

## **EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE CAPACIDAD PRODUCTIVA Y RIESGO DE EROSIÓN EN SUELOS AGRÍCOLAS DE ANDALUCÍA. Aplicación del modelo ACCESS**

D. DE LA ROSA\*, P. LOVELAND\*\*, M. ROUNSEVELL\*\*.; A. ARMSTRONG\*\*\*.; y J.P. LEGROS\*\*\*\*

\* Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología, CSIC, Apartado 1052, 41080 Sevilla, ES.

\*\* Soil Survey & Land Research Centre, Cranfield University, Silsoe, Bedford MK45 4DT, UK.

\*\*\* Gleadthorpe Research Centre, ADAS, Meden Vale, Mansfield, NG20 9PF, UK.

\*\*\*\* Science du Sol, INRA, 2 Place Viala, 34060 Montpellier, FR

**Abstract:** The ACCESS model (AgroClimatic Change and European Soil Suitability) is an integrated agroecological prediction system, which combines the explicative capacity and accuracy of simulation modelling with the empirical simplicity and applicability of land evaluation. With a modular structure and many options, the model describes crop growth development and soil erosion process by using climate, soil and crop characteristics. This model was developed within a EU project by a multi-disciplinary research group from six countries, in order to provide a precise tool to predict the effects of climate change on European soils and crops.

As a validation test, the ACCESS model was applied to in sites representative of 34 agricultural zones (over 43233 km<sup>2</sup>) of Andalusia region. This application considered an initial scenario with current climate conditions and a second scenario defined by a climate perturbation predicted for the year 2050, i.e. with a mean temperature change of +1.75 °C, -7.5% precipitation and 523 ppmv CO<sub>2</sub>.

The simulations predicted average sunflower yield of 1177 kg/ha for current situation, and 1763 kg/ha for 2050 which represents an increase of 50%. For erosion risk, the dominant modelled vulnerability classes are 'Class V4-Moderately low' and 'Class V3-Slightly low', respectively in both scenarios. According to these results, it is to be expected that optimum crop growing conditions will give rise under a changed climate and the erosion risk will remain in the same degree, as are found at present.

**Key words:** land evaluation, crop simulation modelling, decision trees, pedo-transfer functions, degradation risk assessment, natural resources survey.

**Resumen:** El modelo integrado ACCESS (AgroClimatic Change and European Soil Suitability) es un sistema híbrido de predicción agroecológica, en el que se combina la capacidad de explicación y precisión de la simulación dinámica de cultivos con la simplicidad empírica y aplicabilidad de la evaluación de tierras. Entre otras prestaciones correspondientes a su estructura modular, el modelo describe el desarrollo de los cultivos y el proceso de erosión hídrica haciendo uso de características climáticas, edáficas y de los propios cultivos. Como proyecto de la Comisión Europea, el modelo fue desarrollado por un grupo de científicos de diversos centros de investigación, a fin de conseguir una herramienta con la suficiente precisión para pronosticar, a nivel regional, el impacto de un posible cambio climático sobre los suelos y cultivos de Europa.

A modo de test de validación, se hizo aplicación del modelo ACCESS para un conjunto de lugares representativos (34) de las comarcas agrícolas de Andalucía, tanto para las condiciones climáticas actuales, como para una supuesta perturbación estimada por los modelos de circulación global de la atmósfera (para el año 2050) que representa un incremento medio de temperatura de 1.75 °C, una disminución de las precipitaciones de 7.5% y un nivel de CO<sub>2</sub> de 523 ppmv.

Los resultados pronosticados sobre capacidad de producción actual, con referencia al cultivo del girasol, alcanzan el valor medio de 1177 kg/ha, presentando diferencias significativas entre las comarcas seleccionadas. Para el cambio climático simulado, los rendimientos mejoran considerablemente, alcanzando un valor medio de 1763 kg/ha que representa un incremento del 50%. Entre los resultados actuales pronosticados sobre riesgo de erosión domina la Clase 'V4-Moderadamente baja' de vulnerabilidad, mientras que en el escenario de cambio, se desplaza la dominancia a la Clase 'V3-Baja' pero también aumenta la proporción de Clase 'V6-Ligeramente elevada'. En síntesis, el supuesto cambio climático repercutiría favorablemente en la capacidad de producción de los suelos agrícolas de Andalucía, mientras que el riesgo de erosión de estos suelos se mantendría en valores similares a los actuales.

**Palabras clave:** evaluación de suelos, modelos de simulación, arboles de decisión, funciones de transferencia, riesgos de degradación, reconocimiento de recursos rurales.

## 1. INTRODUCTION

Los suelos agrícolas de la Unión Europea alcanzan una extensión total de 1.6 millones de km<sup>2</sup>, comprendidos entre los 37° y 64° de latitud norte y entre los 10° oeste y 23° este de longitud. Estos suelos constituyen una de las más grandes zonas de producción agrícola del mundo, y se corresponden con el mayor capítulo económico de la Política Agrícola Comunitaria. Por consiguiente, cualquier cambio en la capacidad de producción o en la extensión de las zonas donde se desarrollan los principales cultivos resulta de especial importancia.

A su vez, los riesgos actuales de degradación de las tierras de la Europa Comunitaria se pusieron especialmente de manifiesto en el estudio realizado para el programa CORINE (CEC, 1992), destacando la extensión y gravedad de la erosión hídrica en las regiones mediterráneas. En estas regiones, el 35 % de las tierras presentan un riesgo potencial elevado que se reduce al 19 % cuando se considera el efecto protector de la cubierta vegetal. En el caso concreto de Andalucía, se estima una pérdida anual de más de 80 toneladas de suelo por hectárea en las tierras cultivadas de olivar, lo que supera con creces la capacidad de regeneración de dichos suelos (Laguna, 1989).

Durante los próximos 50 ó 100 años, se pronostica para toda Europa una subida media de

las temperaturas de alrededor de 3 °C (Viner y Hulme, 1993), mientras que las precipitaciones se espera que varíen en un 10 %. Los posibles cambios estacionales y espaciales de las precipitaciones resultan todavía bastante desconocidos y muy difíciles de pronosticar (Carter *et al.*, 1992). Sin embargo, los inviernos serán probablemente más húmedos y los veranos más secos, y al mismo tiempo la frecuencia y severidad de los "casos extremos" tales como épocas de sequía o lluvias torrenciales pueden aumentar significativamente (IPCC, 1992). Desde el punto de vista del uso y conservación de los recursos naturales, el resultado de todos estos posibles cambios podría ser un aumento del déficit de humedad del suelo durante el verano, pudiendo llegar a ser excesivo en algunas regiones.

El proyecto ACCESS (AgroClimatic Change and European Soil Suitability) se emprendió ante el convencimiento de que la 'modelación del uso-degradación del territorio' resulta una herramienta ideal para tomar decisiones referentes a la utilización sostenible de los recursos rurales. Tales decisiones, tanto sean a nivel local como regional, deben basarse en toda la información y el conocimiento que facilita la ciencia moderna. La parte central del modelo ACCESS consta de un módulo potente y preciso para el cálculo de las relaciones suelo-planta-agua, que se considera decisivo en cualquier intento de evaluar la capa-

cidad de uso y degradación de las tierras agrícolas. Otras prestaciones importantes del modelo son: i) la estimación de propiedades hidráulicas de los suelos, mediante funciones edáficas de transferencia; ii) modelación del movimiento del agua en suelos agrietables; iii) predicción del peligro de salinización de los suelos; y iv) evaluación del riesgo de erosión hídrica.

La mayoría de los estudios para predecir los efectos de un potencial cambio climático sobre los suelos, se han hecho bien en zonas experimentales muy pequeñas e intensamente explotadas, o bien a escalas de varias decenas o centenas de kilómetros. Sin embargo, son muy pocas las herramientas predictivas útiles para el técnico, administrador o político, a nivel local y regional, que tengan una resolución espacial media. En Europa existe una gran variabilidad de suelos, usos del territorio y condiciones climáticas, muchos de ellos solo a nivel de decenas o centenas de metros. A su vez, una gran cantidad de datos sobre dichos factores biofísicos se encuentran informatizados y pueden ser fácilmente manipulados mediante ordenador. En este sentido, el modelo ACCESS es capaz de utilizar ese volumen de información detallada para predecir el efecto de cambio climático sobre el potencial de utilización agrícola y conservación de los suelos de Europa. El modelo hace uso, a nivel de reconocimiento o regional (submodelo ACCESS-I), de datos observacionales procedentes de mapas de suelos; y a nivel detallado o local (submodelo ACCESS-II), de datos experimentales de parcelas. Las principales diferencias entre ambos submodelos radican en los requerimientos de datos de entrada, tiempo de cálculo y nivel de precisión de las estimaciones (Loveland y Rounsevell, 1996).

En este trabajo se lleva a cabo una descripción somera del submodelo ACCESS-I, seguida de la aplicación de los módulos de productividad y erosión en un conjunto de suelos representativos de las principales comarcas agrícolas de Andalucía. Concretamente, la sostenibilidad del uso de las tierras se pronostica en términos del rendimiento del cultivo del girasol en régimen de

secano y de los riesgos de erosión hídrica. Para esta aplicación se consideran, en primer lugar, las condiciones climáticas actuales, referidas a los registros históricos entre 1961 y 1990; y a continuación, se simula la perturbación climática pronosticada para el año 2050 en las regiones mediterráneas.

## 2. EL MODELO ACCESS

Tal y como describe Loveland *et al.* (1996), para el desarrollo del proyecto ACCESS se tomó como marco de referencia un modelo ya existente en el Reino Unido (Thomasson y Jones, 1989), que relaciona los requerimientos de los cultivos con los factores edáficos y climáticos. En primer lugar, se ha pretendido mejorar ciertos aspectos de dicho modelo inicial, tales como el cálculo del balance hídrico y la simulación del desarrollo de los cultivos, e incluir la predicción de riesgos de degradación. También, se ha puesto especial interés en facilitar la extrapolación de la modelación desarrollada en zonas detalladas (nivel local) a grandes zonas (nivel regional). Igualmente, se prestó la mayor atención al desarrollo y compatibilización de bases de datos con la información básica, así como en la presentación de los resultados de evaluación en formatos aptos para los más usuales sistemas de información geográfica.

