

LOS SISTEMAS DE EVALUACION DE SUELOS EN LA PLANIFICACION DEL TERRITORIO

DIEGO DE LA ROSA

Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC
Apartado 1052, 41080 Sevilla, <http://www.irnase.csic.es>

INTRODUCCIÓN

La idea de desarrollo sostenible es radicalmente diferente al crecimiento socio-económico actual en base al consumo o degradación de los recursos. En el mejor de los casos, los sistemas actuales de producción con tecnología "end of pipe" (tecnología ambiental convencional) tratan tan solo de transformar los residuos generados en otras sustancias de más fácil tratamiento o control. Sin embargo, los sistemas integrados de producción, indispensables para conseguir un verdadero desarrollo sostenible, conllevan un nuevo planteamiento tecnológico dirigido a reducir no solo la generación de residuos y emisiones, sino también el consumo de energías y recursos. Para introducir estos sistemas integrados (tecnología ambiental avanzada) resulta imprescindible la planificación medioambiental a largo plazo. El Programa Holandés de Desarrollo Sostenible (STD, 1994) representa uno de los escasos ejemplos de planificación medioambiental, con objetivos concretos cuantificados a medio y largo plazo y escenarios temporales de cambio muy específicos. De acuerdo con las previsiones de la Comisión Europea a través del Instituto de Prospectiva Tecnológica de Sevilla, la generalización de estos esquemas de mayor eficiencia energética

y de recursos está muy lejos de lo que parece técnicamente posible en los próximos cincuenta años (Coenen y Klein-Vielhauer, 1997).

En cualquier caso, el propósito fundamental de la planificación es el acierto y precisión en la toma de decisiones sobre las actividades productivas. La planificación medioambiental, cuya parte esencial corresponde a la planificación del territorio, trata de acertar al decidir sobre los usos del territorio y el diagnóstico de los problemas ambientales. La teoría de la decisión es una rama fundamental de la investigación operativa y de la gestión de recursos, y su metodología se viene desarrollando en la frontera entre la matemática aplicada y las tecnologías de la información. En el pasado, los procesos de toma de decisiones se consideraban como optimizaciones matemáticas racionales sencillas, basadas principalmente en la programación lineal y en técnicas gráficas. Sin embargo, esta excesiva simplificación daba lugar a representaciones de sistemas alejadas de la realidad y, por consiguiente, de aplicaciones prácticas muy limitadas. En los últimos veinte años, junto con el desarrollo espectacular de las tecnologías de la información, la teoría de la decisión ha evolucionado y propiciado la aparición de los llamados Sistemas Integrados de Apoyo a la Decisión. Se trata de sistemas informáticos, basados en técnicas avanzadas de

ingeniería del software, y que incorporan avances de otras disciplinas sobre el comportamiento humano y la teoría del conocimiento.

En el ámbito de los sistemas integrado de apoyo a las decisiones medioambientales, la evaluación de suelos se convierte en el elemento esencial. Tal y como se esquematiza en la **Figura 1**, la información y el conocimiento sobre el medio ambiente y sus recursos se combina con el uso continuado de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones. Este esquema agro-ecológico, que viene desarrollando el Grupo de Evaluación de Suelos del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (De la Rosa, 1996), responde a una verdadera ingeniería de la información y el conocimiento

sobre multitud de variables edáficas, climáticas, de cultivos y manejo agrícola y de atributos socio-económicos; mediante el desarrollo y aplicación de programas de ordenador, bases de datos, sistemas expertos, simulación dinámica, redes neuronales artificiales, sistemas de información geográfica y recursos Web, entre otras nuevas tecnologías. A lo largo de esta ponencia se muestra una selección de resultados conseguidos por este Grupo de Investigación, que dejan entrever la reciente transición desde la "vieja" ciencia del suelo a la "nueva" ciencia de los recursos naturales a través del "caos digital" que han ocasionado los últimos avances en los terrenos de la informática y las comunicaciones.

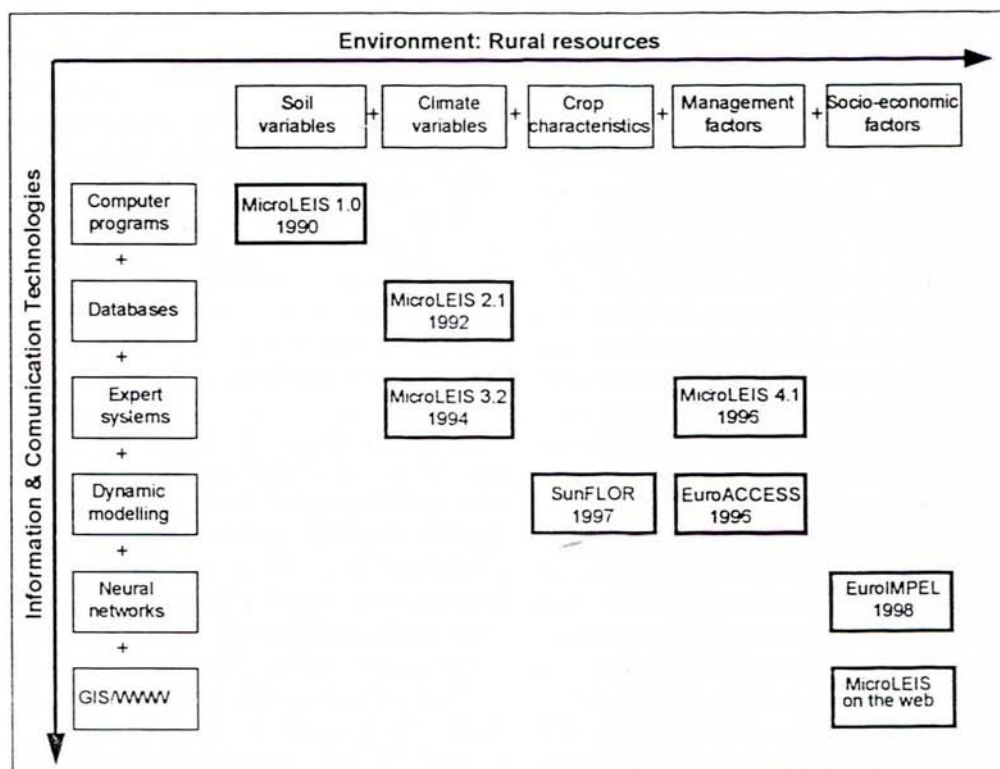


Figura 1. Combinación de información medioambiental y tecnologías de la información y las comunicaciones en el desarrollo de sistemas de evaluación de recursos naturales.

