

# EL PAPEL DE LA HETEROGENEIDAD ESPACIAL EN LA RESTAURACIÓN DE UN ECOSISTEMA SEMIÁRIDO DEGRADADO I. DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LA SUPERVIVENCIA

FERNANDO T. MAESTRE<sup>1</sup>, JORDI CORTINA<sup>1</sup>, SUSANA BAUTISTA<sup>1,2</sup>,  
JUAN BELLOT<sup>1</sup> Y RAMÓN VALLEJO<sup>2</sup>

## RESUMEN

Las repoblaciones forestales en zonas semiáridas con frecuencia sufren marras elevadas. La determinación de los patrones espaciales de la mortalidad de los plántones introducidos y de los factores implicados puede ser un elemento clave para la optimización de la restauración en estos ambientes. En el presente artículo se evalúa la evolución del patrón espacial de la supervivencia de una repoblación realizada con *Pistacia lentiscus* en una zona semiárida de la provincia de Alicante durante los tres años posteriores a la plantación. La caracterización espacio-temporal se realizó mediante tres grupos de técnicas: (i) análisis geoestadístico, (ii) análisis SADIE y (iii), análisis de componentes principales (ACP). Los principales episodios de mortalidad se registraron durante el primer y el tercer verano después de la plantación. La supervivencia de los plántones no mostró un patrón espacial claro antes del primer verano en el campo. Después de este período se observa un importante cambio en el patrón espacial, apareciendo zonas de elevada y baja supervivencia dentro de la parcela. El patrón espacial mostró una gran consistencia entre las distintas fechas muestreadas, con pequeños cambios asociados a los principales periodos de mortalidad. Los resultados obtenidos indican que el primer verano en el campo es crítico para la delimitación del patrón espacial de la mortalidad.

**Palabras clave:** análisis espacial, geoestadística, *Pistacia lentiscus*, restauración, SADIE, semiárido, supervivencia de los plántones.

## SUMMARY

Spatial heterogeneity of seedling survival after planting is a key element in restoration of degraded semiarid areas. Identification of the causes responsible for this heterogeneity and actions towards integrating these findings into routine restoration activities are priorities within ecosystem management in arid and semiarid areas. We characterized temporal variations in the small-scale spatial pattern of seedling survival during three years after planting in a degraded semiarid site

<sup>1</sup> Departamento de Ecología. Universidad de Alicante. Apartado de Correos 99. 03080 Alicante.

<sup>2</sup> Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo. Parque Tecnológico. Charles Darwin, 14. 46980 Paterna (Valencia).

Recibido: 01/08/2002.

Aceptado: 24/03/2003.

in SE Spain. We used spatial analysis by distance indices (SADIE), geostatistics, and Principal Components Analysis (PCA) to characterize the spatio-temporal dynamics of seedling survival. Main seedling mortality was detected during the first summer in the field, with a second main mortality during the third summer. Spatial pattern of seedling survival did not show any deviation from randomness before the first summer. After this date, it became strongly clumped, showing the formation of patches (areas of high survival) and gaps (areas of low survival). We found a strong similarity in the spatial pattern between the different surveys. PCA suggested that major increases in the degree of patchiness with time were coupled with mortality events. Our results suggest that the first summer in the field is a key period in the establishment of seedling survival spatial patterns.

**Key words:** geostatistics, *Pistacia lentiscus*, restoration, SADIE, seedling survival, semiarid, spatial variability.

## INTRODUCCIÓN

Las zonas áridas y semiáridas ocupan un tercio de la superficie terrestre (MEIGS 1953) y se espera que su extensión aumente debido a los cambios climáticos que se esperan en las próximas décadas (SCHLESINGER *et al.* 1990). Algunas actividades que han venido realizándose en estas áreas durante siglos, como la agricultura, el pastoreo y la utilización de la madera, han deteriorado la vegetación y las condiciones edáficas de estos lugares, provocando un incremento en su tasa de desertificación (SCHLESINGER *et al.* 1990; PUIGDEFÁBREGAS & MENDIZÁBAL 1998). Debido al importante papel que la vegetación tiene en la conservación del suelo (CASTILLO *et al.* 1997; ALBALADEJO *et al.* 1998), la revegetación de las zonas áridas y semiáridas degradadas ha cobrado especial relevancia como estrategia para luchar contra la erosión y la desertificación (GRANTZ *et al.* 1998; LE HOUÉROU 2000).

Uno de los principales factores que condiciona el éxito de las actividades de restauración en estos ambientes es la mortalidad de los plantones durante las primeras etapas tras la plantación (SERRADA 1997). La caracterización del patrón espacial de dicha mortalidad y de los factores responsables puede ser un elemento clave para la optimización de las actividades de restauración en zonas semiáridas (VALLEJO *et al.* 2000a; CORTINA & VALLEJO 1999). A una escala regional, la variabilidad en la litología, el tipo de suelo y el clima son factores que van a influenciar

la heterogeneidad espacial en la supervivencia de plantaciones efectuadas en estos ambientes (VILAGROSA *et al.* 1997; ALLOZA & VALLEJO 1999). A escalas locales, la disponibilidad de agua es un elemento fundamental que va a controlar la supervivencia de los plantones (GRANTZ *et al.* 1998; WHISENANT 1999). En parcelas experimentales, aparentemente homogéneas, se ha registrado una alta variabilidad espacial en la mortalidad, tanto dentro de la parcela como entre réplicas (VILAGROSA *et al.* 1997; FONSECA 1999; VILAGROSA 2002). Si bien no es posible determinar los agentes causales de la mortalidad mediante el estudio de su patrón espacial, éste puede proporcionar valiosa información sobre los procesos que son importantes en su formación (GREIG-SMITH 1983; DALE 1999).

A pesar de su importancia, existe una falta de estudios que hayan caracterizado de manera cuantitativa el patrón espacial de la supervivencia de los plantones durante los primeros años después de la plantación, así como su evolución en el tiempo. Asimismo, existe una falta de conocimiento sobre la idoneidad de las distintas técnicas estadísticas existentes, por lo que es necesaria la puesta a punto de técnicas apropiadas para el análisis espacial de la supervivencia de los plantones. Recientemente se han utilizado técnicas geoestadísticas para la caracterización de la supervivencia y el crecimiento de especies forestales templadas a medio y largo plazo (BIONDI *et al.* 1994; MEREDIEU *et al.* 1996). Otras técnicas de reciente aparición,

como el método SADIE («Spatial Analysis by Distance IndicEs», PERRY 1998; PERRY *et al.* 1999), han sido empleadas para el análisis de la distribución espacial de malas hierbas (PERRY 1995), insectos (HOLLAND *et al.* 1999; WINDER *et al.* 1999), nemátodos (PERRY 1998), patógenos vegetales (TURECHEK & MADDEN 1999) y propiedades edáficas superficiales (MAESTRE & CORTINA 2002). Análisis previos muestran que puede ser apropiada para el análisis de las especies utilizadas en las repoblaciones.

En el presente estudio se analiza el patrón espacio-temporal de la supervivencia de una repoblación de lentisco (*Pistacia lentiscus* L.), efectuada en una zona semiárida de la provincia de Alicante, utilizando técnicas geoestadísticas y el método SADIE. El principal objetivo de este trabajo es describir el patrón espacial de la supervivencia de esta repoblación y evaluar su dinámica durante los tres primeros años tras la plantación. SADIE no ha sido empleado en el análisis de la heterogeneidad espacial en la supervivencia de una plantación, por lo que se evalúa en este trabajo su utilidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una parcela experimental de 100 x 28 m localizada cerca de Crevillente, en la provincia de Alicante (figura 1). El clima es termomediterráneo semiárido, con una precipitación media anual de 277 mm y una temperatura media anual de 20,1 °C (12,5 °C en enero y 28,8 °C en julio) para el período 1960-1990 (PÉREZ CUEVA 1994). La zona de estudio recibe más de 2900 horas de sol al año y presenta una pronunciada sequía desde mayo a septiembre, donde se recoge menos del 13 % de la precipitación media anual. La parcela presenta una pendiente del 32% (figura 1) y una exposición de 260 °SW. El suelo se clasifica como *Lithic Calciorthid* (SOIL SURVEY STAFF 1994). La vegetación natural es escasa y presenta una cobertura inferior al 30%, estando compuesta principalmente por caméfitos como *Fagonia cretica* L., *Sideritis leucantha* Cav. y *Thymus vulgaris* L.

