

PROCEDIMIENTOS DE ALERTA TEMPRANA  
Y ESTIMACIÓN DE RIESGOS DE DESERTIFICACIÓN  
MEDIANTE MODELOS DE DINÁMICA DE SISTEMAS



Madrid, 2015

# PROCEDIMIENTOS DE ALERTA TEMPRANA Y ESTIMACIÓN DE RIESGOS DE DESERTIFICACIÓN MEDIANTE MODELOS DE DINÁMICA DE SISTEMAS

Programa de Acción  
Nacional contra la  
Desertificación



La **coordinación** de este trabajo ha sido realizada por Leopoldo Rojo Serrano. Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

En la **redacción** y **preparación** de la presente publicación han intervenido los siguientes técnicos:

- *Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente:*  
LEOPOLDO ROJO SERRANO
- *Dpto. Economía, Estadística y Gestión de Empresas. E.T.S.I. Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid:*  
F. JAVIER IBÁÑEZ PUERTA
- *Estación Experimental de Zonas Áridas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEZA-CSIC):*  
JAIME MARTÍNEZ VALDERRAMA
- *Centro de Ciencias Humanas y Sociales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CCHS-CSIC):*  
SILVIO MARTÍNEZ VICENTE
- *Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A. (TRAGSATEC, Grupo TRAGSA):* ARACELI MARTÍNEZ RUIZ



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización.



## MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

### Edita:

© Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente  
Secretaría General Técnica  
Centro de Publicaciones

### Diseño y maquetación:

MAGRAMA

### Impresión y encuadernación:

Taller del Centro de Publicaciones del MAGRAMA

NIPO: XXX (papel)  
Depósito Legal: XXX  
NIPO: XXX (línea)  
NIPO: XXXXX (CD o memoria USB)  
Depósito Legal: xxxx

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:  
<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

### Distribución y venta:

Paseo de la Infanta Isabel, 1  
28014 Madrid  
Teléfono: 91 347 55 41  
Fax: 91 347 57 22

Tienda virtual: [www.magrama.es](http://www.magrama.es)  
[centropublicaciones@magrama.es](mailto:centropublicaciones@magrama.es)

**Datos técnicos:** Formato: 21x29,7 cm. Caja de texto: 17,7x24,5 cm. Composición: una columna. Tipografía: Times a cuerpos 11 y 18. Encuadernación: fresado. Papel: interior en papel Igloo Silk de 125 g. Cubierta en cartulina couché mate de 250 g. Tintas: 4/4.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA Y ESTIMACIÓN DE RIESGOS DE DESERTIFICACIÓN MEDIANTE MODELOS DE DINÁMICA DE SISTEMAS (SAT)	3
LAS UTILIDADES DEL SAT	9
• Estimación de tendencias esperadas	9
• Estimación de riesgos de desertificación y de plazos previsibles para la degradación	9
• Clasificación de factores climáticos, económicos y biofísicos según su influencia en los procesos de desertificación.	10
LOS MODELOS DE DINÁMICA DE SISTEMAS (DS) DEL SAT	13
• Elementos de los modelos del SAT y definición de un escenario de simulación	13
• Cultivos leñosos (CLE) y cultivos secano extensivo (CES)	15
• Sistemas agro-silvo-pastorales (SSP) y matorrales degradados (MDE)	18
• Sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación (SAR)	23
LAS POSIBILIDADES DEL SAT: ESTUDIOS DE CASO	27
CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	53



## INTRODUCCIÓN

La Convención de Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (CNULD) considera la evaluación y seguimiento de la desertificación como una de las actividades fundamentales para su control. El Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND), necesita contar con procedimientos de evaluación, de seguimiento y de alerta temprana.

Por lo tanto, el PAND propone el desarrollo de un Sistema Integrado de Evaluación y Vigilancia de la Desertificación (SIEVD), cuyo principal objetivo es constituirse en un instrumento operativo de apoyo a la aplicación del Programa, a través de la determinación de zonas problemáticas en las que llevar a cabo las actuaciones preventivas y correctoras que correspondan, de acuerdo a la evaluación de la situación actual y a las previsiones futuras que determine el Sistema.

La incorporación de este Sistema en el PAND fue uno de los resultados del proceso de revisión del diagnóstico de la desertificación, puesto en marcha por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, y se realizó contando con la colaboración de un grupo de expertos en diagnóstico y evaluación de la desertificación. Durante dicho proceso, se detectaron una serie de iniciativas y líneas de trabajo con una mayor potencialidad y viabilidad, entre ellas la que es objeto de esta publicación: la utilización de modelos basados en la dinámica de sistemas como procedimiento de alerta temprana.

La presente publicación recoge, junto con el trabajo Evaluación de la desertificación en España. Mapa de la condición de la tierra 2000-2010 también publicado por el MAGRAMA, los primeros resultados de la puesta en marcha del SIEVD, de acuerdo a los objetivos, características y elementos del sistema que se recogen en el PAND. Según el programa, el establecimiento y mantenimiento del sistema debe contar con la participación activa de los grupos de investigación involucrados en la evaluación y seguimiento de la desertificación en España. Este principio lógico de actuación ha sido satisfactoriamente cumplido en este caso mediante la colaboración con un equipo integrado por investigadores del Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS-CSIC), de la Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA-CSIC) y de la Universidad Politécnica de Madrid.

Los sistemas de predicción y alerta temprana, línea de trabajo promovida en el seno del Comité de Ciencia y Tecnología de la CNULD, conllevan el desarrollo de procedimientos de detección del riesgo de aparición o agravamiento de la desertificación mediante indicadores biofísicos y socioeconómicos integrados en modelos y sistemas de soporte a la decisión. El trabajo realizado en el marco del PAND ha tenido como objetivo desarrollar sistemas de pronóstico mediante la utilización de modelos de simulación, basado en aquellos que ya se habían puesto en marcha por parte de grupos de investigación españoles, con resultados de gran interés. El objetivo de estos sistemas es disponer de modelos de los distintos paisajes de la desertificación señalados en el PAND, para

estimar su tendencia en diferentes escenarios climáticos y socioeconómicos al aplicarlos de forma regular en zonas amenazadas. Este conocimiento puede ayudar a diseñar planes de actuación antes de que los síntomas más evidentes de la desertificación aparezcan.

La presente publicación expone los conceptos y elementos de la dinámica de sistemas, su utilidad como herramienta estimadora de las tendencias de los procesos de desertificación, y la aplicación de esta disciplina a los principales paisajes-sistemas productivos de la desertificación en España.

## EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA Y ESTIMACIÓN DE RIESGOS DE DESERTIFICACIÓN MEDIANTE MODELOS DE DINÁMICA DE SISTEMAS (SAT)

En los epígrafes siguientes se describen los objetivos y el alcance del Sistema de alerta temprana y estimación del riesgo de desertificación en España (en adelante SAT). Este tipo de sistemas constituyen una línea de trabajo promovida en el seno del Comité de Ciencia y Tecnología de la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) que el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND) va a incorporar dentro de su Sistema Integrado de Evaluación y Vigilancia de la Desertificación (SIEVD).

El PAND establece los siguientes cinco escenarios o paisajes de desertificación:

- Cultivos leñosos afectados por la erosión
- Cultivos extensivos de secano con riesgo de erosión
- Sistemas agro-silvo-pastorales afectados de sobrepastoreo
- Matorrales degradados y eriales
- Sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación

En el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND) se utiliza el término de “escenario, o paisaje, de desertificación” para describir distintos usos del territorio en España en los que se ha detectado el desarrollo de procesos de desertificación.

### PAISAJES DE LA DESERTIFICACIÓN



Fuente: MAGRAMA

#### **Cultivos leñosos afectados por la erosión**

Entre las tierras actualmente cultivadas, son los cultivos leñosos (olivo, frutales y vid) los que presentan una mayor problemática de erosión hídrica laminar y en regueros. Es frecuente la situación de estos cultivos en terrenos de pendientes altas o medias, con baja densidad de plantación. Estas circunstancias unidas al laboreo frecuente para eliminar la competencia de la cubierta herbácea, hacen que, cuando no se realizan prácticas de conservación de suelos, el suelo esté desprotegido frente a la erosión.

#### **Cultivos extensivos de secano con riesgo de erosión**

En los cultivos herbáceos de secano situados en pendientes de moderadas a altas y que no son objeto de prácticas de conservación, se producen importantes pérdidas del suelo por erosión. El sistema de rotaciones cereal/barbecho suele dejar el suelo desprovisto de vegetación en otoño, coincidiendo con la ocurrencia de las lluvias más intensas. El laboreo en sentido de máxima pendiente, la quema de rastrojeras o la utilización de maquinaria muy potente o excesivamente pesada que contribuye a la compactación y pérdida de estructura del suelo, son prácticas que contribuyen al incremento de los procesos erosivos con consecuencias sobre la degradación de los suelos muy importantes.



Fuente: MAGRAMA



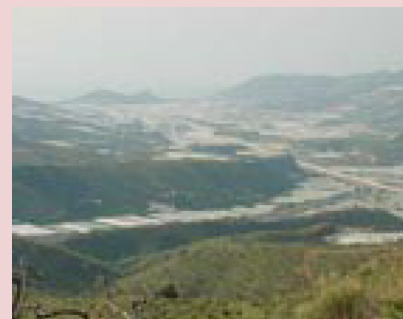
Fuente: MAGRAMA

### **Sistemas agro-silvo-pastorales afectados de sobrepastoreo**

Otro de los agentes clásicos de degradación de tierras es el sobrepastoreo. Además de la excesiva carga de ganado, casos de empleo de técnicas inadecuadas de manejo de tierras de pastos como la quema de matorral en pendientes fuertes o en terrenos muy deleznales, la ausencia de rotaciones, etc., contribuyen a la degradación de las superficies objeto de aprovechamiento. Aunque el sobrepastoreo ha constituido en España una de las causas históricas de degradación de las cubiertas vegetales, en las últimas décadas disminuyó considerablemente debido a la reducción de la cabaña ganadera y al desarrollo de la ganadería intensiva. No obstante existen situaciones residuales a nivel local en las que todavía se practica un pastoreo excesivo sobre todo en el caso del ganado ovino y caprino.

### **Sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación**

Como procesos asociados al riesgo de desertificación en los regadíos se pueden citar la sobreexplotación de acuíferos, el deterioro de la calidad del agua por intrusión salina de origen marino y por polución con agroquímicos, y la salinización de los suelos, bien por extensión inadecuada de cultivos irrigados en áreas con substratos inadecuados para el cultivo, o por deficiente manejo de las técnicas de regadío como la utilización de aguas con exceso de sales.



Fuente: MAGRAMA



Fuente: MAGRAMA

### **Matorrales degradados y eriales**

En el ámbito forestal, los escenarios de la desertificación comprenden la gran cantidad de terrenos que sustentan formaciones de eriales o de matorrales que proceden de la degradación de formaciones vegetales más maduras, dotadas de mayor complejidad ecológica. Dentro de estas comunidades vegetales la extensión de las más gravemente afectadas por la manifestación más extendida de degradación, que es la erosión, supera los 2 millones de hectáreas.

El SAT trabaja sobre la base de una colección de modelos de Dinámica de Sistemas (en adelante modelos DS) que permiten ser referidos a estudios de caso pertenecientes a los cinco paisajes de desertificación del PAND. Los casos son adaptaciones de un modelo general de desertificación y recrean mediante ecuaciones matemáticas los principales procesos biofísicos y económicos que interactúan en cada escenario. La aplicación de cada modelo a un estudio de caso requiere asignar valores a un conjunto de *parámetros de escenario* que tienen una significación real clara, como pueden ser la precipitación anual media, el punto de marchitez, la capacidad de campo, o el precio medio de un producto. Se entiende *por escenario de simulación* el conjunto de valores paramétricos que configuran una aplicación concreta del SAT. A partir de un escenario de simulación, cada modelo proporciona las *trayectorias temporales* de todas las variables que lo forman, a lo largo de periodos tan amplios como se quiera.



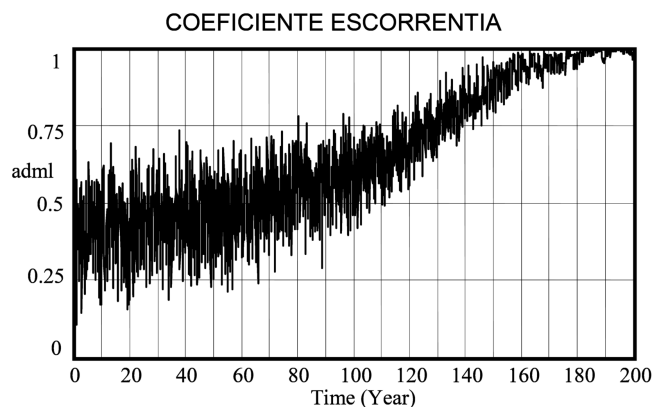
Reproducir procesos que pueden extenderse en el tiempo durante un largo número de años implica una dificultad incuestionable. Esta evidencia hace sumamente importante aclarar qué se pretende conseguir con el SAT y qué no. Empezando por esto último, hay que decir que **el objeto del SAT no es hacer predicciones**. La realidad es enormemente compleja y predecir cualquiera de sus eventos requeriría recrearla con una fidelidad imposible de conseguir. El SAT aporta unas representaciones a escala, o escenarios de desertificación virtuales, sobre los que se van a poder hacer distintos análisis que son irrealizables en el mundo real. Pero es evidente que dichos análisis están condicionados por: i) el conocimiento científico de que disponemos a día de hoy; ii) la formalización que de ese conocimiento se hace en los modelos DS; y iii) la validez de los valores que se asignen como escenario de simulación.