EVALUACIÓN DE SUELOS

El objetivo fundamental de la evaluación de suelos es comparar los requerimientos de los usos del territorio con las potencialidades y limitaciones de las unidades territoriales (Dent y Young, 1981). Se trata de pronosticar la aptitud relativa para un uso específico, mediante el análisis de las características y cualidades de las unidades-tierra (FAO, 1976). Las características son simples atributos territoriales que pueden ser medidos o estimados, mientras que las cualidades se componen de un conjunto de características relacionadas con los requerimientos y que determinan la aptitud relativa. Tanto unas como otras se refieren no solo a los aspectos positivos o potencialidades de los suelos (ej. capacidad productiva) sino también a los aspectos negativos o limitaciones (ej. vulnerabilidad a la degradación).

Un criterio fundamental que caracteriza a los estudios de evaluación de suelos es la utilización casi exclusiva de la información facilitada por los reconocimientos de suelos, así como el uso preferente de una resolución temporal mensual en los datos climáticos. Aunque se hace indistinto uso de la expresión "evaluación de suelos", son claramente identificables las unidades de estudio: suelo, tierra y campo. En términos generales, para la unidad-suelo se analizan exclusivamente variables de suelo y lugar; la unidad-tierra incluye además los factores climáticos; y la unidad-campo contempla también los atributos de manejo agrícola

POTENCIALIDADES DE USO

En el desarrollo del proceso de evaluación de suelos, resulta prioritario conocer la capacidad general de uso de las tierras, es decir, segregar las mejores tierras agrícolas de aquellas que presentan una aptitud moderada y de aquellas otras que son claramente marginales e incluso improductivas (ej. Land Capability Classification system; Klingebiel y Montgomery, 1961). En la

realidad, los usos agrícolas, forestales y naturales deberían de estar íntimamente asociados con dicha clasificación.

Una vez definida la vocación agro-ecológica de las tierras, el paso siguiente consiste en precisar la capacidad productiva de cada unidad territorial a nivel de cultivo (ej. Riquier et al., 1970). Para ello es imprescindible precisar los requerimientos edafoclimáticos de los principales cultivos, modelando su desarrollo vegetativo. Además de definir el uso productivo ideal, es igualmente necesario establecer las normas o prácticas de manejo correspondientes. La definición científica de estas prácticas de manejo, como un nuevo límite agro-ecológico, se ha de hacer también de acuerdo con las particularidades de cada suelo, clima y tipo de utilización. Con la introducción de las prácticas agrícolas se consigue hacer evaluación de suelos a nivel de fincas, ofreciendo resultados realmente útiles para los agricultores (Bouma et al., 1993).

Entre otras potencialidades de uso son también predecibles para los sistemas de evaluación la fertilidad natural de los suelos (ej. FCC system; Sanchez et al., 1982), la manejabilidad para las labores agrícolas, la regabilidad (ej. Bureau of Reclamation system; USDA, 1953), etc.

RIESGOS DE DEGRADACIÓN

La evaluación de suelos se ha de desarrollar teniendo también en consideración los procesos degradativos de los ecosistemas como principales indicadores de la desertificación. La erosión hídrica es el más relevante elemento degradativo de los suelos, muy especialmente en las zonas mediterráneas. Riesgos de erosión, sedimentación e inundación se tratan de predecir de forma conjunta o separada, encerrando una gran complicación por los múltiples procesos y variables que interfieren e interaccionan (ej. WEPP project; Flanagan y Nearing, 1995).

En segundo lugar, es evidente la creciente importancia de los problemas de contamina-

ción de suelos y aguas por compuestos agroquímicos, ya sean abonos, pesticidas, metales pesados u otros (Stigliani, 1991). Por ello, el análisis de los niveles de contaminantes en los suelos resultan actualmente tan necesarios como los correspondientes a los niveles de nutrientes. A su vez, la pérdida creciente de calidad de las aguas de riego y en especial su mayor contenido en sales solubles, acentúa aun más la gravedad del problema y la necesidad de predecir los riesgos de salinización. Por último, el saber de cada suelo su capacidad agronómica para digerir residuos, bien sea urbanos, industriales o agrícolas, resulta actualmente tan necesario como conocer su capacidad agrológica para producir cosechas.

INDICADORES DE LA SOSTENIBILIDAD

Las actividades productivas no solo afectan al entorno más próximo o local sino que también inciden en el comportamiento del medio ambiente de todo el planeta. Esta visión global y a largo plazo tiene que ser también contemplada por los estudios de evaluación. Los suelos, tanto agrícolas como forestales y naturales, están resultando ser uno de los principales emisores/sumideros de gases contaminantes a la atmósfera. Las más recientes previsiones elevan drásticamente las emisiones de gases nitrogenados referidas a los cultivos agrícolas de regadío. Los arrozales parecen que son también importantes emisores de gas metano a la atmósfera. Sin embargo, se trata de procesos muy complejos que requieren de un mayor conocimiento, ya que por ejemplo un mismo cultivo durante ciertos períodos fenológicos puede actuar como emisor y durante otros como sumidero.

Como la otra cara de la misma moneda, el impacto de las posibles perturbaciones climatológica, ya sean producida por causas naturales o antrópicas, tiene que ser tenida en consideración a la hora de establecer los límites ecológicos de las actividades productivas. Sobre los nue-

vos escenarios de cambio global, incluyendo cambio climático y cambio de uso actual del territorio, es necesario pronosticar el aumento o disminución tanto de la capacidad productiva como de los riesgos de degradación en cada zona (ej. EuroACCESS model; Loveland y Rounsevell, 1996).

METODOLOGÍA DE LA EVALUACIÓN

En la actualidad, un sistema de evaluación de suelos incluye una serie de componentes integrados para desarrollar tareas de inventario, evaluación y planificación del territorio, tal y como considera, el sistema AEZ: Agro-Ecological Zoning (FAO, 1995) o el sistema MicroLEIS: Microcomputer-based Land Evaluation Information System (De la Rosa, 1996; Figura 2). Estos componentes se pueden agrupar, de acuerdo con la tecnología informática predominantemente utilizada, de la siguiente forma: bases de datos, modelación empírica cualitativa, modelación empírica cuantitativa, simulación dinámica, automatización de la aplicación, generación de escenarios y conexión con los sistemas GIS/WWW.

BASES DE DATOS Y EXPERIENCIA

A partir del universo informativo generado por los inventarios de recursos naturales, las tecnologías de la información permiten construir grandes bases de datos fáciles de utilizar, recogiendo información de fuentes diversas y en una amplia variedad de formatos. Sobre el número de variables que almacenan estas bases de datos puede dar una idea las consideradas por el sistema MicroLEIS 4.1 (Tabla 1).