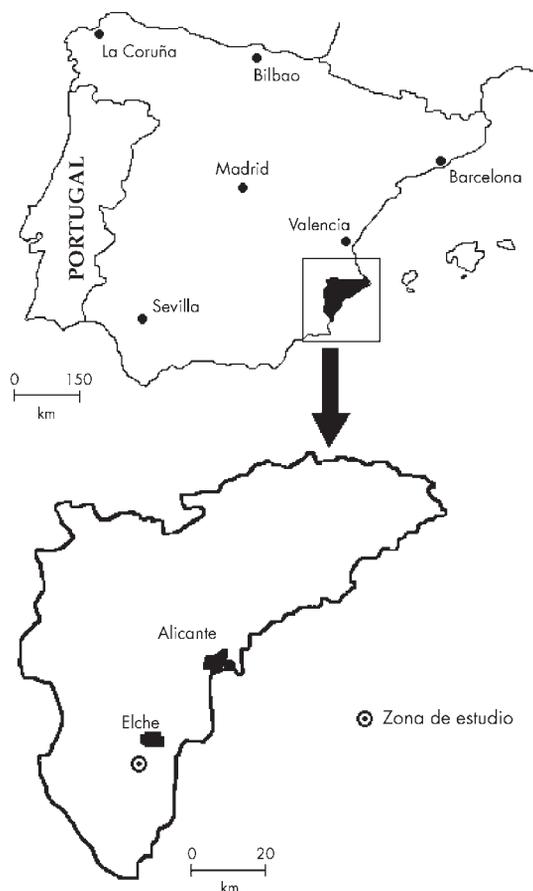
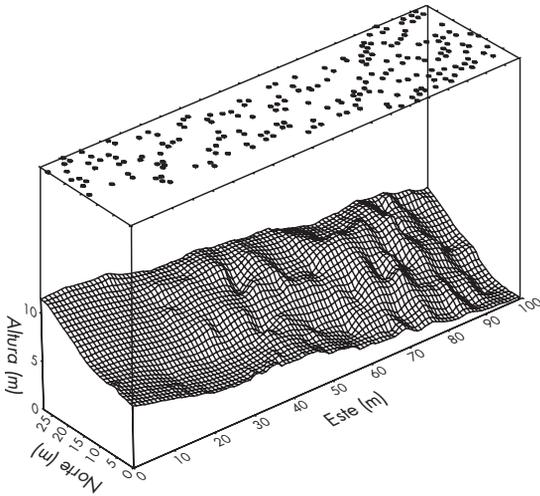


Figura 1 - Localización de la zona de estudio.

Figure 1 - Location of the study area.

### Diseño experimental

En diciembre de 1997 se plantaron aleatoriamente y mediante ahoyado mecánico de 40\*40\*40 cm 205 individuos de una variedad local de *P. lentiscus*, dando una densidad de 732 plantones\*ha<sup>-1</sup> (figura 2). La localización espacial de los plantones se realizó durante la primavera de 2000, utilizando para ello una estación total (modelo TC1101, Leica, Heerbrugg, Suiza). Para caracterizar la respuesta de los plantones se evaluó su supervivencia durante los tres años posteriores a la plantación, evaluándola cuatro veces durante el primer año (abril, julio, septiembre y noviembre de 1998), dos veces en el segundo (abril y noviembre de 1999) y tres veces en el tercero (abril, septiembre y diciembre de 2000). Durante este tiempo no se procedió en ningún momento a regar o fertilizar los planto-



**Figura 2** - Mapa topográfico de la parcela experimental (gráfico inferior) y localización espacial de los plantones evaluados (gráfico superior). La posición de cada plantón está indicada como un punto negro.

**Figure 2** - Topographical map of the plot (lower graph) and spatial location of evaluated seedlings (upper map). The position of each seedling is indicated as a black dot.

nes de manera artificial, transcurriendo la experiencia en condiciones naturales.

**Análisis espacial de la supervivencia: geoestadística**

Para caracterizar el patrón espacial de la supervivencia se ha utilizado el semivariograma, una herramienta geoestadística que mide el grado de autocorrelación resultante de la estructura espacial de los datos (OLIVER & WEBSTER 1987). Cuando la supervivencia muestra una estructura espacial, el semivariograma incrementa sus valores con la distancia debido a la comparación de muestras vecinas que son similares y están correlacionadas hasta que llega a una asíntota, que indica la distancia o rango a partir del cual las muestras están independientemente relacionadas. En este caso el rango indicaría la longitud media de zonas de elevada o baja supervivencia, mientras que la semivarianza a distancia cero o «nugget» indica la varianza no explicada espacialmente. Esta varianza se debe a errores de medida y a la variación espacial existente a distancias menores que el intervalo de muestreo menor (WEBSTER & OLIVER 1990). Los semivariogramas experi-

mentales fueron calculados de acuerdo a la siguiente ecuación (WEBSTER & OLIVER 1990):

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} \{z(\mathbf{x}_i) - z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})\}^2 \quad (1)$$

donde  $\hat{\gamma}$  es la semivarianza,  $z(\mathbf{x}_i)$  y  $z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})$  son los valores de cobertura observados en los puntos de muestreo  $\mathbf{x}_i$  y  $\mathbf{x}_i + \mathbf{h}$  respectivamente,  $\mathbf{h}$  es la separación entre puntos de muestreo y  $N(\mathbf{h})$  es el número de comparaciones existentes a una determinada separación  $\mathbf{h}$ .

Todos los semivariogramas calculados fueron omnidireccionales. Para cuantificar el grado de dependencia espacial y obtener posteriormente mapas de la distribución espacial de las zonas de alta y baja supervivencia, se ajustaron modelos a los semivariogramas que permitiesen relacionar la semivarianza con la distancia de separación entre pares de puntos. Los semivariogramas fueron ajustados utilizando dos tipos de modelos: esférico y lineal (WEBSTER & OLIVER 1990). Los modelos fueron ajustados por mínimos cuadrados, ponderando cada valor del semivariograma por el número de comparaciones que presenta (OLIVER & WEBSTER 1991). En todos los casos donde los semivariogramas mostraron la presencia de estructura espacial, se apreciaron dos rangos de variación, por lo que se utilizó la combinación de dos modelos sencillos para modelar el semivariograma (WEBSTER & OLIVER 1990).

El modelo esférico es especialmente útil para interpretar patrones espaciales en mosaico, donde el rango es menor que la distancia máxima a la que se realiza el análisis. En este modelo, la semivarianza se relaciona con la distancia según la siguiente ecuación (WEBSTER & OLIVER 1990):

$$\gamma(0) = 0 \quad (2a)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right\} \text{ para } 0 < h \leq a \quad (2b)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad \text{para } h > a \quad (2c)$$

donde  $C_0$  es el «nugget»,  $C$  es la varianza estructural y  $a$  es el rango. para modelar el semivariograma:

El modelo lineal se utiliza en aquellos casos donde se observa una continuidad espacial en gradiente, sin manchas definidas dentro de la distancia máxima analizable. La ecuación que describe este modelo es la siguiente (WEBSTER & OLIVER 1990):

$$\gamma(h) = C_0 + (C h^w) \quad (3)$$

donde  $C_0$  es el «nugget»,  $w$  es un exponente con valores comprendidos entre 0 y 2 y  $C$  es la pendiente de la recta. En este modelo el rango se elige arbitrariamente como la distancia máxima a la que se ha estimado el semivariograma (JACKSON & CALDWELL 1993), mientras que el «sill» es el valor de la semivarianza a esta distancia.