Dado que son muchas las incertidumbres asociadas a los procesos de la desertificación, el objeto del SAT en modo alguno es hacer predicciones, aunque sí **proporcionar una estimación**, lo más rigurosa posible, **del nivel de alerta** que existe en cada caso analizado con él.

En cualquier caso, el SAT pretende convencer a sus usuarios de que con él es posible llevar a cabo una evaluación rigurosa, aunque inevitablemente tentativa, de los riesgos y plazos de la desertificación. En decir, que cuando el SAT refleje un alto riesgo de desertificación en un plazo de tiempo relativamente breve para un determinado escenario modelado, ello sea tomado como una **medida del nivel de alerta** que existe en el escenario real correspondiente.

**Los modelos DS aseguran la coherencia y consistencia de sus resultados siempre que los valores que los usuarios den a los parámetros los tengan.**

El gráfico adjunto es un ejemplo de trayectoria temporal del coeficiente de escorrentía en una simulación del modelo para cultivos leñosos en la que se ha perdido todo el suelo. Obsérvese cómo al final del periodo, ya sin apenas suelo, dicho coeficiente se sitúa en valores próximos a la unidad aunque sin llegar a exceder este umbral.



Así pues, es fundamental que la representación que los modelos DS del SAT hacen de los escenarios de desertificación antes mencionados genere en los usuarios pertinentes un alto nivel de confianza. Para conseguirlo, su construcción ha seguido una estrategia basada en tres puntos:

1. representar sólo procesos *poco controvertidos*,
2. hacerlo de forma *realista y coherente* y,
3. cuando sea imprescindible hacer *supuestos*, adoptar los más elementales.

## ¿CÓMO ASEGURAR EL REALISMO Y LA COHERENCIA DE LOS MODELOS?

### 1. Ajuste a valores de referencia

Los modelos aseguran que las variables tomarán determinados valores de referencia, definidos por el usuario, cuando dentro de una simulación se den las circunstancias propias para esos valores. Por ejemplo:

- El rendimiento de un cultivo será igual a su valor medio, aportado por el usuario, en aquellos años simulados en que la humedad del suelo sea también media.
- La evapotranspiración sería igual a la evapotranspiración potencial, aportada por el usuario, si en algún año simulado el suelo resultara estar constantemente a capacidad de campo.
- El consumo de pasto por animal será igual a su valor normal *ad libitum*, aportado por el usuario, cuando la disponibilidad de pasto sea suficiente para ello.

### 2. Verosimilitud en situaciones extremas

Las ecuaciones están formuladas de tal manera que a priori aseguran que no se van a producir nunca valores imposibles. Por ejemplo:

- Magnitudes físicas negativas
- Humedades del suelo superiores a la saturación.
- Evapotranspiración no nula cuando la humedad del suelo está en el punto de marchitez.
- Ganado que consuma pasto cuando no hay pasto.

### 3. Flexibilidad

Puesto que los modelos van a tener que generar trayectorias temporales largas, se limita al mínimo el número de factores que se asumen invariables en el tiempo. Es decir, la estructura de ecuaciones forma una red de relaciones causales dinámicas (variables en el tiempo) que abarca la gran mayoría de las variables relevantes del sistema. Así, por ejemplo, en el sistema pastoral no se asume constante el número de cabezas de ganado, sino que éste varía con las distintas coyunturas económicas que se van produciendo a lo largo de una simulación. Lo mismo ocurre con el número de explotaciones que bombean agua de un acuífero. Tampoco se supone constante la porosidad del suelo sino que ésta disminuye conforme la erosión va poniendo al descubierto capas profundas, etc.

### 4. Aleatoriedad de factores exógenos

No se asumen constantes las principales variables exógenas a los sistemas modelados, esto es, aquellas variables cuya evolución es ajena al sistema pero que, sin embargo, tienen influencia sobre el mismo. Estas variables toman valores muestreados aleatoriamente en los distintos instantes de tiempo de una simulación. Ejemplos de variables exógenas son la precipitación, su intensidad y el precio de un producto.

El desarrollo del SAT ha incluido la elaboración de una **interfaz de usuario** que facilita la aplicación de sus utilidades a cada estudio de caso. El entorno de funcionamiento de la interfaz se realiza mediante el programa Excel® (Microsoft). A través de éste, el usuario interactúa de forma sencilla con el software Vensim® (Ventana Systems Inc.) que es el empleado para implementar los modelos DS<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> La aplicación informática del SAT es un producto todavía en desarrollo y se encuentra en fase de explotación y validación.



## LAS UTILIDADES DEL SAT

El SAT presenta las siguientes utilidades:

- Estimación de tendencias esperadas
- Estimación de riesgos de desertificación y de plazos previsibles para la degradación
- Clasificación de factores climáticos, económicos y biofísicos según su influencia en los procesos de desertificación.

### • Estimación de tendencias esperadas

Esta utilidad no consiste en otra cosa que en dar a los modelos DS su empleo más convencional, esto es, la obtención y representación de las trayectorias temporales seguidas por sus variables. En el SAT se ha fijado un periodo de simulación de 200 años.

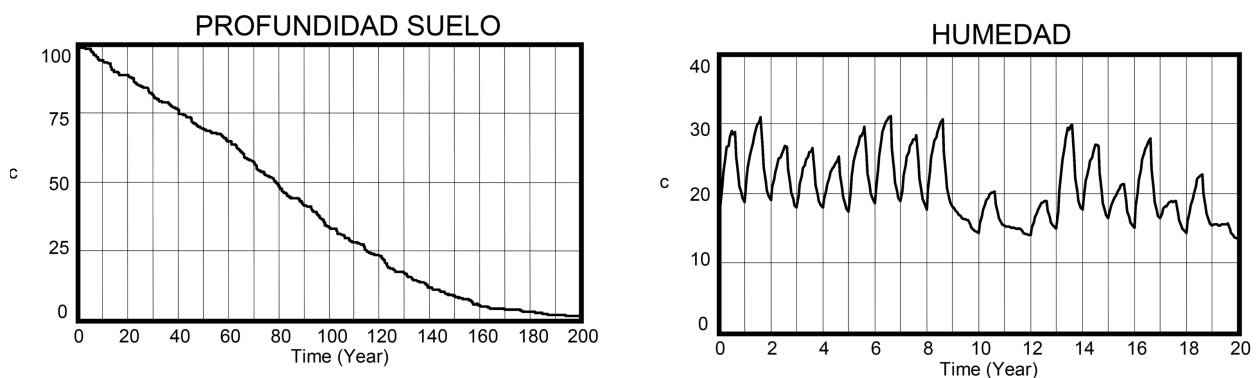


Figura 1. Ejemplos de trayectorias temporales

### • Estimación de riesgos de desertificación y de plazos previsibles para la degradación

Esta utilidad se lleva a cabo mediante simulaciones Montecarlo de los modelos DS. Ello significa que cada modelo es simulado un gran número de veces (1.000, en concreto), bajo escenarios de simulación diferentes obtenidos, de forma automática, generando distintas trayectorias aleatorias de sus variables de escenario. El riesgo de desertificación de un sistema se cuantifica como el porcentaje de las simulaciones realizadas que acaban mostrando un sistema desertificado antes de un cierto plazo de tiempo que debe ser fijado por el usuario.

