
MicroLEIS 2000: Marco Conceptual

Evaluación Agro-ecológica de Tierras*

D. de la Rosa

*Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología, CSIC, Avda. Reina Mercedes 10,
41012 Sevilla*

INDICE

Resumen

- 1. Introducción**
- 2. Procedimiento general**
- 3. Métodos tradicionales**
 - 3.1. Métodos cualitativos
 - 3.2. Métodos de factor único
 - 3.3. Métodos aritméticos
 - 3.4. Métodos estadísticos
- 4. Métodos avanzados**
 - 4.1. Modelos expertos
 - 4.2. Modelos de lógica difusa
 - 4.3. Modelos de red neuronal
 - 4.4. Modelos de simulación dinámica
 - 4.5. Modelos híbridos
- 5. Sistema de apoyo a la decisión**
 - 5.1. Bases de datos de atributos
 - 5.2. Programas informáticos
 - 5.3. Herramientas de optimización
 - 5.4. Análisis de espacialización
- 6. Perspectivas de futuro**

Bibliografía recomendada

Apéndice A. Contenido actual de MicroLEIS

(*) *Este artículo es una adaptación de la siguiente publicación on-line: D. de la Rosa and C.A. van Diepen. 2002. **Qualitative and Quantitative Land Evaluations**, in 1.5. Land Use and Land Cover, in [Encyclopedia of Life Support System \(EOLSS-UNESCO\)](#). Se incluye una visión global del estado actual de los conocimientos en el campo de la evaluación agro-ecológica de tierras. Como marco conceptual y a modo de introducción al sistema MicroLEIS (**Apéndice A**), a lo largo del texto se hacen llamadas continuas a los correspondientes módulos de este sistema. Sevilla, 2002.*

Resumen

En este artículo se pone de manifiesto la gran complejidad del estudio agro-ecológico del uso y manejo de los recursos terrestres. Se analiza la utilidad del procedimiento de evaluación de tierras como instrumento de asesoramiento en los cambios de explotación de estos recursos, determinando si los atributos de las tierras se corresponden o no adecuadamente con los requerimientos de su uso. Dentro de este contexto, la evaluación de tierras se considera como el procedimiento más adecuado de exploración de los límites medioambientales de la sostenibilidad del uso. Mediante revisión desde los procedimientos cualitativos más simples a los métodos cuantitativos más complejos, se trata la evaluación de tierras en sus dos fases principales de estudio: desarrollo y aplicación.

En lo relativo al desarrollo metodológico de la evaluación de tierras y dentro de los sistemas tradicionales, las evaluaciones cualitativas dependen en gran medida de la experiencia y el criterio intuitivo del evaluador, constituyendo verdaderos sistemas empíricos. Los sistemas de factor único intentan expresar la influencia de una característica individual de tierras sobre el funcionamiento del tipo de uso. Los sistemas aritméticos, por otro lado, tienen en cuenta las características de tierras más significativas y tratan de explicar las interacciones entre dichos factores mediante simples multiplicaciones o sumas de índices de cada factor único. En los sistemas estadísticos se emplean los análisis de correlación y regresión múltiple para investigar las contribuciones relativas de las características de tierras seleccionadas sobre la aptitud de dichas tierras. Como parte de las más recientes metodologías, los modelos de sistema experto formulan los conocimientos deductivos empleando árboles de decisión que expresan de forma clara el proceso de concordancia entre los requerimientos de uso con las cualidades de tierra. En las metodologías de lógica difusa, la rígida lógica booleana de la aptitud de tierras de los sistemas tradicionales se sustituye por funciones difusas de pertenencia. Los modelos de red neuronal vienen demostrando su utilidad en el estudio de sistemas multivariables, no lineales, tales como los analizados en la evaluación de tierras. Es de destacar que actualmente se esté produciendo una fertilización cruzada, con excelentes resultados científicos y prácticos, entre la modelación dinámica de simulación y las técnicas empíricas de evaluación de tierras, resultados que aumentan la precisión a la vez que la aplicabilidad de los modelos de evaluación. En los sistemas híbridos que normalmente combina dos tipos de modelos, uno simula las funciones de razonamiento cualitativos, mientras que el otro simula la parte de modelización cuantitativa.

En cuanto a la aplicación práctica y automatizada de los sistemas de evaluación de tierras, ésta se describe como sistemas de apoyo a la decisión en el uso y manejo de tierras; utilizando tecnologías de la información que permiten la conexión entre bases de datos integradas y los diferentes tipos de modelos de evaluación. Así, se procede al análisis de los datos mediante el uso de bases de datos de atributos, permitiendo que los datos básicos se homogeneicen y almacenen de forma sistemática en un formato que facilite su clasificación y recuperación. A través de programas informáticos, los métodos o algoritmos de evaluación de tierras se expresan en forma de instrucciones que pueden ser interpretadas por un dispositivo de cálculo. Las herramientas de optimización basadas en modelos de evaluación de tierras se consideran de gran importancia en la formulación de alternativas de uso y manejo de las tierras, como por ejemplo en las prácticas de manejo agrícola que minimicen los riesgos de degradación de los sistemas de cultivo. Por último, los análisis de espacialización incluyen la utilización de técnicas geo-espaciales para extrapolar los resultados de la evaluación de tierras desde puntos concretos (escala local) a zonas geográficas más amplias (escala regional).

1. Introducción

En términos generales se puede decir que cualquier tierra puede soportar cualquier tipo de uso siempre que se le suministre los inputs necesarios. La aplicación de estos inputs puede ser de tal magnitud que determine las condiciones de explotación; como es el caso, por ejemplo, de los cultivos de invernadero. Sin embargo, cada unidad de tierra cuenta con sus propias potencialidades y limitaciones y cada uso de tierras con sus propios requerimientos biofísicos. Los inputs externos o mejoras se suelen expresar en relación con los costes económicos, energéticos o medioambientales que conlleven. El objetivo fundamental de la evaluación de tierras es determinar la capacidad inherente de cada unidad de tierra para soportar un uso determinado sin deteriorarse durante un largo período de tiempo. Este análisis predictivo se lleva a cabo con el fin de minimizar dichos costes socio-económicos, energéticos o medioambientales.

La evaluación de tierras como estimación del comportamiento de las tierras cuando se utilizan con fines específicos, proporciona una base racional para la ordenación territorial. Desde un punto de vista de producción agrícola, el mayor desafío para la planificación del territorio es mantener la capacidad productiva de las tierras y al mismo tiempo diversificar los tipos de uso. A su vez, para evitar la degradación del medio ambiente se han de definir sistemas sostenibles de uso de tierras. Por consiguiente, todas las opciones para aumentar la producción agrícola se han de formular y desarrollar a partir de los resultados previos de la evaluación de tierras. Todas estas opciones posibles se pueden agrupar de la siguiente forma: i) expansión de la superficie de tierras agrícolas; ii) introducción de técnicas de riego; iii) uso de fertilizantes y pesticidas; iv) mejora de técnicas de laboreo; y v) uso de variedades mejoradas de los cultivos.

La evaluación de tierras constituye una interfaz entre el ‘reconocimiento de suelos’ y la ‘ordenación territorial’, estando directamente relacionada con la interpretación práctica de dicho reconocimiento de suelos. Dado que *tierra* es un término mucho más amplio que *suelo*, la interpretación de los reconocimientos de suelos y la evaluación de tierras no son sinónimos, aunque a menudo se empleen como tales. El reconocimiento de suelos es la fase inicial y obligatoria del proceso de evaluación de los atributos biofísicos de las tierras en relación con diversos aspectos socio-económicos. En estos estudios no se incluyen las evaluaciones económicas sino sólo las evaluaciones propiamente agro-ecológicas, aunque también se consideren las evaluaciones con fines no agrícolas.

Información básica: El proceso de evaluación de cada ‘unidad de tierra’ requiere información sobre los atributos o ‘características de tierras’ y las ‘cualidades de tierras’ asociadas que se puede agrupar en los siguientes factores básicos: suelo, clima, cultivo y manejo. El reconocimiento de suelos representa la piedra angular en la elaboración del conjunto de datos necesarios para realizar la evaluación de tierras, que normalmente se fundamenta sobre variables edáficas, las más fijas y permanentes, como profundidad útil, textura, retención hídrica, clase de drenaje, pH o relieve. Otros atributos biofísicos, principalmente relacionados con los parámetros climáticos mensuales o diarios, también se incluyen en la información básica necesaria (véase *SDBm: Base de datos de suelos* y *CDB: Base de datos climáticos*).

Tradicionalmente, uno de los aspectos más frustrantes de la evaluación de tierras ha sido la escasa relación de ésta con otras áreas de la Edafología y Agronomía, y así, por ejemplo, los elementos relacionados con el manejo agrícola sólo se tenían en cuenta como pre-requisito. Actualmente, los factores de manejo o gestión se están incorporando a la evaluación de tierras como

respuesta a la creciente necesidad de saber sobre dichos aspectos técnicos de las explotaciones. Aunque las interacciones entre los factores biofísicos: lugar, suelo y clima, y los factores de manejo son muy complejas, nuevos procedimientos de evaluación están propiciando la estimación no sólo de tipos óptimos de uso de tierras, sino también de prácticas óptimas de manejo agrícola para cada suelo, tales como rotación de cultivos, sistema de laboreo, fertilización y medidas de conservación. En estos casos, los datos sobre cultivo y manejo derivados de la observación de campo, la monitorización o la simulación, como son el tiempo de crecimiento, profundidad de enraizamiento, implementos de cultivo o tratamiento de residuos también se consideran información básica de la evaluación de tierras (véase *MDBm: Base de datos de manejo agrícola*).

Capacidad general de uso y aptitud relativa: Las primeras metodologías de evaluación de tierras se basaban principalmente en la estimación, con carácter general, de la ‘capacidad de uso’ de una tierra. La principal aplicación de estos procedimientos ha sido su utilización como método para identificar tierras buenas u óptimas para la agricultura. Sin embargo la evaluación para usos específicos forma parte de la actual metodología y se refiere a la estimación de la ‘aptitud relativa’ de las tierras. A propósito de ello, FAO desarrolló en 1976 un marco conceptual y metodológico que se ha aceptado internacionalmente en los análisis de evaluación de tierras (véase *Anexo I: Glosario de términos*).

Aptitud y vulnerabilidad: Durante la pasada década, el campo de la evaluación de tierras se ha desarrollado considerando no sólo la ‘aptitud o potencialidad de tierras’ sino también la ‘vulnerabilidad o limitación de tierras’. La aptitud de tierras, referida por ejemplo a la productividad de las cosechas, fertilidad natural, irrigación o tempero, proporciona un soporte para las aplicaciones orientadas a la producción; mientras que la vulnerabilidad de tierras, por ejemplo referida a la erosión, salinización, contaminación o compactación, se centra en la evaluación de la degradación medioambiental.

Usuarios de la evaluación de tierras: Es evidente que los resultados de la evaluación de tierras representan una base imprescindible de información para la toma de decisiones encaminadas al uso sostenible y a la protección de los recursos terrestres. Pero, ¿quiénes son los que toman las decisiones?

La evaluación de tierras basada en los reconocimientos de suelos se puede utilizar a diferentes escalas o niveles de detalle, aunque las aplicaciones más comunes se hacen a escala regional sobre un elevado número de unidades de tierras diferentes. A esta escala regional, las evaluaciones son utilizadas por los políticos y administradores en la planificación de los usos territoriales. Sin embargo, la evaluación de tierras puede servir también de apoyo a la toma de decisiones en explotaciones individuales, lo que correspondería a una escala local.