Para todos los semivariogramas calculados, se utilizó la proporción de la varianza explicada por el modelo ajustado para obtener una medida de la dependencia espacial de los datos (DPE) conforme a la ecuación (ROBERTSON & FRECKMAN 1995):

$$DPE = \frac{C_1 + C_2}{C_0 + C_1 + C_2} * 100 \quad (4)$$

donde  $C_0$  es el «nugget» y  $C_1$  y  $C_2$  son los valores de varianza estructural para el primer y segundo rango respectivamente. En los modelos que sólo tienen un rango,  $C_2 = 0$ . El cálculo de los semivariogramas y el ajuste de los modelos se realizó con el programa GSTAT 2.3.2 (PEBESMA & WELLINGS 1998).

Una vez ajustados los modelos a los semivariogramas experimentales, se elaboraron mapas para localizar espacialmente las áreas de baja y elevada supervivencia en cada uno de los muestreos. Estos mapas se obtuvieron mediante la técnica del «kriging» (DEUTSCH & JOURNAL 1998), herramienta geoestadística que utiliza la estructura espacial de los datos descrita con el semivariograma para estimar los valores de una variable en lugares no muestreados. En el caso de la supervivencia de los plantones introducidos, los mapas obtenidos mediante esta técnica indican la probabilidad de encontrar un planctón vivo en un punto determinado (GOOVAERTS

1997; DEUTSCH & JOURNAL 1998). Los cálculos del «kriging» se realizaron con el programa GSLIB (DEUTSCH & JOURNAL 1998), mientras que los mapas fueron elaborados con el programa SURFER (Golden Software, Colorado, USA).

### **Análisis espacial de la supervivencia: método SADIE**

El método SADIE calcula el patrón espacial de un conjunto de datos estimando el mínimo esfuerzo necesario para obtener una distribución regular donde la variable objeto de estudio tenga el mismo valor en todos los puntos de muestreo (PERRY 1995; 1998). En la práctica, este esfuerzo se mide con la mínima distancia requerida para obtener dicha regularidad,  $D$ . El valor de  $D$  se obtiene utilizando el algoritmo de transporte proporcionado por KENNINGTON & HELGASON (1980), basado en la existencia de flujos de individuos y fracciones de individuos desde unidades muestrales «donantes» (puntos de muestreo con abundancia superior a la media) hacia unidades muestrales «receptoras» (puntos de muestreo con abundancia inferior a la media). Generalmente, cuanto mayor es  $D$ , mayor agregación espacial hay en los datos. Para estimar la magnitud de  $D$ , su valor es comparado con los valores obtenidos en un test de Monte Carlo, basado en una serie de permutaciones donde los valores observados son distribuidos al azar entre los puntos de muestreo (LEGENDRE & LEGENDRE 1998). En particular, la división del valor observado de  $D$  por el valor medio obtenido a partir de las permutaciones produce un índice de agregación,  $I_a$ , que es utilizado para describir el patrón espacial de los datos. Los datos muestran una distribución agregada si  $I_a > 1$ , aleatoria si  $I_a = 1$  y regular si  $I_a < 1$  (PERRY 1998; PERRY *et al.* 1999). La comparación del valor observado de  $D$  con las colas de la distribución de los valores obtenidos con las permutaciones permite establecer su significación estadística. Utilizando el usual test de dos colas y un valor  $\alpha = 0,05$ , un conjunto de datos tendrán un patrón agregado si el  $P$ -valor es menor de 0,05, un patrón aleatorio si el  $P$ -valor se encuentra en el intervalo 0,05-0,95 y un patrón regular si es mayor de 0,95.

Aunque  $I_a$  proporciona una medida general del patrón espacial para el conjunto de datos, no recoge todas sus características. Así, no proporciona evidencia de si un punto de muestreo concreto que tiene un valor elevado o bajo forma parte, respectivamente, de una mancha (zonas de elevada supervivencia) o de un claro (zonas de baja supervivencia), o si se distribuye al azar (PERRY *et al.* 1999). Otro índice complementario proporcionado por SADIE es el índice de agrupación ( $v$ ), que específicamente mide el grado de agrupación de los datos en manchas y claros. A su vez, este índice cuantifica el grado en el que cada unidad de muestreo contribuye al patrón espacial global en los datos. Si se considera una unidad  $A$  donante que tiene un flujo de unidades hacia  $n$  unidades receptoras, la distancia media de flujo,  $Y_A$ , se calcula como (nomenclatura y formulación conforme a PERRY *et al.* 1999):

$$Y_A = \frac{\sum_n d_{AZ} v_{AZ}}{\sum_n v_{AZ}} \quad (4)$$

donde  $v_{AZ}$  es el flujo hacia la unidad receptora  $Z$  y  $d_{AZ}$  es la distancia de este flujo,  $[(x_A - x_Z)^2 + (y_A - y_Z)^2]^{1/2}$ , siendo  $x$  e  $y$  las coordenadas bidimensionales. Así pues, existe un valor de  $Y$  para cada una de las unidades donantes.  $Y_A$  es un buen indicador de la agregación porque tiende a ser más elevado para una unidad que forma parte de una mancha que para una que tiene un valor de la variable a estudiar elevado pero que está rodeada por unidades vecinas con valores bajos. No obstante, depende de la escala a la que las distancias son medidas, de la magnitud del valor y de su localización respecto a otras unidades. Para tener en cuenta estas características, SADIE utiliza un índice de agregación adimensional,  $v$ , obtenido a partir de la siguiente relación:

$$v = \frac{Y_A \circ Y}{{}_A Y_c Y} \quad (5)$$

donde  $Y_A$  es la distancia media de flujo descrita en la ecuación 1.8,  ${}_c Y$  representa la media de los valores de  $Y_A$  obtenidos al asignar el valor de  $A$  a otras unidades durante las permutaciones,  ${}_A Y$  es la media de los valores absolutos de

$Y_A$  obtenidos para cada uno de los valores numéricos que fueron asignados a la localización espacial de  $A$  durante las permutaciones e,  $Y$  es la media de los valores de  ${}_A Y$  para cada una de las unidades de muestreo. Para las unidades receptoras,  $v$  se calcula de igual forma, con la convención de que es negativo en signo. Más detalles sobre los cálculos pueden encontrarse en PERRY *et al.* (1999) y en MAESTRE (2002).

Puntos de muestreo que están situados dentro de una mancha tienen valores de  $v$  (por convención  $v_i$ ) elevados, mientras que aquellas unidades que forman un claro presentan valores de  $v$  (por convención  $v_j$ ) elevados y negativos. La presencia de agrupaciones en los datos viene dada por valores elevados de  $v_i$  o  $v_j$ . Valores de  $v_i$  mayores que 1,5 indican la presencia de una mancha, mientras que valores de  $v_j$  inferiores a -1,5 indican la existencia de un claro; aquellos valores cercanos a 1 indican una distribución aleatoria de esa unidad (PERRY *et al.* 1999). Para evaluar estadísticamente el grado de agrupación de los datos, se realizan dos test de Monte Carlo para unidades donantes y receptoras, respectivamente. En cada caso, los valores medios de  $v_i$  y  $v_j$  son comparados con los valores obtenidos en las permutaciones, de la misma forma que ocurre con  $I_a$  (PERRY *et al.* 1999). Una interesante propiedad de  $v$  es que es una variable continua, y si se localizan en un mapa de los puntos muestreados, los valores de  $v_i$  y  $v_j$  representan visualmente la localización y tamaño de las manchas y los claros.

El patrón espacial de la supervivencia se caracterizó para cada uno de los muestreos utilizando 2.340 permutaciones con el software descrito en PERRY *et al.* (1999). Los mapas del índice de agrupación se realizaron mediante interpolación lineal con el programa SURFER (Golden Software, Colorado, USA).

