: New Directions in Australian Agriculture*. Inkata Press, Melbourne.
- French, R.J. 1978a. The effect of fallowing on the yield of wheat. I. The effect on soil water storage and nitrate supply. *Australian Journal of Agricultural Research* 29: 653-668.
- French, R.J. 1978b. The effect of fallowing on the yield of wheat. II. The effect on grain yield. *Australian Journal of Agricultural Research* 29: 669-684.
- French, R.J. and J.E. Schultz. 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Australian Journal of Agricultural Research* 35: 743-64.
- Frías, V. y J.P. González. 1971. El deserbaje químico del olivar. p. 174-176. En: 1º *Symposium Nacional de Herbicidas*. Vol. I. Madrid.
- Frye, W.W. and G.W. Thomas. 1991. Management of long term field experiments. *Agronomy Journal* 83: 38-44.
- Fuentes, C. 1989. Teoría de la infiltración unidimensional: 2. La infiltración vertical. *Agrociencia* 78: 119-153.
- Gallagher, J.N., P.V. Biscoe, and R. Dennis-Jones. 1983. Environmental influences on the development, growth and yield of barley. p. 21-50. In: G.H. Wright and R.B. Wynn-Williams (eds.). *Agronomy Society of New Zealand, Special Publication No. 2*.
- García, A. 1990. Técnicas de cultivo en la agricultura sostenible. Experiencias en Castilla y León. *El Campo. Boletín de Información Agraria* nº 117: 6-41.
- García, A. y J.M. González. 1985. Siembra directa: cinco años de ensayos en Castilla-León. p. 50-59. En: *II Jornadas Técnicas sobre Cereales de Invierno, Tomo I*, Pamplona, Dpto. Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Navarra.
- García de Luján, A. 1990. El no laboreo en vid. p. 135-136. En: *Jornadas Técnicas sobre "El Agua y el Suelo: Laboreo de Conservación"*, Colección: *Congresos y Jornadas* Nº 17/1990, Junta de Andalucía, Sevilla.
- García de Reparaz, F. 1971. Técnica de no laboreo en olivar con paraquat. p. 170-173. En: 1º *Symposium Nacional de Herbicidas*. Vol. I, Madrid.
- Gardner, W.R. 1972. Comments on the "field capacity" and "permanent wilting point" concepts. p. 237. In: R.W. Brown and B.P. Van Haveren, *Psychrometry in Water Relations Research*, Utah State University, Logan, Utah.
- Gardner, W.R. 1978. Soil water uptake patterns and availability. *Soil Physics Seminar*, Dept. Soils, Univ. of Wisconsin, Madison, WI.

- Garrido, M.S., J. Almorox, M.C. Díaz y A. Saa. 1992. Soil erosion in cereal crop fields of Madrid province: effect of different tillage systems and set aside. p. 69. In: Intern. Symp. on Farm Lands Erosion in Temperate Plains Environments and Hills, Abstracts, Saint-Cloud, France.
- Gascuel-Oudou, C. et Ph. Merot. 1988. Variabilidad espacial del transporte de agua: geostatística, trazado isotópico, relación con la organización de los suelos. p. 133-152. In: R. Calvet (ed.), Estudios sobre los traslados de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, INRA, París.
- Gebhardt, M.R., T.C. Daniel, E.E. Schweizer, and R.R. Allmaras. 1985. Conservation tillage. *Science* 230: 625-630.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1*, 2nd edn., Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI.
- George, T.A. and J. Choate. 1989. A first look at the 1987 National Resources Inventory. *Journal of Soil and Water Conservation* 44: 555-556.
- Gibson, G., B.J. Radford, and R.G. H. Nielsen. 1992. Fallow management, soil water, plant-available soil nitrogen and grain sorghum production in South West Queensland. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 32: 473- 482.
- Gil, E., G. Gorchs, J.A. Garrido y J. Parelló. 1992. Estudio de la influencia del trabajo del suelo en el cultivo de cereales de invierno. p. 303-308. En: Proc. 24 Conferencia Internacional de Mecanización Agraria, Zaragoza.
- Giordano, A. 1988. The project "Soil erosion risk and important land resources" in the CORINE program. En: Seminario CORINE. Madrid, M.O.P.U., Madrid.
- Giráldez, J.V., C. Carrasco, A. Otten, H. Ietswaart, A. Laguna, and M. Pastor. 1990b. The control of soil erosion in olive orchards under reduced tillage. In: Interaction between agricultural systems and soil conservation in the mediterranean belt. European Society for Soil Conservation, Lisboa.
- Giráldez, J.V., P. González y E. Fereres. 1990a. Conservación agrícola de suelos y aguas. p. 19-32. En: Jornadas Técnicas sobre: "El Agua y el Suelo: Laboreo de Conservación", Colección: Congresos y Jornadas N° 17/1990, Junta de Andalucía, Sevilla.
- Giráldez, J.V., E. Fereres, M. García, J. Gil, P. González y J. Agüera. 1985. Laboreo mínimo y siembra directa en los suelos arcillosos de la campiña andaluza. p. 77-92. En: II Jornadas Técnicas sobre Cereales de Invierno, Tomo I, Pamplona, Dpto. Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Navarra.
- Giráldez, J.V., A. Laguna, and P. González. 1989. Soil conservation under minimum tillage techniques in mediterranean dry farming. *Soil Technology* Ser. 1: 139-147.

- Glasbey, C.A. and M.F. O'Sullivan. 1988. Analysis of cone resistance data with missing observations below stones. *Journal of Soil Science* 39: 587- 592.
- Gobierno de Aragón. 1993. Anuario Estadístico Agrario de Aragón 1992. Departamento de Agricultura, Ganadería y Montes, D.G.A., Zaragoza.
- Gómez Orea, D. 1990. Laboreo de conservación y medio ambiente. *Agricultura LIV*: 92-94.
- González, P., E. Fereres, J.V. Giráldez, M^aI. González de Quevedo y A. Laguna. 1991. El laboreo de conservación como medida de control de la erosión. *Suelo y Planta* 1: 545-554.
- González, P., E. Fereres, J.V. Giráldez, I. Martín, M. García, J. Gil and J. Agüera. 1988. Non tillage dry farming in heavy clay soil under mediterranean climate. p. 661-666. In: *Proc. International Soil Tillage Research Organization*. Vol. 2; Edinburgh, Scotland.
- Greb, B.W. 1979. Reducing drought effects on croplands in the west-central Great Plains. *U.S. Department of Agriculture Information Bulletin No. 420*.
- Gregory, P.J., D. Tennant, and R.K. Belford. 1992b. Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a mediterranean-type environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 43: 555-573.
- Gregory, P.J., D. Tennant, A.P. Hamblin, and J. Eastham. 1992a. Components of the water balance on duplex soils in Western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 32: 845-855.
- Griffith, D.R., J.V. Mannering, and J.E. Box. 1986. Soil and moisture management with reduced tillage. p. 19-57. In: M.A. Sprague and G.B. Triplett (eds.) *No-Tillage and Surface-Tillage Agriculture*. John Wiley & Sons, New York.
- Grupo de Trabajo de Normalización de Métodos Analíticos. 1978. Determinaciones analíticas en suelos. Normalización de métodos: Densidad real. *Anales de Edafología y Agrobiología* 37: 1003-1016.
- Grupo de Trabajo de Normalización de Métodos Analíticos. 1984. Determinaciones analíticas en suelos. Normalización de métodos. IV. Determinación de carbonatos totales y caliza activa. p. 53-68. En: *Actas del I Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Tomo. I. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, Madrid.
- Hadas, A. and I. Shumulewich. 1990. Spectral analysis of cone penetrometer data for detecting spatial arrangement of soil clods. *Soil & Tillage Research* 18: 47-62.
- Hamblin, A.P., D. Tennant, and H. Cochrane. 1982. Tillage and the growth of a wheat crop in a loamy sand. *Australian Journal of Agricultural Research* 33: 887-897.

- Hardy, C.K., D.J. Dollhopf, and W.F. Quimby. 1991. A geostatistical assessment of recontoured spoil sampling regulations. *Soil Science* 151: 274-281.
- Haukka, J. 1988. Effect of various cultivation methods on earthworm biomasses and communities on different soil types. *Annales Agriculturae Fenniae* 27: 263-269.
- Hawley, M.E., R.H. McCuen, and T.J. Jackson. 1982. Volume-accuracy relationship in soil moisture sampling. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 108: 1-11.
- Hermawan, B. and K.C. Cameron. 1993. Structural changes in a silt loam under long-term conventional or minimum tillage. *Soil & Tillage Research* 26: 139-150.
- Hernández, J.L. 1990. Repercusión de las nuevas técnicas de laboreo de conservación en los costes de producción. p. 171-181. En: *Jornadas Técnicas sobre "El agua y el suelo: Laboreo de conservación"*. Colección Congresos y Jornadas N° 17/1990, Junta de Andalucía, Sevilla.
- Hernández, J.L. and V. Sánchez-Girón. 1988. Experiments on the growing of cereals with different tillage-systems in central Spain. p. 691-696. In: *Proc. International Soil Tillage Research Organization*. Vol. 2, Edinburgh, Scotland.
- Hernández, J.L., V. Sánchez-Girón y C. Cerisola. 1992. Análisis de la energía consumida y de los costes de producción en tres sistemas diferentes de laboreo ensayados en el período 1983-1991 con tres cultivos extensivos. p. 229-238. En: *Proc. 24 Conferencia Internacional de Mecanización Agraria*, Zaragoza.
- Hernández, J.L., V. Sánchez-Girón, C. Fernández-Quintanilla y L. Navarrete. 1985. Ensayos de laboreo mínimo y siembra directa en la zona Centro. p. 62-73. En: *II Jornadas Técnicas sobre Cereales de Invierno*, Tomo I, Pamplona, Dpto. Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Navarra.
- Hill, R.L. 1990. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* 54: 161- 166.
- Hoogmoed, W.B. 1989. Soil preparation techniques. p. 7-35. En: *Proc. 21 Conferencia Internacional de Mecanización Agraria*, Zaragoza.
- Hulugalle, N.R. and P.R. Maurya. 1991. Tillage systems for the West African Semi-Arid Tropics. *Soil & Tillage Research* 20: 187-199.
- ICONA (ed.). 1986. Mapas de estados erosivos. Cuenca del Guadalquivir. Servicio de Publicaciones MAPA, Madrid.
- ICONA (ed.). 1987. Mapas de estados erosivos. Cuenca del Tajo. Servicio de Publicaciones MAPA, Madrid.
- ICONA (ed.). 1987. Mapas de estados erosivos. Cuenca del Ebro. Servicio de Publicaciones MAPA, Madrid.