A escala regional, los procedimientos tradicionales de evaluación de tierras proporcionan respuestas a los problemas relacionadas con la planificación territorial, tales como la preservación de tierras agrícolas de alta calidad, selección de emplazamientos urbanos o industriales, predicción de posibles riesgos naturales, etc. A escala local, los nuevos procedimientos de evaluación dan también respuesta a las cuestiones planteadas por los agricultores, tales como la selección de variedades de cultivos, momento y dosis de siembra, tipo y momento del laboreo, uso de fertilizantes, etc. Para ello, se ha de hacer llegar a los agricultores la información proveniente de los resultados de la evaluación de tierras, como está ocurriendo en la agricultura de precisión en el establecimiento de prácticas de manejo de los cultivos a la medida de cada suelo.

Incorporación del concepto de sostenibilidad: El término ‘sostenibilidad’ se emplea para indicar los límites impuestos a la explotación de los recursos naturales por el hombre. Obviamente, la evaluación de tierras tiene que tener en consideración el concepto de sostenibilidad al analizar un importante recurso natural como es la tierra. En este sentido, la evaluación de tierras puede pronosticar el uso y gestión de tierras no sólo en cuanto a su eficiencia productiva sino también a su impacto sobre el medio ambiente. La consideración simultánea de los criterios: aptitud y vulnerabilidad, permite definir la sostenibilidad en el sentido de que un sistema de uso de tierras sostenible u óptimo sea aquel que incluya una aptitud máxima y una vulnerabilidad mínima. De esta forma, el objetivo fundamental de la evaluación de tierras se traduce en predecir las consecuencias positivas y negativas del uso y gestión de las mismas (**Figura 1**).

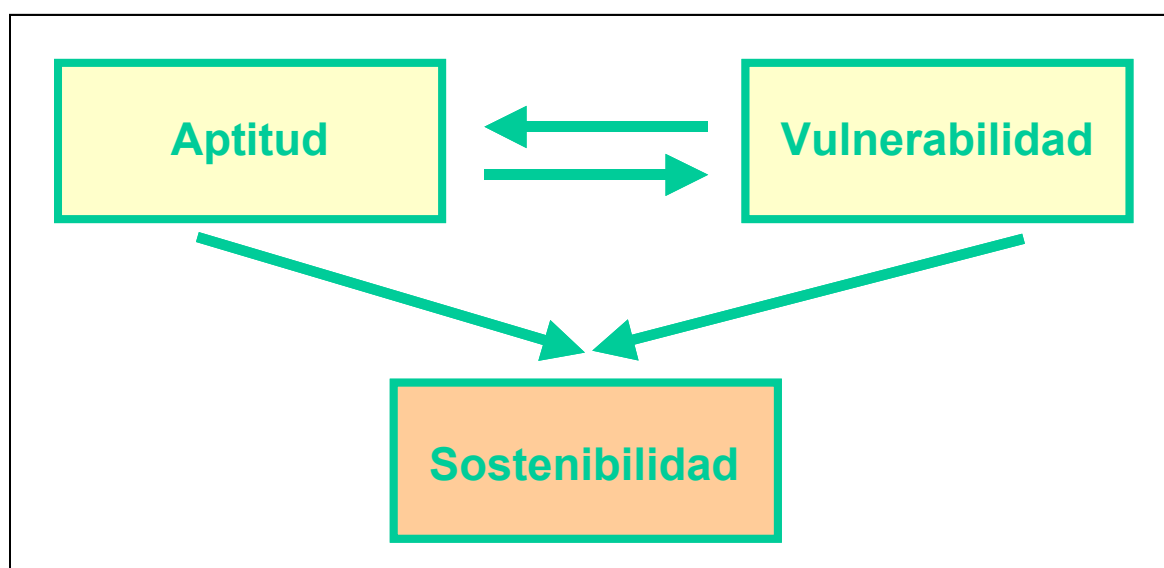


Figura 1. Esquema de definición de la sostenibilidad del uso y manejo de los recursos terrestres mediante la predicción simultánea de la aptitud y la vulnerabilidad de cada unidad de tierra y las interacciones entre ambas, tal y como se considera en el proceso de evaluación de tierras.

Siguiendo dicho esquema de sostenibilidad, se han desarrollado metodologías de evaluación de tierras para estimar el impacto de la degradación continua y persistente de las tierras (vulnerabilidad) sobre la productividad de las mismas (aptitud). Así por ejemplo, se ha calculado el índice de cambio en la productividad relativa de los suelos causada por la erosión, tomando como base la presencia o ausencia de condiciones favorables de enraizamiento a lo largo del perfil del suelo. Conforme la erosión elimine la capa superior del suelo, la productividad disminuirá si el subsuelo no es apropiado para el crecimiento de los cultivos. No se ha tenido en cuenta en este tipo de evaluaciones el resultado de la reducción de materia orgánica, nutrientes, fitodiversidad, etc. sobre la productividad, aunque estas consideraciones adicionales sean importantes en la evaluación de los efectos globales de la erosión del suelo (*véase modelo ImpelERO: Predicción de pérdida de suelo, impacto y optimización del manejo*).

A través de la evaluación de tierras, se puede profundizar en el concepto de sostenibilidad siguiendo el marco conceptual DPSIR establecido por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 1999) encaminado a la protección del medio ambiente y más concretamente al desarrollo de directrices para paliar la vulnerabilidad de los ecosistemas (**Figura 2**). Donde:

D = (*Driving forces*, causas): actividades humanas responsables de un problema medioambiental, ej. agricultura, turismo, urbanismo, etc.

P = (*Pressures*, presiones): nivel de importancia de la fuente del problema, ej. ocupación de tierras, intensificación agrícola, etc.

S = (*State*, situación actual): alcance del problema, ej. erosión del suelo, contaminación, salinización, etc.

I = (*Impacts*, impactos): efectos del problema sobre otros problemas resultantes, ej. reducción de productividad, pérdida de biodiversidad, cambio climático, etc.

R = (*Responses*, respuestas): estrategias y compromisos para solucionar o minimizar dicho problema, ej. medidas de protección del suelo, reforma de la PAC, etc.

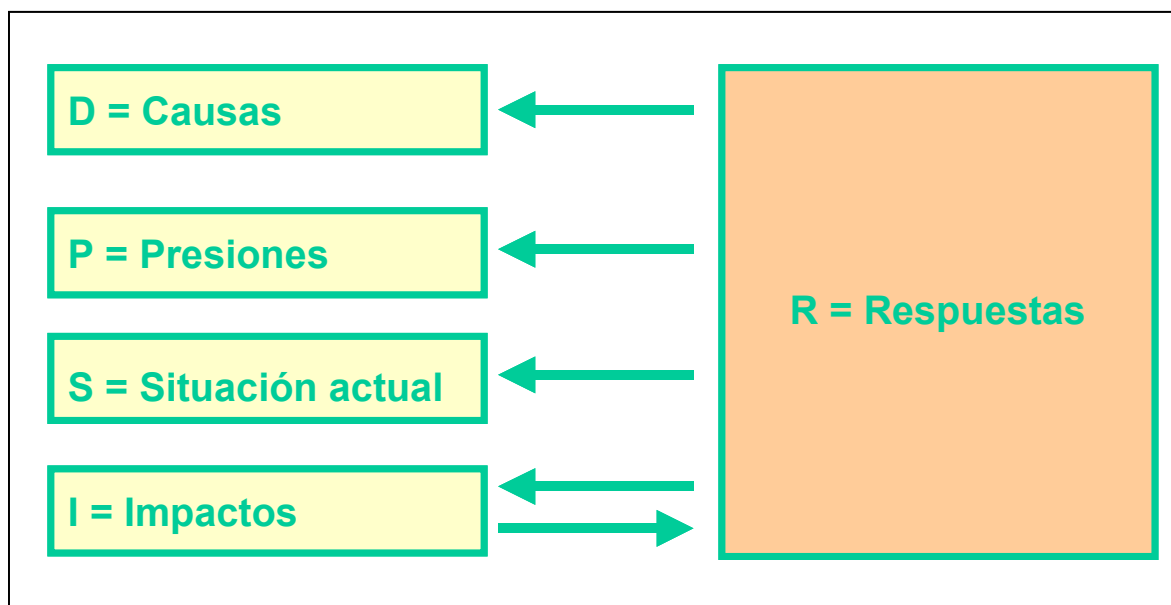


Figura 2. Marco conceptual DPSIR que puede ser adaptado al proceso general de evaluación de tierras con el fin de formular estrategias realmente sostenibles sobre el uso y manejo de los recursos terrestres.

2. Procedimiento general

El análisis inductivo de la evaluación de tierras incluye dos fases principales: ‘desarrollo’ y ‘aplicación’. La fase de desarrollo se realiza a partir de información básica de áreas representativas de referencia, mientras que la de aplicación se efectúa preferentemente en escenarios desconocidos (**Figura 3**). A su vez, el desarrollo de cualquier método de evaluación conlleva las siguientes etapas:

Etapa 1. *Selección* de atributos relevantes: ‘características de tierras’ y ‘cualidades de tierras’ asociadas

Etapa 2. *Definición* del tipo de comportamiento a analizar: ‘requerimientos del uso de tierra’ o ‘condicionantes del problema de degradación’

Etapa 3. *Comparación* entre atributos (Etapa 1) y requerimientos o condicionantes (Etapa 2): identificando las relaciones de causa-efecto a través de: simples definiciones, tablas de correspondencia, curvas de respuesta, índices de evaluación, árboles de decisión, factores de peso o modelos de predicción

Etapa 4. *Formulación* de algoritmos de aplicación.

La etapa de comparación o correspondencia constituye la base fundamental del análisis de adecuación de una tierra a un uso particular que corresponde a la evaluación de tierras. Este proceso de adecuación o interpretación es a menudo difícil y subjetivo ya que existe un gran desconocimiento sobre la forma en que una combinación de seleccionadas características y cualidades de tierras inciden sobre el funcionamiento del sistema tierra-uso. En términos generales, desde las primitivas metodologías cualitativas, el desarrollo de la evaluación de tierras se ha orientado cada vez más hacia la cuantificación y cálculo de aquellos aspectos relativos a la tierra y su uso, hasta llegar a la descripción matemática de procesos, acciones directas e interacciones.

La mayor parte de este artículo trata de la fase de desarrollo de la evaluación de tierras de acuerdo con los diferentes procedimientos seguidos en la Etapa 3: Comparación, mientras que la fase de aplicación se examina desde la perspectiva de los posibles procedimientos automatizados que se utilizan (véase *Anexo 1: Glosario de términos*).