### Dinámica temporal del patrón espacial de la mortalidad

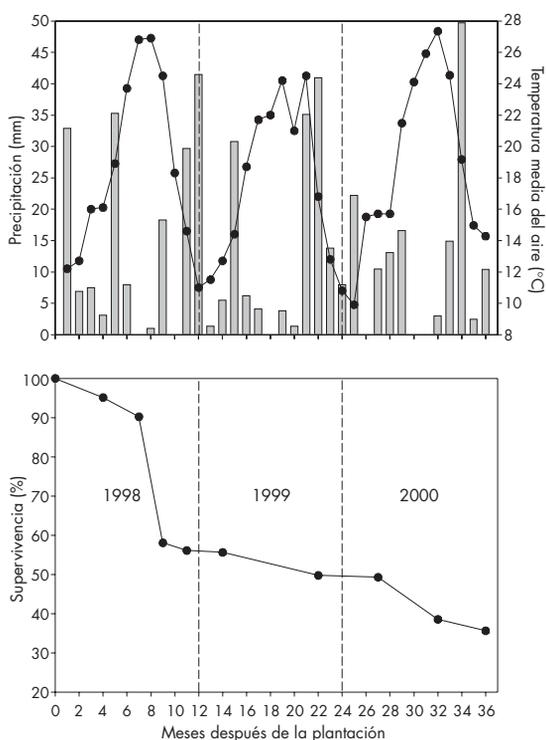
Los cambios en el tiempo del patrón espacial de la supervivencia se evaluaron con un análisis de componentes principales (ACP) de los valores de  $v$  correspondientes a los diferentes

muestreos. Este índice refleja para cada plánton su pertenencia a una mancha (zona de elevada supervivencia), a un claro (zona de baja supervivencia) o a una zona donde la supervivencia se distribuye de manera aleatoria. Así pues, cambios en el patrón espacial de la supervivencia de los plánton con el tiempo se verán reflejados en este índice. Los valores de  $v$  para todos los muestreos mostraron desviaciones significativas de la normalidad (test de Kolmogorov-Smirnoff,  $P < 0,001$ ) y cierto grado de autocorrelación. No obstante, se realizó un ACP con rotación Varimax sin transformar los datos, ya que tanto las desviaciones de la distribución normal como la autocorrelación no afectan en gran medida a este análisis (WEBSTER 2001). El ACP se realizó con el programa SPSS para Windows 9.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

## RESULTADOS

La precipitación durante el periodo de estudio varió entre 142 y 181 mm, un 52-65% de la precipitación media anual (figura 3). Estos años de escasa precipitación no son inusuales en la zona de estudio, donde el 56 % de los años presentan precipitaciones inferiores a la media anual (PÉREZ CUEVA 1994). La supervivencia tres años después de la plantación fue del 36 % (figura 3). La evolución de la supervivencia mostró la presencia de un período de mortalidad principal durante el primer verano (1998), y dos períodos donde se produjo una mortalidad menor en la primavera de 1998 y el verano de 2000.

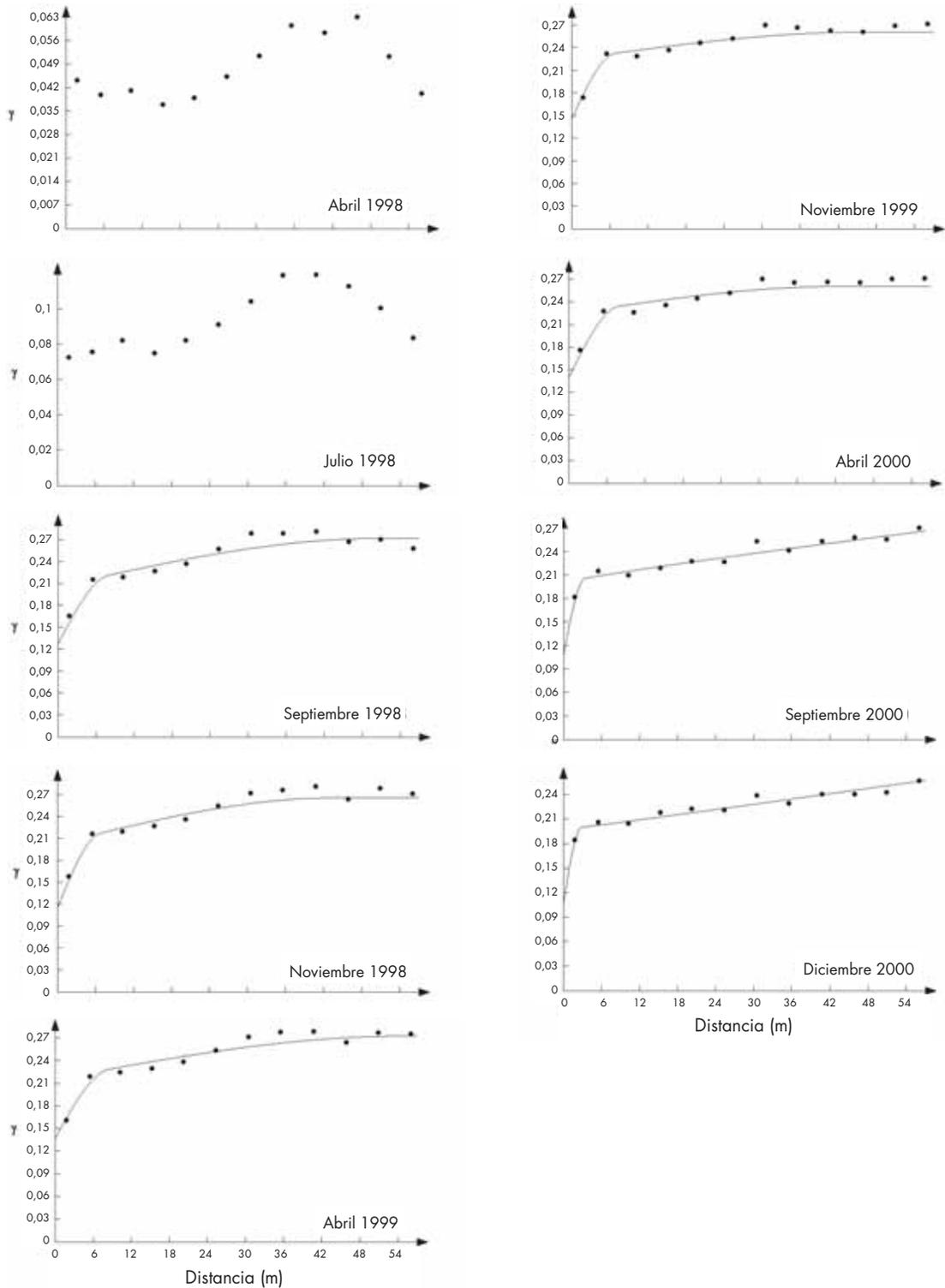
El análisis del patrón espacial de la supervivencia mediante los semivariogramas mostró la presencia de tres grupos de muestreos claramente diferenciados: abril-julio de 1998, septiembre de 1998-abril de 2000 y septiembre-diciembre de 2000 (figura 4). En el primer caso, los semivariogramas mostraron la ausencia de un patrón espacial claro. Después del primer verano en el campo, y hasta septiembre de 2000, el patrón espacial quedó caracterizado por un modelo esférico con dos rangos de variación, uno de 8 m y otro de 43-55 m, indicando la presencia de manchas de mortalidad



**Figura 3** - Evolución de las principales características climáticas (gráfico superior) y de la supervivencia de los plánton (gráfico inferior) durante el periodo de estudio (1998-2000). Los plánton fueron plantados en diciembre de 1997 ( $n = 205$ ). Los datos meteorológicos provienen de la estación meteorológica de Crevillente (38°13'N, 0°46'W).