En la Figura 3 se muestra un esquema general de la base de datos de perfiles de suelos SDBm (FAO-ISRIC-CSIC, 1995; De la Rosa, 1996) donde se pueden observar los distintos tipos de datos de entrada, así como las principales prestaciones: importación y exportación de

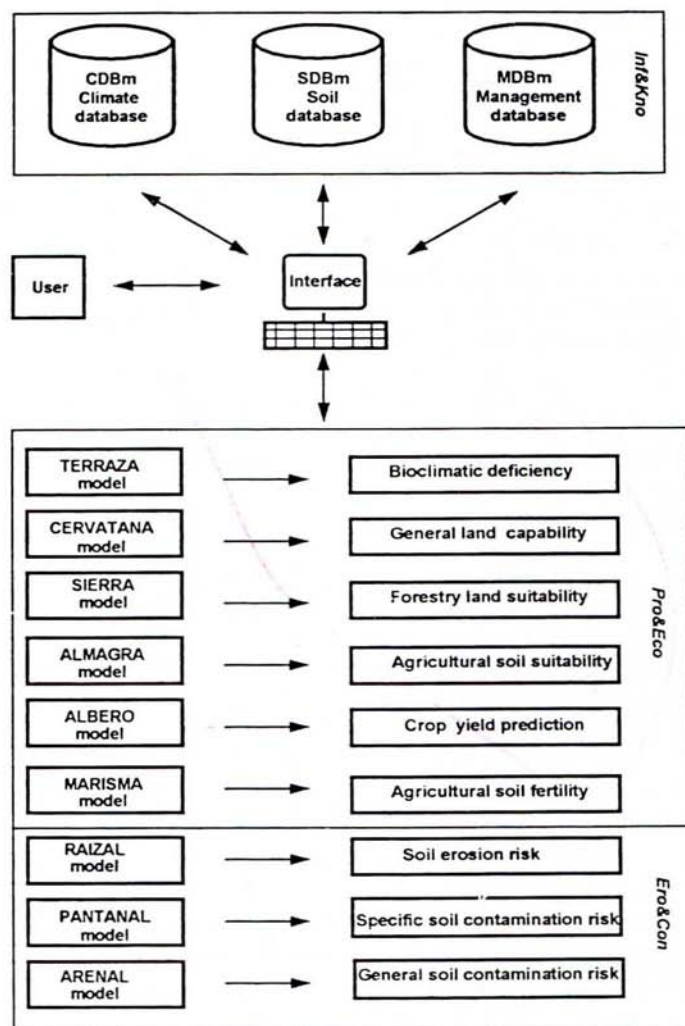


Figura 2. Esquema general del sistema de evaluación agro-ecológica de suelos MicroLEIS 4.1.

datos, cambio de idioma, sistema de códigos, descripciones convencionales, representaciones gráficas y generación de capas de suelo como interfase con los modelos de evaluación. La Tabla 2 presenta una relación de todas las variables de suelo almacenadas, que se agrupan como: descripción del lugar, descripción morfológica del perfil, datos analíticos convencionales, datos de sales solubles y datos de determinaciones físicas.

En la Figura 4 se muestra un esquema general de la base de datos climáticos CDBm (De la Rosa, 1996) donde se destacan los tipos de datos de entrada, así como las principales prestaciones: importación y exportación de datos, cambio de idioma, representaciones gráficas, cálculo de variables derivadas y generación de resúmenes como interfase con los modelos de evaluación. La Tabla 3 presenta una relación de todas las variables climáticas inclui-

Tabla 1. Número de variables incluidas en las bases de datos sobre recursos naturales que considera el sistema MicroLEIS 4.1.

Variables group	Number	Total
<u>SDBm soil profile database</u>		
Site description	33	
Morphological description (for 4 soil horizons)	176	
Standard analytical data (for 4 soil horizons)	96	
Soluble salts analytical data (for 4 soil horizons)	52	
Physical analytical and field data (for 4 soil horizons)	41	398
<u>CDBm monthly climate database</u>		
Station/dataset identification	4	
Observed parameters (for a period of 30 years)	3600	
Calculated parameters	42	
Simulated daily parameters	1080	4726
<u>MDBm agricultural management database</u>		
Dataset identification/farm description	15	
Parcel description	12	
Cropping characteristics	11	
Operations (for a sequence of 6 operations)	60	
Behaviour observations	11	109
		5233

das, que se agrupan como: identificación de la estación meteorológica, variables observadas, variables calculadas y variables diarias simuladas.

En la Figura 5 se muestra un esquema general de la base de datos/experiencia sobre manejo agrícola MDBm (De la Rosa, 1996) donde se destacan los tipos de datos de entrada, así como las principales prestaciones: importación y exportación de datos, cambio de idioma, sistema de códigos y glosario, presentación de resultados y generación de resúmenes como interfase con los modelos de evaluación. Se trata de un capturador de experiencia georeferenciada a unidades edáficas, a través de encuestas directas a agricultores y técnicos. La Tabla 4 presenta una relación de todas las variables de manejo incluidas, que se agrupan como: identificación

de la finca, descripción de la parcela, características del cultivo, secuencia de operaciones y observaciones sobre comportamiento.

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

La construcción de modelos se ha convertido en un elemento básico del método científico, utilizándose para ello una gran variedad de técnicas. Un modelo es una simplificación de la realidad que considera las relaciones más sobresalientes para explicar el sistema en estudio. La metodología clásica en modelación incluye el desarrollo de un modelo teórico, adquisición de datos sobre un sistema piloto, calibración y validación del modelo con los datos reales, y refinamiento, estandarización y automatización de su aplicación.

Tabla 2. Relación de variables de suelo incluidas en la base de datos SDBm (MicroLEIS 4.1).