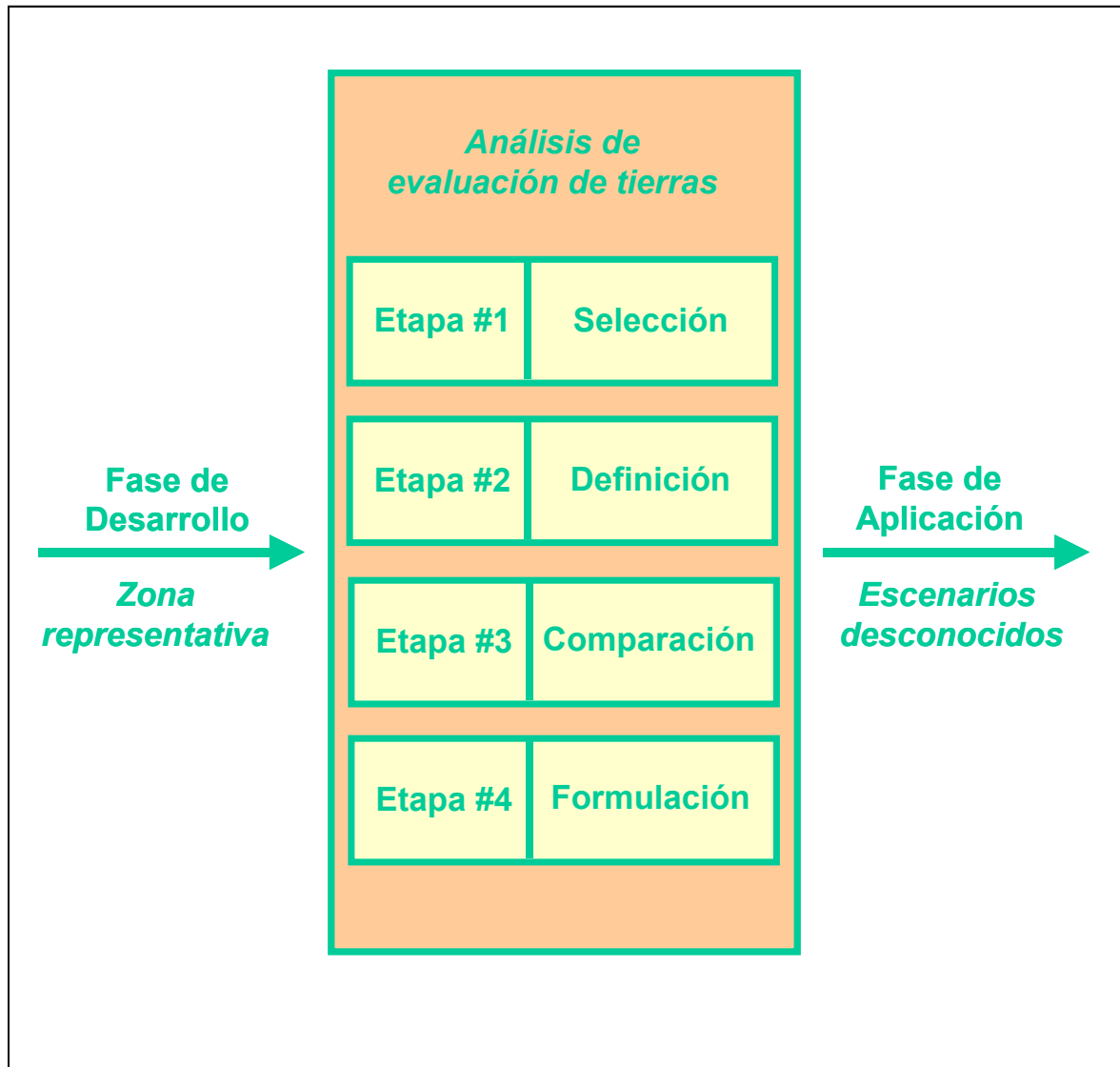


Figura 3. Esquema general de los estudios de evaluación de tierras. En la figura se trata de diferenciar la fase de desarrollo de cualquier sistema de evaluación de tierras, de la fase de simple aplicación del sistema. A partir de la información y el conocimiento disponible en una zona representativa de referencia, la fase de desarrollo incluye en cada caso las siguientes etapas básicas: i) selección, de características y cualidades de tierras a ser analizadas; ii) definición, de los requerimientos más importantes del uso de tierras considerado; iii) comparación, entre las cualidades y requerimientos a través de simples expresiones cualitativas, tablas de evaluación, curvas de respuestas, índices, árboles de decisión, factores de peso o modelos más complejos; y formulación, de algoritmos que faciliten la aplicación del sistema desarrollado. La fase de aplicación se lleva a cabo en escenarios desconocidos, representando una extrapolación del conocimiento detallado de la zona de referencia a otras zonas más amplias.

3. Métodos tradicionales

3.1. Métodos cualitativos

Las evaluaciones cualitativas pueden tomar la forma de simples descripciones subjetivas sobre la aptitud de tierras para determinados usos, agrupando las tierras en ciertas clases o grados de aptitud. Estos sistemas de evaluación de tierras dependen en gran medida de la experiencia y del conocimiento intuitivo, constituyendo verdaderos sistemas empíricos que no ofrecen la menor expresión cuantitativa. En otros estudios cualitativos se logra una cierta cuantificación mediante la aplicación de la norma de máxima limitación, según la cual la característica de tierras más restrictiva determina el grado de aptitud de las mismas. Para ello se asume el conocimiento sobre los requerimientos óptimos de los usos y sobre las consecuencias de las desviaciones de esos óptimos.

Probablemente el primer sistema de evaluación cualitativa de la productividad del suelo fue el desarrollado por Whitney a principios del siglo 20 agrupando los suelos de Estados Unidos en tres categorías agrícolas y en una no-agrícola. Whitney dedujo que la producción real dependía de los factores técnicos y económicos así como de los tipos de suelos, y trató de clasificar los suelos según su potencial de uso, independientemente de su uso actual. Sin embargo, no describió los criterios metodológicos seguidos para establecer dicha clasificación.

El sistema USDA de capacidad general de uso, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (1961), proporciona las definiciones conceptuales de ciertas clases de aptitud según el grado de restricción del uso agrícola impuesto por las características de tierras que representan las propiedades edáficas más fijas y permanentes. Este sistema, y sus múltiples adaptaciones, tales como la Clasificación Británica (1969), el Esquema Canadiense (1970) o el Sistema Holandés (1975), se han utilizado ampliamente en el mundo, y casi todos los estudios de reconocimiento de suelos de EE.UU. y otros países contienen alguna sección sobre la capacidad de uso de las tierras siguiendo esta metodología (véase modelo *Cervatana: Capacidad general de uso*).

En las evaluaciones cualitativas de la aptitud relativa para un determinado tipo de uso, siguiendo el principio de máxima limitación para cada característica seleccionada, se utilizan tablas de correspondencia como la que se muestra en la **Tabla 1**. A veces se introducen cambios importantes a partir de este esquema, haciendo que las clases de aptitud dependan de más de un conjunto de características o cualidades de tierras, lo que conduce a tablas o diagramas más complejos (véase modelo *Almagra: Aptitud relativa agrícola* y modelo *Sierra: Aptitud relativa forestal*).

Tabla 1. Ejemplo de tabla de evaluación para un tipo de uso determinado.

Clase de aptitud	Características de tierras			
	Prof.del suelo, cm	Textura	Salinidad, mS/cm	Pendiente, %
S1. Muy elevada	Más de 120	Media	0 a 2	0 a 3
S2. Elevada	60 a 120	Media a pesada	2 a 4	3 a 8
S3. Moderada	30 a 60	Media a ligera	4 a 8	8 a 15
S4. Baja	15 a 30	Ligera	8 a 10	15 a 30

N. No apta	0 a 15	Muy pesada	Más de 10	Más de 30
------------	--------	------------	-----------	-----------

3.2. Métodos de factor único

Como un primer paso real dentro del proceder cuantitativo en la evaluación de tierras, los métodos de factor único expresan numéricamente la influencia de una sola característica de tierras sobre el funcionamiento del sistema tierra-uso. Estos esquemas se suelen utilizar en aquellos casos en los que una cierta característica de tierras tiene un efecto extremo, positivo o negativo, sobre un uso determinado, como por ejemplo el de la “profundidad del suelo” sobre la productividad de un cultivo. En este caso y a través de una curva de respuesta, se considera que la “profundidad del suelo” guarda una correlación positiva con la productividad, sobre todo cuando el suelo es poco profundo y tiende a la asíntota cuando la profundidad se aproxima a la de enraizamiento del cultivo. En la **Figura 4** se muestra una típica curva de respuesta que expresa tal relación, mediante la ecuación

$$Si = 1 - e^{-xS} \quad (1a)$$

donde Si corresponde al índice de aptitud del suelo para una escala del 0 al 1; x al coeficiente específico del cultivo, en cm^{-1} ; y S a la profundidad del suelo, en cm. El valor del coeficiente x se ha considerado 0.02 cm^{-1} como representativo de especies arbóreas. Todas las relaciones y valores de los coeficientes empleados en cada caso se suelen establecer o validar mediante experimentos de campo.

En el ejemplo anterior, se podría mejorar la expresión de esta curva de respuesta considerando que se requiere una profundidad de suelo mínima para que tenga lugar el desarrollo del cultivo. Si se considera que el valor límite de profundidad del suelo es de 20 cm, la ecuación (1a) tomaría esta otra forma:

$$Si = 1 - e^{-x(S-20)} \quad (1b)$$

que sería válida para $S > 20 \text{ cm}$, y donde $Si = 0$ para $S < 20 \text{ cm}$.

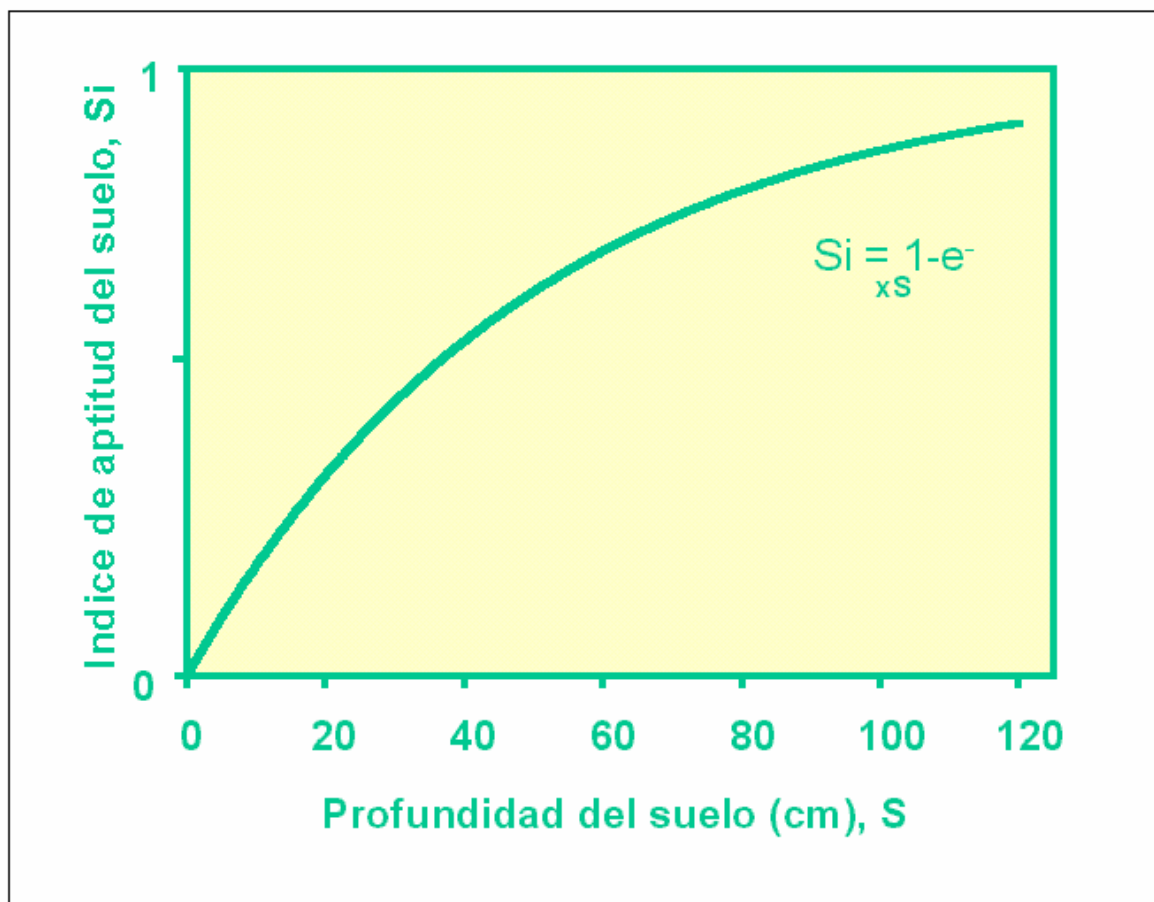


Figura 4. Típica curva de respuesta de un sistema de evaluación de tierras de factor único. En este caso la curva representada transforma los valores de la característica profundidad útil del suelo en un índice de aptitud del suelo para el cultivo analizado.

Aunque estos sistemas de factor único no tienen en cuenta el efecto de dos o más características de tierras, se pueden combinar los valores calculados individualmente para varias de ellas con objeto de generar un índice de aptitud más próximo a la realidad del sistema tierra-uso (véase modelo *Terraza: Deficiencia bioclimática*).