**Figure 3** - Evolution of main climatic characteristics (upper graph) and seedling survival (lower graph) during the studied period (1998-2000). Seedlings were planted in late December 1997 ( $n = 205$ ). Meteorological data come from the Crevillente meteorological station (38°13'N, 0°46'W).

a dos escalas (tabla 1). En estos casos los modelos fijados explicaron entre el 44 y el 57% del total de la varianza, sugiriendo la presencia de una moderada dependencia espacial en los datos. El patrón vuelve a cambiar en septiembre de 2000, observándose una reducción del rango a pequeña escala hasta los 2 m y la aparición de un gradiente en la mortalidad. Este patrón permanece prácticamente inalterado en diciembre de 2000. Los mapas de probabilidad obtenidos mediante la técnica de «kriging» indican la distribución de las zonas de elevada y baja supervivencia dentro de la parcela (figura 5). Antes del primer verano en el campo la distribución espacial de la mortalidad se caracteriza por la ausencia de una gran agregación, aunque en julio de 1998 comienzan a



**Figura 4** - Semivariogramas de la supervivencia de los plantones durante los distintos muestreos. Cada punto del semivariograma tiene más de 380 pares.  $\gamma$  = semivarianza.

**Figure 4** - Semivariograms of seedling survival for the different surveys. Each semivariogram point has more than 380 pairs.  $\gamma$  = semivariance.

Muestreo	Modelo 1	Modelo 2	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	DPE
Abril 1998	(*)	(*)	-	-	-	-	-	-
Julio 1998	(*)	(*)	-	-	-	-	-	-
Septiembre 1998	Esférico	Esférico	0,13	0,21	0,27	7,98	50,77	52,75
Noviembre 1998	Esférico	Esférico	0,12	0,20	0,27	6,83	43,89	56,18
Abril 1999	Esférico	Esférico	0,14	0,22	0,27	8,55	54,72	49,45
Noviembre 1999	Esférico	Esférico	0,15	0,23	0,26	6,84	45,60	43,68
Abril 2000	Esférico	Esférico	0,15	0,23	0,27	7,98	42,72	45,28
Septiembre 2000	Esférico	Lineal	0,11	0,20	0,27	3,42	56,00(**)	60,00
Diciembre 2000	Esférico	Lineal	0,11	0,20	0,26	2,85	56,00(**)	57,98

(\*) No hay evidencia de una clara estructura espacial a esta escala. No se ajustó ningún modelo.  
 (\*\*) El valor del rango para un modelo lineal se ajusta arbitrariamente a la distancia máxima utilizada en el cálculo del semivariograma (JACKSON & CALDWELL 1993), que fue 56 m en este caso.

**Tabla 1** - Parámetros de los modelos dobles ajustados a los semivariogramas de los distintos muestreos de supervivencia. C<sub>0</sub> = «nugget», a<sub>1</sub> = primer rango (m) y a<sub>2</sub> = segundo rango (m), C<sub>1</sub> = varianza estructural para el primer rango, C<sub>2</sub> = varianza estructural para el segundo rango, DPE = dependencia espacial (%).

**Table 1** - Parameters of the nested models fitted to the semivariograms for the different survival surveys. C<sub>0</sub> = nugget variance, a<sub>1</sub> = first range (m) y a<sub>2</sub> = second range (m), C<sub>1</sub> = structural variance for the first range, C<sub>2</sub> = structural variance for the second range, DPE = spatial dependence (%).

apreciarse las primeras zonas de elevada mortalidad. En septiembre de 1998 hay un primer cambio importante en esta distribución, y varias zonas de elevada supervivencia comienzan a ser aparentes en la parte derecha de la parcela, a la vez que una zona principal de mortalidad comienza a ser visible en la parte central de la parcela. Este patrón se mantiene sin grandes cambios hasta diciembre de 2000, y sólo es destacable el incremento en el tamaño de la zona central de mortalidad y un aumento en el grado de agregación de las áreas de elevada supervivencia.

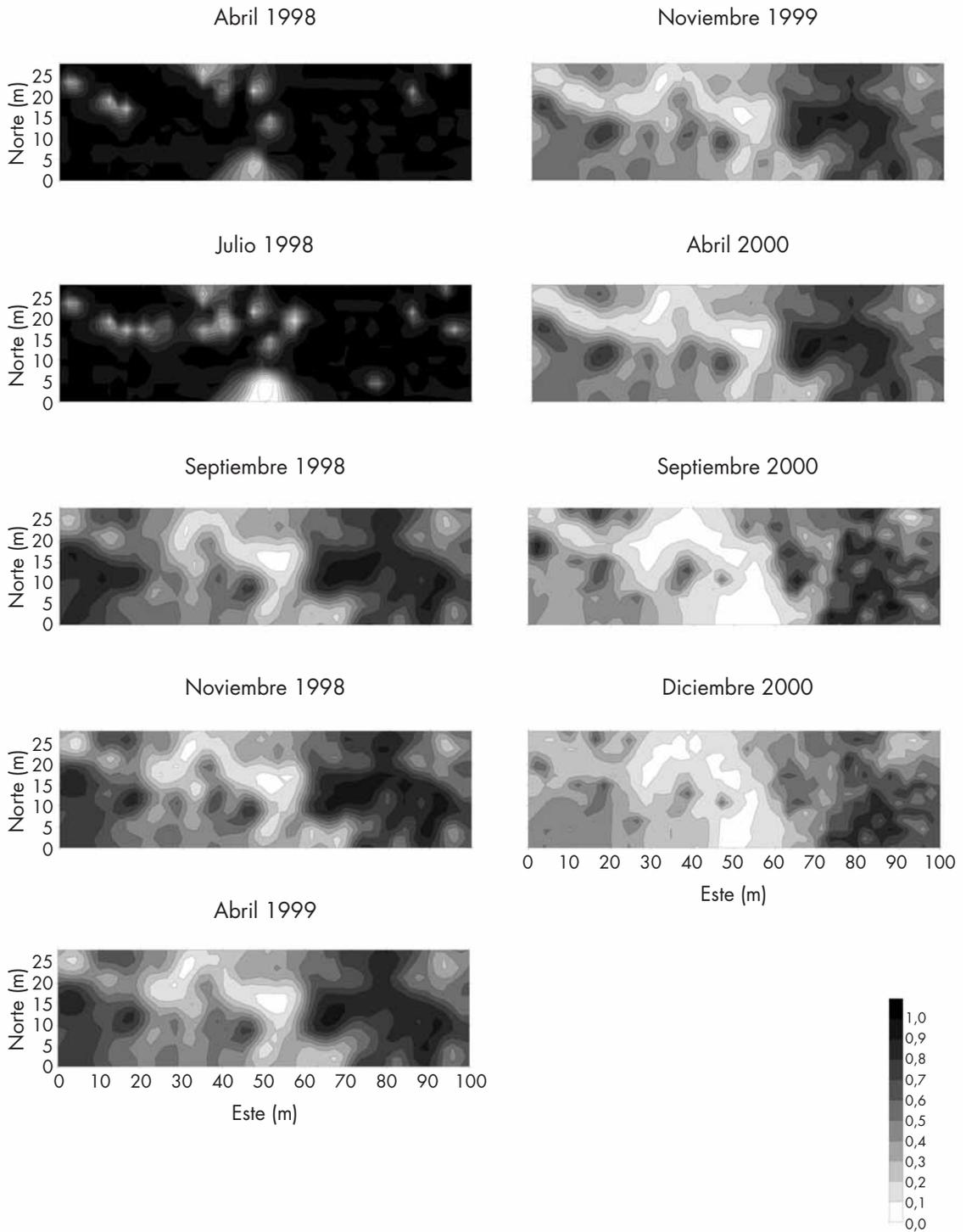
El análisis SADIE indicó la presencia de un patrón aleatorio en la mortalidad en los muestreos de abril y julio de 1998 (tabla 2). Después del primer verano en el campo el patrón espacial es significativamente agregado, como lo muestran los valores de I<sub>a</sub>. Los valores significativos de v<sub>i</sub> y V<sub>i</sub> indican la formación de manchas (zonas de elevada supervivencia) y claros (zonas de baja supervivencia). Hay una tendencia general hacia un incremento de todos los índices SADIE con el tiempo, indicando un aumento del grado de agregación de los datos. Los mapas de v muestran la distribución de las manchas y los claros dentro de la zona de estudio para los distintos muestreos (figura 6). Estos mapas confirman la complejidad del patrón espacial de la supervivencia sugerida por