Se entiende que **un sistema se ha desertificado** cuando alguna o algunas de sus variables relevantes rebasan ciertos umbrales que también son fijados por el usuario.

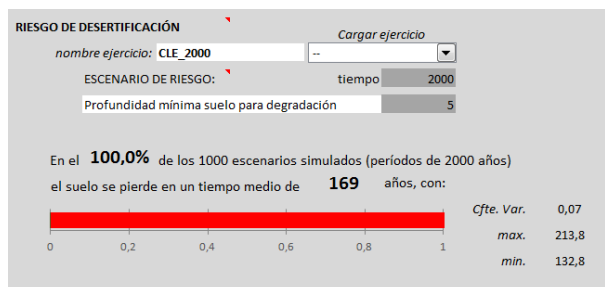
**Ejemplo:** El “tiempo de pérdida de suelo” es el tiempo que tarda en alcanzarse la profundidad mínima del suelo que el usuario ha definido como umbral de desertificación.

El SAT proporciona, además, la media, el coeficiente de variación y los valores máximo y mínimo del tiempo que el sistema ha tardado en desertificarse en aquellas simulaciones en que así ha ocurrido antes del plazo fijado. Nótese que, en sentido estricto, la estimación del tiempo esperado para la desertificación en un cierto estudio de caso será el plazo medio calculado en un análisis en el que el 100% de las 1.000 simulaciones realizadas conduzcan a la desertificación del sistema. En muchas ocasiones, para obtener esta estimación, bastará con establecer un plazo de tiempo para el análisis suficientemente elevado.

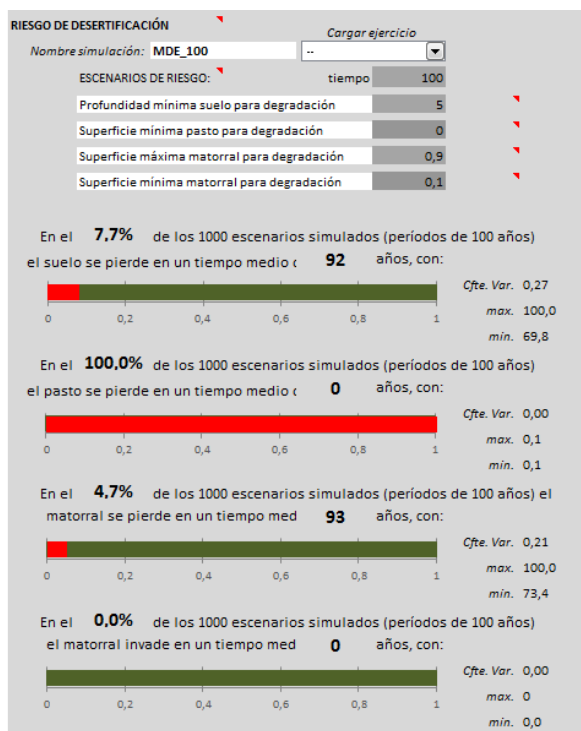
**Riesgo de desertificación:** % de simulaciones que acaban mostrando un sistema degradado tras realizar 1000 simulaciones bajo distintos escenarios generados aleatoriamente.

**Plazos previsible:** media del tiempo (años) que el sistema ha tardado en desertificarse en aquellas simulaciones en que así ha ocurrido antes del plazo fijado.

### Riesgos de desertificación y plazos previsible para la degradación. Ejemplos obtenidos en estudios de caso.



Olivar en Obejo (Córdoba)



Albaidar en la Sierra de los Filabres (Almería)

- **Clasificación de factores climáticos, económicos y biofísicos según su influencia en los procesos de desertificación.**

Esta utilidad se lleva a cabo mediante análisis de sensibilidad. En concreto se emplea la técnica conocida con el nombre de Plackett-Burman, un procedimiento estadísticamente riguroso que mide los impactos de cada parámetro de un modelo sobre una serie de variables objetivo, que en nuestro caso son los tiempos para la desertificación. Una característica importante del método es el hecho de que el impacto evaluado para cada parámetro no es medido bajo la condición *ceteris*

*paribus* (manteniéndose inalterados todos los demás parámetros) sino que dicho impacto es pro-  
mediado sobre variaciones combinadas realizadas sobre el resto de parámetros de escenario.

### **Clasificación de factores según su impacto sobre el tiempo para la desertificación.**

#### **Ejemplos obtenidos en estudios de caso.**

Los impactos que proporciona el SAT indican el porcentaje de variación experimentado por un "tiempo hasta la degradación" al aumentar en un 10% el valor de un cierto parámetro. Un impacto con signo positivo indica que aumentar el parámetro de que se trate retrasa la degradación del sistema y disminuirlo la adelanta. Un impacto con signo negativo significa que aumentar el parámetro en cuestión anticipa, y viceversa.

<b>Orden</b>	<b>Olivar en Obejo (Córdoba)</b>	<b>Tiempo pérdida suelo</b>
1)	Media precipitación anual	-22.2%
2)	Media coeficiente escorrentía en seco	-6.1%
3)	Meses recarga suelo	-3.5%
4)	Evapotranspiración anual cultivo condiciones estándar	2.1%
5)	Fracción evapotranspiración meses recarga suelo	1.2%
6)	Cfte. variación del coeficiente de escorrentía en seco	1.0%
7)	Coficiente variación precipitación anual	-0.6%
8)	Fracción precipitación meses recarga suelo	-0.5%
9)	Meteorización	0.1%

En el ejemplo de la tabla:

- Un aumento del 10% en la media de la precipitación anual supone que el tiempo esperado para la pérdida de suelo que el usuario ha establecido como umbral de degradación disminuye en un 22,2 %.
- Un aumento del 10% en la media del coeficiente de escorrentía en seco, supone que el tiempo esperado para la pérdida de suelo disminuye en un 6,1 %.