Variable name	
<u>1. Site description</u>	
Author(s)	Species
Soil climate	Parent material
Topography	Parent rock
Landform	Drainage: class - internal - external
Land element	Water table: depth - type
Position	Moisture condition
Slope: class - form	Effective soil depth
Micro topography	Human influence
Flood: frequency - duration	Stones: size - abundance
Land use type	Rock outcrops: abundance - distance
Crops	- height
Vegetation type	Erosion: type - intensity
Grass/forb cover	Sealing/crusting
<u>2. Morphological description (for each soil horizon)</u>	
Color modifier	Rock fragments: abundance- size
Mottles: abundance - size- contrast - boundary	- shape - weathering - nature
- color	Nodules: abundance - size - kind
Texture	- shape - hardness - nature - color
Structure: grade - size - type - relation	Carbonates
Consistence: dry - moist - stickiness - plasticity	Biol features: abundance- kind
Cutans: quantity - contrast - nature - location	Boundary: width- topography
Cem/Comp: continuity - structure - grade - nature	Voids type
Pores/Roots: abundance - size	Porosity
<u>3. Standard analytical data (for each horizon sample)</u>	
pH: H2O - other	Exchangable cations: Ca - Mg - K- Na
EC	Particles size. sand: very coarse
P	- coarse - medium - very fine:
Organic C - N	silt: coarse - fine: and clay
K fixed	CaCO ₃ : total - active
CEC: soil - clay	CaSO ₄
<u>4. Soluble salts analytical data (for each horizon sample)</u>	
pH	B
EC	CO ₃
Ca	HCO ₃
Mg	CL
K	SO ₄
Na	NO ₃
	SAR
<u>5. Physical analytical and field data (for each horizon sample)</u>	
Infiltration: Basic infiltration (average of 3)	Water retention, moisture content: 0.03bar
Surface structure stability index	- 0.05bar - 0.1bar - 0.3bar -1bar - 3bar- 5bar
Bulk density	-15bar

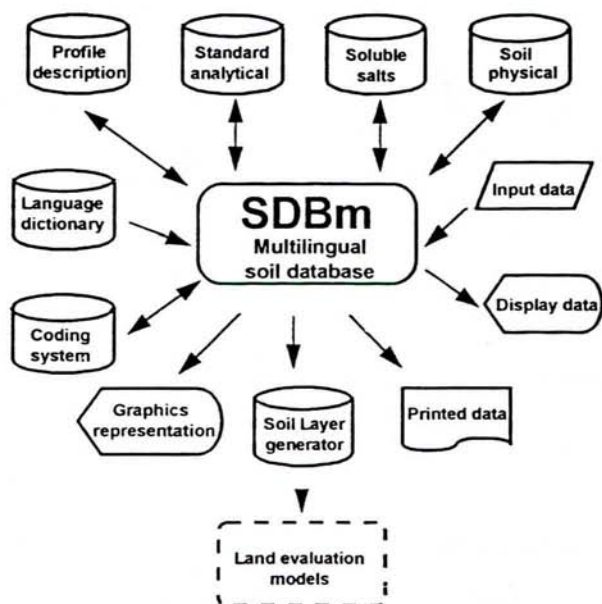


Figura 3. Esquema general de la base de datos de perfiles de suelos SDBm, como módulo integrado en el sistema MicroLEIS 4.1.

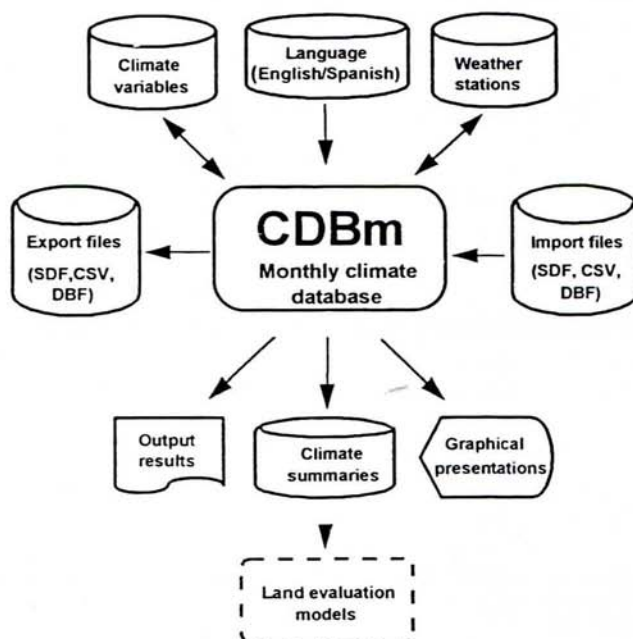


Figura 4. Esquema general de la base de datos climáticas CDBm, como módulo integrado en el sistema MicroLEIS 4.1.

Tabla 3. Relación de variables climáticas incluidas en la base de datos CDBm (MicroLEIS 4.1).

Variable name	Unit
<u>1. Station/dataset identification</u>	
Climate dataset identifier (weather station code)	
Latitude	<i>degrees, min, sec</i>
Longitude	<i>degrees, min, sec</i>
Altitude	<i>m</i>
<u>2. Observed parameters</u>	
Mean temperature	<i>°C</i>
Maximum temperature	<i>°C</i>
Minimum temperature	<i>°C</i>
Precipitation	<i>cm or mm</i>
Maximum precipitation per day	<i>cm or mm</i>
Days of precipitation	<i>number of days</i>
Days of precipitation with >1mm	<i>number of days</i>
Days of precipitation with >10mm	<i>number of days</i>
Days of precipitation with >30mm	<i>number of days</i>
Extraterrestrial radiation	<i>MJ m⁻² d¹</i>
<u>3. Calculated parameters</u>	
Potential evapotranspiration, Thornthwaite	<i>cm or mm</i>
Potential evapotranspiration, Hargreaves	<i>cm or mm</i>
Day length	<i>hours</i>
Growing season or vegetative period (annual)	<i>number of months</i>
Humidity index (annual)	
Aridity index (annual)	<i>number of months</i>
Modified Fournier index (annual)	
Precipitation concentration index (annual)	<i>%</i>
Arkley index (annual)	
<u>4. Simulated daily parameters</u>	
Julian day number (1st January = 1)	
Maximum temperature	<i>°C</i>
Minimum temperature	<i>°C</i>

Modelación empírica

En la modelación empírica, aunque resulta necesario el conocimiento de los procesos que tienen lugar en el sistema a modelar, no se pretende analizar el funcionamiento de tales procesos. A partir de un conjunto de variables de entrada, se trata de explicar el comportamiento del sistema a través de una o varias variables respuestas (es la metodología conocida como de "black box"). Entre los modelos empíricos son fácilmente diferenciables los que utilizan simples procedimientos cualitativos, de los que manejan cuantitativamente la información.

Los modelos empíricos cualitativos han sido, hasta hace relativamente pocos años, casi los únicos procedimientos utilizados en evaluación de suelos. El sistema Land Capability Classification (Klingebiel y Montgomery, 1961)

es el ejemplo más representativo y utilizado de todos ellos. En esencia, estos sistemas de clasificación (tablas de evaluación) siguen un esquema Booleano (basado en reglas) y suelen adoptar el principio del máximo factor limitante (ley del mínimo de Liebig) para segregar un número de clases entre cinco y ocho (ej. S1, S2, S3, N1 y N2, como el más convencional). Los resultados de estos sistemas dependen de las reglas elaboradas de acuerdo con otras metodologías previas y con la experiencia capturada de los usuarios y especialistas en el fenómeno a evaluar (ej. producción del cultivo de trigo).