Fecha	I <sub>a</sub>	V <sub>i</sub>	V <sub>i</sub>
Abril 1998	1,35 (0,127)	-1,23 (0,171)	1,43 (0,092)
Julio 1998	1,41 (0,102)	-1,23 (0,172)	1,54 (0,055)
Septiembre 1998	1,84 (0,016)	-1,63 (0,033)	2,03 (0,005)
Noviembre 1998	2,19 (0,003)	-1,91 (0,007)	2,44 (0,001)
Abril 1999	2,15 (0,005)	-1,90 (0,010)	2,42 (0,001)
Noviembre 1999	2,32 (0,001)	-2,07 (0,005)	2,47 (0,002)
Abril 2000	2,38 (0,002)	-2,10 (0,006)	2,52 (0,002)
Septiembre 2000	2,70 (0,001)	-2,37 (0,001)	3,10 (<0,001)
Diciembre 2000	2,69 (0,001)	-2,39 (0,002)	3,12 (0,001)

**Tabla 2** - Resultados del análisis SADIE para los diferentes muestreos (n = 205). El P-valor obtenido en el test de Monte Carlo se muestra entre paréntesis. I<sub>a</sub> = índice de agregación, V<sub>i</sub> = media del índice de agrupación para los claros (áreas de baja supervivencia) y V<sub>i</sub> = media del índice de agrupación para las manchas (áreas de elevada supervivencia).

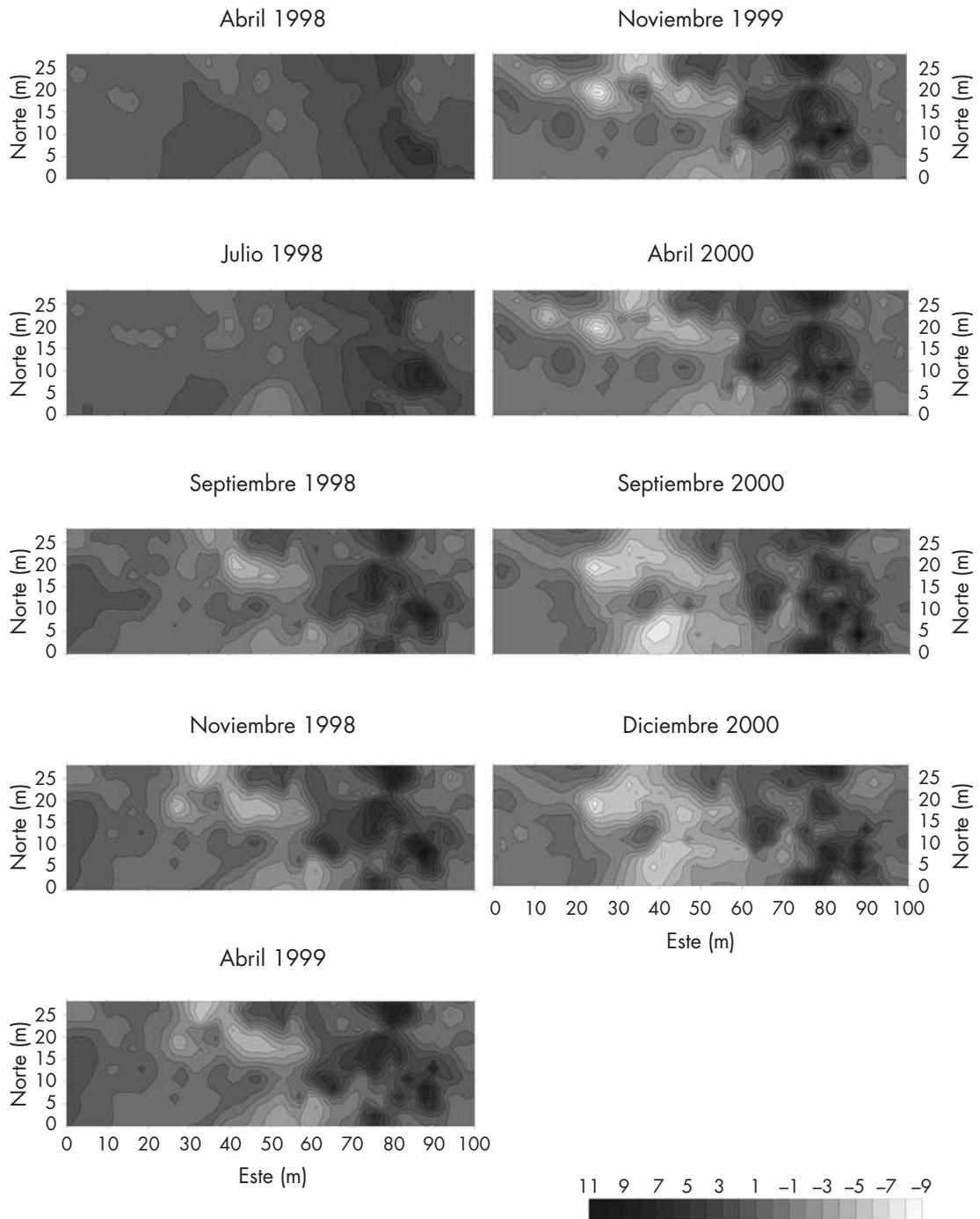
**Table 2** - Summary of SADIE analysis for the different surveys (n = 205). P values derived from a randomization test statistics are shown in brackets. I<sub>a</sub> = index of aggregation, V<sub>i</sub> = mean index of clustering for gaps (low survival areas), and V<sub>i</sub> = mean index of clustering for patches (high survival areas).

el análisis geoestadístico. Antes del primer verano en el campo, el patrón espacial es aleatorio, y sólo dos manchas principales que cruzan la parcela de norte a sur en la parte derecha de la parcela pueden apreciarse claramente. En septiembre de 1998 hay un primer cambio en esta distribución, y varias manchas comienzan a ser aparentes en esta parte derecha, a la vez que un claro principal se hace visible en el centro de la parcela. Este patrón permanece prácticamente sin cambios hasta diciembre de 2000,



**Figura 5** - Mapas de probabilidad de supervivencia obtenidos mediante «kriging», mostrando la distribución y evolución de las zonas de elevada supervivencia (en negro) y las de elevada mortalidad (en blanco) durante los tres años después de la plantación.

**Figure 5** - Isopleth maps of survival probability obtained with ordinary kriging showing the distribution and evolution of patches (high survival areas, in dark) and gaps (low survival areas, in white) during the three years after transplantation.



**Figura 6** - Mapas del índice de agregación ( $v$ ) obtenido con el análisis SADIE, mostrando la distribución y evolución de las zonas de elevada supervivencia (en negro) y las de elevada mortalidad (en blanco) durante los tres años después de la plantación.

**Figure 6** - Isopleth maps of SADIE index of clustering ( $v$ ) showing the distribution and evolution of patches (high survival areas, in dark) and gaps (low survival areas, in white) during the three years after transplantation.

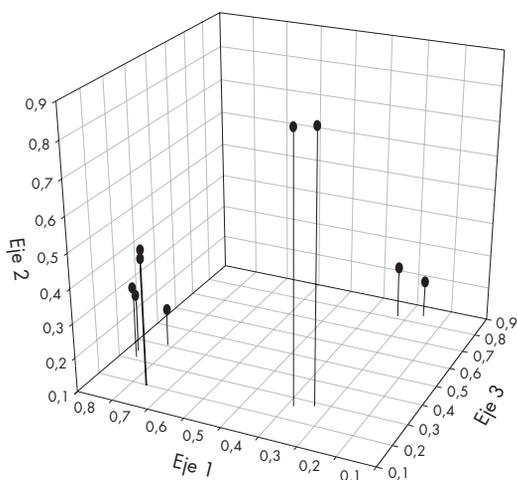
Componente	Autovalor	% de varianza explicado	% acumulado de varianza explicada
1	6,45	71,61	71,61
2	0,81	8,99	80,61
3	0,72	7,97	88,58

**Tabla 3** - Resumen del ACP con rotación Varimax realizado con los datos del índice de agrupación entre los distintos muestreos ( $n = 205$ ).