El análisis de sensibilidad indica que, en este caso, el factor que más influencia tiene es la cantidad de precipitación, seguido de la intensidad de la misma, representada por el coeficiente de escorrentía en seco.





## LOS MODELOS DE DINÁMICA DE SISTEMAS (DS) DEL SAT

### ELEMENTOS DE LOS MODELOS DEL SAT Y DEFINICIÓN DE UN ESCENARIO DE SIMULACIÓN

Una simulación de cualquier modelo DS proporciona las trayectorias temporales de todos y cada uno de sus elementos, es decir, de sus *variables endógenas*, *variables de escenario* y *parámetros de escenario*.

#### Elementos de los modelos SAT

**Parámetro de escenario:** magnitud *constante*, no calculada por el modelo sino *aportada por el usuario* y que tiene una *significación real* (p.e. capacidad de campo del suelo o media de la precipitación anual). Por supuesto, al ser constante, la trayectoria temporal de todo parámetro es una recta horizontal.

**Variable de escenario o exógenas:** es aquella cuyos valores se obtienen *a partir de una expresión estocástica* y no mediante una relación funcional con otros elementos del modelo. Por tanto, aunque la trayectoria temporal de una variable de escenario no es constante, dicha trayectoria no está relacionada en modo alguno con lo que acontece en el sistema, sino que sus valores son el producto de muestrear al azar reiteradamente de una cierta distribución de probabilidad (SAT realiza estos muestreos de forma automática a lo largo de las simulaciones). No obstante, una variable de escenario se especifica completamente asignando valores a ciertos parámetros de escenario, principalmente la media y la desviación típica de la variable de que se trate.

- **Afectan al sistema pero no son afectadas por éste**
- **No requieren ecuación sino escenario**

**Variable endógena:** aquella cuya trayectoria temporal *es generada por medio de una ecuación* que la relaciona con otros elementos del modelo (variables y/o parámetros). Por ejemplo, la profundidad del suelo es una variable endógena porque su ecuación la relaciona con la tasa de meteorización de la roca madre, que es un parámetro de escenario, y con la tasa de erosión, que es otra variable endógena.

- **Afectan al sistema y son afectadas por éste**
- **Requieren ecuación**

Para realizar una aplicación del SAT, el usuario debe dar valores a la lista completa de parámetros de escenario de un modelo. Un subconjunto de estos parámetros sirve para *caracterizar el estado actual* del estudio de caso que se quiera llevar a cabo (“Valores iniciales”) y otro subconjunto sirve para *establecer escenarios de simulación a futuro* (“Escenarios de simulación”).

### Valores iniciales y Escenario de simulación

CULTIVOS LEÑOSOS  
AFECTADOS POR EROSIÓN

Nombre ejercicio:  
**Base**

---

EJEMPLO: **1**

Olivar Obejo  
(Córdoba)

---

Descripción del modelo

Diagramas causales

METODOLOGÍA

ESCUENARIO DE SIMULACIÓN	
Coeficiente variación precipitación anual	0,39
Media precipitación anual*	618,79
Meses recarga suelo	6,00
Fracción precipitación meses recarga suelo	0,85
Media coeficiente escorrentía en seco*	0,09
Fracción evapotranspiración meses recarga suelo	0,32
Evapotranspiración anual cultivo condiciones estándar	51,04
Meteorización	0,00
Cfte. variación del coeficiente de escorrentía en seco	1,32
VALORES INICIALES	
Media coeficiente escorrentía en seco inicial*	0,09
Media precipitación producto	1,72
Fracción espacio poroso inicial	0,30
Fracción marchitez permanente en peso	0,02
Fracción capacidad de campo en peso	0,08
Profundidad suelo inicial	80,00
Profundidad suelo mitad porosidad	0,05
Media coeficiente escorrentía en humedo inicial	0,22
Media erosión anual inicial	23,16
Rendimiento regadio inicial	1076,90
Rendimiento secano inicial	706,20
Coste laboreo por hectárea	380,50
Otros costes por hectárea	1067,70
Subvención por hectárea	741,51
Media precipitación anual inicial*	618,79
Elige gamma para precipitación	1,00

La interfaz del SAT distingue y separa claramente los tipos de parámetros a incluir en el grupo de “Valores iniciales” y en el de “Escenarios de simulación”. Muchos parámetros aparecen en ambos grupos (p.e. la precipitación media anual). En tal caso, su nombre incluye el término "inicial" dentro del primer grupo (p.e. 'media precipitación anual inicial') y no lo hace dentro del segundo grupo. Lo natural sería que, en una **primera simulación** de un modelo, se diera el mismo valor a estos parámetros comunes a ambos grupos. Ello significaría que, inicialmente, **el sistema se lanza a futuro sin alterar sus condiciones de entorno**.

En simulaciones posteriores se podría proceder a **explorar las variaciones provocadas por otros escenarios**, para lo cual deberán modificarse los valores correspondientes a los parámetros de escenario a futuro, nunca los valores "iniciales" que caracterizan el estado actual. Por ejemplo, **una simulación de prueba podría bajar el valor del parámetro ‘media precipitación anual’ de 400 a 350 mm para ver los efectos de un escenario a futuro más seco**.

De aquí en adelante, emplearemos las siguientes abreviaturas a la hora de referirnos a los modelos DS del SAT:

**CLE:** Cultivos leñosos afectados por erosión

**CES:** Cultivos extensivos de secano con riesgo de erosión

**SSP:** Sistemas agro-silvo-pastorales afectados de sobrepastoreo

**MDE:** Matorrales degradados y eriales

**SAR:** Sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación

#### Resolución espacial de los modelos

Los modelos **CLE**, **CES**, **SSP** y **MDE** están referidos a una hectárea tipo para la que se asumen unas características topográficas, biofísicas, agronómicas y culturales homogéneas.

El modelo **SAR**, en cambio, está referido a la superficie total abarcada por todas las explotaciones agrarias usuarias del sistema acuífero representado.

Se realiza a continuación una **descripción sintética de los modelos**, en la que, sin entrar en detalles matemáticos, se pretende dar a conocer las características por las que las variables modeladas se asemejan a sus correspondientes variables reales. Veremos que son precisamente estas características las que aseguran en los modelos el realismo y la coherencia a los que se ha hecho referencia.

En los gráficos incluidos en esta descripción se emplean letras mayúsculas para definir variables (endógenas y de escenario) y letras minúsculas para definir parámetros de escenario.

Como se verá los modelos realizados para los cultivos leñosos y extensivos de secano (CLE y CES), por un lado, y los modelos de sistemas agro-silvo-pastorales y matorrales (SSP y MDE), por otro, comparten muchas de sus relaciones causales, por lo que se han formulado conjuntamente.