3.3. Métodos aritméticos

A medio camino entre los sistemas típicamente cualitativos y los cuantitativos, se encuentran los métodos semi-cuantitativos o aritméticos de evaluación de tierras que consideran los efectos numéricos inferidos de varias características de tierras sobre el comportamiento potencial de un sistema de uso de tierras. Se pueden considerar pues estos métodos aritméticos o paramétricos como una fase de transición entre los métodos cualitativos basados íntegramente en criterios subjetivos y los más complejos modelos matemáticos. Los sistemas aritméticos tienen en cuenta la acción directa de las características de tierras o factores más significativos y contabilizan, a su vez,

la interacción entre dichos factores mediante una simple multiplicación o suma de los índices correspondientes a cada factor.

Sistemas multiplicativos: Estos métodos asignan valores independientes a cada una de las diversas características o factores de tierras seleccionados, calculando seguidamente el producto de todas las valoraciones independientes como índice global de evaluación. Estos sistemas cuentan con la ventaja de que cualquier factor considerado controla la evaluación final. Otra ventaja es que la evaluación global no puede ser un número negativo, aunque una de sus limitaciones sea la posibilidad de que esta misma evaluación pueda resultar considerablemente menor que la evaluación parcial de cada uno de los factores individuales.

Es notorio que Storie en 1993 intentó por primera vez desarrollar criterios multiplicativos específicos para evaluar de manera inductiva la productividad del suelo. El índice original de Storie (SIR) se calcula multiplicando las valoraciones parciales correspondientes a la morfología del perfil del suelo (A), la textura superficial del suelo (B), el ángulo de pendiente (C) y las condiciones modificadoras, tales como profundidad del suelo, drenaje o alcalinidad (X), de la siguiente forma:

$$SIR = A \cdot B \cdot C \cdot X \quad (2)$$

Storie puso de manifiesto que los resultados de la aplicación de su sistema de evaluación de tierras se debían tomar como guía discriminante entre tierras y no como valores absolutos de productividad. Además, las tablas de evaluación de los diversos factores se debían ir cambiando conforme los evaluadores fueran ganando experiencia utilizando dicho índice.

Los métodos de evaluación de los riesgos de erosión del suelo tipo USLE: Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, y sus revisiones la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE) y la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) desarrollan un procedimiento multiplicativo muy parecido al del índice de Storie.

Sistemas aditivos: Estas metodologías asignan valores numéricos a seleccionadas características de tierras según su efecto inferido sobre el uso de tierras, y estos valores se suman o restan de una valoración máxima de 100 hasta derivar un índice de evaluación global. Los sistemas aditivos tienen la ventaja de poder incorporar información de un mayor número de características de tierras que los sistemas multiplicativos. Parece que un límite adecuado para los sistemas multiplicativos es el de cuatro o cinco factores, ya que un número superior hace que la evaluación global alcance un valor tan bajo que el sistema no pueda distinguir pequeñas diferencias en la respuesta. Por el contrario, los sistemas aditivos permiten la consideración de muchos más factores. Otra ventaja consiste en que ningún factor individual llega a tener suficiente peso como para influir excesivamente en la evaluación final.

Las limitaciones de los sistemas aditivos vienen impuestas por su complejidad, ya que conforme el número de factores a evaluar aumenta, también lo hace la dificultad del manejo de dichas valoraciones parciales para que la evaluación final resulte realista. Otra limitación es la posibilidad de que la evaluación global salga negativa.

Métodos combinados: Estos son métodos ideados especialmente para la evaluación de la productividad del suelo que utilizan tanto los procedimientos multiplicativos como los aditivos. La mayoría de los métodos combinados utilizan los métodos aditivos para derivar evaluaciones parciales, para después multiplicar entre sí dichos valores hasta calcular un índice final de evaluación. También, la aptitud de cada factor seleccionado se suele evaluar individualmente

mediante la utilización de curvas de respuesta. La mayor ventaja de estos sistemas es la posibilidad de incluir información de múltiples factores seleccionados sin minimizar el efecto de ninguno de ellos y sin generar resultados que sean falsamente bajos o incluso negativos. La mayor limitación puede resultar de su complejidad, que evidentemente es mayor que la de los sistemas multiplicativos o aditivos simples. La mayor parte de los métodos combinados existentes derivaron del concepto multiplicativo original del índice de Storie.

3.4. Métodos estadísticos

En la evaluación de tierras los sistemas estadísticos son métodos muy utilizados para predecir la aptitud relativa basándose en seleccionadas características de tierras. Cuando se dispone de suficientes datos básicos de una zona representativa de referencia, tanto sobre características de tierras como sobre el comportamiento de los sistema de uso, los modelos estadísticos proporcionan muy buenos resultados. Los análisis estadísticos de correlación y regresión múltiple se emplean para investigar las contribuciones relativas de las características de tierras seleccionadas.

La variable de respuesta o comportamiento del sistema de uso considerado Y se analiza como una función del tipo:

$$Y = \phi(X_1, X_2, \dots, X_n) + \varepsilon \quad (3)$$

donde las variables independientes X_n corresponden a las características de tierras seleccionadas, por ejemplo, profundidad del suelo, contenido de arcilla, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH, saturación de sodio, etc.; y ε recoge los valores residuales. Como la expresión matemática de ϕ es desconocida, esta función puede estimarse satisfactoriamente dentro del campo experimental, asimilándola a un polinomio. La calibración de este modelo polinomial puede calcularse estadísticamente como un caso particular de regresión múltiple. El coeficiente de regresión (R^2) proporcionado por este análisis representa un índice inductivo de validación del modelo calibrado al expresar el porcentaje de variación observada que explica dicho modelo.

En el desarrollo de estos sistemas, el análisis de correlación proporciona un buen punto de partida para la selección de variables independientes X_n , al proporcionar una medida de sus efectos directos sobre la variable respuesta Y , así como de las posibles interacciones entre las propias variables independientes (*véase modelo Albero: Predicción de cosecha*).

Esta metodología se ha empleado sobre todo en la predicción de la productividad del suelo para distintos cultivos. Estadísticos, agrónomos, edafólogos han de trabajar conjuntamente con los evaluadores en el desarrollo de estos modelos de regresión para conseguir buenos resultados. También, en las interpretaciones de los reconocimientos de suelos para usos de ingeniería se emplea a menudo la modelación estadística con objeto de predecir ciertas propiedades geotécnicas de los suelos (como plasticidad, compactación o retención hídrica) a partir de las características edafológicas (como contenido de arcilla, materia orgánica o densidad aparente). No obstante, en este último caso, sería mejor hablar de funciones de transferencia edafológica en lugar de sistemas de evaluación de tierras.

4. Métodos avanzados

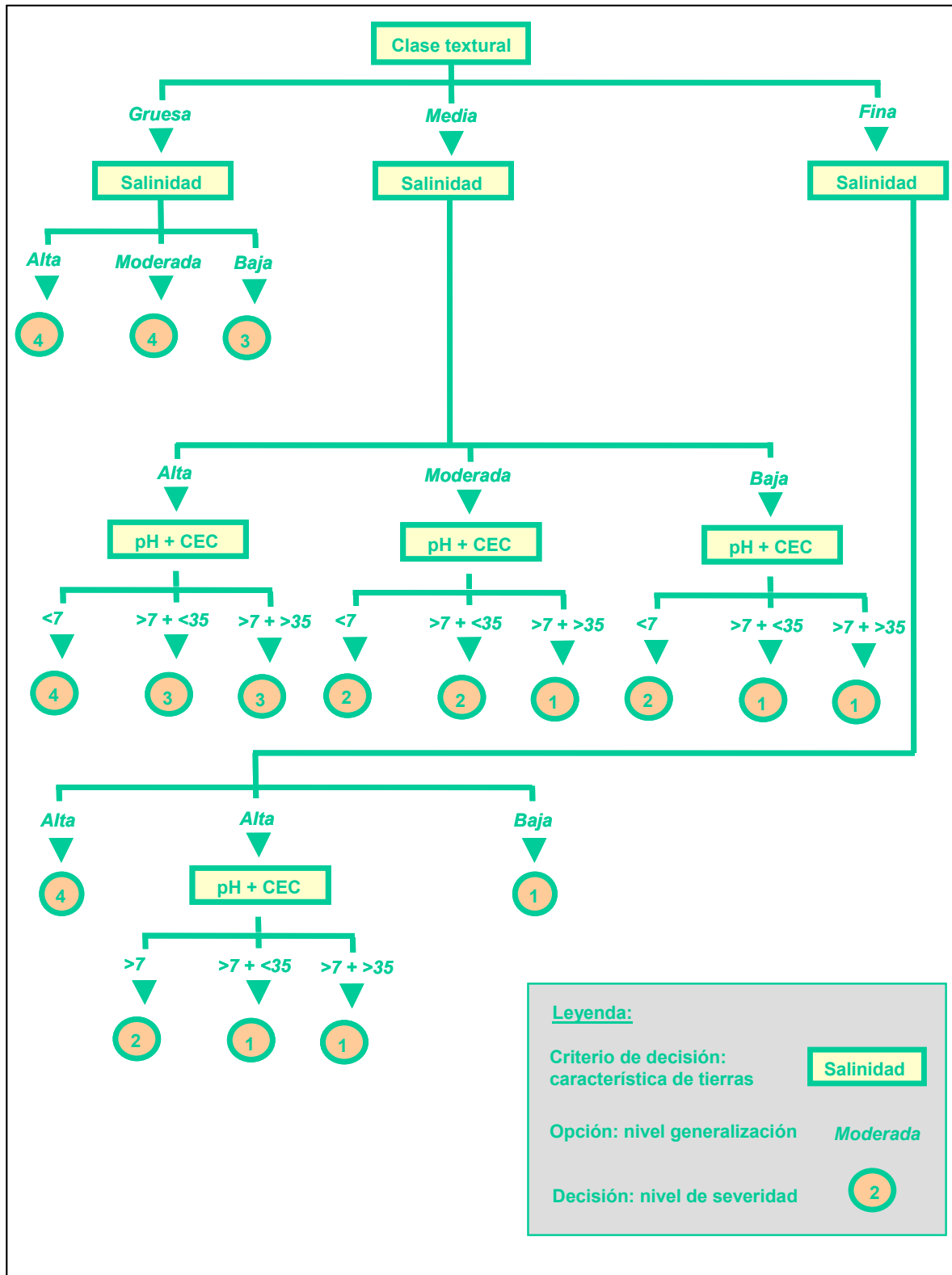
Los actuales avances en las tecnologías de la información posibilitan el uso de diversas técnicas de modelización en los sistemas más complejos. La aplicación de estas técnicas más sofisticadas han incrementado la tendencia cuantitativa en la evaluación de tierras a través de la modelización. Los modelos constituyen una representación simplificada del mundo real que puede expresarse en una gran diversidad de formas tales como diagramas conceptuales, sistemas de clasificación y verdaderos modelos matemáticos, estadísticos o deterministas. En la evaluación de tierras, la modelización empírica ha progresado desde los más simples modelos estadísticos hacia otros más complejos basados en técnicas de inteligencia artificial. A su vez, la modelización determinista, que simula sobre todo el desarrollo de los cultivos, sigue su propio camino basado en la comprensión de los mecanismos reales del crecimiento vegetal a través de ecuaciones matemáticas.

Otros tipos de modelos relacionados con la evaluación de tierras son los modelos de interpolación espacial que tratan la variabilidad geográfica de las características de tierras; y los modelos integrados, que combinan los resultados de la evaluación biofísica de tierras con otros aspectos alternativos, tales como la maximización de los beneficios económicos o la conservación de la biodiversidad.