- ICONA (ed.). 1988. Mapas de estados erosivos. Cuenca del Júcar. Servicio de Publicaciones MAPA, Madrid.
- ICONA (ed.). 1988. Mapas de estados erosivos. Cuenca del Segura. Servicio de Publicaciones MAPA, Madrid.
- Jamieson, P.D. and D.R. Wilson. 1985. Modelling the influence of irrigation and drought on crop production and water use. p. 429-443. In: Les besoins en eau des cultures. Conférence Internationale, Paris, 11-14 sept. INRA, Paris.
- Janssen, B.H. 1972. The significance of the fallow year in the dry-farming system of the Great Konya Basin, Turkey. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 20: 247-260.
- Jensen, M.E. 1984. Soil moisture regimes on some rangelands of Southeastern Idaho. *Soil Science Society of America Journal* 48: 1328-1330.
- Johnsson, H. and P.E. Jansson. 1991. Water balance and soil moisture dynamics of field plots with barley and grass ley. *Journal of Hydrology* 129: 149-173.
- Journel, A.G. and Ch.J. Huijbregts. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, New York.
- Juste, F., C. Gracia, L. Val e I. Fornes. 1986. Variación de las propiedades físicas del suelo según el sistema de cultivo en cítricos. p. 145-154. En: Proc. 18 Conferencia Internacional de Mecanización Agraria, Zaragoza.
- Juste, F., L. Val, C. Gracia, and I. Fornes. 1988. Effects of soil management treatments on soil physical conditions and fruit production in a citrus orchard of W. Spain. p. 703-708. In: Proc. International Soil Tillage Research Organization, Vol. 2, Edinburgh, Scotland.
- Karlen, D.L. 1990. Conservation tillage research needs. *Journal of Soil and Water Conservation* 45: 365-369.
- Karlen, D.L., W.J. Busscher, S.A. Hale, R.B. Dodd, E.E. Strickland, and T.H. Garner. 1991. Drought condition energy requirement and subsoiling effectiveness for selected deep tillage implements. *Transactions of the ASAE* 34: 1967-1972.
- Karlen, D.L., D.C. Erbach, T.C. Kaspar, T.S. Colvin, E.C. Berry, and D.R. Timmons. 1990. Soil tilth: A review of past perceptions and future needs. *Soil Science Society of America Journal* 54: 253-161.
- Kemper, W.D. and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. p. 425-442. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1*, 2nd edn., Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI.
- Khakural, B.R., G.D. Lemme, T.E. Schumacher, and M.J. Lindstrom. 1992. Effects of tillage systems and landscape on soil. *Soil & Tillage Research* 25: 43-52.

- Kirkegaard, J.A., H.B. So, R.J. Troedson, and E.S. Wallis. 1992. The effect of compaction on the growth of pigeonpea on clay soils. I. Mechanisms of crop response and seasonal effects on a vertisol in a sub-humid environment. *Soil & Tillage Research* 24: 107-127.
- Klajj, M.C. and W.B. Hoogmoed. 1993. Soil management for crop production in the West African Sahel. II. Emergence, establishment, and yield of pearl millet. *Soil & Tillage Research* 25: 301-315.
- Klute, A. and C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. p. 687-734. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1*, 2nd edn., Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI.
- Kuipers, H. 1991. Agronomic aspects of ploughing and non-ploughing. *Soil & Tillage Research* 21: 167-176.
- Lal, R. 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments. *Advances in Agronomy* 42: 85-197.
- Lal, R. 1991. Tillage and agricultural sustainability. *Soil & Tillage Research* 20: 133-146.
- Lal, R. and D.M. VanDoren. 1990. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration for two soils in Ohio. *Soil & Tillage Research* 16: 71-84.
- Lambert, F.J., M. Bower, R.D.B. Whalley, A.C. Andrews, and W.D. Bellotti. 1990. The effects of soil moisture and planting depth on emergence and seedling morphology of *Astrebla lappacea* (Lindl.) Domin. *Australian Journal of Agricultural Research* 41: 367-376.
- Laryea, K.B., P. Pathak, and M.C. Klajj. 1991. Tillage systems and soils in the semi-arid tropics. *Soil & Tillage Research* 20: 201-218.
- Lasanta, T. e I. Sobrón. 1988. Influencia de las prácticas de laboreo en la evolución hidromorfológica de suelos cultivados con viñedo. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 14: 81-97.
- Lascano, R.J. and C.H.M. Van Bavel. 1986. Simulation and measurement of evaporation from a bare soil. *Soil Science Society of America Journal* 50: 1127-1132.
- Laslett, G.M. and A.B. McBratney. 1990. Further comparison of spatial methods for predicting soil pH. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1553-1558.
- Laslett, G.M., A.B. McBratney, P.J. Pahl, and M.L. Hutchinson. 1987. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Science* 38: 325-341.
- Lee, L.K. 1990. The dynamics of declining soil erosion rates. *Journal of Soil and Water conservation* 45: 622-624.

- Lee, D.M., W.D. Reynolds, D.E. Elrick, and B.E. Clothier. 1985. A comparison of three field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Canadian Journal of Soil Science* 65: 563-573.
- Leuning, R., A.G. Condon, F.X. Dunin, S. Zegelin, and O.T. Denmead. 1993. Measurements of rainfall interception and soil evaporation from soil below a wheat canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* (en prensa).
- Li, C.C. 1969. *Introducción a la estadística experimental*. Ediciones Omega, Barcelona.
- Lindstrom, M.J., F.E. Koehler, and R.I. Papendick. 1974. Tillage effects on fallow water storage in the eastern Washington dryland region. *Agronomy Journal* 66: 312-316.
- Lipiec, J., I. Hakansson, S. Tarkiewicz, and J. Kossowski. 1991. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil & Tillage Research* 19: 307-317.
- Liso, M. y A. Ascaso. 1969. Introducción al estudio de la evapotranspiración y clasificación climática de la Cuenca del Ebro. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei* 10: 524 pp.
- Logan, T.J. 1990. Agricultural best management practices and groundwater protection. *Journal of Soil and Water Conservation* 45: 201-206.
- Logan, T.J., R. Lal, and W.A. Dick. 1991. Tillage systems and soil properties in North-America. *Soil & Tillage Research* 20: 241-270.
- Logsdon, S.D., R.R. Allmaras, L. Wu, J.B. Swan, and G.W. Randall. 1990. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1096-1101.
- López, M^a V. y J.L. Arrúe. 1992. Estructura espacial de las propiedades físicas del suelo y diseño experimental en ensayos de laboreo de conservación. p. 45-50. En: III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Conferencias Plenarias y Comunicaciones, Pamplona, Dpto. de Edafología, Universidad de Navarra.
- López, J.J., y J.V. Giráldez. 1992. ¿Es el barbecho necesario?. Análisis de la eficiencia del barbecho mediante un modelo de la evolución de la humedad del suelo. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales* 7: 327-343.
- Lowrance, R. 1990. Research approaches for ecological sustainability. *Journal of Soil and Water Conservation* 40: 51-54.
- Maindonald, J.H. 1992. Statistical design, analysis, and presentation issues. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 35: 121-141.
- Malhi, S.S., D.W. McAndrew, and M.R. Carter. 1992. Effect of tillage and N fertilization of a Solonchic soil on barley production and some soil properties. *Soil & Tillage*

Research 22: 95-107.