El continente europeo es tan extenso y diverso que resultaba lógico que el modelo ACCESS fuese formulado y calibrado para un amplio rango de condiciones. Para ello se seleccionaron varias regiones europeas que contaban con detallada información de suelos, climas y cultivos, en formato digital, así como con redes de fincas experimentales generadoras de datos de gran precisión. Estas regiones fueron las siguientes:

- i) Inglaterra central, Reino Unido: de clima frío y húmedo;
- ii) Languedoc-Roussillon, Francia: de clima mediterráneo suave;
- iii) Andalucía, España: de clima mediterráneo extremado;

iv) Lublin, Polonia: de clima continental moderado;

v) Nagykunsag, Hungría: de clima continental seco y frío.

Los datos de suelos de Inglaterra se obtuvieron de la versión digital del Mapa Nacional de Suelos (Mackney *et al.*, 1983) y sus bases de datos asociadas (LandIS; Ragg *et al.*, 1988). Los datos diarios de precipitación y temperatura corresponden a 130 estaciones y para un período de 30 años. En el Languedoc-Roussillon, los datos de suelos proceden básicamente del banco de datos de la región (Bornand *et al.*, 1993). Los datos diarios de precipitación y temperatura se obtuvieron de 75 estaciones y para un período de 20 años. En Andalucía, la información edáfica procede de la base de datos SDBM-IRNAS (De la Rosa, 1996). Los datos climáticos mensuales de precipitación y temperatura proceden de 62 estaciones y para un período de 30 años, y los datos diarios se seleccionaron de 4 estaciones y para cinco años. En Lublin, los datos edáficos y climáticos proceden del Institute of Agrophysics y del Soil Science and Plant Protection Institute. Por último en Nagykunsag, los datos de suelos proceden del Hungarian Soil Information System (TIR; Csillag, 1988), mientras que la información climática se obtuvo del Hungarian Meteorological Office.

Los modelos de simulación dinámica del sistema suelo-planta-atmósfera se desarrollan y validan mediante laboriosos experimentos, en zonas muy específicas. Para ello se genera y analiza una gran cantidad de información sobre múltiples variables, estableciéndose con precisión su distribución espacial y temporal. La aplicación de tales modelos de precisión requiere, por consiguiente, un gran volumen de datos de entrada, que solo se puede conseguir para algunos cultivos y a nivel de zonas donde la variabilidad de suelo y clima es muy reducida. Para salvar esta dificultad de aplicabilidad, el modelo ACCESS fue desarrollado a dos niveles de detalle y complicación:

i) el submodelo ACCESS-I, a escala regional, para ser aplicado en zonas extensas de

varios cientos a varios miles de hectáreas, utilizando básicamente la información facilitada por los reconocimientos de suelos;

ii) el submodelo ACCESS-II, a escala local, para ser aplicado en parcelas o fincas experimentales de donde se disponga del gran volumen de información necesaria.

Para ambos submodelos, se hace especial referencia a los siguientes cultivos estratégicos: trigo, girasol, maíz y patata.

La estructura general del modelo ACCESS se muestra en la Figura 1. Los dos submodelos ACCESS-I y ACCESS-II comparten un mismo formato de datos de entrada. En el primer caso los datos climáticos son medidos mensualmente, mientras que en el segundo caso se precisa de datos diarios. La mayor diferencia entre ambos submodelos radica en el mecanismo de cálculo del balance hídrico del suelo; siendo éste mucho más detallado en ACCESS-II que en ACCESS-I, de acuerdo con la mayor resolución de los datos climáticos. El formato de los resultados de evaluación es también similar en ambos submodelos, y apropiado para ser utilizado por los más conocidos sistemas de información geográfica.

A fin de ser ampliamente utilizable, el modelo fue informatizado respondiendo a las siguientes características:

i) microordenador PC IBM o compatible;  
ii) programas compatibles con Microsoft FORTRAN 5.1;

iii) versión para WINDOWS, mediante una interfaz fácilmente utilizable desarrollada en Microsoft VISUAL BASIC.

El paquete de software ejecutable, así como una extensa documentación: descripción técnica y manual de usuario, que se distribuye bajo el nombre de EuroACCESS, se puede solicitar al Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla o al Soil Survey and Land Research Centre de Silsoe. El módulo de erosión puede ser también utilizado, con prestaciones adicionales, en el entorno definido en la última versión del paquete integrado MicroLEIS (De la Rosa, 1996).

### 2.1. El módulo de productividad

El submodelo ACCESS-I simula el desarrollo de la productividad en base, fundamentalmente, a ciertos índices agroclimáticos, balance hídrico del suelo, y fenología y eficiencia en el uso del agua de cada cultivo. Sus principales características son las siguientes:

- i) el desarrollo de la planta y balance hídrico se analizan mensualmente;
- ii) la acumulación de biomasa, en base a la eficiencia en el uso del agua, se calcula mediante un procedimiento general, seguido de otro específico para cada cultivo;

iii) su aplicación puede contemplar una rotación de diversos cultivos, diferentes años y lugares;

iv) el suelo se considera formado por dos horizontes o capas de espesor variable, que pueden tener diferentes características físicas;

v) el balance hídrico se lleva a cabo a partir del potencial básico del suelo.

Aunque los procedimientos y fórmulas que se han seguido para el desarrollo de este módulo se describen con detalle por Mayr *et al.* (1996), a continuación se hace una descripción somera de las diferentes etapas.

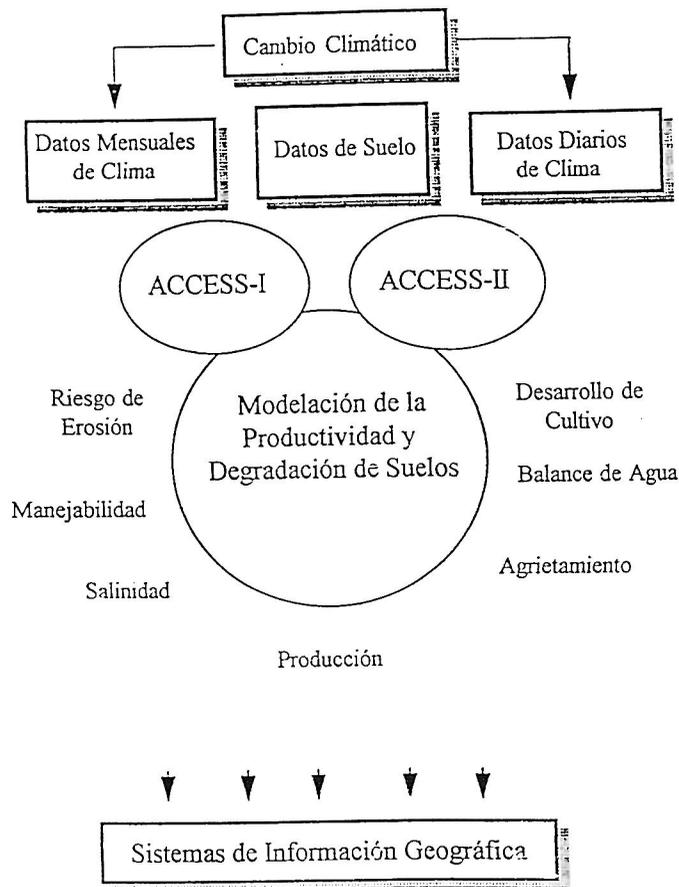


Figura 1. Estructura básica del modelo integrado de evaluación de tierras ACCESS.

### 2.1.1. Índices agroclimáticos

Los índices agroclimáticos que utiliza el modelo se refieren a la temperatura acumulada, al índice de humedad y al período de desarrollo. Temperatura acumulada (ETS) se considera al exceso integrado de temperatura por encima de un valor dado (ej. 5.6°C), y durante un período de tiempo determinado, como un mes o un año (Jones y Thomasson, 1985). La relación conocida como índice de humedad (HUI) entre precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETo), se considera un buen indicador de la humedad disponible (Thornthwaite, 1948). El período de desarrollo (GP) de los cultivos se define como el número de días del año durante los cuales la precipitación excede a la mitad de la evapotranspiración potencial. Este período se alarga con los días necesarios para consumir la reserva máxima del suelo, fijada en 100 mm; y se acorta o interrumpe con los días de temperatura media por debajo de 6.5°C (FAO, 1983).

### 2.1.2. Balance hídrico del suelo

En el cálculo del balance hídrico, el perfil del suelo se divide teniendo en cuenta las propiedades físicas de suelo y subsuelo, y el desarrollo del sistema radicular del cultivo. El límite entre suelo y subsuelo es fijo, mientras que el límite de la zona de raíces varía de acuerdo con el crecimiento del cultivo. Con estas condicionantes, el balance se calcula mensualmente y solo para la zona de desarrollo radicular. Durante todo el período de la simulación, se considera que la zona sin raíces mantiene el mismo contenido en humedad que al comienzo de la simulación, tal y como suelen hacer los modelos conocidos como 'de tipo pistón'.

Siguiendo a Van Keulen (1982), la transpiración potencial (TRm) se calcula por diferencia entre la evapotranspiración potencial (ETo) y la evaporación máxima en presencia del cultivo (Em). La extracción de agua por las raíces (Sr) se determina en función de las condiciones climatológicas y del propio suelo. La primera

extracción se calcula a partir de la transpiración potencial y de la profundidad de raíces, mientras que para el perfil del suelo se utiliza la ecuación de Steinhardt *et al.* (1982). Este cálculo de la extracción de agua del suelo se repite tanto para el suelo como para el subsuelo.

Una parte esencial del modelo se refiere a la determinación independiente de la transpiración real (TRa), suponiendo que la cantidad de agua disponible procede de dos fuentes: agua acumulada en el suelo y agua de lluvia. En el primer caso, se analiza la relación entre la curva de extracción de agua por las raíces (Sr) y la curva del contenido en humedad del suelo (q; Steinhardt *et al.*, 1982). A continuación el modelo considera que el agua procedente de la lluvia es interceptada por el sistema radicular del cultivo, siendo añadida directamente a la cantidad acumulada en el suelo.