4.1. Modelos expertos

Los sistemas expertos, como una de las técnicas de inteligencia artificial, son programas informáticos que simulan las capacidades resolutorias de los expertos humanos en un campo determinado, proporcionando soluciones a un problema. Estos sistemas expresan el conocimiento inferido utilizando árboles de decisión. En la evaluación de tierras, los árboles de decisión proporcionan una expresión muy clara del proceso de comparación entre los requerimientos de usos de tierras y las características o cualidades de tierras. Como en cualquier otro sistema de evaluación, cuanto más profundo y detallado sea el conocimiento básico de partida, mejor será el resultado de la aplicación de los sistemas expertos. Este conocimiento procede tanto de la investigación científica previa (descripción teórica), como de los resultados de experiencias y discusiones con expertos locales (experiencia práctica).

Los árboles de decisión son sistemas jerárquicos de múltiples caminos en los que las derivaciones se corresponden con los criterios de decisión y sus posibles opciones (rangos), como por ejemplo los niveles de generalización de las características de tierras; y las salidas con las decisiones, como por ejemplo las clases de aptitud de tierras. Tal y como se muestra en la **Figura 5**, los árboles de decisión en la evaluación de tierras visualizan la secuencia de las decisiones tomadas de una forma mucho más clara que las tradicionales tablas de correspondencia o evaluación.



Legenda:

- Criterio de decisión: característica de tierras: **Salinidad**
- Opción: nivel generalización: **Moderada**
- Decisión: nivel de severidad: **2**

Figura 5. *Árbol de decisión de un sistema de evaluación de tierras que relaciona las características de tierras previamente seleccionadas: clase textural, salinidad, pH y capacidad de cambio catiónico, con cuatro niveles de severidad o clases de aptitud para un cultivo, a través de tres niveles de generalización para cada característica.*

Cuando se dispone de suficientes datos de experiencias prácticas se pueden emplear análisis estadísticos para mejorar los árboles de decisión. Estos análisis de regresión y clasificación están indicados para tratar casos de una baja relación de número de observaciones a número de variables, como suele ocurrir en la evaluación de tierras. Para ello, desarrollan un proceso interactivo de identificación de atributos que son decisivos para la descripción de la variable respuesta. El modelo de factores restrictivos así desarrollado se puede representar gráficamente mediante un diagrama en árbol (**Figura 5**) o como un sistema basado en reglas dentro de un programa informático.

Ambos procedimientos expertos: árboles (teóricos) de decisión y árboles (estadísticos) de decisión, se suelen emplear simultáneamente para optimizar los resultados en el desarrollo de sistemas de evaluación de tierras (*véase modelo Raizal: Riesgo de erosión y modelo Pantanal: Riesgo específico de contaminación*).

El Sistema Automatizado de Evaluación de Tierras (ALES) es un programa informático que permite a los evaluadores de tierras construir sistemas expertos de acuerdo con los criterios convencionales recogidos en el Marco de Evaluación de Tierras de FAO (1976). ALES no es un sistema experto en sí mismo, y no incluye información o conocimiento alguno sobre tierras o usos de tierras, sino que es una estructura dentro de la cual los evaluadores pueden expresar su propio conocimiento local. ALES tampoco facilita la etapa inicial de selección de características y cualidades de tierras asociadas a un tipo de uso, actividad ésta crucial en el desarrollo de sistemas de evaluación de tierras (*véase modelo Arenal: Riesgo global de contaminación*).

4.2. Modelos de lógica difusa

En términos generales, los sistemas tradicionales cualitativos de evaluación de tierras siguen un enfoque booleano o basado en reglas adaptadas al principio de máxima limitación. Sin embargo, existe un convencimiento creciente de la incapacidad de este enfoque para analizar la naturaleza inexacta o difusa de muchos de los aspectos de los recursos terrestres.

El uso de esta metodología en la evaluación de tierras es de particular importancia ya que es posible minimizar el efecto de cualquier característica de tierras cuando alcance un valor inmediatamente exterior a su rango establecido. De esta forma, la rígida lógica booleana en la aptitud de tierras, tal y como determinada por las características seleccionadas, es remplazada por funciones difusas de pertenencia. En los casos a evaluar que corresponden claramente a las clases definidas se les asigna un valor de pertenencia (MF) igual a 1, mientras que en aquellos que no entran en dichas clases se les asigna un valor de pertenencia entre 0.0 y 1.0, dependiendo del grado de cercanía a la clase definida. De acuerdo con ello, la lógica booleana admite sólo dos posibilidades de pertenencia: completa (MF = 1) o nula (MF=0).

Las características de tierras facilitadas en clases se convierten así en grados de pertenencia dependiendo de los valores de las características. La valoración global de la aptitud de las unidades de tierras se basan entonces en un factor de ponderación de las características relevantes de tierras. La función conjunta de pertenencia (JMF) proporciona una suma ponderada para las diferentes características de tierras (A, B, \dots, Z) de la siguiente forma

$$JMF_x = a_A MF_A + a_B MF_B + \dots + a_Z MF_Z \quad (4)$$

donde

$$a_A + a_B + \dots + a_Z = 1 \quad (5)$$

La calibración de estas ponderaciones (a_A, a_B, \dots, a_Z) resulta de vital importancia y se suele obtener en base al conocimiento experto local, a datos experimentales o calculados mediante anteriores métodos de evaluación de tierras, etc.

En resumen, la utilización de la estricta álgebra booleana: verdadero o falso, al igual que un modelo rígido y exacto se muestra a menudo inapropiada para la evaluación de tierras debido a la naturaleza continua de la variabilidad de los suelos, a las dudas asociadas a la descripción del fenómeno en sí, a la imprecisión de las mediciones que ello conlleva, o a la incapacidad de formular adecuadamente las cuestiones. De todos modos, la evaluación de tierras que emplea los modelos de lógica difusa también está sujeta a las limitaciones de los datos y del conocimiento de partida al igual que el resto de los métodos.

4.3. Modelos de red neuronal

El interés por la aplicación de los modelos de red neuronal en los procesos biofísicos ha crecido rápidamente en los últimos años. Esta técnica basada en la inteligencia artificial ha demostrado su capacidad a la hora de analizar sistemas no lineales de múltiples variables, de discriminar de forma bastante acertada entre la información real y el ruido, y de generalizar, es decir, de procesar patrones de entrada que no se hubieran presentado antes, de una forma muy similar a cómo lo hace la inteligencia humana.

Una red neuronal artificial es un mecanismo informático capaz de adquirir, representar y computar las relaciones o pesos de un espacio de múltiples variables de información y de cualquier otro espacio, siempre que se le proporcionen los datos que representan esos espacios. Las redes neuronales pueden identificar diferencias sutiles entre patrones de la entrada de datos de la fase de entrenamiento que pueden pasar desapercibidos en los análisis estadísticos convencionales. En contraste con los modelos estadísticos de regresión, las redes neuronales no requieren del conocimiento de las relaciones funcionales entre las variables de entrada y de resultados. Además, las redes neuronales no son lineales, y por ello, pueden manipular patrones muy complejos de datos que imposibilitan el uso de métodos matemáticos. Otra ventaja de las redes neuronales está relacionada con los tipos de datos: continuos, casi continuos y categóricos o binarios que se pueden introducir sin que se transgredan las suposiciones del modelo. También pueden realizar una modelización de fenómenos con múltiples resultados o variables de respuesta.

La **Figura 6** muestra un ejemplo de red neuronal de correlación en cascada correspondiente a un modelo de erosión de suelos (*véase modelo ImpelERO: Predicción de pérdida de suelo, impacto y optimización del manejo*).

Una vez que las fases de entrenamiento y de validación de la red neuronal se han concluido, el algoritmo resultante se puede utilizar de forma fácil en las aplicaciones prácticas automatizadas.

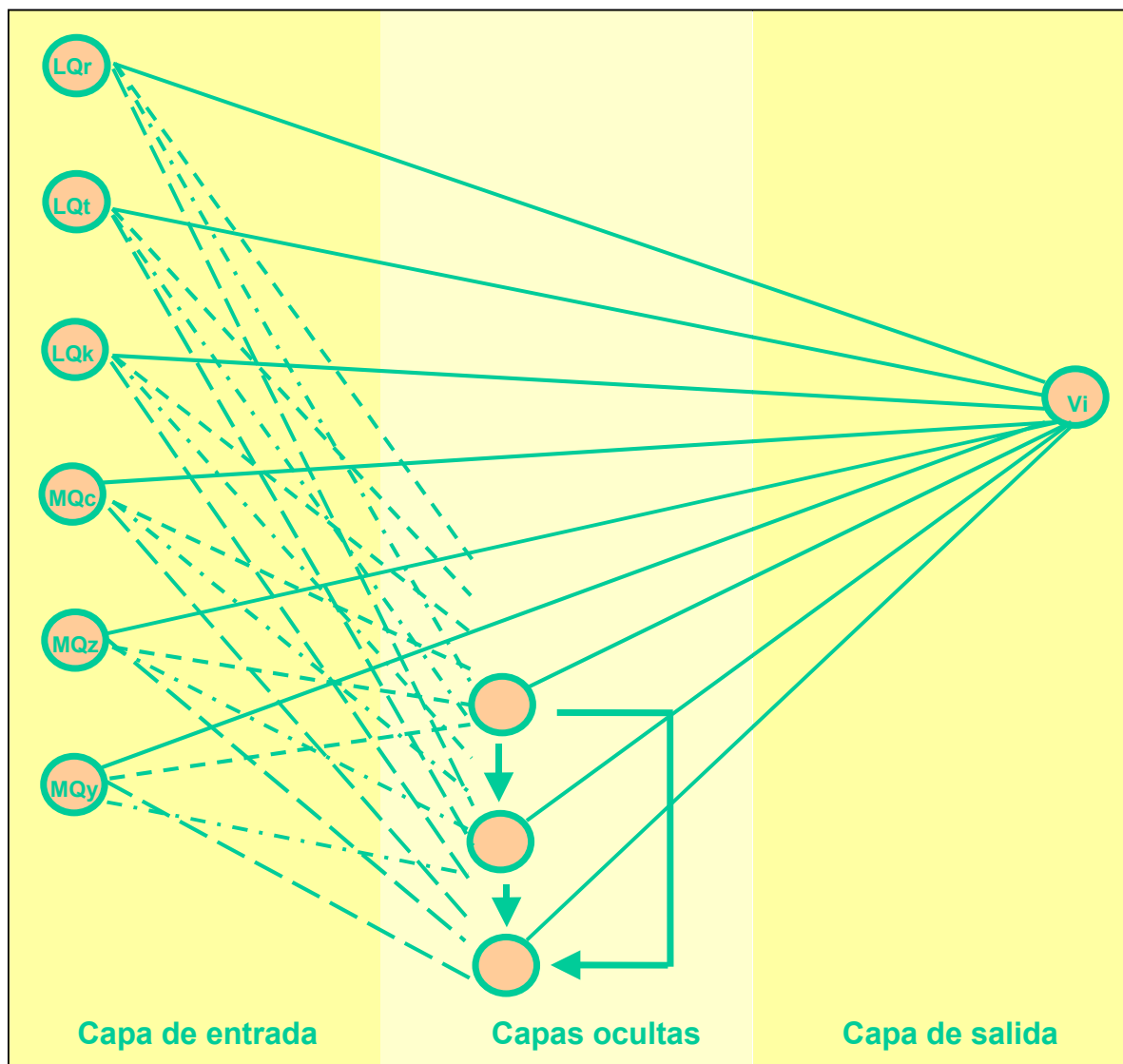


Figura 6. Estructura de una red neuronal artificial que muestra las interrelaciones entre los nodos de entrada o cualidades de tierras: LQr =erosividad de la lluvia, LQt =factor relieve, LQk =erodibilidad del suelo, MQc =protección del cultivo, MQz =efecto de las labores y MQy =influencia de la productividad, y el nodo de salida o índice de vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica, a través de un conjunto indefinido de nodos ocultos.