- Mannering, J.V., D.L. Schertz, and B.A. Julian. 1987. Overview of conservation tillage. p. 3-17. In: T.J. Logan, J.M. Davidson, J.L. Baker and M.R. Overcash (eds.), *Effects of Conservation Tillage on Groundwater Quality*, Lewis, Chelsea, MI.
- MAPA. 1983. No laboreo en el olivar. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. *Explotaciones Olivareras Colaboradoras N° 7*. Madrid.
- MAPA. 1986. *Métodos oficiales de análisis*. Tomo III. Secretaría General Técnica, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- Márquez, L. 1991. El laboreo de los suelos en las zonas áridas y semiáridas. *Surcos de Aragón* 31: 5-10.
- Martí, A. 1992. Repercusiones de la irregularidad pluviométrica en los rendimientos de los cereales de secano en los monegros. *ITEA* 88: 9-20.
- Martín Aranda, J., J.L. Arrúe y F. Moreno. 1980. Propiedades físicas y químicas en relación con la porosidad de los suelos: Influencia del ciclo natural de humectación - desecación. IV. Hinchamiento y contracción. *Anales de Edafología y Agrobiología* 39: 383-720.
- Martínez-Cob, A., and R.H. Cuenca. 1992. Influence of elevation on regional evapotranspiration using multivariate geostatistics for various climatic regimes in Oregon. *Journal of Hydrology* 136: 353-380.
- Masle, J. 1992. Genetic variation in the effects of root impedance on growth and transpiration rates of wheat and barley. *Australian Journal of Plant Physiology* 19: 109-125.
- Masle, J. and J.B. Passioura. 1987. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Australian Journal of Plant Physiology* 14: 643-656.
- Mateo Box, J.M^a. 1989. Evolución del laboreo. Del barbecho al cultivo de conservación. p. 147-173. En *Proc. 21 Conferencia Internacional de Mecanización Agraria*, Zaragoza.
- Matheron, G. 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology* 58: 1246-1266.
- Mausbach, M.J. and L.P. Wilding (eds.). 1991. *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA Special Publication Number 28, Madison, WI.
- McAfee, M., J. Lindström, and W. Johansson. 1989. Effects of pre-sowing compaction on soil physical properties, soil atmosphere and growth of oats on a clay soil. *Journal of Soil Science* 40: 707-717.
- McAneney, K.J. and J.L. Arrúe. 1993. A wheat-fallow rotation in North-Eastern Spain: water balance-yield considerations. *Agronomie (en prensa)*.

- McAneney, K.J. and J.P. Kerr. 1984. Environmental inputs into agronomic research -Guidelines. Agricultural Research Division, New Zealand Ministry of Agriculture and Fisheries, Wellington, NZ.
- McBratney, A.B., G.A. Hart, and D. McGarry. 1991. The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *Journal of Soil Science* 42: 513-532.
- McBratney, A.B., R. Webster, and T.M. Burgess. 1981. The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalised variables. I. Theory and method. *Computers and Geosciences* 7: 331-334.
- McDonald, G.K. and R.A. Fischer. 1991. Soil management to maintain crop production in semi-arid environments. p. 421-440. In: E. Acevedo, E. Fereres, C. Gímez and J.P. Srivastava (eds), *Improvement and Management of Winter Cereals under Temperature, Drought and Salinity stresses*. Colección: Monografías I.N.I.A. Núm. 76, Madrid.
- Mead, R. 1988. *The design of experiments: statistical principles for practical application*. Cambridge University Press.
- Meek, B.D., E.R. Rechel, L.M. Carter, W.R. DeTar, and A.L. Urie. 1992. Infiltration rate of a sandy loam soil: effects of traffic, tillage, and plant roots. *Soil Science Society of America Journal* 56: 908-913.
- Mesa, J., A. Vázquez y L. García. 1986. Resultados de ensayos de no laboreo en trigo, girasol y habas en Andalucía. p. 229-244. En: *Ponencias y Comunicaciones, I Simposium sobre Mínimo Laboreo en Cultivos Herbáceos*, Universidad Politécnica de Madrid.
- Mohanty, B.P., R.S. Kanwar, and R. Horton. 1991. A robust-resistant approach to interpret spatial behaviour of saturated hydraulic conductivity of a glacial till soil under no-tillage system. *Water Resources Research* 27: 2979-2992.
- Monleón, A. 1986. Estudio cualitativo sobre la percepción de beneficios del laboreo de conservación para los agricultores. p. 75-87. En: *Ponencias y Comunicaciones, I Symposium sobre Mínimo Laboreo en Cultivos Herbáceos*, Universidad Politécnica de Madrid.
- Monsanto. 1990. *Laboreo de conservación en Andalucía y Extremadura*. Conservar el Suelo, Boletín Nº 12, Madrid.
- Monsanto. 1991. *Sting SE en presiembra de cereales: selectividad*. Informe.
- Moolman, J.H. and L. van Huyssteen. 1989. A geostatistical analysis of the penetrometer soil strength of a deep ploughed soil. *Soil & Tillage Research* 15: 11-24.
- Mulla, D.J. 1989. Soil spatial variability and methods of analysis. p. 241-252. In:

- ICRISAT (ed.), *Soil, Crop, and Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone*, Proc. Intern. Workshop, 7-11 Jan. 1987, ICRISAT Sahelian Center, Niamey, Niger.
- Mulla, D.J., A.U. Bhatti, and R. Kunkel. 1990. Methods for removing spatial variability from field research trials. *Advances in Soil Science* 13: 201- 213.
- Muñoz-Pardo, J., P. Ruelle, and M. Vauclin. 1990. Spatial variability of an agricultural field: geostatistical analysis of soil texture, soil moisture and yield components of two rainfed crops. *Catena* 17: 369-381.
- Muriel, J.L., M. del Toro y A.M. García. 1991. Influencia del tipo de laboreo en la disponibilidad de agua de distintos suelos de la campiña de Andalucía. p. 403-413. En: Proc. XVIII Reunión Nacional de Suelos, Comunicaciones, La Laguna.
- Nash, M.S., A. Toorman, P.J. Wierenga, A. Gutjahr, and G.L. Cunningham. 1992. Estimation of vegetative cover in an arid rangeland based on soil-moisture using cokriging. *Soil Science* 154: 25-36.
- NeSmith, D.S. and J.T. Ritchie. 1992. Short- and long-term responses of corn to a pre-anthesis soil water deficit. *Agronomy Journal* 84: 107-113.
- Nyborg, M. and S.S. Malhi. 1989. Effect of zero and conventional tillage on barley yield and nitrate nitrogen content, moisture and temperature of soil in North-Central Alberta. *Soil & Tillage Research* 15: 1-9.
- Onstad, C.A. and W.B. Voorhees. 1987. Hydrologic soil parameters affected by tillage. p. 95-112. In: T.J. Logan, J.M. Davidson, J.L. Baker and M.R. Overcash (eds.), *Effects of Conservation Tillage on Groundwater Quality*, Lewis, Chelsea, MI.
- O'Sullivan, M.F., J.W. Dickson, and D.J. Campbell. 1987. Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *Journal of Soil Science* 38: 137-148.
- Oussible, M., R.K. Crookston, and W.E. Larson. 1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agronomy Journal* 84: 34-38.
- Packer, I.J., G.J. Hamilton, and T.B. Koen. 1992. Runoff, soil loss and soil physical property changes of light textured surface soils from long-term tillage treatments. *Australian Journal of Agricultural Research* 30: 789- 806.
- Papendik, R.I. 1987. Tillage and water conservation: experience in the Pacific Northwest. *Soil Use and Management* 3: 69-74.
- Passioura, J.B. 1983. Roots and drought resistance. *Agricultural Water Management* 7: 265-280.
- Passioura, J.B. 1991. Soil structure and plant growth. *Australian Journal of Soil Research*

- Pastor, M. 1989. Efecto del no-laboreo en olivar sobre la infiltración de agua en el suelo. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales* 4: 225-247.
- Pastor, M. 1990. Agronomía del laboreo de conservación en cultivos leñosos. p. 67-83. En: *Jornadas Técnicas sobre "El Agua y el Suelo: Laboreo de Conservación"*. Colección: *Congresos y Jornadas N° 17/1990*, Junta de Andalucía, Sevilla.
- Pastor, M., M. Fragero y V. Vega. 1985. Efectos del "no laboreo" en algunas propiedades físicas del perfil en suelos cultivados de olivar. *ITEA* 59: 55-64.
- Pastor, M., J.V. Giráldez, C. Carrasco y A. Otten. 1990. Erosión del suelo bajo sistema de laboreo nulo en olivar. *Agricultura* 697: 674-679.
- Pelegrín, F. 1988. Respuesta de diferentes sistemas de laboreo a la infiltración de agua en el suelo aplicada mediante simulador de lluvia. p. 99-109. En: *Proc. 20 Conferencia Internacional de Mecanización Agraria*, Zaragoza.
- Pelegrín, F., F. Moreno, J. Martín-Aranda, and M. Camps. 1988. The influence of tillage methods on soil-water conservation in SW Spain. p. 803-808. In: *Proc. International Soil Tillage Research Organization. Vol. 2*. Edinburgh, Scotland.
- Pelegrín, F., F. Moreno, J. Martín-Aranda, and M. Camps. 1990. The influence of tillage methods on soil physical properties and water balance for a typical crop rotation in SW Spain. *Soil & Tillage Research* 16: 345-358.
- Pérez, R. y F. Díaz-Fierros. 1989. Resistencia del suelo y susceptibilidad a la compactación en terrenos de monte sometidos a pastoreo. *Anales de Edafología y Agrobiología* 47: 547-560.
- Perfect, E., P.H. Groenevelt, B.D. Kay, and C.D. Grant. 1990. Spatial variability of soil penetrometer measurements at the mesoscopic scale. *Soil & Tillage Research* 16: 257-271.
- Philip, J.R. 1969. Theory of infiltration. *Advances in Hydrosiences* 5: 215- 290.
- Phillips, R.E., R.L. Blevins, G.W. Thomas, W.W. Frye, and S.H. Phillips. 1980. No-tillage agriculture. *Science* 208: 1108-1113.
- Pidgeon, J.D. and B.D. Soane. 1977. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley mono-culture system. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 88: 431-442.
- Pierce, F.J., M.C. Fortin, and M.J. Staton. 1992. Immediate and residual effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil physical properties and corn performance. *Soil & Tillage Research* 24: 149-165.