En cuanto al drenaje del suelo (D), el modelo asume que éste se produce como un flujo equivalente a la conductividad hidráulica no saturada de suelo y subsuelo a partir del contenido inicial en humedad del mismo.

Por último, se realiza un balance hídrico mensual correspondiente a la zona de raíces. Los elementos de entrada en el balance son precipitación (P) y cantidad de agua acumulada en el suelo durante el desarrollo del sistema radicular; mientras que los elementos de salida son evaporación real (Ea), transpiración real (TRa) y drenaje (D). El valor resultante del contenido en agua ( $\theta$ ) se compara con la curva de humedad del suelo en la zona de raíces, con objeto de estimar el nuevo valor de partida de agua en el suelo para el próximo mes.

### 2.1.3. Fenología del cultivo

Tanto la germinación como otras etapas fenológicas de los cultivos se producen sólo y cuando se alcanza una acumulación crítica de temperatura a lo largo del período de desarrollo. Esta acumulación de temperatura equivale a la suma de temperatura efectiva (ETS) y se conoce también como temperatura acumulada, pe-

ríodo térmico o días-grado de desarrollo. Se define como la acumulación de temperaturas por encima de un valor dado que se considera decisivo para que comience el desarrollo del cultivo.

En base a dicho parámetro ETS, calculado por el procedimiento TRIM (Temperature Remainder Index Model; Robertson, 1983), se determina una fenología general, referida a valores diarios. Para ello se realiza, previamente, una generación de valores diarios de temperatura máxima y mínima a partir de los valores mensuales de entrada. A continuación, se utilizan otras rutinas de cálculo para cultivos específicos, tales como la AFRCWHEAT2 (Porter *et al.*, 1987) para el trigo o la Ontario Units (Brown y Chapman, 1961) para el maíz.

El período térmico (Tt) trata de explicar la variación sinusoidal de la temperatura, a lo largo del día, desde la temperatura máxima (Tmax) a la mínima (Tmin). Se analiza en incrementos de Tt para un día, como la suma de 8 períodos de 3 horas. A su vez, el período foto-térmico (PTt) se calcula multiplicando Tt por un factor del foto-período (Fp). Por último, el período foto-vernal-térmico se calcula multiplicando PTt por el factor de vernalización (Fv).

#### 2.1.4. Acumulación de biomasa

La acumulación de biomasa se basa en el concepto de eficiencia del uso del agua, que se define como la cantidad de biomasa (materia seca) sintetizada por unidad de área (ha) y por unidad de transpiración del cultivo (cm). Se trata de una función de dependencia del cultivo que permite manipular las siguientes condicionantes de desarrollo: nivel de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, temperatura del aire y estrés hídrico.

La eficiencia del uso del agua (WUE) se establece con relación a la eficiencia fotosintética de los grupos de plantas C3 ó C4, e independientemente del nivel de radiación. Así, según Goudriaan *et al.* (1984), para las plantas C3 se considera una WUE de 500 kg/ha/cm, y para las plantas C4 de 1000 kg/ha/cm.

Para estimar el efecto global del nivel de CO<sub>2</sub> sobre el desarrollo de los cultivos, se utiliza el concepto de factor biótico del desarrollo (b) como modificador de la velocidad de crecimiento (Goudriaan y Ketner, 1984). Además del factor b, se considera la concentración actual de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (355 ppmv) que se puede variar de acuerdo con las posibles concentraciones futuras.

Para medir el grado del estrés hídrico sobre la planta se utiliza el déficit de transpiración relativo (RTD), como la diferencia entre la transpiración potencial (TRm) y la transpiración real (TRa; Van Keulen, 1982). Los valores de RTD divididos por una constante de tiempo se integran para obtener el déficit de transpiración acumulativo (CTDT). A continuación, la eficiencia real en el uso del agua (Aeff) se relaciona con el CTDT (Simota, 1991).

La acumulación de biomasa se calcula por multiplicación de Aeff, TRa y la dependencia de la temperatura. La distribución de la materia seca o partición de la biomasa sintetizada en los órganos de la planta (hojas y raíces) se basa en la fracción de masa fenológicamente dependiente. El índice de área foliar (LAI) se calcula a partir de la biomasa de las hojas y utilizando un índice de área foliar específico de dependencia fenológica (SLA). Por último, el rendimiento del cultivo se obtiene desde la biomasa total mediante un índice de cosecha (HI) propio de cada cultivo.

Tomando como referencia el rendimiento máximo calculado (MAY) en cada sesión de aplicación del modelo ACCESS, se establecen las clases de capacidad productiva o aptitud relativa para el cultivo considerado. Estas cinco clases de productividad responden a las siguientes equivalencias:

S1. Muy elevada	75 - 100 % MAY
S2. Elevada	60 - 75 % “
S3. Moderada	50 - 60 % “
S4. Baja	35 - 50 % “
S5. Muy baja	< 35 % “

### 2.1.5. Desarrollo radicular

La profundidad máxima de las raíces es un parámetro de entrada del modelo que se puede modificar de acuerdo con la máxima profundidad efectiva del suelo.

La duración del desarrollo de las raíces es específica de la etapa de crecimiento del cultivo, constituyendo un parámetro de entrada del modelo. Para la mayoría de los cultivos anuales, el sistema radicular finaliza su desarrollo alrededor de 0.6 a 0.7 del tiempo que transcurre desde la nascencia a la madurez.

A su vez, la profundidad de las raíces en cada etapa de desarrollo del cultivo se modela utilizando tres técnicas diferentes: lineal, no lineal (Borg y Grimes, 1986) y de resistencia a la penetración (Dexter, 1987), a elegir por el usuario en cada caso.

### 2.1.6. Funciones de transferencia

Para que pueda ser aplicado el módulo de productividad de ACCESS-I a partir de la información que facilitan los reconocimientos de suelos, puede resultar necesario acudir a las funciones de transferencia para estimar algunas variables de entrada (Tabla 1). De esta forma se estiman con facilidad y suficiente precisión las propiedades físicas del suelo, básicamente las referidas a la capacidad del suelo para retener o liberar agua.

Para densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez y conductividad hidráulica se utilizaron funciones desarrolladas con datos analíticos del IRNAS sobre suelos de Andalucía (De la Rosa, 1996), así como otras expresiones (ej. Rawls *et al.*, 1982), siempre a partir de las clases texturales.

Simota *et al.* (1996) desarrollaron o adaptaron diversas funciones de transferencia para el cálculo de los parámetros de las ecuaciones de Van Genuchten que predicen las curvas de retención de agua del suelo. Dicho cálculo se lleva a cabo a partir de la clase textural y la densidad aparente del suelo. Utilizando valores

experimentales de suelos de Inglaterra y Gales, Rumanía, Holanda y España, se validaron los valores calculados mediante dichas funciones, obteniéndose resultados muy satisfactorios del análisis de regresión ( $0.872 < r^2 < 0.962$ ).

## 2.2. El módulo de erosión

Este módulo de ACCESS-I se compone de un modelo experto de evaluación (Crompvoets *et al.*, 1994; De la Rosa *et al.*, 1996) para pronosticar los riesgos de degradación o vulnerabilidad de las tierras agrícolas, haciendo especial referencia a la erosión hídrica. El riesgo potencial o biofísico de erosión se calcula en base a las características topográficas, edáficas y climáticas. No se consideran, pues, las características de uso y manejo de la tierra ni las condicionantes socio-económicas.

Este modelo experto se formuló y calibró combinando los siguientes tipos de información:

- i) datos observacionales, especialmente referidos al territorio de Andalucía;
- ii) conocimiento científico procedente de la literatura especializada;
- iii) experiencia de técnicos y agricultores, conseguida mediante encuestas dirigidas.

Al mismo tiempo se llevó a cabo una serie de entrevistas con investigadores e ingenieros para precisar la configuración del modelo teórico y llevar a cabo su calibración. En conjunto, el equipo de expertos estuvo formado por 48 especialistas, fundamentalmente de España y Holanda, y 32 agricultores de Andalucía.

En el desarrollo teórico del modelo, para lo que se trataron de adaptar básicamente los criterios recogidos en la USLE: Universal Soil Loss Equation (Wischmeier y Smith, 1978), la RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation (Renard *et al.*, 1991) y el proyecto CORINE: Coordinated Information for the Environment (CEC, 1992), se consideró la erosión hídrica del suelo como un proceso en dos fases: i) desagregación de partículas individuales de la masa del suelo y ii) transporte de las mismas,

Tabla 1. Lista de variables de entrada para los módulos de productividad y erosión del submodelo ACCESS-I.

Variable	Módulo de productividad	Módulo de erosión
<u>Características del lugar</u>		
Longitud, °	xxx	xxx
Latitud, °	xxx	xxx
Tipo de relieve		xxx
Pendiente, %		xxx
Clase de drenaje		xxx
<u>Características del suelo, por horizontes*</u>		
Contenido en arcilla, %	xxx	xxx
Contenido en limo, %	xxx	xxx
Contenido en arena, %	xxx	xxx
Contenido en piedras, %	xxx	
Pedregosidad superficial, %		xxx
Densidad aparente, g/cm <sup>3</sup>	xxx	
Capacidad de campo, %	xxx	
Punto de marchitez, %	xxx	
Parámetros de Van Genuchten	xxx	
Conductividad hidráulica, cm/día	xxx	
Carbono orgánico, %	xxx	xxx
Saturación en sodio, %		xxx
Profundidad útil, cm	xxx	
<u>Características del clima, mensuales</u>		
Temperatura máxima, °C	xxx	xxx
Temperatura mínima, °C	xxx	xxx
Precipitación total, mm	xxx	xxx
Precipitación máxima, mm		xxx
Número de días de lluvia	xxx	

(\*) Se consideran dos horizontes o secciones de control (0-30 cm y 30-120 cm) para el módulo de productividad y un horizonte (0-30 cm) para el módulo de erosión. Dentro de estas secciones, se seleccionan los valores correspondientes a los horizontes genéticos dominantes.

por la acción del agua de lluvia. No se tuvo en cuenta una tercera fase de deposición de las partículas, que ocurre cuando remite la energía necesaria para el transporte (Morgan, 1979). Este proceso degradativo se supone que provoca en el suelo una erosión de tipo laminar y por surcos. No se consideran, por tanto, otros tipos de erosión que podrían seguir a los anteriores, tales como la formación de cárcavas.