La rígida metodología de la lógica Booleana determinada por las características limitantes del suelo está siendo reemplazada por otras más flexibles, tales como la lógica difusa (Burrough, 1989), que mejor se ajustan a la evaluación de los recursos naturales (Davidson, 1992).

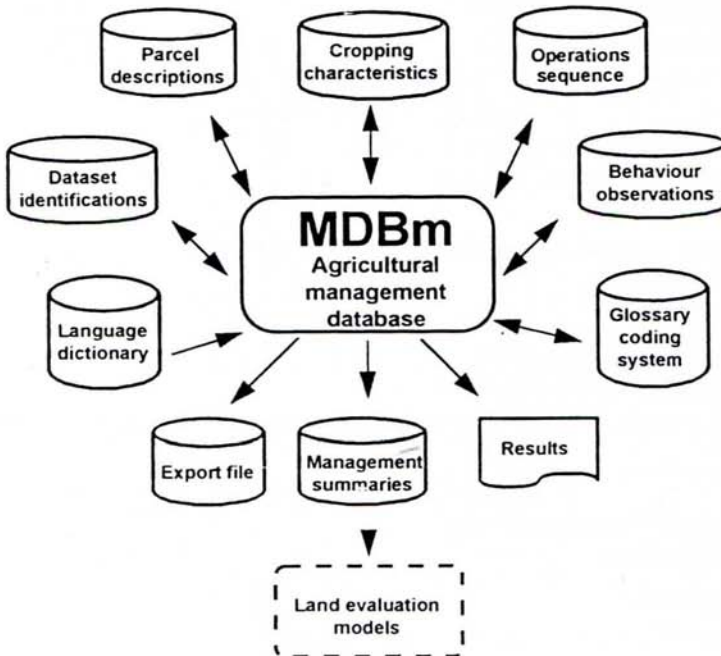


Figura 5. Esquema general de la base de datos de manejo agrícola MDBm, como módulo integrado en el sistema MicroLEIS 4.1.

Dentro también de la modelación empírica cualitativa, aunque aproximándose a las técnicas propias de la inteligencia artificial, los árboles de decisión como elementos esenciales de los sistemas expertos están resultando de gran utilidad en la evaluación de suelos, dada su transparencia y facilidad de elaboración y aplicación. El esquema marco de Rossiter (1990) para desarrollar sistemas expertos de evalua-

ción, facilita grandemente la elaboración de reglas y construcción de los árboles de decisión, así como su posterior aplicación en un escenario determinado. En la Figura 6 se presenta una sección del árbol de decisión desarrollado para la cualidad de manejo "protección del cultivo" en el modelo IMPEL-SEEM de evaluación de los riesgos de erosión de suelos (De la Rosa et al., 1997). Todas las cualidades de tierra y

Tabla 4. Relación de variables de manejo agrícola incluidas en la base de datos MDBm (MicroLEIS 4.1).

Variable name	
<u>1. Dataset identification/Farm description</u>	
Country	Max., Min. longitude
Region	Tenancy arrangement
Province	Holder's name
Natural region	Respondent's name
Municipal term	Enumerator's name
Farm name	Enumeration date
Farm size, <i>ha</i>	Information source
Max., Min. latitude	
<u>2. Parcel description</u>	
Topographic sheet	Altitude, <i>m</i>
Cadastral polygon	Infrastructure kind
Parcel name	Infrastructures type
Parcel size, <i>ha</i>	SDBm soil ref.
Max., Min. latitude	CDBm climate ref.
Max., Min. longitude	Project
<u>3. Cropping characteristics</u>	
Cropping system	Leaf duration
Crop type (cultivar)	Row spacing, <i>m</i>
Seed rate, <i>kg/ha</i>	Residues treatment
Seed quality	Farming year
Growing season length, <i>day</i>	Crop rotation
Plant height, <i>m</i>	
<u>4. Operations (for a sequence of <i>n</i> operations)</u>	
Operation type	Material input kind
Operation timing	Material input type
Power (tractor)	Material input rate, <i>kg/ha</i>
Implement type	Labour input
Implement origin	Work rate, <i>h/ha</i>
<u>5. Behaviour observations</u>	
Management level	Soil erosion status
Tillage system	Soil contamination status
Product type	Soil salinisation status
Product purpose	Subsoil compaction status
Product yield, <i>t/ha</i>	Remarks
Product quality	