- Pikul, J.L., J.F. Zuzel, and R.E. Ramig. 1990. Effect of tillage-induced soil macroporosity on water infiltration. *Soil & Tillage Research* 17: 153- 165.
- Pomares, F. 1975. Efectos del no cultivo en las propiedades físicas y químicas del perfil en suelos cultivados de agrios. *Anales INIA* 3: 49-69.
- Pratley, J.E. and D.L. Rowell. 1987. From the first fleet-evolution of australian farming systems. p. 2-23. In: P.S. Cornish and J.E. Pratley (eds.), *Tillage. New Directions in Australian Agriculture*, Inkata Press, Melbourne.
- Radcliffe, D.E., E.W. Tollner, W.L. Hargrove, R.L. Clark, and M.H. Golabi. 1988. Effect of tillage practices on infiltration and soil strength of a Typic Hapludult soil after ten years. *Soil Science Society of America Journal* 52: 798-804.
- Radford, B.J., G. Gibson, R.G.H. Nielsen, D.G. Butler, G.D. Smith, and D.N. Orange. 1992. Fallowing practices, soil water storage, plant-available soil nitrogen accumulation and wheat performance in South West Queensland. *Soil & Tillage Research* 22: 73-93.
- Reynolds, W.D. and D.E. Elrick. 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science* 140: 292-302.
- Reynolds, W.D. and D.E. Elrick. 1986. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the conductivity-pressure head relationship. *Ground Water Monitoring Review* 6: 84-95.
- Reynolds, W.D., D.E. Elrick, and B.E. Clothier. 1985. The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow. *Soil Science* 139: 171-180.
- Reynolds, W.D., D. E. Elrick, and G.C. Topp. 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science* 136: 250-268.
- Richards, W. 1991. Restoring the land. *Journal of Soil and Water Conservation* 46: 409-410.
- Richards, R.A. and T.F. Townley-Smith. 1987. Variation in leaf area development and its effect on water use, yield and harvest index of droughted wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 38: 983-992.
- Ritchie, J.T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8: 1204-1213.
- Ritchie, J.T. 1981. Soil water availability. *Plant and Soil* 58: 327-338.
- Rizvi, H.A., S.J. Marley, T.S. Colvin, and D.C. Erbach. 1991. Tillage index trials at different agro-ecological zones. ASAE paper n° 911004. St. Joseph, MI 49085 - 9659. USA.

- Rodríguez, J. y C. Lacasta. 1985. Efecto de diferentes labores profundas en suelo arcilloso y su influencia en las producciones de cereales y leguminosas. p. 106-114. En: II Jornadas Técnicas sobre Cereales de Invierno, Tomo I, Pamplona, Dpto. Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Navarra.
- Rossi, R.E., D.J. Mulla, A.G. Journel, and E.H. Franz. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 62: 277-314.
- Saavedra, M. 1990. El almendro en condiciones mediterráneas: laboreo y herbicidas. p. 117-132. En: Jornadas Técnicas sobre "El Agua y el Suelo: Laboreo de Conservación", Colección: Congresos y Jornadas Nº 17/1990, Junta de Andalucía, Sevilla.
- Salverda, A.P. and J.H. Dane. 1993. An examination of the Guelph permeameter for measuring the soil's hydraulic properties. *Geoderma* 57: 405-421.
- Sallaway, M.M., D.F. Yule, D. Mayer, and P.W. Burger. 1990. Effects of surface management on the hydrology of a vertisol in semi-arid Australia. *Soil & Tillage Research* 15: 227-245.
- Samper, F.J. y J. Carrera. 1990. *Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea.* Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, 1ª ed., Barcelona.
- Sánchez-Girón, V. 1986. Comparación del laboreo convencional con varios sistemas de no laboreo en el cultivo de cereales: influencia del tratamiento en las propiedades físicas del suelo, en el desarrollo del cultivo y en el consumo de energía. Tesis Doctoral, E.T.S.I.A., Universidad Politécnica de Madrid.
- Sánchez-Girón, V., J.L. Hernánz y C. Cerisola. 1991. Efecto del sistema de laboreo y de la sembradora utilizada en las condiciones de la cama de siembra de un cultivo de cebada de primavera. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales* 6: 353-365.
- Sánchez-Girón, V., J.L. Hernánz y J.A. Muñoz. 1987. Evaluación económica de las técnicas de laboreo mínimo y laboreo convencional en la producción de cereales. p.23-30. En: Proc. 19. Conferencia Internacional de Mecanización Agraria, Zaragoza.
- Sánchez-Toribio, M. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Cuadernos Técnicos de la S.E.G. nº 3. Sociedad Española de Geomorfología. Geofoma Ediciones, Logroño.
- Sauer, T.J., B.E. Clothier, and T.C. Daniel. 1990. Surface measurements of the hydraulic properties of a tilled and untilled soil. *Soil & Tillage Research* 15: 359-369.
- Scheffé, H. 1970. *The analysis of variance.* John Wiley & Sons, New York.
- Sharma, B.R. 1991. Effect of different tillage practices, mulch and nitrogen on soil

- properties, growth and yield of fodder maize. *Soil & Tillage Research* 19: 55-66.
- Sharma, M.L., R.J.W. Barron, and M.S. Fernie. 1987. Areal distribution of infiltration parameters and some soil physical properties in lateritic catchments. *Journal of Hydrology* 94: 109-127.
- Shipitalo, M.J. and R. Protz. 1987. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Canadian Journal of Soil Science* 67: 445-456.
- Shouse, P.J., Gerik, T.J., Russell, W.B., and D.K. Cassel. 1990. Spatial distribution of soil particle size and aggregate stability index in a clay soil. *Soil Science* 149: 351-360.
- Singh, P., R.S. Kanwar, and M.L. Thompson. 1991. Measurement and characterization of macropores by using AUTOCAD and automatic image analysis. *Journal of Environmental Quality* 20: 289-294.
- Skidmore, E.L. 1988. Wind erosion. p. 203-233. In: R. Lal (ed.), *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Smart, P. 1975. Soil microstructure. *Soil Science* 119: 385-393.
- Smith, J.A. 1986. Distribution of crop residue: a requirement for conservation tillage. *NebGuide G86-782*, University of Nebraska, Lincoln.
- Smith, P.G. and A.H. Millett. 1964. Germinating and sprouting responses of the tomato at low temperatures. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* 84: 481-484.
- Sokal, R.R. y F.J. Rohlf. 1979. *Biometría. Principios y métodos estadísticos en la investigación biológica*. 1ª edición española, H. Blume Ediciones, Madrid.
- Soil Survey Staff. 1951. *Soil survey manual*. Agric. Handbook No. 18, USDA, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy*. Agric. Handbook No. 436, USDA, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Soilmoisture Equipment Corp. 1986. 2800K1 operating instructions. Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA.
- Sommer, C. and M. Zach. Managing traffic-induced soil compaction by using conservation tillage. *Soil & Tillage Research* 24: 319-336.
- Sowers, G.F. 1965. Consistency. p. 391-399. In: C.A. Black (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1*, Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI.
- Sprague, E.M. and G.B. Triplett. 1986. *No-Tillage and Surface-Tillage Agriculture*. Wiley, New York.

- SSSA. 1978. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Starr, J.L. 1990. Spatial and temporal variation of ponded infiltration. *Soil Science Society of America Journal* 54: 629-636.
- Steel, R.D. and J.H. Torrie. 1985. *Bioestadística: Principios y procedimientos*. 2ª edición, McGraw-Hill, New York.
- Stitt, R.E., D.K. Cassel, S.B. Weed, and L.A. Nelson. 1982. Mechanical impedance of tillage pans in Atlantic Coastal Plains soil and relationships with soil physical, chemical, and mineralogical properties. *Soil Science Society of America Journal* 46: 100-106.
- Sundsbo, S. 1991. Soil cultivation in relation to "our common future" and sustainable global development. *Soil & Tillage Research* 21: 159-166.
- Tanner, C.B. and W.A. Jury. 1976. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agronomy Journal* 68: 239-243.
- Tanner, C.B. and T.R. Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production: Research or re-search? p.1-27. In: H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair (eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA, Madison, WI.
- Tavernier, R. et A. Van Wambeke. 1976a. Détermination du régime hydrique des sols du Maghreb d'après Newhall. *Pédologie, Gand* 26: 168-178.
- Tavernier, R. y A. Van Wambeke. 1976b. Determinación del régimen hídrico de los suelos de España según el modelo matemático de Newhall. *Agrochimica* 20: 406-412.
- Taylor, H.M. and G.S. Brar. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil & Tillage Research* 19: 111-119.
- Taylor, H.M., G.M. Robertson, and J.J. Parker. 1966. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. *Soil Science* 102: 18-22.
- Thomas, G.A., J. Standley, H.M. Hunter, G.W. Blight, and A.A. Webb. 1990. Tillage and crop residue management affect Vertisol properties and grain sorghum growth over seven years in the semi-arid sub-tropics. 3. Crop growth, water use and nutrient balance. *Soil & Tillage Research* 28: 389-407.
- Thorburn, P.J. 1992. Structural and hydrological changes in a Vertisol under different fallow management techniques. *Soil & Tillage Research* 23: 341-359.
- Unger, P.W. 1988. Sistemas de labranza para la conservación del suelo y del agua. *Boletín de Suelos de la FAO* 54. Roma.