4.4. Modelos de simulación dinámica

Preferentemente, los modelos de simulación dinámica describen de forma cuantitativa procesos biofísicos que tienen lugar en los ecosistemas agrícolas, tales como el crecimiento del cultivo, balance hídrico del suelo, movimiento de nutrientes, o erosión hídrica. Estos modelos se aplican en la evaluación de tierras para cuantificar la producción de un cultivo, los efectos de la sequía, la pérdida de nutrientes y la del propio suelo, bajo varias opciones de uso y manejo de las

tierras. Cuando se aplican sobre diversas unidades de tierra o a lo largo de varios años, el resultado constituye un conjunto consistente de datos con valores medios y con variaciones en el espacio y en el tiempo. El resultado del modelo puede utilizarse directamente como un índice de comportamiento de las tierras, o como coeficiente técnico del sistema de uso de tierras en una etapa posterior del proceso interpretativo de datos.

Las mayores limitaciones para la utilización de estos modelos son su necesidad de gran número de datos y, por consiguiente, la dificultad de calibrarlos y validarlos en nuevos espacios agro-ecológicos. Los modelos de simulación no recogen todos los aspectos tratados en la evaluación de tierras, siendo los aspectos que no contemplan los que menos varían con el tiempo, como es el caso de la rocosidad del suelo, el tipo de relieve o la fertilidad natural. No obstante, estos modelos proporcionan información cuantitativa detallada sobre los aspectos más dinámicos, tales como el régimen hídrico del suelo y sus consecuencias sobre el cultivo. La simulación dinámica facilita una nueva dimensión a la evaluación de tierras, como corresponde al análisis de la variabilidad en el tiempo de los requerimientos del uso de las tierras y de las cualidades de tierras.

En los últimos años, la simulación dinámica de los sistemas suelo/planta/contaminación ha progresado considerablemente a nivel local, por ejemplo en parcelas y estaciones experimentales o en pequeñas cuencas; sin embargo, su extrapolación al ámbito regional es aún una asignatura pendiente. Esta labor de extrapolación puede investigarse por dos vías: i) mediante ‘funciones de transferencia edafológica’ que permiten relacionar las variables de entrada de los modelos con aquellas incluidas en las bases de datos regionales; o ii) mediante el desarrollo de ‘meta-modelos’ utilizando técnicas empíricas de evaluación de tierras que combinen los resultados de la aplicación de los modelos de simulación en zonas representativas con la información regional de esas zonas. En todo caso, los modelos de simulación dinámica y las técnicas empíricas de evaluación de tierras se están enriqueciendo mutuamente con excelentes resultados científicos y de aplicación, mejorando la precisión y aplicabilidad de los modelos resultantes.

4.5. Modelos híbridos

En los sistemas híbridos de evaluación de tierras, a través de la vinculación de dos tipos de modelos, generalmente uno de ellos simula las funciones de razonamiento cualitativo mientras que el otro simula la parte cuantitativa de la modelización.

Algunos modelos híbridos demuestran, por ejemplo, que los resultados de la simulación dinámica pueden combinarse muy bien con los sistemas expertos en la evaluación de la producción de cultivos. De esta forma se han obtenido modelos híbridos de árboles de decisión algunas de cuyas ramas corresponden a estimaciones cualitativas y otras a estimaciones cuantitativas obtenidas por simulación. Concretamente, la simulación del régimen hídrico del suelo proporcionó información cuantitativa de varias de las cualidades de tierras analizadas. Este enfoque de modelización simulada/sistema experto es preferible al de los simples cálculos cualitativos, aunque no necesariamente todas las cualidades de tierras puedan ser caracterizadas mediante simulación dinámica.

Se han desarrollado otros sistemas híbridos empleando árboles de decisión y redes neuronales artificiales para la evaluación del riesgo de erosión del suelo. La **Figura 7** muestra un ejemplo de este enfoque sistema experto/red neuronal en la modelización del complejo problema de la erosión de suelos con una muy buena capacidad de cuantificación y predicción. Según los análisis de sensibilidad y validación, este modelo híbrido explica las principales relaciones de los parámetros

de entrada y es capaz de reproducir con precisión la vulnerabilidad de la erosión del suelo (véase *modelo ImpelERO: Predicción de pérdida de suelo, impacto y optimización del manejo*).

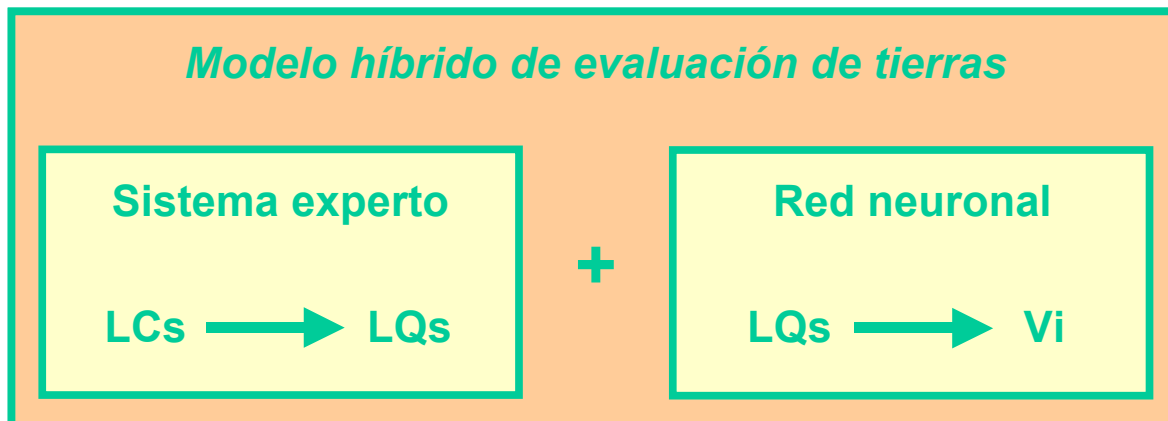


Figura 7. Esquema general de un sistema híbrido de evaluación de tierras que utiliza un sistema de decisión experto para relacionar características (LCs) con cualidades de tierras (LQs), seguido de una red neuronal artificial para relacionar cualidades con índice de aptitud o vulnerabilidad (V_i).

5. Sistema de apoyo a la decisión

La fase de aplicación de los sistemas de evaluación de tierras se lleva a cabo en escenarios desconocidos, tratándose de un proceso de generalización o extrapolación de conocimiento desde las áreas representativas de la fase de desarrollo a dichos escenarios o amplias zonas de aplicación. Esta fase de aplicación que antes se realizaba manualmente puede ahora ejecutarse mediante procesos asistidos por ordenador. La tecnología emergente en ingeniería de datos y de conocimientos proporciona excelentes posibilidades en el proceso de aplicación de la evaluación de tierras. Esto conlleva básicamente el desarrollo y vinculación de bases de datos integradas, programas informáticos y herramientas de optimización y espacialización que, junto con los modelos de evaluación de tierras descritos con anterioridad, constituyen verdaderos sistemas de apoyo a la toma de decisiones sobre uso y manejo de tierras (**Figura 8**). En términos generales, un sistema de apoyo a la decisión integra y organiza todos los tipos de información necesaria para las decisiones que se han de tomar.

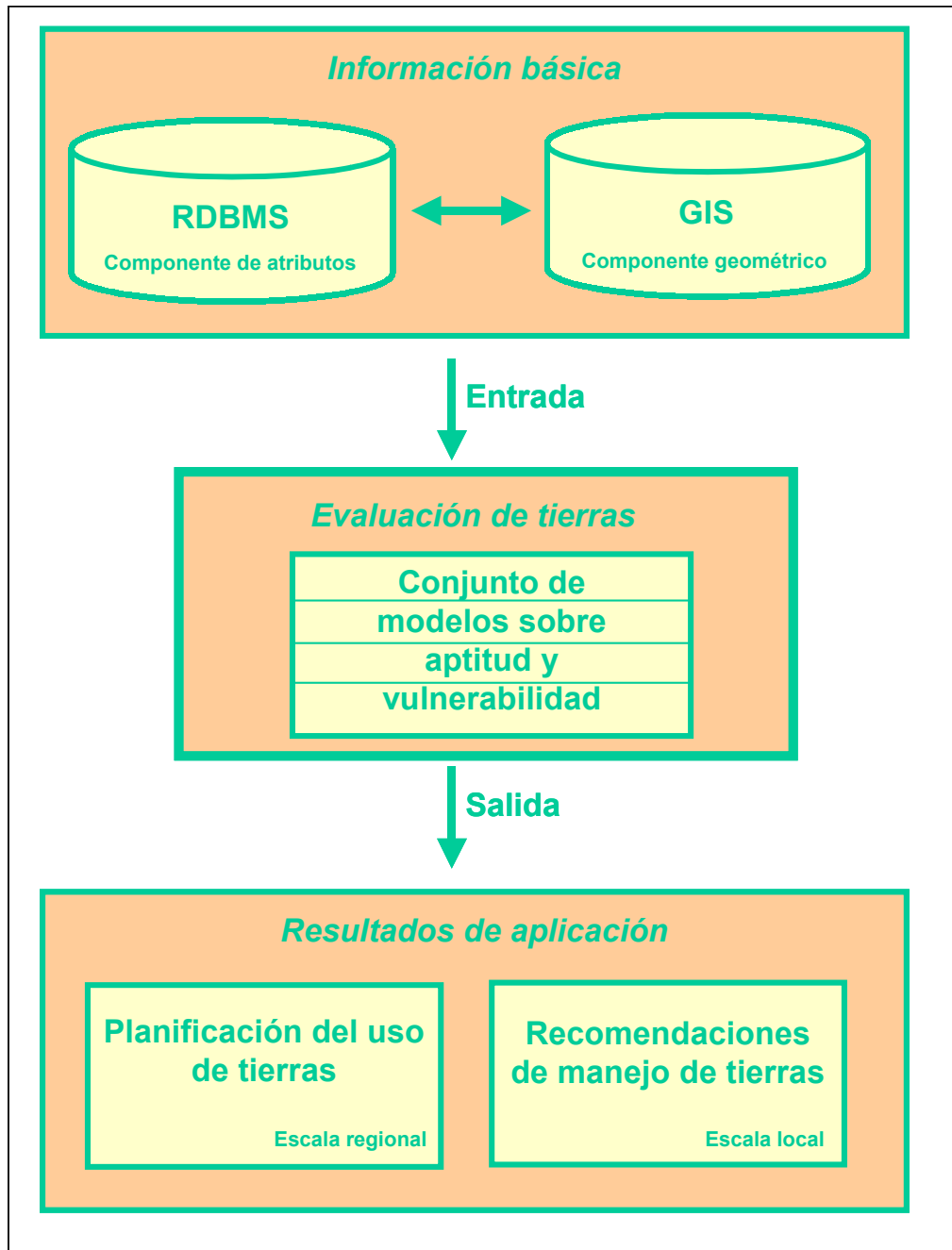


Figura 8. Esquema general de un sistema de apoyo a la decisión para el uso y manejo de tierras. Este sistema incluye, en primer lugar, una serie de bases de datos de atributos o características de tierras (RDBMS) y otras bases de los componentes geométricos (GIS), que facilitan la información básica que utiliza los modelos de evaluación como elementos de entrada. En segundo lugar figuran los modelos de evaluación de tierras, sobre aptitud y vulnerabilidad, en formato de programas de ordenador que permitan su aplicación automática. Por último se muestran los elementos del sistema que permiten la presentación de los resultados, incluidas las herramientas de optimización; y diferenciando los resultados que a una escala regional tratan de apoyar una planificación de uso de tierras, de los resultados que a una escala local se relacionan con el manejo óptimo de cada unidad de tierra.

5.1. Base de datos de atributos

La aplicación de los sistemas de evaluación de tierras se puede facilitar en gran medida si la información básica de partida se agrupa y almacena de manera sistemática en un formato computerizado de base de datos. Estas bases de datos se convierten así en el elemento esencial o motor de los sistemas de apoyo a la decisión. Los sistemas computerizados de información de tierras separan, por una parte, la serie de atributos que maneja con los subsistemas de gestión de bases de datos relacionales (RDBMS), y por otra, los componentes geométricos manejados por los subsistemas de información geográfica (GIS). Los principales atributos utilizados en la evaluación de tierras corresponden a los siguientes factores básicos: suelo/lugar, clima y cultivo/manejo. El desarrollo de bases de datos específicas para facilitar el uso integrado de estos atributos constituye un punto de especial importancia (véase *SDBm: Base de datos de suelos*, *CDB: Base de datos climáticos* y *MDBm: Base de datos de manejo agrícola*).