Para evitar excesivas complicaciones, se analizó la erosión como representación estática sin considerar la variabilidad temporal o estacional. Sin embargo, la realidad es evidentemente bastante más compleja y muchos de los parámetros analizados cambian durante el año, e incluso a lo largo de un simple episodio.

### 2.2.1. Efecto del relieve

En la cualidad 'relieve (t)' se analiza el componente de la erosión esperada como consecuencia del incremento del gradiente y la longitud de la pendiente que afectan, directamente, la velocidad y volumen del escurrimiento superficial del agua. Mientras que en las superficies llanas las gotas de lluvia dispersan las partículas de suelo por igual en todas direcciones, en las superficies inclinadas se dispersan más partículas hacia abajo que hacia arriba, creciendo la proporción conforme aumenta el gradiente de pendiente (Wishmeier y Smith, 1978).

Dada la dificultad de precisar la longitud de pendiente en los estudios de reconocimiento del terreno, se substituyó esta característica por la posición fisiográfica del lugar a evaluar.

### 2.2.2. Erodibilidad del suelo

La cualidad 'erodibilidad (k)' representa la vulnerabilidad o resistencia del suelo para la desagregación y transporte de partículas sobre su superficie. Aunque la resistencia del suelo a la erosión depende en gran parte del relieve en el que se encuentra situado y del tipo de uso y manejo que de él se hace, también las propiedades intrínsecas del suelo juegan un papel

importante. Como parte de la erodibilidad se consideraron conjuntamente la protección que ejerce la pedregosidad superficial y la estabilidad de los agregados estructurales.

Como características asociadas a la estabilidad estructural se seleccionaron clase textural, materia orgánica, tipo de drenaje y saturación en sodio. La pedregosidad se relacionó directamente con el porcentaje de piedras sobre la superficie del suelo.

### 2.2.3. Erosividad de la lluvia

La cualidad 'erosividad (r)' se analiza a través de la desagregación de las partículas del suelo por la fuerza de las gotas, así como por la incidencia de la escorrentía superficial. Sin embargo, tal y como se trata en la USLE (Wishmeier y Smith, 1978), no se analiza directamente el proceso de escorrentía sino que sólo se relaciona la erosividad con la intensidad de la lluvia. A partir de información climática mensual, el procedimiento más utilizado para estimar la erosividad sigue siendo el índice de Fournier (FUI; FAO 1984). Se trata simplemente de una medida de la concentración mensual de la precipitación, de donde se deduce la intensidad de lluvia. Dado que la ocurrencia de lluvia después de un período seco resulta especialmente significativa sobre la vulnerabilidad del suelo, se incluyó una modificación del índice de Fournier (DFUI) mediante el índice de humedad (HUI; Thornthwaite, 1948), tratando de estimar la humedad del suelo y por consiguiente la protección que ofrece la cubierta vegetal (DFUI = FUI/HUI).

Así, un valor elevado de DFUI denota un régimen climático muy contrastado con un período seco que debilita la cubierta vegetal e incrementa la erosividad de las lluvias.

### 2.2.4. Árboles de decisión

En la construcción del modelo experto de erosión se siguieron los criterios generales sobre evaluación de tierras desarrollados por FAO

(1976). Para ello las características y cualidades de la tierra se consideran en el sentido de limitación ambiental, en vez de potencialidad productiva. Las características o variables de entrada (Tabla 1) se asocian a las cualidades ambientales, y éstas a las clases de vulnerabilidad o riesgo de erosión, mediante árboles de decisión. Tal y como defienden distintos autores, como Rossiter (1990) y Davidson *et al.* (1994), en el desarrollo de sistemas de evaluación los árboles de decisión resultan procedimientos más lógicos y transparentes que las clásicas tablas o matrices de gradación. En la Figura 2 se muestra, a modo de ejemplo y en forma gráfica, una parte del árbol de decisión desarrollado para la cualidad 'erodibilidad del suelo (k)'. Para optimizar el trazado de los árboles de decisión se llevaron a cabo diferentes estudios de sensibilidad y validación.

Finalmente, este modelo empírico basado en el conocimiento de expertos establece clases de vulnerabilidad (V1. Nula a V10. Extrema), con sus correspondientes subclases (t, k, r) de acuerdo con la cualidad más limitante en cada caso (Crompvoets *et al.*, 1994).

### 3. APLICACIÓN DEL MODELO

Una aplicación puntual de los módulos de productividad y erosión del modelo ACCESS-I se llevó a cabo en lugares representativos de las principales comarcas agrícolas de la región de Andalucía, tanto para las condiciones climáticas actuales como para una supuesta perturbación climática.

Andalucía tiene una extensión total de 87,599 km<sup>2</sup>, localizándose en la parte sur de España: N36°00' a N38°44', y W01°37' a W07°31'. En la Tabla 2 se muestran las 34 comarcas agrícolas seleccionadas en las ocho provincias, con sus correspondientes lugares de observación: estación climática y suelo representativo. La extensión respectiva de cada comarca se presenta también a fin de hacer una extrapolación espacial de los resultados de la evaluación. El conjunto de

la comarcas seleccionadas alcanzan una extensión global de 42,233 km<sup>2</sup>, casi la mitad del total regional.

#### 3.1. Escenario actual

Las condiciones climáticas definitorias del escenario actual se refieren al período histórico 1961-1990, mostrándose en la Tabla 3, a modo de ejemplo, los valores de la estación de Sevilla correspondiente a la comarca agrícola Terrazas. Se trata de valores medios de las variables climáticas que constituyen parámetros de entrada del modelo de evaluación. A pesar de la elevada variabilidad espacial que se observa entre las 34 estaciones seleccionadas de la base CDBm-IRNAS, en conjunto se trata de un clima típico mediterráneo, con veranos calurosos y muy secos e inviernos moderadamente fríos y húmedos. Esa distribución estacional de las precipitaciones y su fuerte variabilidad interanual, hace que la agricultura en general dependa decisivamente del agua de riego.

Los suelos representativos (Tabla 2), seleccionados de la base de datos SDBm-IRNAS (1992), corresponden a diferentes Grupos de la clasificación natural Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975). Esta representatividad conlleva una simplificación, que debe ser tenida en cuenta, dada la elevada variabilidad espacial que presentan algunas comarcas. Las propiedades morfológicas y analíticas de estos suelos son muy diferentes (Tabla 4), así como sus producciones y estados de conservación. Los suelos vérticos (Chromoxererts y Pelloxererts) así como los aluviales recientes (Xerofluvents) ofrecen los mejores rendimientos para la mayoría de los cultivos, aunque los primeros tienen una clara vocación de secano, mientras que los segundos responden muy positivamente a la práctica del riego. En general, todos los suelos agrícolas son bastante tolerantes a la erosión, aunque no lo sean tanto los de mayor desarrollo genético.

Los cultivos tradicionales de Andalucía se pueden dividir en dos grandes categorías: cultivos de secano, tales como trigo y girasol, y

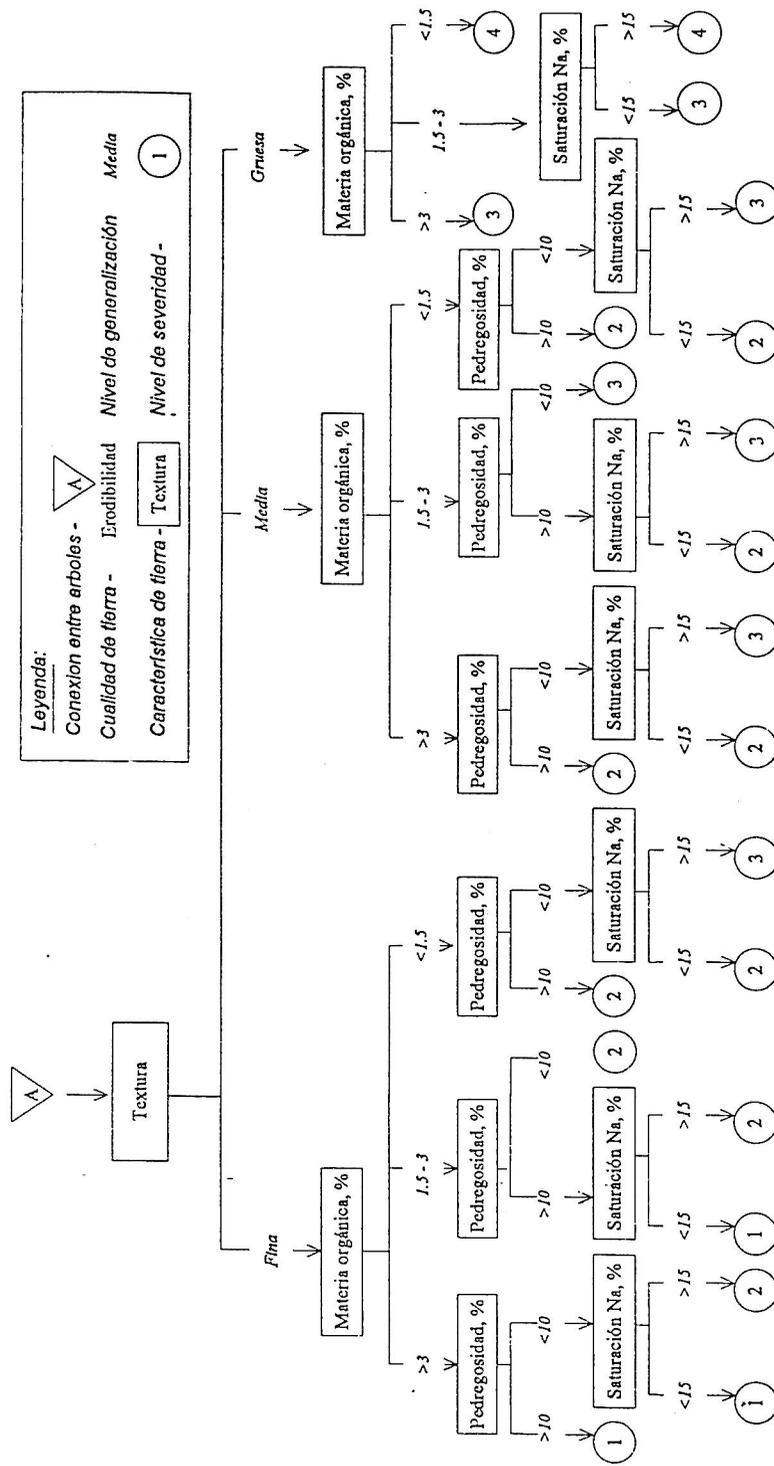


Figura 2. Esquema parcial del árbol de decisión desarrollado para la calidad 'erodibilidad del suelo (k)' correspondiente al módulo de erosión del submodelo ACCESS-1.