- Unger, P.W. and D.K. Cassel. 1991. Tillage implement disturbance effects on soil properties related to soil and water conservation: a literature review. *Soil & Tillage Research* 19: 363-382.
- Unger, P.W. and L.J. Fulton. 1990. Conventional-and no-tillage effects on upper root zone soil conditions. *Soil & Tillage Research* 16: 337-344.
- Unger, P.W. and T.M. McCalla. 1980. Conservation tillage systems. *Advances in Agronomy* 33: 1-58.
- U.S.S.L. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Salinity Laboratory. USDA Agric. Handbook, No. 60.
- Valera, A. 1986. Siembra directa de girasol. Ensayos Monsanto en gran parcela. p. 245-256. En: Ponencias y Comunicaciones, I Simposium sobre Mínimo Laboreo en Cultivos Herbáceos, Universidad Politécnica de Madrid.
- Valera, A. 1990. Aceptación de las nuevas técnicas de laboreo por los agricultores p. 87-93. En: Jornadas Técnicas sobre "El Agua y el Suelo: Laboreo de Conservación". Colección: Congresos y Jornadas Nº 17/1990, Junta de Andalucía, Sevilla.
- Valera, A. y J. Costa. 1989. Laboreo de conservación en la rotación cereales-girasol. p. 237-243. En: Proc. 21 Conferencia Internacional de Mecanización Agraria, Zaragoza.
- Valera, A., J. Costa, P. González, E. Fereres, and J.V. Giráldez. 1990. Conservation tillage in south Spain for the wheat-sunflower rotation. p. 1-8 In: Interaction between agricultural systems and soil conservation in the mediterranean belt. European Society for Soil Conservation. Lisboa.
- van Es, H.M. and C.L. van Es. 1993. Spatial nature of randomization and its effect on the outcome of field experiments. *Agronomy Journal* 85: 420-428.
- van Es, H.M., C.L. van Es, and D.K. Cassel. 1989. Application of regionalized variable theory to large-plot field experiments. *Soil Science Society of America Journal* 53: 1178-1183.
- van Es, H.M., C.L. van Es, and K.E. Rhodes. 1990. Field experimental design based on Geostatistics. p. 221. In: *Agronomy abstracts*, ASA, Madison, WI.
- van Ouwerkerk, C., S.O. Ojeniyi, and W.W. Frye. (eds.) 1992. ISTRO INFO Nº 32. *Soil & Tillage Research* 23: 241-308.
- Van Wambeke, A., P. Hastings, and M. Tolomeo. 1986. Newhall Simulation Model. A BASIC program for the IBM PC (DOS 2.0 or later). Department of Agronomy, Cornell University, Ithaca, NY.
- Vauclin, M. 1983. Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. p. 9-43. En: I.N.R.A. (ed.), Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols,

Avignon.

- Vauclin, M., S.R. Vieira, G. Vachaud, and D.R. Nielsen. 1983. The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Science Society of America Journal* 47: 175-184.
- Veen, B.W. and F.R. Boone. 1990. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. *Soil & Tillage Research* 16: 219-226.
- Vieira, S.R., J.L. Hatfield, D.R. Nielsen, and J.W. Biggar. 1983. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia* 51: 1-75.
- Villalobos, F.J. and E. Fereres. 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. *Agronomy Journal* 82: 1153-1159.
- Voltz, M. et M. Bornand. 1988. Analyse de la variabilité spatiale des propriétés physiques du sol. p. 101-131. In: R. Calvet (ed.), *Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère*, INRA, Paris.
- Voorhees, W.B. and M.J. Lindstrom. 1984. Long-term effects of tillage methods on soil tilth independent of wheel traffic compaction. *Soil Science Society of America Journal* 48: 152-156.
- Warrick, A.W., D.E. Myers, and D.R. Nielsen. 1986. Geostatistical methods applied to Soil Science. p. 53-82. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd edn.*, Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI.
- Warrick, A.W. and D.R. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. p. 319-344. In: D. Hillel, *Applications of Soil Physics*, Academic Press, New York.
- Webster, R. and T.M. Burgess. 1983. Spatial variation in soil and the role of kriging. *Agricultural Water Management* 6: 111-122.
- Webster, R., and M.A. Oliver. 1992. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *Journal of Soil Science* 43: 177-192.
- Weill, A.N., C.R. de Kimpe, and E. McKyes. 1988. Effect of tillage reduction and fertilizer on soil macro-and microaggregation. *Canadian Journal of Soil Science* 68: 489-500.
- White, I. and K.M. Perroux. 1987. Use of sorptivity to determine field soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal* 51: 1093- 1101.
- Willatt, S.T. 1986. Root growth of winter barley in a soil compacted by the passage of tractors. *Soil & Tillage Research* 7: 45-51.
- Wilson, D.R. 1985. The value of water for crop production. *New Zealand Agricultural Science* 19: 174-179.

- Wopereis, M.C., C. Gascuel-Oudou, G. Bourrie, and G. Soignet. 1988. Spatial variability of heavy metals in soil on a one hectare scale. *Soil Science*. 146: 113-118.
- Wu, L., J.B. Swan, W.H. Paulson and G.W. Randall. 1992. Tillage effects on measured soil hydraulic properties. *Soil & Tillage Research* 25: 17-33.
- Yaalon, D.H. 1964. Has soil research national characteristics? *Soils and Fertilizers* 27: 89-93.
- Yates, S.R. and A.W. Warrick. 1987. Estimating soil water content using cokriging. *Soil Science Society of America Journal* 51: 23-30.
- Yates, S.R. and M.V. Yates. 1989. Geostatistics for waste management: A user's manual for the GEOPACK (version 1.0) geostatistical software system. Report, U.S. Salinity Laboratory and Dept. Soil and Environmental Sciences, University of California. Riverside, CA.
- Youker, R.E. and J.L. McGuinness. 1956. A short method of obtaining mean weight-diameter values of aggregate analyses of soils. *Soil Science* 83: 291-294.
- Zadoks, J.C., T.T. Chang, and C.F. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415-421.
- Zaragoza, C. 1988. Influencia de la reducción del laboreo en la evolución de la flora arvense, el estado hídrico del suelo y en la producción de la vid. Tesis doctoral. E.T.S.I.A. Universidad Politécnica de Madrid.
- Zaragoza, C., J. Gómez-Aparisi, J.M. Sopena y V. Sotés. 1990. Ensayos de reducción de laboreo en la vid en Aragón y la Rioja. p. 137-143. En: *Jornadas Técnicas sobre "El Agua y el Suelo: Laboreo de Conservación"*, Colección: *Congresos y Jornadas N° 17/1990*. Junta de Andalucía, Sevilla.
- Zhai, R., R.G. Kachanoski, and R.P. Voroney. 1990. Tillage effects on the spatial and temporal variations of soil water. *Soil Science Society of America Journal* 54: 186-192.
- Zimmerman, D.L. and P. Hinz. 1988. Optimal statistical designs for sampling positional variability associated with conservation tillage. p. 289. In *Agronomy abstracts*. ASA, Madison, WI.
- Zobeck, T.M. and T.W. Popham. 1990. Dry aggregate size distribution of sandy soils as influenced by tillage and precipitation. *Soil Science Society of America Journal* 54: 198-204.

ANEXO I

Descripción y datos analíticos del suelo en cada uno de los ensayos

PERFIL E1

Localidad: Peñafior (Zaragoza)

Situación: Hoja topográfica 355 (1:50.000); 41°44'30''N; 0°46'18''O

Altitud: 270 m

Pendiente: < 1%

Posición fisiográfica: media en glacis II, prácticamente llana

Drenaje: bueno

Uso de la tierra: cultivo de cebada de secano en rotación cereal-barbecho

Material original: sedimentos cuaternarios

Clasificación: Calcisol háplico (FAO, 1989)

Horizonte	Prof.(cm)	Descripción
Ap	0-30	Color pardo amarillento oscuro (10YR4/3), en húmedo; pardo amarillento oscuro (10YR5/4), en seco. Textura franca. Frecuentes elementos gruesos. Estructura poliédrica subangular, media, débilmente desarrollada. Plástico y adherente en mojado. Poco compacto. Pocos poros muy finos. Distribución homogénea de raíces, escasas, finas a muy finas. Límite neto.
Bw	30-55	Color pardo amarillento oscuro (10YR4/3), en húmedo; pardo amarillento oscuro (10YR5/4), en seco. Textura franca. Frecuentes elementos gruesos. Estructura poliédrica subangular, media, débilmente desarrollada. Plástico y ligeramente adherente en mojado. Poco compacto. Pocos poros. Canalículos frecuentes y finos. Distribución homogénea de raíces, frecuentes, finas a muy finas. Límite neto e irregular.
Cmk	55-90	Color pardo amarillento oscuro (10YR5/4), en húmedo; pardo pálido (10YR6/4), en seco. Textura franco-arenosa. Abundantes elementos gruesos. Estructura poliédrica subangular, fina, débilmente desarrollada. No plástico y no adherente en mojado. Muy compacto; costra caliza poco cementada. Raíces frecuentes muy finas en los primeros 10 cm. Límite neto.
Cy	90 +	Color amarillo pálido (2,5Y6/4), en húmedo; amarillo claro (2,5Y7/4), en seco. Textura franca. Frecuentes elementos gruesos. Estructura poliédrica subangular, media, débilmente desarrollada. Plástico y muy adherente en mojado. No hay raíces. Yesos en nódulos.