La base de datos multilingüe SDBm Plus es un buen ejemplo de una base de datos geo-referenciados para el almacenamiento y gestión de perfiles morfológicos y analíticos de suelos. Esta base de datos es igualmente útil en el almacenamiento y homogeneización de información primaria de suelos, recogida a escala nacional; o para el simple almacenamiento temporal de datos generados durante un determinado estudio de correlación o de reconocimiento de suelos, a escala local. Puede pues utilizarse a distintas escalas: regional, nacional o local. Entre otras muchas opciones, la SDBm Plus incluye un generador de capas de suelos que permite la exportación automática de datos en la aplicación práctica de los modelos de evaluación de tierras, como parte de un sistema global de apoyo a la toma de decisiones sobre usos de tierras.

5.2. Programas informáticos

Cuando los algoritmos de evaluación de tierras se expresan en forma de instrucciones que pueden ser interpretadas por un mecanismo de cálculo u ordenador, estos algoritmos se convierten en 'programas informáticos'. Con objeto de mecanizar los sistemas de evaluación de tierras, es decir, automatizar la aplicación de los modelos de evaluación, se precisa desarrollar un listado de instrucciones informáticas. También se necesita una interfaz de entrada con las necesarias ayudas que permitan la aplicación fácil del modelo. Estas interfaces de usuario suelen reunir las siguientes características: i) conexión con las bases de datos atributivas y geométricas; ii) pantallas desplegables que muestran los códigos, tipos y clases de las variables de entrada; iii) selección de modos de procesamiento individual o en lote; iv) opciones para realizar predicciones en escenarios hipotéticos; y v) presentación de resultados de evaluación y conexión con bases de datos geométricas. Además, estos programas informáticos son en gran medida autoexplicativos (véase *modelos Ero&Con: Modelos de erosión y contaminación*).

Recientemente, los programas informáticos para aplicar los sistemas de evaluación se están desarrollando sobre Internet, con lo que el usuario puede hacer aplicación on-line de estos sistemas a través de su navegador. Estas aplicaciones WWW ofrecen una serie de ventajas, siendo la principal su mayor disponibilidad, facilitando la comprobación de sus posibilidades de uso y la mejora de los modelos. Dichas mejoras y actualizaciones se hacen directamente en el servidor de Internet, quedando a disposición de los usuarios de forma inmediata (véase *opción principal Aplicación: Aplicación de modelos en la Web*).

5.3. Herramientas de optimización

Los sistemas de apoyo a las decisiones sobre uso y manejo sostenible de los recursos terrestres se centran en la elección del uso óptimo y de las prácticas de manejo más adecuadas en cada caso. En este sentido, las herramientas de optimización, en base a los modelos de evaluación de tierras, son de gran importancia en la formulación de las distintas alternativas de decisión, por ejemplo, de las buenas prácticas de manejo agrícola para minimizar las amenazas a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. La formulación de las operaciones de manejo agrícola en función de la variabilidad espacial de las características de tierras tiene la dificultad añadida de intentar satisfacer objetivos múltiples y a menudo contradictorios; así pues, las mejores condiciones del suelo para el desarrollo de un cultivo pueden no ser las mejores en términos de erosión o de contaminación.

En el ejemplo de la **Figura 9**, y basado en un modelo de sistema experto/red neuronal, se siguió un procedimiento informatizado para encontrar la combinación más adecuada de prácticas de manejo agrícola que minimizaran los riesgos de erosión del suelo. Como primer paso, y para una unidad de tierra determinada, el usuario establece un porcentaje de reducción de la vulnerabilidad (R) a partir del índice actual de vulnerabilidad (V_a), para así calcular el índice de vulnerabilidad reducida (V_t). Como segundo paso, se llevan a cabo sucesivas aplicaciones de la red neuronal para calcular el índice de vulnerabilidad (V_j) más cercano al índice reducido. Seguidamente, se selecciona la combinación de cualidades de manejo (MQs) que corresponde con el índice V_j . Como tercer y último paso, se recorren hacia atrás los árboles de decisión para seleccionar la combinación de características de manejo (MCs) que corresponde con las MQs previamente fijadas y así formular las estrategias óptimas de manejo para reducir la erosión del suelo (véase *modelo ImpelERO: Predicción de pérdida de suelo, impacto y optimización del manejo*).

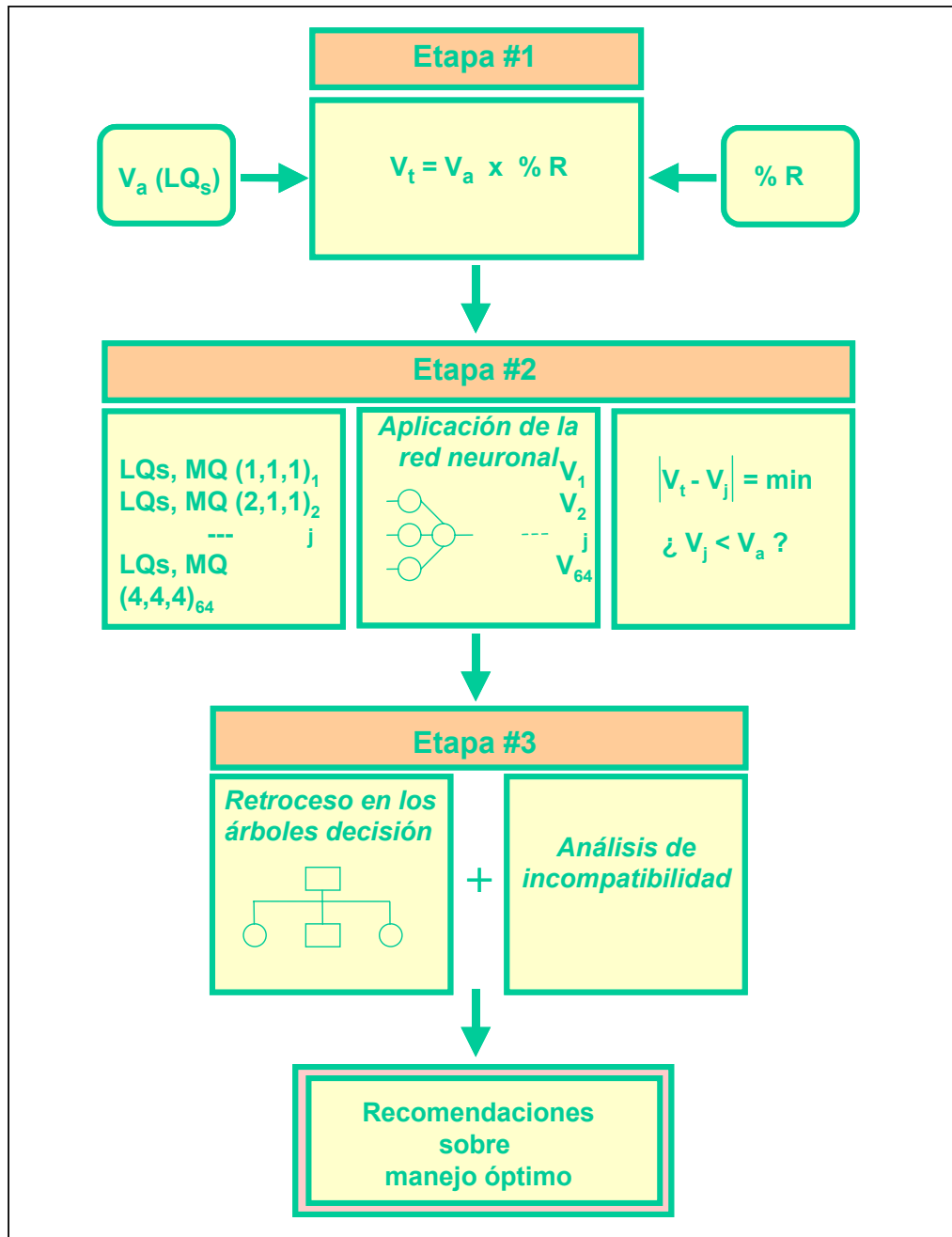


Figura 9. Esquema de un procedimiento informatizado seguido como herramienta de optimización a partir de un sistema híbrido (sistema experto y red neuronal) de evaluación de tierras. Mediante un funcionamiento de marcha atrás de la red neuronal (Etapa #2) y de los árboles de decisión (Etapa #3) se trata de seleccionar para cada unidad de tierra el sistema de manejo que permita la mayor reducción de la vulnerabilidad a la erosión del suelo (Etapa #1).

5.4. Análisis de espacialización

Como etapa final del proceso de aplicación de la evaluación de tierras, y parte de los sistemas de apoyo a la decisión, el análisis de espacialización trata de diseminar los resultados de

la evaluación desde puntos geo-referenciados a áreas geográficas, utilizando básicamente los mapas de reconocimiento de suelos y otros relacionados. Para ello el uso de técnicas geo-estadísticas y los sistemas de información geográfica (GIS) lleva a la rápida generación de mapas automáticos de evaluación así como al cálculo de las áreas segregadas. Estas y otras muchas operaciones analíticas se pueden realizar en un formato espacial al combinar, de múltiples maneras, diferentes grupos de información para producir superposiciones de datos básicos y los procedentes de la evaluación. También se puede profundizar en este proceso de espacialización incorporando la información de imágenes de satélites. Toda esta tecnología GIS, junto con las bases de datos de atributos (RDBMS), constituye ya un requisito indispensable para manipular adecuadamente las grandes cantidades de datos necesarios para la evaluación de tierras (**Figura 8**).

6. Perspectivas de futuro

Hoy se acepta de forma generalizada que serán necesarios importantes cambios en el uso y manejo de las tierras si se quiere:

- avanzar hacia sistemas sostenibles de explotación de estos recursos;
- reducir los índices actuales de degradación, tales como erosión de suelos, salinización, acidificación, eutrofización, pérdida de nutrientes, contaminación de suelos y aguas, pérdida de biodiversidad, etc.;
- controlar las emisiones de gases de efecto invernadero de origen terrestre, así como las absorciones;
- proporcionar bases explícitas para cuantificar la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de la actividad agrícola, y establecer los niveles de reducción de carbono dentro de distintas estrategias políticas.

Para que estos cambios en el uso y gestión de las tierras se correspondan realmente con las potencialidades y limitaciones de cada unidad territorial, deberán basarse en los resultados de la evaluación de tierras, tanto sobre aptitud como sobre vulnerabilidad. En un futuro próximo, se hará mucho más evidente que la evaluación agro-ecológica de tierras constituye el punto de partida y la forma más correcta de contestar los qué (s), porqué(s) y cómo(s) para conseguir un desarrollo rural sostenible.

Aún cuando los aspectos concretos de desarrollo y aplicación de la evaluación de tierras se hayan de analizar a escala local o específica, se pueden hacer algunos comentarios de carácter general. En este sentido, se hace evidente que el desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones continuarán siendo poderosas herramientas para: la incorporación de nuevas fuentes de información (ej. imágenes de satélites y modelos digitales del terreno); la extracción del valor máximo de los datos disponibles (ej. bases de datos y sofisticadas técnicas de modelización con acceso en Internet); y el incremento de la disponibilidad de los productos finales (ej. visualizadores espaciales de bajo costo). La actual tendencia cuantitativa de la evaluación de tierras se hará mucho más importante en un futuro próximo.