Tabla 2. Relación de las 34 comarcas agrícolas seleccionadas de Andalucía, que representan un total de 43,233 Km<sup>2</sup>

Comarca agrícola	Estación climática	Suelo representativo		Extensión, Km <sup>2</sup>	
		Código	Soil Taxonomy	Comarcal	Provincial
<u>Almería:</u>					
Almanzora Bajo	Bacares	AL002	Xerochrepts	1079	
Campo Nijar	Almería	AL005	Haplargids	1248	
Rio Nacimiento	Canjayar	AL008	Xerofluvents	781	3108
<u>Cádiz:</u>					
Campaña	P. Guadalquivir	CA001	Pelloxererts	1825	
Campo Gibraltar	Tarifa	CA002	Chromoxererts	1495	
Costa	San Fernando	CA003	Rhodoxeralfs	891	
Rincon Jerez	Jerez B.A.	CA005	Arents	624	4835
<u>Córdoba:</u>					
Campaña Alta	Lucena	CO001	Xerorthents	1842	
Campaña Baja	Córdoba A.	CO002	Chromoxererts	1196	
Vega	Posadas	CO007	Xerofluvents	1107	4145
<u>Granada:</u>					
Alhama	P. Bermejales	GR001	Xerorthents	982	
Baza	Baza	GR003	Xerorthents	1596	
Guadix	Exfiliana	GR005	Rhodoxeralfs	1901	
Loja	Loja E.	GR008	Xerorthents	553	
Montefrío	Montefrío	GR009	Chromoxererts	598	
Valle Lecrín	Padul	GR010	Rhodoxeralfs	417	
Vega	Granada B.A.	GR011	Xerofluvents	1433	7480
<u>Huelva:</u>					
Cond. Campaña	Escacena	H0003	Pelloxererts	1312	
Cond. Litoral	Bodegones	H0004	Xerumbrepts	1507	
Costa	Huelva	H0005	Palexeralfs	1144	3963
<u>Jaén:</u>					
Campaña Norte	Linares	J0001	Rhodoxeralfs	1307	
Condado	P. Guadalquivir	J0003	Palexeralfs	1461	
La Loma	Ubeda	J0004	Chromoxererts	1555	
Sierra Sur	Jaén	J0009	Xerochrepts	1019	5342
<u>Málaga:</u>					
Antequera	Alfarnate	MA001	Xerochrepts	2398	
Costa	Málaga	MA003	Xerorthents	737	
Guadalhorce	Tolox	MA004	Haploxerolls	1825	4960
<u>Sevilla:</u>					
Alcores	Carmona	SE001	Haploxeralfs	186	
Aljarafe	Torrequemada	SE002	Rhodoxeralfs	594	
Campaña	Ecija	SE003	Chromoxererts	4605	
Estepa	Osuna	SE004	Haploxerolls	503	
Sierra Sur	Morón B.A.	SE007	Chromoxererts	1136	
Terrazas	Sevilla A.	SE008	Haploxeralfs	683	
Vega	Sevilla Tablada	SE009	Xerofluvents	1693	9400

Table 3. Valores climáticos medios para el período 1961-1990 y valores simulados (entre paréntesis) para el año 2050, en la estación de Sevilla correspondiente a la comarca Terrazas.

Mes	Temperatura, °C		Precipitation, cm	Evapotransp. potencial, cm	Días de lluvia
	Máxima	Mínima			
Ene	15.8 (17.3)	5.8 (7.3)	8.9 (8.6)	2.9 (2.1)	7 (7)
Feb	17.5 (19.0)	6.7 (8.2)	7.3 (6.8)	4.0 (2.6)	9 (9)
Mar	20.3 (22.0)	8.1 (9.8)	5.4 (5.0)	5.9 (4.5)	6 (6)
Abr	22.4 (24.1)	9.8 (11.5)	5.7 (5.3)	8.7 (6.1)	7 (7)
May	26.7 (28.4)	12.4 (14.1)	3.1 (2.9)	13.7 (10.1)	10 (9)
Jun	31.1 (33.1)	15.8 (17.8)	1.8 (1.6)	20.2 (15.2)	6 (5)
Jul	35.5 (37.5)	18.3 (20.3)	.2 (.2)	13.5 (14.8)	1 (1)
Ago	35.6 (37.6)	18.2 (20.2)	.5 (.4)	13.5 (14.8)	2 (2)
Sep	32.1 (33.8)	16.9 (18.6)	1.7 (1.6)	18.4 (13.6)	4 (4)
Oct	26.0 (27.7)	13.3 (15.0)	6.3 (5.9)	10.8 (8.1)	12(11)
Nov	19.7 (21.4)	9.2 (10.9)	9.6 (8.9)	5.3 (3.8)	4 (4)
Dic	16.1 (17.6)	6.0 (7.5)	9.0 (8.7)	3.0 (2.4)	6 (6)
Anual	24.9 (26.6)	11.7 (13.4)	59.5 (55.9)	119.9 (98.1)	74 (71)

cultivos de regadío, tales como maíz y algodón. Generalmente, los primeros se siembran en otoño, y los segundos en primavera. Aunque el riego no es imprescindible para los cultivos de secano, sus producciones suelen aumentar significativamente con el aporte adicional de agua. Es destacable la diferencia de producción entre los distintos tipos de suelos.

### 3.2. Escenario de cambio climático

Una segunda aplicación del modelo ACCESS-I en Andalucía, se llevo a cabo simulando un escenario de cambio climático dentro del rango pronosticado por las últimas versiones de los modelos generales de circulación de la atmósfera (IPCC, 1992; Kenny et al. 1993). Este escenario previsto para la región del Mediterráneo sur y situado en el año 2050, queda

definido por un incremento de la temperatura de +1.5 °C en invierno (Diciembre, Enero y Febrero) y +2.0 °C en verano (Junio, Julio y Agosto), y una disminución de la precipitación del -3 % en invierno y del -12 % en verano. Los cambios termoplumiométricos para los restantes meses del año se calcularon por simple interpolación lineal. Este escenario de cambio climático se corresponde con una concentración media de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de 523 ppmv, que representa un aumento del 47.3 % sobre el nivel actual de 355 ppmv. Dicha perturbación climática se aplicó por igual a cada una de las 34 estaciones meteorológicas consideradas en el estudio, mostrándose en la Tabla 3 un ejemplo para el caso de la estación de Sevilla. Las características de suelo y cultivo se mantuvieron en este escenario de cambio con los mismos valores que para el escenario actual.

Tabla 4. Resúmenes de valores de las variables de entrada de los modelos, correspondientes a las 34 comarcas agrícolas seleccionadas.

Variable	(Rango) Valor dominante/medio		
	General	Horizonte 0-30 cm	Horizonte 30-120 cm
<u>Características del lugar</u>			
Longitud, °	(W01 52 45-W07 00 10)		
Latitud, °	(N36 12 14-N38 15 34)		
Tipo de relieve	(plano - colina) colina		
Pendiente, %	(<2 -16) 8		
Clase de drenaje	(imperfecto-excesivo) bueno		
<u>Características del suelo</u>			
Contenido en arcilla, %	(4 - 65) 32	(2 - 68) 31	
Contenido en limo, %	(5 - 63) 24	(3 - 63) 24	
Contenido en arena, %	(10 - 95) 44	(6 - 97) 42	
Contenido en piedras, %	(0 - 0) 0	(0 - 0) 0	
Pedregosidad superficial, %	(0 - >50) 10		
Densidad aparente, g/cm <sup>3</sup>	(0.98 - 1.73) 1.42	(1.06 - 1.78) 1.40	
Capacidad de campo, w w <sup>-1</sup>	(0.16 - 0.43) 0.25	(0.16 - 0.43) 0.25	
Punto de marchitez, w w <sup>-1</sup>	(0.04 - 0.32) 0.14	(0.05 - 0.27) 0.14	
Parámetros de Van Genuchten:			
α	(0.0360-0.1360)0.0598	(0.0360-0.1500)0.0605	
n	(1.1940-1.5030)1.2466	(1.1970-1.5290)1.2546	
m	(0.1625-0.3347)0.1957	(0.1646-0.3460)0.1982	
Conductividad hidráulica, cm/día	(0.96 - 216.00) 15.07	(0.96 - 216.00) 19.39	
Carbono orgánico, %	(0.1 - 1.6) 0.8	(0.1 - 1.3) 0.4	
Saturación en sodio, %	(0.1 - 1.9) 0.5	(0.1 - 4.2) 0.7	
Profundidad útil, cm	120		

### 3.3. Resultados de la evaluación

Los resultados que ofrece el modelo ACCESS-I para cada lugar evaluado se refieren a múltiples parámetros calculados, especialmente en el módulo de productividad, tales como evapotranspiración potencial, evaporación y transpiración real, balance hídrico, índice de área foliar, biomasa total y rendimiento.

Sin embargo, en esta aplicación se prestó especial atención a la capacidad productiva, a través del rendimiento estimado para el cultivo del girasol, y al riesgo de erosión hídrica cuyos resúmenes se recogen en las Tablas 5, 6 y 7.