DATOS ANALITICOS

HORIZONTE:	Ap	Bw	Cmk	Cy
CARACTERISTICAS QUIMICAS				
pH (H ₂ O)	8,23	8,14	8,25	8,30
pH (KCl)	7,57	7,61	7,80	7,75
CO ₃ ⁼ (%)	34,10	28,50	35,15	57,22
Yeso (%)	5,45	5,12	3,01	3,97
Carbono orgánico (%)	1,12	0,88	0,55	0,47
Materia orgánica (%)	1,93	1,51	0,95	0,81
Nitrógeno total (%)	0,16	0,10	0,08	0,06
C/N	7,0	8,8	-	-
CARACTERISTICAS FISICAS				
Elementos gruesos, >2 mm (%)	5,65	15,27	56,95	5,73
Arena muy gruesa, 2-1 mm (%)	3,46	3,67	9,50	2,04
Arena gruesa, 1-0,5 mm (%)	4,91	4,57	9,29	2,42
Arena media, 0,5-0,25 mm (%)	5,73	7,98	14,82	4,60
Arena fina, 0,25-0,1 mm (%)	8,59	14,29	23,82	10,90
Arena muy fina, 0,1-0,05 mm (%)	5,52	8,92	5,81	22,57
Limo grueso, 0,05-0,02 mm (%)	13,94	13,98	9,32	14,91
Limo medio, 0,02-0,005 mm (%)	19,99	15,36	9,64	15,39
Limo fino, 0,005-0,002 mm (%)	13,37	10,33	5,55	9,35
Arcilla, <0,002 mm (%)	24,49	20,90	12,25	17,82
Retención de agua a -33 kPa (% peso)	20,29	18,46	14,04	17,38
Retención de agua a -1500 kPa (% peso)	10,74	9,85	6,39	6,42
Densidad real (g/cm ³)	2,73	2,73	2,73	2,73
Densidad aparente (g/cm ³)	1,44	1,54	1,59	1,61
Porosidad total (%)	47,25	43,59	41,76	41,03
Límite líquido (% peso)	26,5	24,8	18,8	22,8
Límite plástico (% peso)	18,7	17,8	17,7	19,5
SALINIDAD				
C.E., extracto 1:5 (dS/m)	0,29	0,51	0,38	0,54
C.E., extracto saturado (dS/m)				
Cloruros (meq/L)				
Sulfatos (meq/L)				
Carbonatos (meq/L)				
Bicarbonatos (meq/L)				
Sodio (meq/L)				
Potasio (meq/L)				
Litio (meq/L)				
Calcio (meq/L)				
Magnesio (meq/L)				

PERFIL E2

Localidad: Lecina (Zaragoza)

Situación: Hoja topográfica 323 (1:50.000); 41°51'30''N; 0°41'16''O

Altitud: 400 m

Pendiente: 0 %

Posición fisiográfica: media en glacia I, llana

Drenaje: bueno

Uso de la tierra: cultivo de cebada de secano en rotación cereal-barbecho

Material original: sedimentos cuaternarios

Clasificación: Calcisol háplico (FAO, 1989)

Horizonte	Prof.(cm)	Descripción
Ap	0-35	Color marrón (7,5YR4/4), en húmedo; pardo amarillento oscuro (10YR5/4), en seco. Textura franca. Frecuentes elementos gruesos, gravilla y grava media. Estructura poliédrica subangular, media, débilmente desarrollada. Ligeramente plástico y adherente en mojado. Poco compacto. Abundantes poros muy finos. Distribución homogénea de raíces, escasas, finas a muy finas. Escasas lombrices. Límite neto y plano.
Ck	35-115	Color amarillo claro (2,5Y7/4), en húmedo; amarillo pálido (2,5Y8/4), en seco. Textura franco-limosa. Pocos elementos gruesos. Estructura poliédrica subangular, media, débilmente desarrollada. Plástico y adherente en mojado. Poco compacto. Canaliculos muy finos. Pocas raíces muy finas hasta 80 cm. Presencia de nódulos calizos en los primeros 65 cm. Límite difuso y plano.
C	115 +	Color amarillo claro (2,5Y7/4), en húmedo; amarillo pálido (2,5Y8/4), en seco. Textura franco-arcillo-limosa. Estructura poliédrica subangular, media, débilmente desarrollada. Plástico y adherente en mojado. No hay raíces. Presencia de sales y yeso secundario.

DATOS ANALITICOS

HORIZONTE:	Ap	Ck	C
CARACTERISTICAS QUIMICAS			
pH (H ₂ O)	8,17	8,37	8,50
pH (KCl)	7,61	7,85	7,91
CO ₃ ⁼ (%)	34,10	51,61	48,29
Yeso (%)	5,36	3,35	3,49
Carbono orgánico (%)	1,50	0,30	0,22
Materia orgánica (%)	2,58	0,51	0,37
Nitrógeno total (%)	0,16	0,05	0,06
C/N	9,4	-	-
CARACTERISTICAS FISICAS			
Elementos gruesos, >2 mm (%)	26,27	1,75	0,09
Arena muy gruesa, 2-1 mm (%)	3,79	0,90	0,12
Arena gruesa, 1-0,5 mm (%)	5,11	0,98	0,47
Arena media, 0,5-0,25 mm (%)	6,63	0,90	0,31
Arena fina, 0,25-0,1 mm (%)	8,63	4,20	0,47
Arena muy fina, 0,1-0,05 mm (%)	10,33	8,00	1,99
Limo grueso, 0,05-0,02 mm (%)	14,10	18,46	9,03
Limo medio, 0,02-0,005 mm (%)	14,62	26,13	27,95
Limo fino, 0,005-0,002 mm (%)	10,94	17,52	21,36
Arcilla, <0,002 mm (%)	25,85	22,91	38,30
Retención de agua a -33 kPa (% peso)	20,42	22,58	25,53
Retención de agua a -1500 kPa (% peso)	11,86	7,43	11,94
Densidad real (g/cm ³)	2,75	2,75	2,78
Densidad aparente (g/cm ³)	1,32	1,48	1,50
Porosidad total (%)	52,00	46,18	46,04
Límite líquido (% peso)	26,9	24,2	24,8
Límite plástico (% peso)	21,6	18,5	19,8
SALINIDAD			
C.E., extracto 1:5 (dS/m)	0,25	0,65	0,80
C.E., extracto saturado (dS/m)		5,24	5,93
Cloruros (meq/L)		30,95	35,10
Sulfatos (meq/L)		25,00	30,00
Carbonatos (meq/L)		0,00	0,00
Bicarbonatos (meq/L)		1,32	1,10
Sodio (meq/L)		26,00	32,10
Potasio (meq/L)		0,10	0,25
Litio (meq/L)		0,08	0,10
Calcio (meq/L)		23,50	15,63
Magnesio (meq/L)		12,50	19,63

PERFIL E3

Localidad: Híjar (Teruel)

Situación: Hoja topográfica 468 (1:50.000); 41°04'14''N; 0°21'43''O

Altitud: 440 m

Pendiente: < 2%

Posición fisiográfica: media en glacis I, ondulado.

Drenaje: bueno

Uso de la tierra: cultivo de cebada de secano en rotación cereal-barbecho

Material original: sedimentos cuaternario.

Clasificación: Calcisol háplico (FAO, 1989)

Horizonte	Prof.(cm)	Descripción
Ap	0-30	Color marrón (7,5YR4/6), en húmedo; naranja (7,5YR6/6), en seco. Textura franca. Frecuentes elementos gruesos. Estructura poliédrica subangular, media, débilmente desarrollada. Plástico y poco adherente en mojado. Poco compacto. Pocos poros. Distribución homogénea de raíces, escasas, finas. Frecuentes lombrices. Límite neto.
Ck	30-75	Color naranja (5YR6/6), en húmedo; naranja (5YR7/6), en seco. Textura franca. Estructura poliédrica subangular, fina, débilmente desarrollada. Ligeramente plástico y ligeramente adherente en mojado. Poco compacto. Pocos poros y canaliculos finos. Presencia de raíces finas hasta 65 cm. Frecuentes lombrices. Presencia de nódulos calizos. Límite difuso.
Cy1	75-125	Color rojo-amarillento (5YR5/6), en húmedo; naranja (5YR6/6), en seco. Textura franco-limosa. Estructura poliédrica subangular, fina, débilmente desarrollada. Plástico y adherente en mojado. Muy compacto. No hay raíces. Escasas lombrices. Presencia de yeso secundario. Límite neto.
Cy2	125 +	Color naranja pálido (5YR6/4), en húmedo; naranja claro (5YR7/4), en seco. Horizonte de acumulación de yesos.

DATOS ANALITICOS

HORIZONTE:	Ap	Ck	Cyl
------------	----	----	-----

CARACTERISTICAS QUIMICAS

pH (H ₂ O)	8,22	8,23	7,91
pH (KCl)	7,51	7,50	7,38
CO ₃ ⁼ (%)	41,97	52,75	47,79
Yeso (%)	4,45	5,21	6,74
Carbono orgánico (%)	0,77	0,33	0,22
Materia orgánica (%)	1,32	0,56	0,37
Nitrógeno total (%)	0,08	0,05	0,03
C/N	9,6	-	-

CARACTERISTICAS FISICAS

Elementos gruesos, >2 mm (%)	5,77	0,85	1,10
Arena muy gruesa, 2-1 mm (%)	1,38	0,25	1,01
Arena gruesa, 1-0,5 mm (%)	2,38	0,90	3,91
Arena media, 0,5-0,25 mm (%)	6,29	2,67	8,62
Arena fina, 0,25-0,1 mm (%)	16,73	20,84	14,22
Arena muy fina, 0,1-0,05 mm (%)	13,97	3,56	13,71
Limo grueso, 0,05-0,02 mm (%)	17,82	15,94	16,15
Limo medio, 0,02-0,005 mm (%)	11,75	15,95	13,39
Limo fino, 0,005-0,002 mm (%)	8,41	13,29	24,08
Arcilla, <0,002 mm (%)	21,27	26,60	4,91
Retención de agua a -33 kPa (% peso)	15,59	19,74	17,84
Retención de agua a -1500 kPa (% peso)	8,64	9,16	8,52
Densidad real (g/cm ³)	2,72	2,73	2,69
Densidad aparente (g/cm ³)	1,52	1,48	1,51
Porosidad total (%)	44,12	45,79	43,87
Límite líquido (% peso)	21,4	25,8	25,7
Límite plástico (% peso)	18,2	19,6	21,3

SALINIDAD

C.E., extracto 1:5 (dS/m)	0,40	0,47	2,20
C.E., extracto saturado (dS/m)			2,55
Cloruros (meq/L)			1,13
Sulfatos (meq/L)			36,00
Carbonatos (meq/L)			0,00
Bicarbonatos (meq/L)			1,40
Sodio (meq/L)			1,00
Potasio (meq/L)			0,04
Litio (meq/L)			0,04
Calcio (meq/L)			35,74
Magnesio (meq/L)			2,97



PERFIL E4

Localidad: Banastás (Huesca)

Situación: Hoja topográfica 248 (1:50.000); 42°10'42''N; 0°27'07''O

Altitud: 538 m

Pendiente: 0 %

Posición fisiográfica: llana en terraza I.