**Table 3** - Summary of PCA with Varimax rotation performed with the index of clustering between different surveys ( $n = 205$ ).

y sólo un incremento de tamaño en la mancha principal y un aumento en el grado de agregación de las manchas presentes en la parte derecha de la parcela es apreciable.

Los tres primeros ejes del ACP explicaron un 88% de la varianza en los datos (tabla 3), y claramente discriminaron tres grandes grupos de muestreos (figura 7). Estos cambios están relacionados con los principales incrementos del grado de agregación de la supervivencia, como ocurre entre junio y septiembre de 1998 y entre abril y septiembre de 2000.



**Figura 7** - Análisis de componentes principales con rotación Varimax del del índice de agrupación ( $v$ ) obtenido con el análisis SADIE para los distintos períodos de muestreo ( $n = 205$ ). A98 = abril 1998, J98 = julio 1998, S98 = septiembre 1998, N98 = noviembre 1998, A99 = abril 1999, N99 = noviembre 1999, A00 = abril 2000 y S00 = September 2000.

**Figure 7** - Principal components analysis after Varimax rotation of SADIE index of clustering ( $v$ ) for the different sampled dates ( $n = 205$ ). A98 = April 1998; J98 = July 1998; S98 = September 1998; N98 = November 1998; A99 = April 1999; N99 = November 1999; A00 = April 2000; S00 = September 2000.

## DISCUSIÓN

Los resultados del siguiente estudio muestran la presencia de un claro patrón espacial en la supervivencia de los plantones de *P. lentiscus* durante los primeros años tras la plantación. Este patrón espacial comienza a ser definido durante los primeros meses tras la plantación, llegando a establecerse claramente después de la mortalidad ocurrida durante el primer verano en el campo.

En zonas áridas y semiáridas, la disponibilidad de agua es el principal factor que va a condicionar el establecimiento de los plantones introducidos durante las actividades de restauración (GRANTZ *et al.* 1998; WHISENANT 1999). En estas áreas, se ha sugerido que la supervivencia de estas plantas está directamente relacionada con la duración de la sequía estival (ALLOZA & VALLEJO 1999; VALLEJO *et al.* 2000b). Los resultados obtenidos en este trabajo apoyan esta hipótesis, ya que los principales episodios de mortalidad tuvieron lugar durante los veranos de 1998 y 2000, dos períodos donde sólo se recogieron 27 y 18 mm de lluvia entre junio y septiembre, respectivamente. El verano de 1999 vino caracterizado por una baja mortalidad, que puede explicarse por las mejores condiciones climáticas registradas, con una precipitación recibida de 40 mm durante el mismo período y temperaturas más bajas.

Las dos técnicas utilizadas en este estudio han permitido detectar la presencia de patrones espaciales marcados en la zona de estudio. La geoestadística permite caracterizar el tamaño de las manchas de supervivencia a través del semivariograma y obtener mapas de probabilidad de supervivencia. No obstante, no permite testar significativamente si el patrón general difiere de la aleatoriedad, ni permite identificar para cada plantón por separado su inclusión en áreas estadísticamente significativas de elevada o baja mortalidad. Por su parte, el análisis SADIE es capaz de detectar no sólo una desviación respecto a la aleatoriedad en la distribución espacial de los datos, sino que también permite distinguir la presencia de áreas

donde tanto la mortalidad como la supervivencia son significativamente mayores de lo esperado, proporcionando diversos índices que pueden utilizarse para realizar test estadísticos formales. Como complemento a estos índices, los mapas de  $v$  reflejan la localización espacial y las dimensiones de las manchas y los claros, proporcionando información que puede facilitar la interpretación de los resultados. SADIE es una metodología accesible, y en este estudio se ha revelado como una herramienta de gran utilidad a la hora de analizar el patrón espacial de la supervivencia de una plantación.

La combinación del análisis SADIE con el ACP permitió explorar la dinámica temporal del patrón espacial de la supervivencia durante los primeros años tras la plantación. Esta evolución estuvo marcada por dos características principales; el incremento en el grado de agregación con el tiempo y un fuerte grado de consistencia entre los diferentes muestreos. Esta coherencia sugiere que los primeros meses tras la plantación son fundamentales para delimitar las principales áreas de supervivencia, a pesar de que pequeños cambios ocurrieron después de los principales episodios de mortalidad.

El establecimiento de programas de seguimiento para evaluar el éxito de una repoblación es una parte fundamental de las actividades de restauración (HOLL & HOWARTH 2000). Información sobre la dinámica espacio-temporal de la supervivencia de los plantones introducidos puede ser utilizada para mejorar la gestión y diseñar programas efectivos de seguimiento tras la plantación. Una de las actividades fundamentales dentro del seguimiento y cuidado post-plantación, especialmente en zonas de clima semiárido donde la mortalidad inicial es elevada, es la reposición de marras (SERRADA 1997). Los mapas del índice  $v$  producidos por SADIE pueden ser utilizados para optimizar esta actividad, ya que permiten distinguir estadísticamente las áreas donde la mortalidad ocurre al azar de aquellas donde la mayor parte de los plantones están muertos. Estas últimas no deberían utilizarse para re-

poner marras a menos que se aplique alguna medida correctora que disminuya el riesgo de mortalidad. La selección de las zonas de reposición de marras utilizando estos mapas permitiría reducir notablemente los costos económicos asociados a esta actividad. Asimismo, también pueden utilizarse como punto de partida de investigaciones para elucidar las posibles causas que han originado la mortalidad de los plantones.

La consistencia encontrada en el patrón espacial durante los tres primeros años tras la plantación resalta la importancia de la fase de aclimatación a las condiciones de campo para el establecimiento de los plantones bajo condiciones semiáridas. Los resultados obtenidos sugieren que el seguimiento de los plantones debe concentrarse durante el primer año tras la plantación, especialmente después del primer verano en el campo, un período clave para el establecimiento de los plantones bajo condiciones mediterráneas (VILAGROSA *et al.* 1997; REY BENAYAS 1998; MAESTRE *et al.* 2001; MAESTRE 2002; VILAGROSA 2002).

Los resultados de este estudio resaltan la importancia que la heterogeneidad espacial de la supervivencia de los plantones puede tener durante las actividades de restauración de las áreas semiáridas degradadas. Si bien los dos métodos utilizados permiten caracterizar el patrón espacial de la supervivencia de los plantones, el método SADIE se ha revelado como especialmente idóneo en el tratamiento de este tipo de datos. Nuevas investigaciones son necesarias para extender la metodología utilizada en este trabajo a escalas mayores, así como para analizar las causas de la heterogeneidad en la supervivencia observada.