#### 3.3.1. Capacidad productiva

Tanto en el escenario actual como en el

simulado de cambio climático, se hizo aplicación del módulo de productividad exclusivamente para el cultivo del girasol en régimen de secano. Otras aplicaciones en los mismos lugares para los cultivos del trigo y maíz ofrecieron resultados menos fiables. En todos los casos, se le facilitó al modelo la fecha de siembra de 15 de Marzo, considerándose un monocultivo precedido y seguido de barbecho. En la Tabla 5 se presentan los resultados conseguidos para los 34 lugares evaluados, en cuanto a transpiración real, balance de agua, rendimiento y clase de capacidad.

En las condiciones actuales, el desarrollo del cultivo se extendió según el modelo desde el 15 de Marzo hasta finales de Julio o principios de Agosto, aunque en el caso de Baza (L-GR003) se retrasa la recolección al 19 de Septiembre. Ello parece ser debido a las bajas temperaturas mínimas de los meses de Marzo, Abril y Mayo (entre -0.2 y 4.6 °C) en ese lugar. Aunque no era objetivo de este estudio formular estrategias de manejo, el modelo permite variar la fecha de siembra, y como consecuencia la recolección, hasta conseguir un rendimiento máximo. La transpiración real del cultivo oscila entre 4.4 y 16.2 cm, no obteniéndose diferencias significativas entre provincias. Los balances hídricos de los suelos durante el período de desarrollo del cultivo llegan a superar los -15 cm, pudiendo interpretarse como indicadores de la respuesta de cada suelo a una posible puesta en riego. Los rendimientos calculados oscilan entre 461 kg/ha ('Clase S5-Muy baja') en Montefrío de Granada (L-GR009) y 1946 kg/ha ('Clase S1-Muy elevada') en Campiña de Cadiz (L-CA001), siendo el valor medio de 1177 kg/ha ('Clase S3-Moderada'). Estos valores calculados se aproximan bastante a los valores reales correspondientes a los últimos años en Andalucía, que fueron analizados estadísticamente por Peccol y Rounsevell (1996) como parte de este mismo proyecto; así como a los resultados pronosticados por otro modelo de desarrollo del girasol puesto a punto con información muy detallada generada en la finca

experimental del IRNAS, Sevilla, durante los años 1993 y 1994 (Barros, 1996). No obstante, las producciones pronosticadas en Almería, y en general en las provincias orientales, se consideran relativamente altas. Ello puede ser debido a una sobrestimación del nivel de radiación disponible que realiza el modelo, en base a la temperatura acumulada. Este procedimiento tendría que ser corregido para su aplicación en las regiones mediterráneas, ya que gran parte de la energía solar de los meses de verano en estas zonas exceden ampliamente a las necesidades de los cultivos. También se observan rendimientos relativamente bajos en los suelos vérticos (ej. L-H003, 'Clase S4-Baja'), lo que se explica por el menor peso que parecen tener en el modelo los parámetros hídricos (ej. capacidad de retención de agua del suelo) con relación a los térmicos.

En la simulación de cambio climático para el 2050, se pronostica un rendimiento medio de 1763 kg/ha ('Clase S1-Muy elevada') que supone un incremento de 586 kg/ha (49.7 %), siendo en la Campiña de Córdoba (L-CO007) donde se consigue el valor más alto (2988 kg/ha). Este incremento, tal y como explica Loveland y Rounsevell (1996) para resultados similares pronosticados en Inglaterra con el cultivo del trigo, parece debido a una mejor eficacia en el uso del agua por parte del cultivo como consecuencia de la mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y elevación de la evapotranspiración potencial y de la temperatura. La concentración de la distribución de los rendimientos en el escenario climático simulado, mayoritariamente dentro del rango de la Clase S1, apoya la hipótesis de una optimización de las condiciones de desarrollo de los cultivos como también ocurre en otras regiones más septentrionales de Europa (Loveland y Rounsevell, 1996). Esta tendencia positiva que pronostica el modelo cambia al simular perturbaciones más acusadas, obteniéndose reducciones importantes de rendimiento al aumentar ligeramente las condiciones de cambio climático.

En la Tabla 7 se muestra una síntesis de la distribución superficial de los resultados conse-

Table 5. Resultados de la evaluación de la capacidad de producción de los suelos en las seleccionadas comarcas de Andalucía, para la situación climática actual (1961-1990) y para la perturbación climática prevista en el año 2050.

Unidad- tierra	Escenario actual				Escenario de cambio			
	Transpiración real,cm	Balance agua,cm	Rendimiento kg/ha	Clase capacid.	Transpiración real,cm	Balance agua,cm	Rendimiento kg/ha	Clase capacid.
L-AL002	15.6	-13.6	1879	S1	16.2	-13.1	2713	S1
L-AL005	9.1	-7.7	1151	S3	10.8	-10.6	1829	S1
L-AL008	10.9	-10.1	1136	S3	13.2	-10.4	1946	S1
L-CA001	16.2	-9.2	1946	S1	16.5	-8.9	2398	S1
L-CA002	10.7	-5.3	1041	S3	10.8	-4.1	1475	S2
L-CA003	6.4	-4.1	725	S4	7.7	-4.2	1085	S3
L-CA005	10.8	-0.8	1112	S3	11.7	-1.2	1655	S1
L-CO001	12.3	-9.3	1311	S2	14.1	-9.9	1995	S1
L-CO002	10.3	-10.6	1338	S2	13.1	-11.5	2276	S1
L-CO007	14.4	-10.6	1611	S1	19.2	-12.6	2988	S1
L-GR001	7.1	0.7	683	S5	8.6	-0.1	1007	S3
L-GR003	13.4	-15.9	1343	S2	11.9	-14.9	1477	S2
L-GR005	11.0	-6.7	1160	S3	10.7	-5.8	1454	S2
L-GR008	11.9	-7.4	1310	S2	14.2	-7.3	2127	S1
L-GR009	4.4	-3.6	461	S5	6.1	-2.7	589	S5
L-GR010	9.0	-9.0	994	S4	9.5	-8.5	1280	S2
L-GR011	14.1	-15.5	1840	S1	16.1	-16.1	2727	S1
L-H0003	9.6	-12.2	978	S4	13.6	-8.6	1949	S1
L-H0004	9.2	-10.2	896	S4	11.1	-11.0	1493	S2
L-H0005	11.1	-11.3	1376	S2	11.9	-10.7	1797	S1
L-J0001	11.7	-11.5	1361	S2	13.3	-10.0	1880	S1
L-J0003	10.0	-6.6	982	S4	12.3	-5.3	1640	S1
L-J0004	8.5	-7.6	806	S4	11.0	-5.9	1416	S2
L-J0009	7.1	-3.2	847	S4	8.3	-3.3	1157	S3
L-MA001	9.6	-0.6	859	S4	11.0	-0.7	1346	S2
L-MA003	10.1	-11.4	1253	S2	12.8	-12.5	2181	S1
L-MA004	13.4	-8.8	1458	S2	15.9	-7.2	2355	S1
L-SE001	6.6	-5.2	599	S5	11.1	-4.1	1577	S1
L-SE002	13.1	-10.5	1396	S2	12.4	-8.0	1717	S1
L-SE003	10.2	-7.1	1101	S3	11.4	-4.8	1470	S2
L-SE004	13.2	-2.9	1531	S1	14.3	-3.7	2077	S1
L-SE007	9.4	-6.7	953	S4	10.3	-6.1	1377	S2
L-SE008	10.0	-10.1	1132	S3	10.7	-9.2	1645	S1
L-SE009	11.6	-12.1	1472	S2	12.2	-11.0	1864	S1

- En el cálculo del rendimiento estimado del cultivo de girasol se consideró un período de desarrollo desde el 15 de marzo al 24 de julio; fijándose el rendimiento máximo calculado en 2000 kg/ha, que se aproxima al valor más elevado en el escenario actual (1946), para la definición de las clases de capacidad de producción: S1= 1500-2000, S2= 1200-1500, S3= 1000-1200, S4= 700-1000, y S5= <700 kg/ha.

Table 6. Resultados de la evaluación del riesgo potencial de erosión en las seleccionadas comarcas de Andalucía, para la situación climática actual (1961-1990) y para la perturbación climática prevista en el año 2050.

Unidad- tierra	Escenario actual				Escenario de cambio			
	Efecto relieve (t)	Erodibilidad suelo (k)	Erosividad lluvia (r)	Clase vulner.	Efecto relieve (t)	Erodibilidad suelo (k)	Erosividad lluvia (r)	Clase vulner.
L-AL002	1	4	4	V6kr	1	4	4	V6kr
L-AL005	1	3	4	V5r	1	3	4	V5r
L-AL008	1	1	-	V1	1	1	-	V1
L-CA001	1	1	-	V1	1	1	-	V1
L-CA002	2	1	4	V4r	2	1	4	V4r
L-CA003	1	2	3	V2	1	2	3	V2
L-CA005	2	1	4	V4r	2	1	4	V4r
L-CO001	4	2	3	V8t	4	2	4	V9tr
L-CO002	1	2	4	V3r	1	2	4	V3r
L-CO007	1	2	4	V3r	1	2	4	V3r
L-GR001	2	1	4	V4r	2	1	4	V4r
L-GR003	1	2	3	V2	1	2	3	V2
L-GR005	1	2	4	V3r	1	2	3	V2
L-GR008	3	2	4	V8r	3	2	4	V8r
L-GR009	3	1	3	V5	3	1	4	V6r
L-GR010	1	2	4	V3r	1	2	3	V2
L-GR011	1	3	1	V2	1	3	1	V2
L-H0003	2	1	4	V4r	2	1	4	V4r
L-H0004	1	2	4	V3r	1	2	4	V3r
L-H0005	2	3	4	V8r	2	3	4	V8r
L-J0001	1	3	3	V4	1	3	3	V4
L-J0003	2	2	3	V5	2	2	3	V5
L-J0004	4	2	4	V9tr	4	2	3	V8t
L-J0009	3	1	3	V5	3	1	4	V6r
L-MA001	1	2	4	V3r	1	2	4	V3r
L-MA003	3	1	4	V6r	3	1	4	V6r
L-MA004	3	1	4	V6r	3	1	4	V6r
L-SE001	2	1	4	V4r	2	1	4	V4r
L-SE002	2	2	4	V6r	2	2	4	V6r
L-SE003	2	2	4	V4r	2	1	3	V3
L-SE004	3	1	4	V6r	3	1	4	V6r
L-SE007	3	2	4	V8r	3	2	4	V8r
L-SE008	1	3	4	V5r	1	3	4	V5r
L-SE009	1	1	-	V1	1	1	-	V1

- Estos resultados de evaluación del modelo ACCESS incluyen los niveles de severidad de cada una de las cualidades biofísicas t, k y r, que oscilan entre 1= bajo y 4= elevado; así como la clase de vulnerabilidad que varía entre V1 = nula y V10 = extrema, seguida de los símbolos de las cualidades más limitantes.

guidos. Ello es meramente orientativo ya que no necesariamente cada punto de observación refleja las características representativas de la comarca agrícola correspondiente. Sería necesario estudiar un conjunto de lugares en cada comarca para recoger, con el nivel de detalle deseado, esa variabilidad espacial. En esta somera aproximación, el 43% de las tierras agrícolas de Andalucía (más de 17000 km<sup>2</sup>) presenta una capacidad de producción de girasol elevada o muy elevada (Clases S1 y S2). En el escenario de cambio climático simulado, este porcentaje aumenta hasta el 92%.