Drenaje: bueno

Uso de la tierra: cultivo continuo de cebada de secano

Material original: sedimentos cuaternarios

Clasificación: Regosol calcárico (FAO, 1989)

Horizonte	Prof.(cm)	Descripción
Ap	0-35	Color pardo amarillento oscuro (10YR5/3), en húmedo; amarillo pálido (2,5Y6/4), en seco. Textura franco-arcillosa. Estructura poliédrica subangular, media, moderadamente desarrollada. Plástico y adherente en mojado. Poco compacto. Abundantes poros, de medios a finos. Canaliculos frecuentes, de medios a finos. Frecuentes grietas medias. Distribución homogénea de raíces, abundantes, de medias a muy finas. Frecuentes lombrices, deyecciones y galerías; conchas de gasterópodos terrestres. Límite neto.
C1	35-75	Color pardo amarillento oscuro (10YR5/3), en húmedo; amarillo pálido (2,5Y6/4), en seco. Textura franco-arcillo-limosa. Estructura poliédrica subangular, media, moderadamente desarrollada. Plástico y adherente en mojado. Poco compacto. Abundantes poros finos. Canaliculos frecuentes finos. Abundantes grietas finas. Abundantes raíces, de finas a muy finas. Presencia de alguna lombriz y conchas de gasterópodo. Límite difuso y plano.
C2	75-135	Color marrón amarillento (2,5Y5/3), en húmedo; amarillo pálido (2,5Y6/3), en seco. Textura arcillo-limosa. Estructura poliédrica, media, moderadamente desarrollada. Muy plástico y adherente en mojado. Poco compacto. Abundantes poros. Frecuentes grietas medias. Presencia de abundantes raíces en grietas. Límite difuso.
Cg	135 +	Color marrón amarillento (2,5Y5/3), en húmedo; amarillo pálido (2,5Y6/4), en seco. Textura arcillo-limosa. Estructura poliédrica, gruesa, moderadamente desarrollada. Plástico y muy adherente en mojado. Poco compacto. Presencia de manchas de óxido-reducción. Horizonte de pseudogley.

DATOS ANALITICOS

HORIZONTE:	Ap	C1	C2	Cg
CARACTERISTICAS QUIMICAS				
pH (H ₂ O)	8,00	8,13	8,18	8,13
pH (KCl)	7,50	7,50	7,46	7,56
CO ₃ ⁼ (%)	27,54	27,73	22,95	36,34
Yeso (%)	4,30	4,64	7,03	6,36
Carbono orgánico (%)	1,10	0,90	0,88	
Materia orgánica (%)	1,90	1,54	1,51	
Nitrógeno total (%)	0,12	0,10	0,11	
C/N	9,2	9,0	8,0	
CARACTERISTICAS FISICAS				
Elementos gruesos, >2 mm (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
Arena muy gruesa, 2-1 mm (%)	0,46	0,13	0,33	0,23
Arena gruesa, 1-0,5 mm (%)	1,55	0,70	0,68	1,31
Arena media, 0,5-0,25 mm (%)	2,18	1,08	0,75	1,51
Arena fina, 0,25-0,1 mm (%)	9,89	3,58	2,00	1,49
Arena muy fina, 0,1-0,05 mm (%)	6,07	7,58	4,45	1,42
Limo grueso, 0,05-0,02 mm (%)	15,31	15,86	10,31	7,97
Limo medio, 0,02-0,005 mm (%)	24,97	26,86	24,71	25,01
Limo fino, 0,005-0,002 mm (%)	12,23	14,00	16,64	20,53
Arcilla, <0,002 mm (%)	27,34	30,21	40,12	40,53
Retención de agua a -33 kPa (% peso)	19,79	21,17	24,19	
Retención de agua a -1500 kPa (% peso)	11,09	11,59	14,87	
Densidad real (g/cm ³)	2,76	2,78	2,78	2,79
Densidad aparente (g/cm ³)	1,71	1,65	1,65	1,65
Porosidad total (%)	38,04	40,65	40,65	40,86
Límite líquido (% peso)	24,9	27,8	32,7	37,2
Límite plástico (% peso)	21,7	22,5	25,6	28,6
SALINIDAD				
C.E., extracto 1:5 (dS/m)	0,11	0,14	0,15	0,20
C.E., extracto saturado (dS/m)				
Cloruros (meq/L)				
Sulfatos (meq/L)				
Carbonatos (meq/L)				
Bicarbonatos (meq/L)				
Sodio (meq/L)				
Potasio (meq/L)				
Litio (meq/L)				
Calcio (meq/L)				
Magnesio (meq/L)				

ANEXO II

Calendario de prácticas culturales en cada uno de los ensayos

ENSAYO E1

PRACTICAS CULTURALES	CAMPANA AGRICOLA	PARCELAS ANUALES			PARCELAS AÑO-VEZ		
		V	Ch	SD	V	Ch	SD
Labor primaria	1990-91	06/08/90	03/08/90	-	11/02/91	11/02/91	-
Abonado fondo ¹		22/11/90	22/11/90	22/11/90	-	-	-
Herbicida presiembra ²		-	-	23/11/90	-	-	14/05/91
Labor secundaria		23/11/90	23/11/90	-	27/05/91	27/05/91	-
Siembra		26/11/90	26/11/90	26/11/90	-	-	-
Herbicida postemergencia ³		13/03/91	13/03/91	13/03/91	-	-	-
Herbicida postemergencia ⁴		03/04/91	03/04/91	03/04/91	-	-	-
Cosecha		20/06/91	20/06/91	20/06/91	-	-	-
Labor primaria	1991-92	20/09/91	20/09/91	-	-	-	-
Abonado fondo ⁵		04/11/91	04/11/91	04/11/91	04/11/91	04/11/91	04/11/91
Herbicida presiembra ⁶		-	-	04/11/91	-	-	04/11/91
Labor secundaria		05/11/91	05/11/91	-	05/11/91	05/11/91	-
Siembra		18/11/91	18/11/91	18/11/91	18/11/91	18/11/91	18/11/91
Herbicida postemergencia ⁷		03/03/92	03/03/92	03/03/92	03/03/92	03/03/92	03/03/92
Cosecha		-	-	-	-	-	-

^{1,5} Superfosfato 18% (400 kg/ha).

² En SD anual: Glifosato (2,5 l/ha). En SD año-vez: Paraquat+Diquat (2 l/ha).

³ Isoproturon (3 l/ha).

⁴ Tribenuron (25 g/ha).

⁶ Glifosato (2 l/ha).

⁷ Dicamba+MCPA (4 l/ha).

ENSAYO E2

PRACTICAS CULTURALES	CAMPAÑA AGRICOLA	PARCELAS ANUALES			PARCELAS AÑO-VEZ		
		V	Ch	SD	V	Ch	SD
Labor primaria	1990-91	20/09/90	20/09/90	-	31/01/91	31/01/91	-
Labor secundaria		18/10/90	18/10/90	-	23/03/91	23/03/91	-
Herbicida presiembra ¹		-	-	17/11/90	-	-	08/03/91
Siembra		21/11/90	21/11/90	21/11/90	-	-	-
Herbicida postemergencia ²		-	08/03/91	08/03/91	-	-	-
Abonado cobertera ³		16/03/91	16/03/91	16/03/91	-	-	-
Herbicida postemergencia ⁴		02/04/91	02/04/91	02/04/91	-	-	-
Cosecha		19/06/91	19/06/91	19/06/91	-	-	-
Labor primaria	1991-92	31/07/91	31/07/91	-	-	-	-
Herbicida presiembra ⁵		-	-	12/08/91	-	-	12/08/91
Herbicida presiembra ⁶		-	-	06/11/91	-	-	06/11/91
Labor secundaria		06/11/91	06/11/91	-	06/11/91	06/11/91	-
Siembra		18/11/91	18/11/91	18/11/91	18/11/91	18/11/91	18/11/91
Cosecha		22/06/92	22/06/92	22/06/92	22/06/92	22/06/92	22/06/92

¹ Glifosato (3,3 l/ha en SD anual y 1 l/ha en SD año-vez).

² Glifosato (1 l/ha).

³ Nitrate amónico 32% (150 kg/ha).

⁴ Diclóropicolina+MCPA+MCP (3,5 l/ha).

⁵ Paraquat+Diquat (3 l/ha).

⁶ Glifosato (2 l/ha).