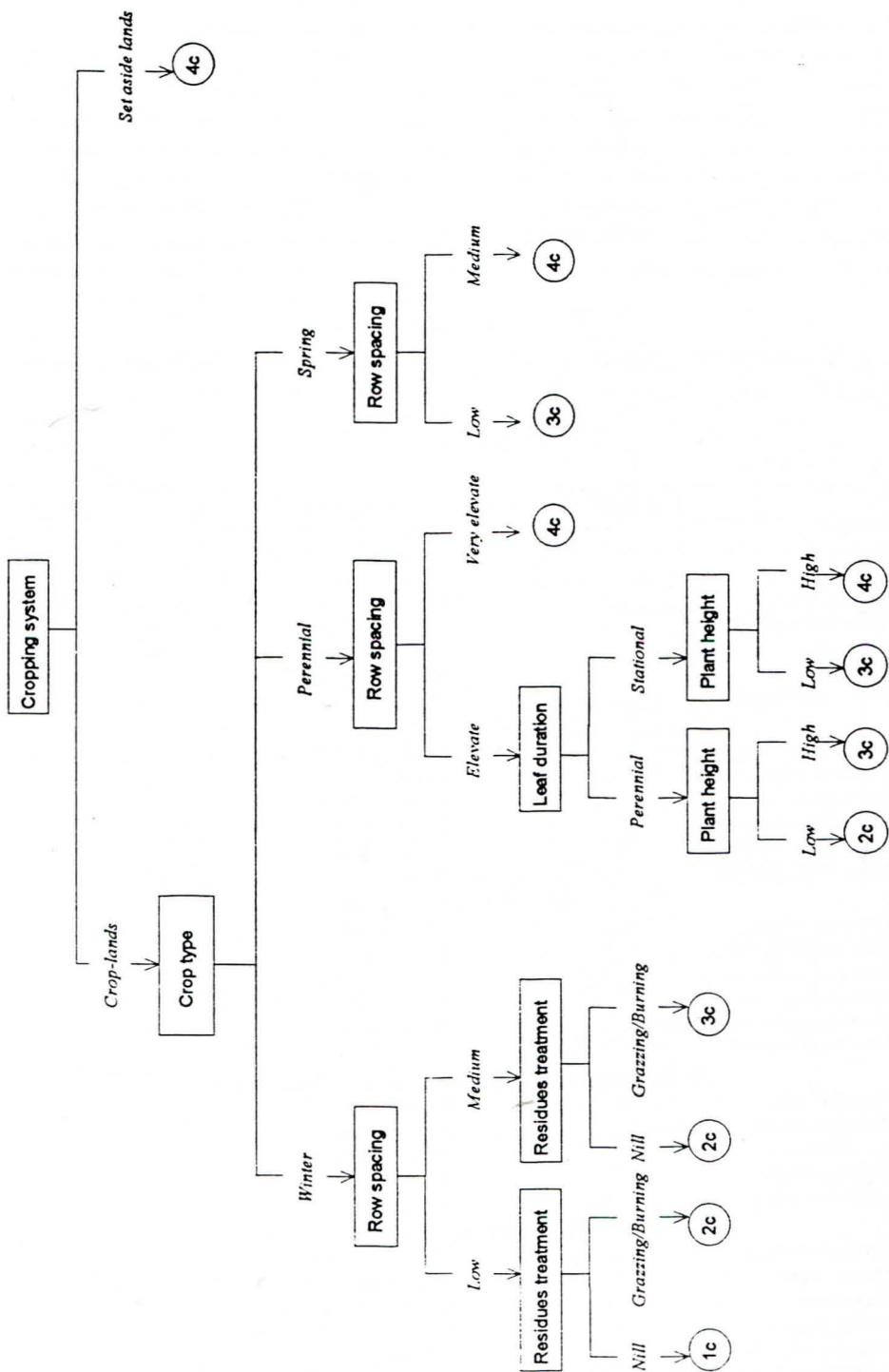


Figura 6. Sección del árbol de decisión desarrollado para la calidad de manejo "Protección del cultivo" en el modelo IMPEL-SEEM de evaluación de los riesgos de erosión de suelos.

manejo y características asociadas que se incluyen en este modelo experto se relacionan en la Tabla 5.

Los modelos empíricos cuantitativos manejan matemáticamente la información. En evaluación de suelos, desde los simples modelos aditivos o multiplicativos (ej. Storie, 1950) se ha progresado hasta los modelos polinomiales de regresión (ej. De la Rosa et al., 1981; Tabla

6) o los más recientes modelos de redes neuronales (ej. De la Rosa et al., 1997). Aunque dentro de la metodología de "black box", estos últimos procedimientos de modelación que encierran una gran complejidad de cálculo ofrecen excelentes posibilidades en evaluación de suelos, cuando se cuenta con información precisa tanto de las variables de entrada como de las variables respuestas (Gunn et al., 1988).

Tabla 5. Cualidades y características asociadas en el desarrollo del modelo IMPEL-SEEM para el pronóstico de los riesgos de erosión de suelos.

Land/management quality	Land/management subquality	Land/management characteristic*
LQr		
Runoff erosivity	Rainfall intensity Soil moisture Soil infiltration Cracking effect	Modified Fournier index [MFi] Humidity index [HUi] Texture [TEX1], Internal drainage [DRA2] Clay mineralogy [STFM]
LQt		
Relief hazard	Slope gradient Slope length Slope aspect	Topography [TOP] Slope form [SLFR] Slope aspect [ADD1]
LQk		
Soil erodibility	Mulching effect Aggregate stability	Stoniness [STON] Texture [TEX1], Clay mineralogy [STFM], Organic matter [OC], Sodium saturation [NA]
MQc		
Crop protection	Farming systems Surface cover Canopy cover	Cropping system [CRSY] Crop type [CROP], Row spacing [ROSP], Residue treatment [RETR] Leaf duration [LEDU], Plant height [PLEI]
MQz		
Tillage translocation	Surface disturbed Surface roughness Surface stabilization	Tillage system [TISY] Operation implements [IMT1] Soil stabilizers [INTY]
MQy		
Productivity influence	Management level	Management level [MALE]

(*) Between [] are the corresponding variable fields of the CDBm, SDBm and MDBm databases.

Las redes neuronales artificiales son modelos analógicos que tratan de reproducir las características y capacidades de procesamiento que tienen las redes de neuronas del cerebro humano (Baughman y Liu, 1995). La utilización de estos últimos modelos presenta ventajas considerables en relación con las ya tradicionales ecuaciones polinomiales de regresión.

Los modelos empíricos híbridos, utilizando técnicas cualitativas mediante reglas (ej. árboles de decisión) para desarrollar las hipótesis y extraer la experiencia acumulada, y técnicas cuantitativas (ej. redes neuronales) para combinar dicho conocimiento, están resultando soluciones del mayor interés (ej. IMPEL-SEEM model; De la Rosa et al., 1997; Figura 7).

Tabla 6. Modelos de regresión polinomial desarrollados para pronosticar el rendimiento de los cultivos de trigo, maíz y algodón.

Crop	Polynomial equation	R ²
Wheat	$Y_1 = -1,740.3 + 52.1 X_1 + 33.0 X_3 + 27.2 X_4 + 238.0 X_5 - 0.4 X_1 X_3 - 6.2 X_5 X_7 + 11.0 X_6 X_7$	0.78
Maize	$Y_2 = 1,085.4 + 30.0 X_1 + 28.0 X_3 - 418.1 X_6 + 17.0 X_2 X_5 + 0.2 X_5 X_7 - 39.2 X_5 X_7 + 21.0 X_6 X_7$	0.78
Cotton	$Y_3 = 1,266.3 - 1.4 X_1 - 9.2 X_2 + 12.1 X_3 - 90.3 X_5 + 49.0 X_7 - 0.4 X_2 X_7 + 11.0 X_6 X_7$	0.84

Y-variables: Y_1 = wheat yield; Y_2 = maize yield; and Y_3 = cotton yield;

X-variables: X_1 = useful depth; X_2 = clay content; X_3 = depth to hydromorphic features; X_4 = carbonate content; X_5 = salinity; X_6 = sodium saturation; and X_7 = cation exchange capacity.