Los nuevos procedimientos de desarrollo de sistemas de evaluación de tierras harán especial énfasis en:

- la determinación simultánea de la aptitud (aspectos orientados a la producción) y de la vulnerabilidad (aspectos degradativos medioambientales) como la mejor forma de incorporar el concepto de sostenibilidad;
- dar máxima prioridad a la precisión y aplicabilidad de los modelos, así como a los enfoques mixtos (cualitativos y cuantitativos).
- hacer uso frecuente de los métodos integrados que combinan la información biofísica sobre aptitud y vulnerabilidad de los recursos de tierras con la información sobre aspectos socio-económicos.

Los nuevos procedimientos de aplicación responderán a más sofisticadas aproximaciones, incluyendo:

- inventarios y resultados de monitorización sobre las características de tierras y los sistemas de uso y manejo actual. Dado que los sistemas de uso son dinámicos y la evaluación de tierras está especialmente interesada en los cambios de usos, un reto importante constituirá la mejora de la

eficiencia de los esquemas de generación de datos sobre uso actual y sus sucesivas actualizaciones. También lo será la identificación de zonas realmente representativas de referencia, bien por su alto potencial productivo o por su elevado riesgo de degradación, para profundizar en el detalle de los inventarios;

- sistemas de apoyo a la decisión realmente operativos y capaces de integrar bases de datos georeferenciados, modelos de evaluación y herramientas de optimización, funcionando tanto a nivel local como regional.

Otra tendencia general que parece que va a continuar es la correspondiente a la conversión de los resultados de evaluación de tierras en instrumentos legales, tales como las guías de buenas prácticas agrícolas o las directivas medioambientales.

Por último, se mantendrá la creciente demanda de especialistas bien preparados, con la consiguiente demanda de inversión en formación de personal en evaluación de tierras, sobre todo en los aspectos referidos a reconocimientos y monitorización de suelos, procesos degradativos, tipos de uso y explotación; así como en campos afines a las tecnologías de la información.

Bibliografía recomendada

Bouma J., Wagenet R.J., Hoosbeek M.R. and Hutson J.L. (1993). Using Expert Systems and Simulation Modeling for Land Evaluation at Farm Level: A Case Study from New York State. *Soil Use and Management* Vol. 9, pp. 131-139. [Este artículo muestra un sistema híbrido de evaluación de tierras siguiendo los criterios de FAO, mediante un árbol de decisión y un modelo de simulación del régimen hídrico del suelo]

Bullock P., Jones R.J. and Montanarella, L. (Eds.). (1999). *Soil Resources of Europe*. 202 pp. Luxembourg: Office for Official Publications of the EU. [Este libro ofrece una serie de informes nacionales europeos relativos al estado actual sobre reconocimiento, monitorización y evaluación de suelos]

Davidson D., Theocharopoulos S.P. and Bloksma R.J. (1994). A Land Evaluation Project in Greece Using GIS and Based on Boolean and Fuzzy Set Methodologies. *International Journal of Geographical Information Systems* Vol. 8, pp. 369-384. [Este artículo compara los resultados de la evaluación de tierras procedentes de dos metodologías diferentes: la booleana y la de lógica difusa, destacando las ventajas de la segunda]

De la Rosa D., Mayol F., Moreno J.A., Bonson T. and Lozano S. (1999). An Expert System/Neural Network Model (ImpelERO) for Evaluating Agricultural Soil Erosion in Andalusia Region. *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol. 73, pp. 211-226. [Este artículo ilustra el desarrollo de un modelo híbrido de árboles de decisión y red neuronal para evaluar la vulnerabilidad a la erosión de suelos, el impacto sobre la producción y la selección de prácticas para un manejo óptimo]

De la Rosa D., Mayol F. and Antoine J. (Eds.). (2001). FAO-CSIC Multilingual Soil Profile Database (SDBm Plus) for Using in Soil Monitoring and Evaluation Systems. *World Soil Resources Report ?*. 158 pp. Rome: FAO Publication. [Este informe presenta una base de datos de fácil manejo diseñada para homogeneizar, almacenar y manipular de forma eficiente y sistemática la gran cantidad de datos sobre atributos generados por los reconocimientos de suelos]

Dent D. and Young A. (1981). *Soil Survey and Land Evaluation*. 278 pp. London: George Allen and Unwin. [Este libro muestra una extensa revisión de las técnicas y procedimientos necesarios para aquellos interesados en el reconocimiento de suelos y la evaluación de tierras]

Driessen P.M. and Konijn N.T. (1992). *Land-use Systems Analysis*. 230 pp. Wageningen: Wageningen Agricultural University. [Este libro analiza los procedimientos cualitativos y semi-cuantitativos más ampliamente utilizados, así como los modernos métodos de cuantificación para evaluar la aptitud biofísica de las tierras en la producción de cultivos]

EEA (1999). *Environment in the European Union at the Turn of the Century*. 446 pp. Luxembourg: Office for Official Publications of the EU. [Este informe proporciona información del estado actual y de las futuras tendencias europeas sobre los problemas medioambientales, haciendo especial aplicación del marco conceptual DPSIR]

FAO (1976). A Framework for Land Evaluation. *Soils Bulletin* 32. 72 pp. Rome: FAO Publication. [Este boletín presenta un marco conceptual y terminológico sobre la evaluación de la aptitud relativa de tierras que ha sido internacionalmente aceptado]

FAO (1978). Report on the Agro-Ecological Zones Project. Vol. 1. Methodology and Results for Africa. *World Soil Resources Report 48*, 158 pp. Rome: FAO Publication. [Este informe presenta el procedimiento AEZ de zonificación agro-ecológica, desarrollado por FAO con el objetivo de evaluar el potencial de uso agrícola de los recursos mundiales]

Gunn R.H., Beattie J.A., Reid R.E. and Van de Graaff R.H. (Eds.). (1988). *Australian Soil and Land Survey Handbook*. 300 pp. Melbourne: Inkata Press. [Este libro proporciona directrices sobre métodos para realizar reconocimientos de suelos y tierras y para interpretar los resultados con múltiples propósitos]

Huddleston J.H. (1984). Development and Use of Soil Productivity Ratings in the United States. *Geoderma* Vol. 32, pp. 297-317. [Este artículo proporciona una relación histórica de los principales esfuerzos realizados en EE.UU sobre el desarrollo de metodologías cualitativas y cuantitativas de evaluación de la productividad del suelo]

Lee J. (1987). Land Resources and Their Use in the European Communities. In: H. Barth and P. L'Hermite (Eds.) *Scientific Basis for Soil Protection*. pp. 29-65. London, New York: Elsevier [Este artículo presenta un estudio detallado de los recursos rurales de la Comunidad Europea y de su potencialidad para la agricultura]

Robert P.C., Rust R.H. and Larsen W.L. (Eds.). (1993). *Soil Specific Crop Management*. 395 pp. Madison: Soil Science Society of America. [Este libro presenta los resultados de un seminario en el que se revisaron el conocimiento actual y las técnicas de aplicación sobre una agricultura a la medida de cada suelo]

Rossiter D. G. (1990). ALES: A Framework for Land Evaluation Using a Microcomputer. *Soil Use and Management* Vol. 6, pp. 7-20. [Este artículo presenta un programa informático que permite a los evaluadores de tierras crear sus propios sistemas expertos conforme al marco general de evaluación de tierras de FAO]

Storie R.E.(1933). An Index for Rating the Agricultural Value of Soils. *California Agricultural Experimental Station Bulletin*, 556. [Este informe muestra el primer intento reconocido de desarrollar criterios multiplicativos específicos para la evaluación de la productividad del suelo]

Sys C. (1985). *Land evaluation*. Ghent: State University of Ghent. [Este informe ofrece una visión general de los enfoque cualitativos de la evaluación biofísica de tierras]

USDA (1961). Land Capability Classification. *Agriculture Handbook 210*. 21 pp. Washington: U.S. Government Printing Office. [Esta publicación proporciona las definiciones conceptuales de las clases de capacidad de uso agrícola de tierras, que han sido más ampliamente utilizadas a nivel mundial]

USDA (1971). *Guide for Interpreting Engineering Uses of Soils*. 87 pp. Washington: U.S. Government Printing Office. [Este informe facilita una guía metodológica para la interpretación de propiedades del suelo que afectan a la construcción y mantenimiento de obras de ingeniería]

Van Diepen C.A., Van Keulen H., Wolf J. and Berkhout J.A. (1991). Land evaluation: From Intuition to Quantification. In: B.A. Stewart (Ed.) *Advances of Soil Science*. Vol. 15, pp. 139-204.

New York: Springer-Verlag. [Este artículo analiza los métodos de evaluación cuantitativa de tierras que simulan el movimiento de agua en el suelo y la producción agrícola asociada]

Van Lanen H.A.J. (1991). *Qualitative and Quantitative Physical Land Evaluation: An Operational Approach*. 196 pp. Wageningen: Wageningen Agricultural University. [Esta Tesis Doctoral, que incluye un conjunto de once artículos, presenta el desarrollo y aplicación de métodos cualitativos/cuantitativos de evaluación de tierras para fines agrícolas]

Verheye, W. (1988). The Status of Soil Mapping and Land Evaluation for Land Use Planning in the European Community. In: J.M. Boussard (Ed.) *Agriculture: Socio-economic Factors in Land Evaluation*. Luxembourg: Office for Official Publications of the EU. [Este informe comenta las líneas metodológicas cualitativas y semi-cuantitativas de evaluación de tierras para determinados cultivos de Europa Occidental]

Wischmeier W.H. and Smith D.D. (1965). Predicting rainfall-erosion loss from cropland east of the Rocky Mountains. *Agriculture Handbook 282*. Washington: U.S. Government Printing Office. [Esta publicación proporciona las definiciones conceptuales y metodología seguida por la ecuación universal de pérdida de suelos USLE]

Zinck J.A. (1990). *Soil Survey: Epistemology of a Vital Discipline*. 40 pp. Enschede: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). [Este informe ofrece una visión general del reconocimiento de suelos y de la evaluación de tierras haciendo especial referencia a los países en vías de desarrollo]

Apéndice A. Contenido global de MicroLEIS*: Sistema integrado de evaluación agro-ecológica de tierras en regiones mediterráneas

Introducción

Marco conceptual 32 pág

Inf&Kno. Bases de Datos de Información y Conocimiento

SDBm: FAO-ISRIC-CSIC Base multilingüe de datos de suelos 109 pág

SDBm Plus: FAO-CSIC Base multilingüe de datos de suelos 168 pág

CDBm: Base de datos climáticos mensuales 41 pág

MDBm: Base multilingüe de datos de manejo agrícola 98 pág

Conjuntos de datos: Suelo, clima y manejo 213 pág

Pro&Eco. Modelos de Producción y Ecosistemas

Introducción 6 pág

Modelo Terraza: Deficiencia bioclimática 10 pág

Modelo Cervatana: Capacidad general de uso 9 pág

Modelo Almagra: Aptitud relativa agrícola 11 pág

Modelo Albero: Producción de cultivos 6 pág

Modelo Sierra: Aptitud relativa forestal 9 pág

Modelo Marisma: Fertilidad natural de suelos 49 pág

Apéndices 12 pág

Ero&Con. Modelos de Erosión y Contaminación

Modelo Raizal: Riesgo de erosión hídrica 59 pág

Modelo Pantanal: Riesgo específico de contaminación 50 pág

Modelo Arenal: Riesgo global de contaminación 12 pág

Imp&Res. Simulación de Impacto y Respuesta

Modelo ImpelERO: 57 pág

Submodelo #1: Predicción de pérdida de suelo

Submodelo #2: Impacto sobre la productividad

Submodelo #3: Selección de prácticas de manejo

Anexos

Anexo 1. Glosario de términos 7 pág

Anexo 2. Bibliografía adicional 3 pág

Anexo 3. Requerimientos informáticos 1 pág

Total 962 pág

(*) Contenido global de la documentación que acompaña al software de WWW MicroLEIS y que se encuentra a libre disposición en la dirección de Internet [Http://leu.irnase.csic.es](http://leu.irnase.csic.es)