• **Cultivos leñosos (CLE) y cultivos secano extensivo (CES)**

La Figura 2 trata de dar una imagen global de los procesos considerados en los modelos CLE y CES. En ella, las relaciones causales entre variables se representan mediante flechas de polaridad positiva o negativa, flechas que serán empleadas también en los esquemas generales de los demás modelos. Un signo positivo indica que la variable que está al final de la flecha (explicada) aumenta si lo hace la que está en el origen de la flecha (explicativa), y viceversa; un signo negativo indica que la variable explicada disminuye si la explicativa aumenta, y viceversa. Puede observarse en el esquema cómo las relaciones causales forman varios bucles de realimentación (circuitos cerrados de causalidad).

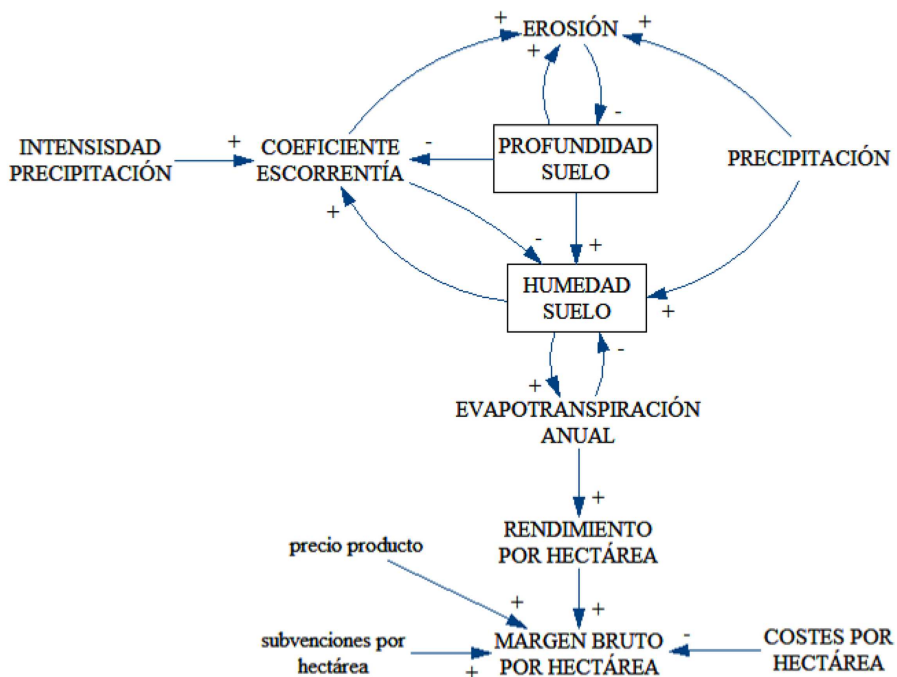


Figura 2. Esquema general de los modelos CLE y CES

La degradación en los sistemas CLE y CES es conducida por la **erosión**. La tasa de erosión depende positivamente, en cada paso de integración, de los valores que tomen la precipitación, el coeficiente de escorrentía y la profundidad del suelo en ese instante. Se asume que la cobertura vegetal, al tratarse de cultivos agrícolas, no varía de un año simulado a otro y que, por tanto, su efecto sobre la tasa de erosión es también constante.

La precipitación es una variable de escenario (aleatoria). El coeficiente de escorrentía tiene, en cada instante de una simulación, una componente aleatoria relacionada con la intensidad de la precipitación, pero depende además (positivamente) del contenido de humedad del suelo y (negativamente) de la profundidad del mismo. Esto último se debe a que, en los modelos, la porosidad disminuye con la profundidad de manera que, al erosionarse el suelo, el coeficiente de escorrentía aumenta. Debido también a la mayor densidad aparente de las capas profundas, la erosión se ralentiza conforme el suelo se pierde (relación positiva: a menos suelo, menos erosión).

El contenido de **humedad del suelo** depende positivamente de la profundidad y de la precipitación, y negativamente del coeficiente de escorrentía y de la evapotranspiración. Esta última variable depende a su vez positivamente de la cantidad de humedad en el suelo, cerrando así uno de los bucles causales realimentados.

Por último, la tasa de evapotranspiración anual determina el **rendimiento de los cultivos** y éste el **margen bruto por hectárea**. Así pues, conforme el suelo se pierda por erosión, su capacidad de almacenamiento de agua disminuirá, llegando a comprometer con ello la evapotranspiración y, por tanto, el rendimiento y el margen por hectárea obtenidos. Los modelos permiten evaluar la probabilidad (el riesgo) de que esto ocurra y el plazo estimado para que se produzca una pérdida determinada.

La degradación en los sistemas **CLE** y **CES** es conducida por la **erosión**. Conforme el suelo se pierda, su capacidad de **almacenamiento de agua** disminuirá, llegando a comprometer con ello la evapotranspiración y, por tanto, el rendimiento y el **margen por hectárea** obtenidos.



Fuente: MAGRAMA



Fuente: MAGRAMA

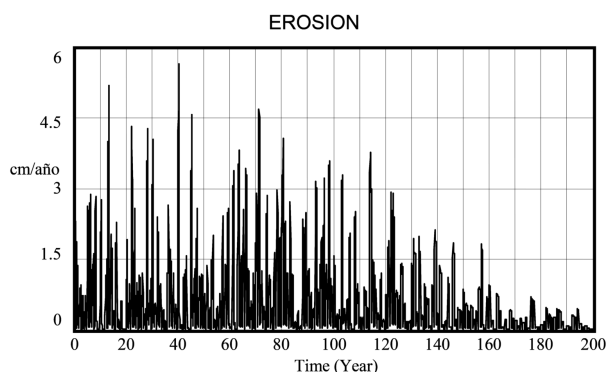


Figura 3. Ejemplo de trayectoria de la tasa de erosión en una simulación en la que se termina perdiendo todo el suelo.