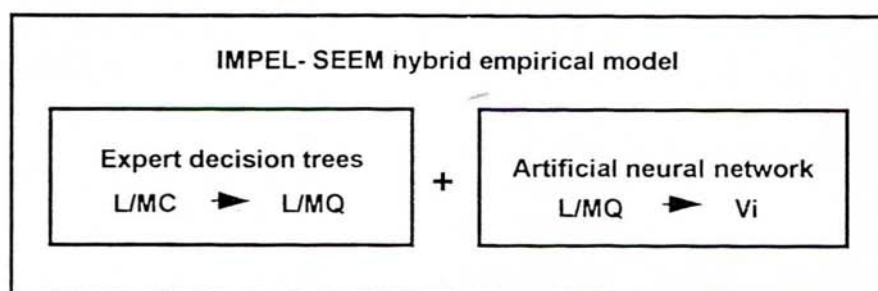


Figura 7. Esquema previo del modelo IMPEL-SEEM diseñado para capturar las interacciones entre características (L/MC) y cualidades (L/MQ) de tierra y manejo, e índices de vulnerabilidad a la erosión (Vi).

Modelación dinámica

En la modelación o simulación dinámica se trata de explicar el funcionamiento de un tipo específico de utilización del suelo, generalmente el desarrollo de un cultivo, sobre un determinado suelo y para un definido período de tiempo (Barros, 1997; Driessen y Konijn, 1992). Esta descripción detallada de los más importantes procesos en el desarrollo de la planta y la correspondiente absorción de agua y nutrientes es una tarea sumamente complicada (Figura 8). Estos modelos deterministas o de simulación matemática, como por ejemplo el EuroACCESS (Loveland y Rounsevell, 1996) o el SunFLOR (Barros, 1997), manejan cientos de variables (meteorológicas, edáficas, de cultivo y manejo) de acuerdo con la resolución espacial (normalmente una parcela experimental) y temporal (normalmente un día). La complicación varía

también con el nivel de abstracción elegido, desde el simple potencial de producción dependiendo solo de la radiación y temperatura del lugar; a la producción limitada además por las disponibilidades de agua del suelo; o a los requerimientos nutritivos para una producción previamente establecida. Las diferencias de nivel de manejo así como los factores reductores del desarrollo: plagas, enfermedades y malas hierbas, no suelen ser aun contempladas en estos tipos de modelos.

Sin lugar a dudas, la evaluación de suelos tendrá que ir haciendo cada vez mayor uso de los modelos de simulación que mejor expliquen las relaciones suelo-planta-agua, aunque manteniendo su fundamento de conocimiento empírico basado en la experiencia. De hecho se viene produciendo ya una "fertilización cruzada" entre ambas disciplinas: sistemas de evaluación y modelos de simulación, con excelen-

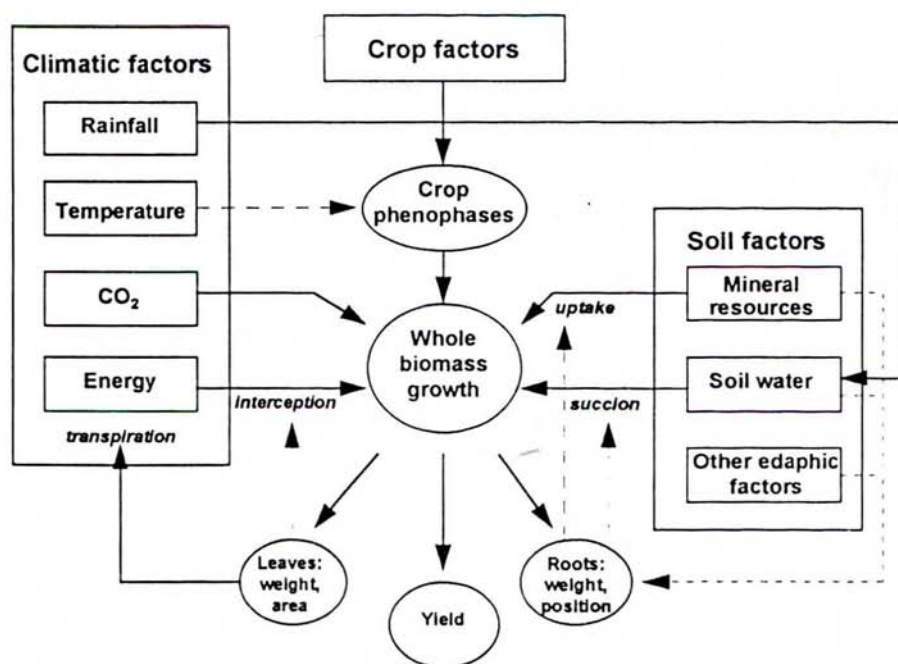


Figura 8. Estructura básica de los modelos de simulación dinámica para el desarrollo de cultivos.

tes resultados científicos y prácticos. En este sentido, ejercicios de modelación con algoritmos semi-empíricos o semi-deterministas están siendo cada vez más frecuentes (ej. Bouma et al., 1993). El inconveniente de la gran demanda y dificultad de elaboración de datos de entrada para su aplicación, está siendo salvado en gran parte mediante las "pedotransfer functions" (Simota et al., 1996).

Modelación integrada

Finalmente, el mayor grado de complicación en la evaluación de suelos se da en los modelos integrados, donde además de los factores biofísicos y agronómicos se consideran los atributos socio-económicos (ej. proyecto EuroIMPEL; Rounsevell, 1997; Figura 9). El diseño en estructura modular resulta imprescindible a fin de conseguir el mayor grado de integración global. De todas formas, esta integración entre aspectos biofísicos y socio-económicos resulta de gran dificultad; en especial, por las diferentes unidades territoriales de referencia que utilizan unos y otros (unidad-natural vs. unidad-administrativa).

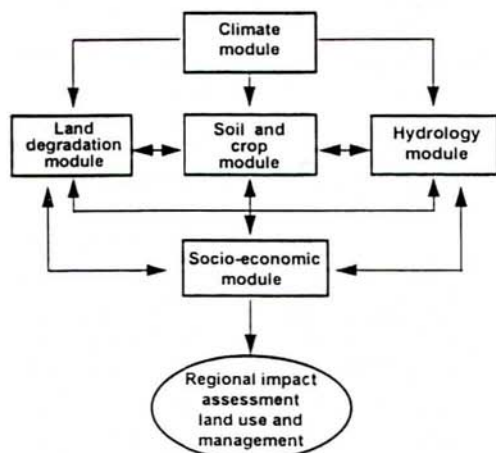


Figura 9. Estructura modular del modelo integrado EuroIMPEL.