ENSAYO E3

PRACTICAS CULTURALES	CAMPAÑA AGRICOLA	PARCELAS ANUALES			PARCELAS AÑO-VEZ		
		V	Ch	SD	V	Ch	SD
Labor primaria	1990-91	03/10/90	03/10/90	-	28/02/91	28/02/91	-
Abonado fondo ¹		05/10/90	05/10/90	05/10/90	-	-	-
Herbicida presiembra ²		-	-	12/11/90	-	-	-
Labor secundaria		23/11/90	23/11/90	-	29/04/91	29/04/91	-
Siembra		23/11/90	23/11/90	23/11/90	-	-	-
Herbicida postemergencia ³		-	-	15/03/91	-	-	-
Herbicida postemergencia ⁴		19/04/91	19/04/91	19/04/91	-	-	-
Abonado cobertera ⁵		25/04/91	25/04/91	25/04/91	-	-	-
Cosecha		02/07/91	02/07/91	02/07/91	-	-	-
Labor primaria	1991-92	23/09/91	23/09/91	-	-	-	-
Abonado fondo ⁶		15/10/91	15/10/91	15/10/91	15/10/91	15/10/91	15/10/91
Labor secundaria		15/10/91	15/10/91	-	15/10/91	15/10/91	-
Herbicida presiembra ⁷		-	-	23/10/91	-	-	23/10/91
Siembra		12/12/91	12/12/91	12/12/91	12/12/91	12/12/91	12/12/91
Herbicida postemergencia ⁸		-	-	15/04/92	-	-	15/04/92
Cosecha		02/07/92	02/07/92	02/07/92	02/07/92	02/07/92	02/07/92

¹ Complejo 8-24-8 (150 kg/ha).

² Glifosato (1 l/ha).

³ Clortolurón+Terbutrina+

+Triasulfurón (2 kg/ha).

⁴ 2,4-D+MCPA (0,75 l/ha).

⁵ Nitrato amónico 33,5% (90 kg/ha).

⁷ Glifosato (2 l/ha).

⁸ Clortolurón+Terbutrina+Triasulfurón (3 kg/ha)

ENSAYO E4

PRACTICAS CULTURALES	CAMPAÑA AGRICOLA	PARCELAS ANUALES		
		V	Ch	SD
Labor primaria	1990-91	31/07/90	25/07/90	-
Abonado fondo ¹		10/10/90	10/10/90	10/10/90
Labor secundaria		25/10/90	25/10/90	-
Herbicida presiembra ²		-	-	27/11/90
Siembra		23/11/90	23/11/90	23/11/90
Abonado cobertera ³		06/03/91	06/03/91	06/03/91
Herbicida postemergencia ⁴		12/03/91	12/03/91	12/03/91
Cosecha		27/06/91	27/06/91	27/06/91
Labor primaria	1991-92	09/10/91	09/10/91	-
Abonado fondo ⁵		21/10/91	21/10/91	21/10/91
Herbicida presiembra ⁶		-	-	02/11/91
Labor secundaria		08/11/91	08/11/91	-
Siembra		11/11/91	11/11/91	11/11/91
Herbicida postemergencia ⁷		28/01/92	28/01/92	28/01/92
Abonado cobertera ⁸		04/02/92	04/02/92	04/02/92
Cosecha		09/07/92	09/07/92	09/07/92

¹ Complejo 20-30-12 (300 kg/ha).

² Glifosato (2 l/ha).

³ Nitrato amónico 30% (250 kg/ha).

⁴ Clortolurón+Terbutrina (3,5 l/ha).

⁵ Complejo 9-20-16 (300 kg/ha).

⁶ Glifosato (1 l/ha).

⁷ Imazetabenz (1,8 l/ha).

⁸ Urea 46% (180 kg/ha).

ANEXO III

**Cuadros-resumen de parámetros de suelo y planta determinados
a lo largo del período experimental en los diferentes sitios de ensayo**

ENSAYO E1

Campaña	Fecha	Parámetros de suelo	Parámetros de planta	Estadio del cultivo ¹
1990-91	17/12/90	W ² ,RP ³	-	Germinación (00-09)
	11/02/91	-	Índice de emergencia. Porcentaje de emergencia. Profundidad de siembra. LAI, altura, biomasa.	Crecimiento de la plántula (11)
	25/03/91	K _{fs} ⁴ ,S ⁵	-	Ahijado (22-23)
	03/04/91	W,RP	LAI, biomasa de hojas y tallos. Número de plantas e hijuelos.	Principios de encañado (30-31)
	09/05/91	W,RP	LAI, biomasa de hojas verdes y secas, de tallos y de espigas. Número de plantas, hijuelos y espigas.	Espigado (55-59)
	30/05/91	W,RP	Idem anterior.	Formación del grano Fase lechosa (73-75)
	20/06/91	W	Idem anterior excepto LAI. Número y peso de granos.	Maduración (99)
	09/07/91	K _{fs} ,S	-	-
1991-92	27/11/91	W,RP	-	Germinación (00-09)
	26/12/91	-	Índice de emergencia. Porcentaje de emergencia. Profundidad de siembra. LAI, altura y biomasa.	Crecimiento de la plántula (11-12)
	21/02/92	K _{fs} ,S	-	Ahijado (22)
	27/03/92	W,RP	LAI, biomasa de hojas y tallos. Número de plantas e hijuelos.	Principios de encañado (30)
	22/04/92	-	Idem anterior.	Encañado (31)
	06/05/92	W,RP	Idem anterior excepto LAI.	-
	23/06/92	W,RP	-	-
	08/07/92	K _{fs} ,S	-	-
	24/07/92	DTA ⁶	-	-

¹Códigos según Zadoks et al. (1974).

²W, contenido de humedad gravimétrico.

³RP, resistencia del suelo a la penetración.

⁴K_{fs}, conductividad hidráulica a saturación.

⁵S, sortividad.

⁶DTA, distribución de tamaños de agregados.

ENSAYO E2

Campana	Fecha	Parámetros de suelo	Parámetros de planta	Estadio del cultivo ¹
1990-91	19/12/90	W ² ,RP ³	-	Germinación (00-09)
	08/04/91	W,RP	-	Encañado (30-31)
	04/06/91	W,RP	-	Formación del grano Fase lechosa (77-79)
	19/06/91	W	Rendimiento en grano.	Maduración (99)
1991-92	09/12/91	W,RP	-	Germinación (00-09)
	31/03/92	W,RP	-	Principios de encañado (30)
	04/05/92	W,RP	-	Espigado (50-55)
	22/06/92	W,RP	Biomasa de tallos, espigas y granos. Número de plantas, espigas y granos.	Maduración (99)
	28/07/92	DTA ⁴	-	-

¹ Códigos según Zadoks et al. (1974).

² W, contenido de humedad gravimétrico.

³ RP, resistencia del suelo a la penetración.

⁴ DTA, distribución de tamaños de agregados.

ENSAYO E3

Campaña	Fecha	Parámetros de suelo	Parámetros de planta	Estadio del cultivo ¹
1990-91	11/01/91	W ² ,RP ³	-	Germinación (00-09)
	28/02/91	-	Índice de emergencia. Porcentaje de emergencia. Profundidad de siembra. LAI, altura, biomasa.	Crecimiento de la plántula (11-12)
	25/04/91	W,RP	LAI, biomasa de hojas y tallos. Número de plantas e hijuelos.	Principios de encañado (30-31)
	21/05/91	W,RP	LAI, biomasa de hojas verdes y secas, de tallos y de espigas. Número de plantas, hijuelos y espigas.	Espigado (50-59)
	06/06/91	W,RP	Idem anterior.	Formación del grano Fase lechosa (73-77)
	02/07/91	W	Idem anterior excepto LAI. Número y peso de granos.	Maduración (99)
1991-92	19/12/91	W,RP	-	Germinación (00-09)
	26/02/91	-	Porcentaje de emergencia. Profundidad de siembra. LAI, altura y biomasa.	Crecimiento de la plántula (11)
	27/04/92	W,RP	LAI, biomasa de hojas y tallos. Número de plantas e hijuelos.	Principios de encañado (30-31)
	13/05/92	W,RP	LAI, biomasa de hojas verdes y secas, de tallos y de espigas. Número de plantas, hijuelos y espigas.	Espigado (48-59)
	04/06/92	W,RP	Idem anterior.	Formación del grano Fase pastosa (83-85)
	02/07/92	W,RP	Idem anterior excepto LAI. Número y peso de granos.	Maduración (99)
	29/07/92	DTA ⁴	-	-

¹ Códigos según Zadoks et al. (1974).

² W, contenido de humedad gravimétrico.

³ RP, resistencia del suelo a la penetración.

⁴ DTA, distribución de tamaños de agregados.

ENSAYO E4

Campaña	Fecha	Parámetros de suelo	Parámetros de planta	Estadio del cultivo ¹
1990-91	24/01/91	W ² ,RP ³	-	Germinación (00-09)
	22/04/91	W,RP	-	Encañado (31)
	28/05/91	W,RP	-	Formación del grano Fase lechosa (77-79)
	27/06/91	W	Rendimiento en grano.	Maduración (99)
1991-92	22/11/91	W,RP	-	Germinación (00-09)
	18/03/92	W,RP	-	Principios de encañado (30-31)
	30/04/92	W,RP	LAI, biomasa de hojas verdes y secas, de tallos y de espigas. Número de plantas, hijuelos y espigas.	Espigado (55-57)
	27/05/92	W,RP	Idem anterior.	Formación del grano Fase pastosa (83-85)
	09/07/92	W,RP	Idem anterior excepto LAI. Número y peso de granos.	Maduración (99)
	21/07/92	DTA ⁴	-	-
	21-29/07/92	M ⁵	-	-

¹ Códigos según Zadoks et al. (1974).

² W, contenido de humedad gravimétrico.

³ RP, resistencia del suelo a la penetración.

⁴ DTA, distribución de tamaños de agregados.

⁵ M, estudio de macroporosidad.