<b>Cultivos leñosos (CLE) y cultivos secano extensivo (CES)</b>	
<p><b>Parámetros de escenario</b>, cuyo valor debe ser asignado para llevar a cabo una aplicación de CLE o CES a un estudio de caso.                      Los parámetros de escenario modificables para establecer escenarios a futuro se indican con un asterisco.</p>	
<b>Clima</b>	<b>Suelo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de variación del coeficiente de escorrentía en seco [adml]*</li> <li>• Coeficiente de variación de la precipitación total anual [adml]*</li> <li>• Fracción precipitación anual en meses en que precipitación &gt; ETP [adml]*</li> <li>• Media coeficiente de escorrentía en seco [adml]*</li> <li>• Media de la precipitación total anual [mm/año]*</li> <li>• Meses de recarga del suelo (precipitación &gt; ETP) +[meses]*</li> <li>• Vale 1 si precipitación anual sigue una distribución gamma; vale 0 si normal [adml]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de escorrentía en húmedo [adml]</li> <li>• Fracción en peso correspondiente a la capacidad de campo [adml]</li> <li>• Fracción en peso correspondiente al punto de marchitez permanente [adml]</li> <li>• Fracción espacio poroso en la superficie del suelo [adml]</li> <li>• Profundidad suelo donde porosidad se reduce a la mitad de su valor inicial [cm]</li> <li>• Profundidad del suelo [cm]</li> <li>• Tasa de meteorización de la roca madre [cm/año]*</li> <li>• Tasa media de erosión del suelo [tm/(año×ha)]</li> </ul>
<b>Cubierta vegetal</b>	<b>Manejo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evapotranspiración anual del cultivo bajo condiciones estándar [cm/año]*</li> <li>• Fracción evapotranspiración del cultivo en meses en que precipitación &gt; ETP [adml]*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coste del laboreo por hectárea [€/ (año×ha)]</li> <li>• Media del precio de la producción del cultivo [€/kg]</li> <li>• Otros costes por hectárea distintos del laboreo [€/ (año×ha)]</li> <li>• Rendimiento por hectárea del cultivo en regadío [kg aceite/(año×ha)]</li> <li>• Rendimiento por hectárea del cultivo en secano [kg aceite/(año×ha)]</li> <li>• Total subvenciones por hectárea [€/ (año×ha)]</li> </ul>
<p><b>Variables de escenario</b>, que se comportan aleatoriamente durante la simulación</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación total anual</li> <li>• Coeficiente de escorrentía en suelo seco inicial</li> </ul>	<p><b>Variables endógenas</b>, cuyas trayectorias se obtienen por medio de ecuaciones.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Humedad del suelo</li> <li>• Humedades de saturación, capacidad de campo y marchitez permanente</li> <li>• Infiltración y escorrentía superficial</li> <li>• Coeficiente de escorrentía</li> <li>• Evapotranspiración</li> <li>• Drenaje y percolación</li> <li>• Suelo</li> <li>• Erosión</li> <li>• Rendimiento del cultivo por hectárea</li> <li>• Margen bruto por hectárea</li> </ul>

### • **Sistemas agro-silvo-pastorales (SSP) y matorrales degradados (MDE)**

La casuística de los sistemas agro-silvo-pastorales y de los matorrales o eriales degradados es muy variada, ya que resulta de combinar distintos tipos de vegetación y de manejo de la misma y del suelo. Ante ello, la formulación de los modelos SSP y MDE ha resultado en una estructura de ecuaciones suficientemente genérica como para ser aplicada, al menos, a estudios de caso circunscritos a los siguientes tres escenarios tipo:

- Zonas pastorales donde no se elimina el matorral y pastadas por ovino o caprino;
- Pastizales de dehesas donde se elimina el matorral y pastadas por ovino o vacuno;
- Matorrales/eriales degradados con o sin pastoreo.



Fuente: MAGRAMA



Fuente: MAGRAMA

La descripción que sigue corresponde al caso más completo posible, que es básicamente el primero de los tres anteriores: un sistema con un rebaño que podría ser caprino, es decir, que podría aprovechar el matorral, y donde este tipo de vegetación no se elimina mediante laboreo. La adecuación de este modelo genérico a cualquiera de las otras situaciones tipo se consigue fácilmente sin más que hacer cero distintas variables del escenario de simulación correspondiente. Así, por ejemplo, en el segundo caso habría que anular el matorral y el rebaño caprino y, en el tercero, quizá la carga ganadera y/o la producción de pasto de herbáceas.

La Figura 4 muestra los principales procesos representados en los modelos SSP y MDE. La **erosión** se relaciona con la precipitación, el coeficiente de escorrentía y la profundidad (porosidad) del suelo de forma idéntica a la explicada para los modelos CLE y CES. Sin embargo, la tasa de erosión incorpora aquí una relación negativa con la **cobertura vegetal** (matorral y pasto), que en los modelos SSP y MDE es una variable endógena (recuérdese que, en el caso de los cultivos, la cobertura vegetal se asume invariable en el tiempo). Así pues, en todo instante de una simulación de los modelos que ahora nos ocupan, la tasa de erosión será mayor cuanto mayor sean la precipitación y el coeficiente de escorrentía, y cuanto menor lo sean la densidad aparente y la cobertura vegetal, y viceversa.