AUTOMATIZACIÓN DE LA APLICACIÓN

Una vez formulado, calibrado y validado el modelo de evaluación, se procede a automatizar o mecanizar su aplicación para conseguir la mayor facilidad de manejo. Para ello es necesario desarrollar el software de la interfase entre las bases de datos de entrada (ej. SDBm, CDBm y MDBm) y el modelo, la rutinización de los algoritmos del modelo y la presentación de los resultados. De esta forma se puede proceder con total facilidad a la generación de potenciales escenarios de cambio, bien sea como consecuencia de perturbaciones climáticas o de modificaciones del uso territorial. La adecuada documentación en forma de ayudas "on line" y de manuales de uso resultan fundamentales para el fácil uso de dichas prestaciones (ej. MicroLEIS 4.1; De la Rosa, 1996). De esta forma, los grupos de evaluación de suelos además de ser ya grandes consumidores de tecnologías de la información, se van a ir convirtiendo en importantes generadores de software (en "factorías de software"). Ello representa además el mejor camino para transformar los resultados científicos en innovación.

CONEXIÓN CON LOS SISTEMAS GIS/ WWW

Por último, otro aspecto importante de la evaluación de suelos es la espacialización de los resultados, ya que los sistemas de evaluación se suelen aplicar a nivel puntual. Existen múltiples técnicas geo-estadísticas para llevar a cabo dicha extrapolación a nivel geográfico o regional. En este sentido, los sistemas de información geográfica (GIS; ej. IDRISI; Clark Univ., 1996) representan la herramienta ideal.

La conexión de los sistemas de evaluación para múltiples propósitos con los sistemas de información geográfica a través de las tecnologías de la comunicación, preferentemente las WWW (World Wide Web), ofrecen excelentes posibilidades de uso futuro (ej. AGSO Internet system; <http://www.agso.gov.au/map/>).

BIBLIOGRAFÍA

- BARROS, J.M.C. 1997. *Quantitative analysis of selected land-use systems with sunflower*. Doct. Thesis, (Directores: J. Bouma, D. de la Rosa y P. Driessen), Wageningen Agric. Univ., Wageningen.
- BAUGHMAN, D.R. and LIU, Y.A. 1995. *Neural networks in bioprocessing and chemical engineering*. Academic Press, London.
- BOUMA, J., WAGENET, R.J., HOOSBEEK, M.R. y HUTSON, J.L. 1993. Using expert systems and simulation modelling for land evaluation at farm level: a case study from New York State. *Soil Use and Management* 9: 131-139.
- BURROUGH, P.A. 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of Soil Science* 40: 477-492.
- CLARK UNIVERSITY. 1996. *IDRISI system*. V.2. Software + Documentation. Worcester, MA.
- COENEN, R. y KLEIN-VIELHAUER, S. 1997. Importancia de la tecnología medioambiental para el desarrollo sostenible desde el punto de vista económico y ecológico. *IPTS Report* 14: 5-13.
- DAVIDSON, D.A. 1992. *The evaluation of land resources*. Longman. Londres.
- DE LA ROSA, D., CARDONA, F. y ALMORZA, J. 1981. Crop yield predictions based on properties of soils in Sevilla, Spain. *Geoderma* 25: 267-274.
- 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., MAYOL, F., MORENO, J.A. y BONSON, T. 1997. *IMPEL-SEEM submodelo to predict soil erosion and its effect on the productivity of soils*. EuroIMPEL project. Contract no. ENV4.CT95.0114. CEC-DGXII.
- DENT, D. y YOUNG, A. 1981. *Soil survey and land evaluation*. George Allen & Unwin. London.
- DRIESSEN, P. y KONIJN, N. 1992. *Land-use system analysis*. Wageningen Agric. Univ. Wageningen.
- FAO. 1976. *A framework for land evaluation*. Soils Bull. 32, FAO Pub. Roma.
- FAO. 1983. *Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture*. Soils Bull. No. 52, FAO Pub. Roma.
- FAO. 1984. *Provisional methodology for assessment and mapping of desertification*. FAO-UNEP Pub. Roma.
- FAO. 1990. *Guidelines for soil profile description*. 3rd edition. FAO Pub. Roma.
- FAO. 1995. *Agro-ecological zoning. Guidelines*. FAO Pub. Roma.
- FAO-ISRIC-CSIC 1995. *SDBm: Multilingual soil database*. World Soil Resources Report No. 81. FAO Pub. Roma.
- FLANAGAN, D.C. y NEARING, M.A. (eds.). 1995. *USDA-Water erosion prediction project (WEPP). Hillslope profile and watershed model documentation*. NSERL Report No. 10. USDA-ARS, West Lafayette, IN.
- GUNN, R.H., BEATTIE, J.A., REID, R.E. y VAN DE GRAAFF, R.H. (eds.) 1988. *Australian soil and land survey handbook: Guidelines for conducting surveys*. Inkata Press. Melbourne.
- HERNANDEZ, H. y CANARELLI, P. 1996. *Apoyo a los procesos de toma de decisiones: las restricciones de la información y el papel de las herramientas de extracción y representación de conocimientos*. IPTS Report 10: 24-30.
- KLINGEBIEL, A.A. y MONTGOMERY, P.H. 1961. *Land capability classification*. USDA Agr. Handb. 210, Washington.
- LOVELAND, P. y ROUNSEVELL, M.D. (eds.). 1996. *EuroACCESS: Agroclimatic change and European soil suitability. A spatially-distributed, soil, agro-climatic and soil hydrological model to predict the effects of climate change on land-use within the EC*. Cranfield Univ. Pub., Silsoe, UK.

- RIQUIER, J., BRAMAO, D.H. y CORNET, J.P. 1970. *A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity*. FAO, AGL: TESR/70/6. Roma.
- ROSSITER, D. 1990. ALES: A framework for land evaluation by using a microcomputer. *Soil Use and Management* 6: 7-20.
- ROUNSEVELL, M. (coord.). 1997. *EuroIMPEL: Integrated model to predict European land use. Spatial modelling at the regional scale of the response and adaptation of soils and land use systems to climate change*. Contract no. ENV4.CT95.0114. CEC-DGXII.
- SANCHEZ, P.A., COUTO, W. y BUOL, S.W. 1982. The fertility capability soil classification system: Interpretation, applicability and modification. *Geoderma* 27: 283-309.
- 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.).
- 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.
- STIGLIANI, W.M. (ed.) 1991. *Chemical time bombs: Definition, concepts and examples*. Exec. Rep. 16, IIASA, Luxembourg.
- STORIE, R.E. 1950. Rating soils for agricultural, forest and grazing use. *Trans. Int. Congr. Soil Sci.*, 4th, 1: 336-339.
- STD, 1994. *Dutch governmental programme for sustainable technology development. Looking back from the future*. STD Brochure.
- US DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 1953. Bureau of reclamation manual Vol. 5, *Irrigated land use*. Part 2, Land classification. Washington.