### 3.3.2. Riesgo de erosión

Los riesgos de erosión en términos de clases de vulnerabilidad para cada uno de los 34 lugares evaluados, referidos al escenario actual y al escenario de cambio climático, se sintetizan en la Tabla 6. Además de las clases de vulnerabilidad, se presentan los niveles de severidad correspondientes a cada una de las cualidades biofísicas consideradas por el modelo experto: relieve (t), erodibilidad del suelo (k) y erosividad de lluvia (r).

Los niveles de severidad para las cualidades

Tabla 7. Resumen superficial de los resultados de la evaluación mediante aplicación del modelo ACCESS a seleccionadas comarcas agrícolas de Andalucía, para la situación climática actual (1961-1990) y para la perturbación climática prevista en el año 2050.

Clase de evaluación	Escenario actual		Escenario de cambio	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
<u>Capacidad de producción</u>				
S1. Muy elevada	5947	14	23133	53
S2. Elevada	12487	29	16610	39
S3. Moderada	11337	26	2892	7
S4. Baja	11696	27	-	-
S5. Muy baja	1766	4	598	1
<u>Riesgo potencial de erosión</u>				
V1. Nula	4299	10	4299	10
V2. Muy baja	3920	9	6238	14
V3. Baja	8526	20	10813	25
V4. Moder. baja	10511	24	5906	14
V5. Liger. baja	5009	12	3392	8
V6. Liger. elevada	4738	11	6355	15
V7. Moder. elevada	-	-	-	-
V8. Elevada	4675	11	4388	10
V9. Muy elevada	1555	4	1842	4
V10. Extrema	-	-	-	-

relieve y erodibilidad del suelo se repiten para cada lugar en los dos escenarios ensayados, ya que en el escenario de cambio solo se modifican las variables climáticas. Al tratarse de comarcas agrícolas, el relieve se mantiene en general en niveles no muy desfavorables, dominando el nivel 1t, y siendo solo en los casos de Campiña Alta de Córdoba (L-CO001) y La Loma de Jaén (L-J0004) donde se alcanzan pendientes muy acusadas (nivel 4t). La erodibilidad del suelo tampoco alcanza niveles de severidad extrema, dominando el nivel 2k, y siendo únicamente en el caso de Almanzora Bajo de Almería (L-AL002) donde se dan características intrínsecas del suelo más vulnerables a la erosión (nivel 4k). Aunque la sensibilidad en el pronóstico de esta cualidad es buena de acuerdo con otros tests de validación realizados (De la Rosa *et al.* 1995; Crompvoets *et al.*, 1996), sería recomendable ensayar nuevas variables edáficas en el árbol de decisión.

En el escenario actual, la erosividad de lluvia representa la cualidad más limitante, alcanzando el nivel 4r en 23 de los 34 lugares evaluados y solamente en el caso de la Vega de Granada (L-GR011) se da la situación más favorable (nivel 1r). Modificando los niveles de generalización del índice de Fournier y del índice de aridez, tal vez se logre conseguir un mayor poder discriminante para esta cualidad. Finalmente el modelo calcula la clase de vulnerabilidad o de riesgo potencial de erosión, obteniéndose como valor dominante para todos los lugares evaluados la 'Clase V4-Moderadamente baja'. Los lugares de mayor riesgo se localizan en La Loma de Jaén (L-J0004; 'Clase V9-Muy elevada'), Campiña Alta de Córdoba (L-CO001; 'Clase V8-Elevada'), La Costa de Huelva (L-H0005; 'Clase V8-Elevada') y la Sierra Sur de Sevilla (L-SE007; 'Clase V8-Elevada'). Por el contrario, en las comarcas de Río Nacimiento de Almería (L-AL008), Campiña de Cádiz (L-CA001) y Vega de Sevilla (L-SE009) se localizan los lugares de mínimo riesgo ('Clase V1-Nula').

En el escenario correspondiente a la perturbación climática prevista para el año 2050, la erosividad de lluvia sigue siendo la cualidad

más limitante, alcanzando niveles de severidad muy similares a los correspondientes al escenario actual. El modificar el cálculo de la erosividad de lluvia introduciendo un nuevo indicador de aridez (ej. mediante el índice Bagnouls-Gausson; CEC, 1992) podría ser más apropiado en escenarios con reducida precipitación. En cuanto a la clase de vulnerabilidad o de riesgo potencial de erosión, la 'Clase V4-Moderadamente baja' se mantiene como dominante para los lugares evaluados. Sin embargo, el lugar de mayor riesgo se localiza en Campiña Alta de Córdoba (L-CO001; 'Clase V9-Muy elevada'), en vez de en La Loma de Jaén (L-J0004) como ocurría en el escenario actual. Los lugares de menor riesgo ('Clase V1-Nula') se siguen situando en las mismas comarcas que en el escenario actual.

En la síntesis de la distribución superficial de los resultados conseguidos (Tabla 7), es destacable que el 39% de las tierras agrícolas de Andalucía (más de 16000 km<sup>2</sup>) presente actualmente una vulnerabilidad a la erosión de baja a nula (Clases V1 a V3); mientras que en el escenario de cambio climático simulado, este porcentaje aumenta hasta el 49%. Estos resultados difieren de los conseguidos en aplicación del modelo en lugares representativos de todas las comarcas de Andalucía incluyendo las forestales y naturales además de las agrícolas (26% y 27%, respectivamente; De la Rosa *et al.*, 1995).

Considerando conjuntamente ambos parámetros evaluados, capacidad de producción y riesgo de erosión, la comarca Campiña de Cádiz (L-CA001) ofrece actualmente las mejores condiciones para el uso agrícola, con máximo rendimiento de girasol (1946 kg/ha) y mínimo riesgo de erosión ('Clase V1-Nula'), de todos los lugares evaluados; no consiguiendo sin embargo mantener el máximo de rendimiento en el escenario del 2050. Sin embargo de acuerdo con los resultados de este estudio, sería necesario investigar la influencia continuada de la erosión sobre la productividad en función de la tolerancia de cada suelo. Lo mismo se podría decir de la inclusión de los

factores de manejo agrícola y socio-económicos en estos modelos biofísicos, al tratarse de los factores más fácilmente modificables y que, por consiguiente, definen los diagnósticos o estrategias de respuesta.

### 3.3.3. *Facilidad de aplicación*

Uno de los elementos esenciales en evaluación de tierras consiste en la facilidad de generar cambios, de lugar, suelo, clima, uso o manejo, y de conocer y comparar sus influencias sobre el comportamiento de las unidades-tierra. Por ello, la automatización o rutinización de la aplicación de los sistemas de evaluación resulta un elemento decisivo. Igualmente, la integración de las metodologías de evaluación de tierras y de simulación dinámica de cultivos se facilita grandemente mediante la informatización del modelo híbrido resultante.

Dentro de este contexto, la aplicación automática del modelo ACCESS mediante su interfaz para WINDOWS resultó de gran utilidad, tanto la entrada de datos como la combinación de suelos, climas y cultivos dentro de la región evaluada. También se crearon con facilidad y rapidez los escenarios de cambio climático, utilizando la opción de perturbación.

La utilización previa de bases de datos, tanto de suelo como de clima, facilitaron grandemente la elaboración de los ficheros de entrada de datos del modelo. En este sentido, el generador de capas de suelos de la base de datos SDBm (FAO-ISRIC-CSIC, 1995) resultó de gran utilidad. No obstante, sería interesante utilizar un solo fichero para todos los suelos de una región a evaluar, o a lo sumo dos ficheros con los datos correspondientes a los dos horizontes (suelo y subsuelo) que considera ACCESS-I. Los datos de clima podrían incluirse también en un solo fichero con todas las estaciones correspondientes a una región a evaluar. Actualmente, el modelo utiliza un fichero de clima y otro de suelo para cada lugar a evaluar.

Además de los resultados detallados que ofrece ACCESS para cada lugar evaluado, una

presentación en forma tabular de los resultados correspondientes a una misma región, tal y como se ofrecen en las Tablas 5 y 6, constituiría una opción interesante; al igual que el resumen por extensión que se muestra en la Tabla 7.

## 4. CONCLUSIONES

La metodología integrada desarrollada en el modelo ACCESS ofrece excelentes posibilidades en el pronóstico del comportamiento de suelos y cultivos, tanto en las condiciones climáticas actuales como en posibles escenarios de cambio climático. Los modelos de simulación de cultivos y los sistemas expertos empiezan a desempeñar un papel esencial y complementario en la evaluación de tierras.