## AGRADECIMIENTOS

La Conselleria de Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana proporcionó apoyo logístico durante la realización de la plantación, que fue realizada por Alberto Vilagrosa y Daniel Fonseca. Este último recolectó los datos de supervivencia durante 1998. Juan Llovet y José

Huesca ayudaron durante la fase del trabajo de campo. El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante amablemente nos cedió la estación total y Francisco Rodríguez nos ayudó con el tratamiento de los datos proporcionados por dicho instrumento. Joe Perry nos proporcionó amablemente el software SADIE, así como toda la ayuda necesaria para utilizar con garantías dicho método. De las discusiones con Richard Webster salieron algunos

de los resultados más interesantes de este trabajo. Este trabajo se ha realizado gracias a una beca FPU del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte otorgada al primer autor y se ha realizado como parte del proyecto REDMED, financiado por la DG XII de la UE (Contrato ENV4-CT97-0682). La Fundación CEAM recibe financiación de la Conselleria de Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana y de Bancaixa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBALADEJO, J., MARTÍNEZ-MENA, M., ROLDAN, A. & CASTILLO, V. 1998. Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Use and Management* 14: 1-5.
- ALLOZA, J.A. & VALLEJO, V.R. 1999. Relación entre las características meteorológicas del año de plantación y los resultados de las repoblaciones. *Ecología* 13: 173-187.
- BIONDI, F., MYERS, D.E. & AVERY, C.C. 1994. Geostatistically modelling stem size and increment in an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 1354-1368.
- CASTILLO, V., MARTÍNEZ-MENA, M. & ALBALADEJO, J. 1997. Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1116-1121.
- CORTINA, J. & VALLEJO, V.R. 1999. Restoration of Mediterranean Ecosystems. En: FARINA, A. (ed.), *Perspectives in Ecology. A glance from the VII International Congress of Ecology*. Backhuys Publishers, Leiden, pp. 479-490.
- DALE, M.R.T. 1999. *Spatial pattern analysis in plant ecology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- FONSECA, D. E. 1999. Manipulación de las características morfoestructurales de plantones de especies mediterráneas producidas en vivero. M.Sc. Thesis. Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes, Zaragoza.
- GRANTZ, D.A., VAUGHN, D.L., FARBER, R.J., KIM, B., ASHBAUGH, L., VAN CUREN, T., CAMPBELL, R., BAINBRIDGE, D. & ZINCK, T. 1998. Transplanting native plants to revegetate abandoned farmland in the Western Mojave desert. *Journal of Environmental Quality* 27: 960-967.
- GREIG-SMITH, P. 1983. *Quantitative Plant Ecology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- HOLL, K.D. & HOWARTH, R.B. 2000. Paying for restoration. *Restoration Ecology* 8: 260-267.
- HOLLAND, J.M., PERRY, J.N. & WINDER, L. 1999. The within-field spatial and temporal distribution of arthropods in winter wheat. *Bulletin of Entomological Research* 89: 499-513.
- JACKSON, R.B. & CALDWELL, M.M. 1993. Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants. *Journal of Ecology* 81: 683-692.
- LEGENDRE, P., & LEGENDRE, L. 1998. *Numerical Ecology*. Second english edition. Elsevier Science, Amsterdam.
- LE HOUÉROU, H.N. 2000. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 14: 3-14.
- MAESTRE, F.T. 2002. La restauración de la cubierta vegetal en zonas semiáridas en función del patrón espacial de factores bióticos y abióticos Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.

- MAESTRE, F.T., BAUTISTA, S., CORTINA, J. & BELLOT, J. 2001. Potential of using facilitation by grasses to establish shrubs on a semiarid degraded steppe. *Ecological Applications* 11: 1641-1655.
- MAESTRE, F.T. & CORTINA, J. 2002. Spatial patterns of surface soil properties and vegetation in a Mediterranean semi-arid steppe. *Plant and Soil* 241:279-291.
- MEIGS, P. 1953. World distribution of arid and semi-arid homoclines. *UNESCO Arid Zone Research* 1: 203-209.
- MEREDIEU, C., ARROUAYS, D., GOULARD, M. & AUCLAIR, D. 1996. Short range soil variability and its effect on red oak growth (*Quercus rubra* L.). *Soil science* 161: 29-38.
- OLIVER, M.A. & WEBSTER, R. 1987. The elucidation of soil pattern in the Wyre Forest of the West Midlands, England. II. Spatial distribution. *Journal of Soil Science* 38: 293-307.
- OLIVER, M.A. & WEBSTER, R. 1991. How geostatistics can help you. *Soil Use and Management* 7: 206-217.
- PEBESMA, E.J. & WESSELING, C.G. 1998. Gstat: a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. *Computers & Geosciences* 24: 17-31.
- PÉREZ CUEVA, J.A. 1994. Atlas climático de la Comunidad Valenciana. Conselleria de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes. Valencia.
- PERRY, J.N. 1995. Spatial aspects of animal and plant distribution in patchy farmland habitats. In: GLEN, D.M., GREAVES, M.P., ANDERSON, H.M. (Eds.), *Ecology and Integrated Farming Systems*. John Wiley & Sons Ltd, Bristol, pp 221-242.
- PERRY, J.N. 1998. Measures of spatial pattern for counts. *Ecology* 79: 1008-1017.
- PERRY, J.N., WINDER, L., HOLLAND, J. M. & ALSTON, R. D. 1999. Red-blue plots for detecting clusters in count data. *Ecology Letters* 2: 106-113.
- PUIGDEFÁBREGAS, J. & MENDIZÁBAL, T. 1998. Perspectives on desertification: Western Mediterranean. *Journal of Arid Environments* 39: 209-224.
- REY BENAYAS, J.M. 1998. Drought and survival in *Quercus ilex* L. seedlings after irrigation and artificial shading on Mediterranean set-aside agricultural land. *Annales des Sciences Forestières* 55: 801-807.
- ROBERTSON, G.P. & FRECKMAN, D.W. 1995. The spatial distribution of nematode trophic groups across a cultivated ecosystem. *Ecology* 76: 1425-1432.
- SCHLESINGER, W.H., REYNOLDS, J.F., CUNNINGHAM, G.L., HUENNEKE, L.F., JARRELL, W.M., VIRGINA, R.A. & WHITFORD, W.G. 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science* 247: 1043-1048.
- SERRADA, R. (coord.). 1997. Actas de la reunión de Madrid sobre causas de las marras. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, número 4. Sociedad Española de Ciencias Forestales, Madrid.
- SOIL SURVEY STAFF. 1994. Keys to Soil Taxonomy, Sixth edition. USDA Soil Conservation Service, Pocahontas Press, Blacksburg.
- TURECHECK, W.W. & MADDEN, L.V. 1999. Spatial pattern of strawberry leaf blight in perennial production systems. *Phytopathology* 89: 421-433.
- VILAGROSA, A. 2002. Estrategias de resistencia al déficit hídrico en *Pistacia lentiscus* L. y *Quercus coccifera* L. Implicaciones en la repoblación forestal. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- VILAGROSA, A., SEVA, J.P., VALDECANTOS, A., CORTINA, J., ALLOZA, J. A., SERRASOLSAS, I., DIEGO, V., ABRIL, M., FERRAN, A., BELLOT, J. & VALLEJO, V.R. 1997. Plantaciones para la restauración forestal en la Comunidad Valenciana. In: VALLEJO, V.R. (Ed.), *La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana*. CEAM-Generalitat Valenciana, Valencia, pp. 435-546.
- VALLEJO, V.R., BAUTISTA, S. & CORTINA, J. 2000a. Restoration for soil protection after disturbances. En: TRABAUD, L. (ed.), *Life and Ecosystems in the Mediterranean*, WIT Press, Southampton, pp. 301-344.
- VALLEJO, V.R., SERRASOLSAS, I., CORTINA, J., SEVA, J.P., VALDECANTOS, A. & VILAGROSA, A. 2000b. Restoration strategies and actions in Mediterranean degraded lands. En: ENNE, G. ZANOLLA, Ch.,

- PETER, D. (eds.). Desertification in Europe: mitigation strategies, land use planning. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, pp. 221-233.
- WEBSTER, R. 2001. Statistics to support soil research and their presentation. *European Journal of Soil Science* 52: 331-340.
- WEBSTER, R. & OLIVER, M.A. 1990. *Statistical methods for land resource survey*. Oxford University Press, Oxford.
- WHISENANT, S.G. 1999. *Repairing Damaged Wildlands*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- WINDER, L., PERRY, J.N. & HOLLAND, J.M. 1999 The spatial and temporal distribution of the grain aphid *Sitobion avenae* in winter wheat. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 93: 275-288.