De acuerdo con la aplicación puntual realizada, la perturbación climática supuesta para el año 2050 mejora claramente las condiciones potenciales de desarrollo agrícola de Andalucía. Los rendimientos del girasol aumentarían significativamente, mientras que los riesgos de erosión no experimentarían cambios importantes. Esta tendencia positiva se invierte al aumentar ligeramente el grado de la perturbación. En esta aplicación no se investiga la influencia de la erosión sobre la capacidad de producción, aunque la tolerancia de la mayoría de los suelos evaluados parece ser bastante elevada.

Los resultados conseguidos en este estudio ponen de manifiesto el interés y utilidad de continuar la investigación, mejorando el nivel de precisión en el pronóstico, e incluyendo en la modelación factores socio-económicos que permitan formular estrategias de respuesta al cambio climático.

## AGRADECIMIENTOS

El proyecto ACCESS, 1992-1995, fue financiado por la Comisión Europea, DGXII Programa de Medio Ambiente, contrato no. EV5V-CT92-0129. Los autores desean ma-

nifestar su agradecimiento al coordinador del proyecto en la DGXII, D. Peter, por la colaboración prestada; así como a los responsables de los equipos de la Europa del Este asociados al proyecto, C. Simota, RISSA, Bucarest; J. Glinski, IAP, Lublin; y K. Rajkai, RISSAC, Budapest. Igualmente es de destacar la participación de los restantes componentes de los equipos, J. Cromptvoets y F. Mayol, CSIC, Sevilla; T. Mayr y E. Peccol, SSLRC, Silsoe; A.M. Matthews y A.M. Portwood, ADAS, Cambridge; M. Voltzy D. Leenhardt, INRA, Montpellier.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- BARROS, J. 1996. *Quantified analysis of selected land use systems with sunflower*. PhD thesis, Wageningen Agric. Univ. (En preparación).
- BORG, H. y GRIMES, D.W. 1986. Depth development of roots with time: an empirical description. *Am. Soc. Agric. Eng.* 0001-2351:194-197.
- BROWN, D.M. y CHAPMAN, L.J. 1961. Soybean ecology III: development units for zones and varieties in the Great Lakes region. *Agronomy Journal* 53:306-308.
- CARTER, T.R., PARRY, M.L., NISHIOKA, S. y HARASAWA, H. (eds.) 1992. *Preliminary guidelines for assessing impacts of climate change*. Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Env. Change Unit, Oxford.
- CROMPVOETS, J., MAYOL, F. y DE LA ROSA, D. 1994. An expert evaluation system for assessing agricultural soil erosion vulnerability. En: *Soil responses to climate change* (M.D. Rousevell and P.J. Loveland, eds.) NATO ASI Series, Springer-Verlag, Heidelberg.
- CROMPVOETS, J., HENDRICKS, H.J., AGUIRRE, G. y DE LA ROSA, D. 1996. Validation of vulnerability expert models. En: *ACCESS: Agroclimatic Change and European Soil Suitability*. Volume I: Technical Report (P. Loveland, ed.). (En prensa).
- DAVIDSON, D.A., THEOCHAROPOULOS, S.P. and BLOKSMA, R.J. 1994. A land evaluation project in Greece using GIS and based on Boolean and fuzzy set methodologies. *Int. J. Geographical Information Syst.* 8:369-384.
- DE LA ROSA, D. (ed.) 1996. *MicroLEIS Version 4.1: Software + Documentation*. IRNAS Pub., versiones en español e inglés. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sevilla.
- DE LA ROSA, D., CROMPVOETS, J., MAYOL, F. y MORENO, J.A. 1995. Land vulnerability evaluation and climate change impact in Andalucía, Spain. Soil erosion and contamination. *Int. Agrophysics Journal*. (En prensa).
- DE LA ROSA, D., CROMPVOETS, J. y MAYOL, F. 1996. Risk modelling: land vulnerability expert system. En: *ACCESS: Agroclimatic Change and European Soil Suitability*. Volume I: Technical Report (P. Loveland, ed.). (En prensa).
- DEXTER, A.R. 1987. Mechanics of root growth. *Plant and Soil* 93:303-312.
- FAO 1976. *A framework for land evaluation*. Soils Bulletin No. 26, FAO Pub., Rome.
- FAO 1983. *Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture*. Soils Bulletin No. 52, FAO Pub., Rome.
- FAO 1984. *Provisional methodology for assessment and mapping of desertification*. FAO-UNEP Pub., Rome.
- FAO-ISRIC-CSIC 1995. *SDBm: Multilingual soil database*. World Soil Resources Report No. 81. FAO Pub., Rome.
- GOUDRIAAN, J. y KETNER, P. 1984. A simulation study for the global carbon cycle, including man's impact on the biosphere. *Climate Change*, 6:167-192.
- GOUDRIAAN, J., VAN LAAR, H.H., VAN KEULEN, H. Y LOUWERSE, W. 1984. Simulation of the effect of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on assimilation and

- transpiration of a closed crop canopy. *Wiss. Zeit. Humboldt Univ. Berlin, Math.- Nat. R.* 33:352-356.
- IPCC 1992. *Climate change: The IPCC scientific assessment* (J.T. Houghton, G.J. Jenkins y J.J. Ephrausmus, eds.). Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press.
- IRNAS 1993. SDBm-IRNAS: *Base de datos de suelos de Andalucía*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sevilla.
- JONES, R.J. y THOMASSON, A.J. 1985. *An agroclimatic databank for England and Wales*. Soil Sur. Tech. Mono. No. 16. Soil Survey of England and Wales. Harpenden.
- KENNY, G.J., HARRISON, P.A. Y PARRY, M.L. (eds.). 1993. *The effect of climate change on agricultural and horticultural potential in Europe*. Research Report No.2, Environmental Change Unit, Oxford.
- LAGUNA, A. 1989. *Estudio cuantitativo de la erosión del suelo*. Tesis Doctoral. Dept. de Agronomía, Univ. de Córdoba.
- LOVELAND, P.J., LEGROS, J.P., ROUNSEVELL, M.D., DE LA ROSA, D. y ARMSTRONG, A. 1994. A spatially distributed soil, hydrological and agroclimatic model for the prediction of climate change in the EC. 6, 83-100. En: *Trans. 15th World Congress of Soil Science* (J.D. Etchevers, ed.), ISSS, Mexico.
- LOVELAND, P. y ROUNSEVELL, M.D. 1996. Chapter 21 Achievements of the project and the way forward. En: *ACCESS: Agroclimatic Change and European Soil Suitability*. Volume I: Technical Report (P. Loveland, ed.). (En prensa).
- LOVELAND, P. (ed.) 1996. *ACCESS: Agroclimatic Change and European Soil Suitability*. Volume I: Technical Report. (En prensa).
- MAYR, T., ROUNSEVELL, M.D. AND DE LA ROSA, D. 1994. Modelling approaches to the evaluation of climate change on future crop potential and land management. En: *Soil responses to climate change* (M.D. Rousevell y P.J. Loveland, eds.) NATO ASI Series, Springer-Verlag, Heidelberg.
- MAYR, T., SIMOTA, C. y ROUNSEVELL, M.D. 1996. Chapter 2 ACCESS-I. En: *ACCESS: Agroclimatic Change and Soil European Suitability*. Volume I: Technical Report (P. Loveland, ed.). (En prensa).
- MORGAN, R.C.P. 1979. *Soil Erosion. Topics in Applied Geography*. Longmans, Harlow.
- PECCOL, E. y ROUNSEVELL, M.D. 1996. Chapter 15 The agricultural production system baseline. En: *ACCESS: Agroclimatic Change and European Soil Suitability*. Volume I: Technical Report (P. Loveland, ed.). (En prensa).
- POESEN, J. 1995. Soil erosion in Mediterranean environments. En: *Desertification a European context: Physical and socio-economic aspects* (R. Fantechi, D. Peter, P. Balabanis y J.L. Rubio, eds.), EUR 15415EN, Luxembourg.
- PORTER, J.R. *et al.*, 1987. An analysis of morphological development stages in Avalon winter wheat crops with different sowing dates and at ten sites in England and Scotland. *J. Agric. Sci., Cambridge* 109:107-121.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L. and SAXTON, K.E. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 25:1316-1320.
- RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A. and PORTER, J.P. 1991. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 46:30-33.
- ROBERTSON, G.W. 1983. *Weather-based mathematical models for estimating development and ripening of crops*. Technical Note No. 10. World Meteor. Organ., Geneve.
- ROSSITER, D.G. 1990. ALES: A framework for land evaluation using a microcomputer. *Soil Use and Management* 6:7-20.
- ROUNSEVELL, M.D. y DE LA ROSA, D. 1993. A conceptual framework for the assessment of climate change impacts on agricultural land-use potential and sustainability in Europe. *ACCESS Development Note*, Sevilla.

- SIMOTA, C. 1991. SIBIL: A simulation model for soil water dynamics and crop yield formation. 11p. *Int. Note RISSA*, Bucarest.
- SIMOTA, C., RAJKAI, K. y MAYR, T. 1996. Chapter 6 Pedotransfer functions. En: *ACCESS: Agroclimatic Change and Soil European Suitability*. Volume I: Technical Report (P. Loveland, ed.). (En prensa).
- SOIL SURVEY STAFF. 1975. *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA Soil Cons. Serv., Agric. Handb. No. 436. US Gov. Print. Off., Washington.
- SSLRC 1988. *Water erosion in England and Wales 1982-1984*. Soil Survey and Land Research Centre. Silsoe.
- STEINHARDT, R., VANDER PLOEG, R.R. y EHLERS, W. 1982. Computing forms and solutions of the single root soil water abstraction model. *Soil and Tillage Research* 2:347-357.
- THORNTHWAITE, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *The Geogr. Rev.* 38:55-94.
- VAN KEULEN, H. 1982. Crop production under semi-arid conditions as determined by moisture availability. En: H.H. van Laar y F.W. Penning (eds.) *Simulation of plant growth and crop production*. PUDOC, Wageningen.
- VINER, D. y HULME, M. 1993. *Climate change scenarios for impact studies in the UK: General circulation models, scenario construction, methods and applications for impact assessment*. Department of the Environment, Climate Res. Unit, Univ. East Anglia, Norwich.
- WISHMEIER, W.H. Y SMITH, D.D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. USDA Agric. Handb. No. 537.
-