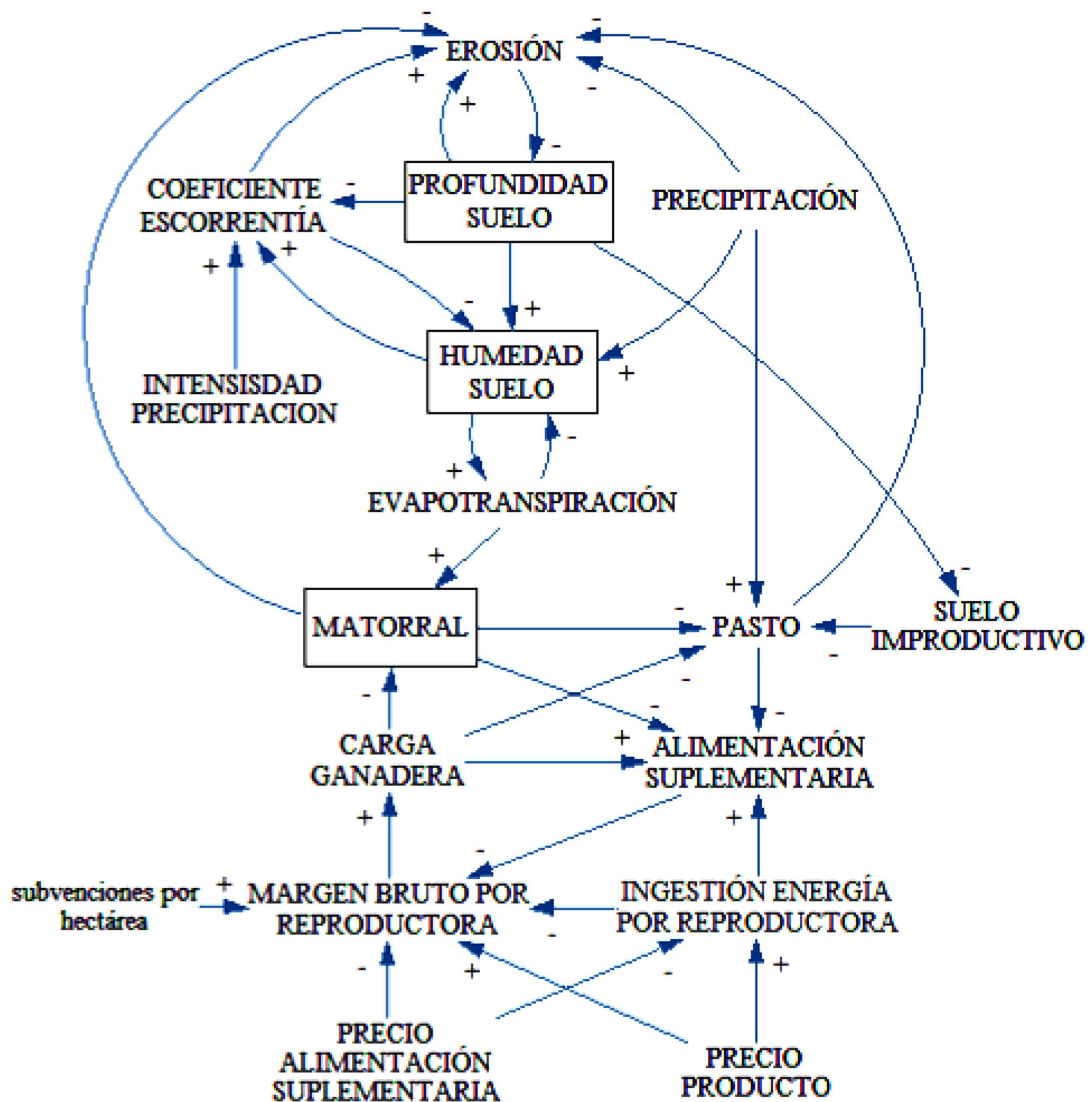


Figura 4. Esquema general de los modelos SSP y MDE

La humedad del suelo se modela igual que en los sistemas anteriores, es decir, en todo instante depende positivamente de la profundidad del suelo y de la precipitación, y negativamente del coeficiente de escorrentía y de la evapotranspiración.

Los modelos representan las superficies de matorral y pasto y sus producciones por unidad de superficie. La **superficie cubierta de matorral** depende negativamente de la **carga ganadera** y positivamente de la **evapotranspiración**. Es decir, el crecimiento del matorral se verá afectado si la erosión terminara por reducir severamente la cantidad de suelo y con ello su capacidad de almacenamiento de agua. La biomasa comestible por unidad de superficie de matorral se supone constante. Dicha biomasa sólo es aprovechada si el rebaño modelado es caprino.

La **producción de pasto** de cada año simulado tiene lugar únicamente en la superficie no cubierta por el matorral y que además no sea suelo improductivo. Se asume pues que el matorral li-

mita el crecimiento del pasto, pero no a la inversa. Por suelo improductivo se entiende aquel cuya densidad aparente es demasiado alta como para permitir el crecimiento de especies herbáceas. Así, la proporción de suelo improductivo aumentará si la erosión descubre capas profundas, con menor porosidad. Al margen de ello, la producción de pasto por unidad de superficie depende positivamente de la precipitación anual y la cobertura que dicha producción proporciona al suelo depende negativamente de cuál sea la carga ganadera.

Los modelos SSP y MDE simulan la evolución en el tiempo de la ocupación del suelo por **matorral** y **pasto** (y sus producciones) por unidad de superficie, haciéndolo depender de parámetros y variables como la **carga ganadera**, la **evapotranspiración** y la **erosión**.

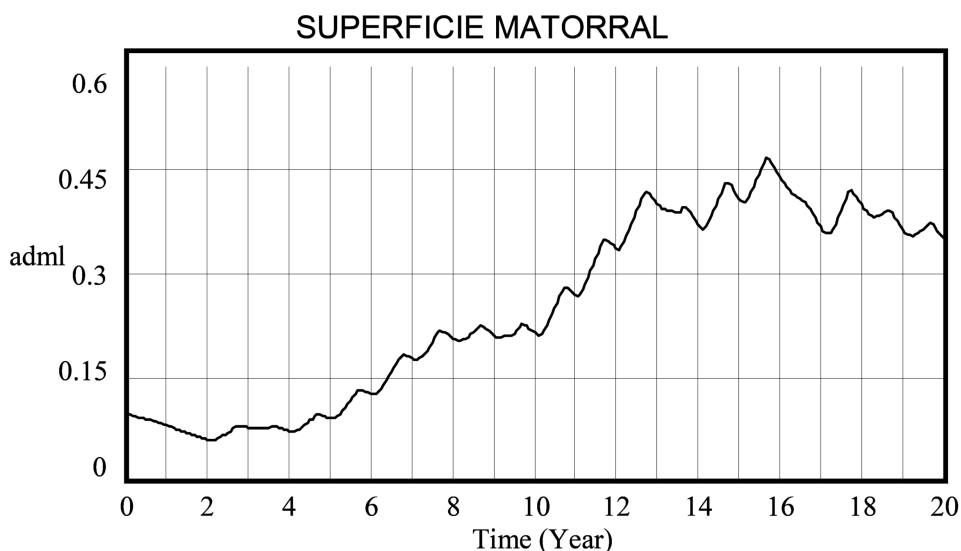


Figura 5. Ejemplo de trayectoria temporal de la superficie de matorral

Teniendo en cuenta que desde el año 2010 **las ayudas de la PAC** al sector de ganado ovino y caprino están **desacopladas**, el **tamaño del rebaño** se relaciona positivamente con la rentabilidad económica, representada ésta por el **margen bruto por cabeza**. Entre las variables rebaño, alimentación suplementaria y margen bruto por cabeza se establece, pues, un bucle de realimentación negativa: en condiciones ceteris paribus, a mayor tamaño del rebaño, mayores son las necesidades de alimentación suplementaria y menor es, por tanto, el margen por cabeza. Este bucle refleja el riesgo que supone para un ganadero la decisión de aumentar su rebaño.

### El desacoplamiento de las ayudas de la PAC

Debido a la implantación del “pago único” de la PAC, ya no se recibe una prima por cabeza de ganado, por lo que el modelo considera que **el tamaño del rebaño está condicionado a las condiciones de mercado**, es decir, al margen bruto esperado.

Como es bien sabido, la PAC propicia desde hace años el desacoplamiento entre ayudas y producción. Es decir, los ganaderos reciben el denominado “pago único”, o “pago básico”



en la PAC post-2013, a partir de una cantidad determinada de ayuda a la renta, basada en derechos históricos, independiente del número de cabezas de la explotación. Ello quiere decir que, aun recibiendo como subvención un cierto pago básico, condicionado al cumplimiento de una serie de requisitos, los agricultores y ganaderos tienen ya, o van a tener, que dimensionar sus niveles de producción en sintonía con las condiciones del mercado.

Ante este horizonte, se ha optado por formular para el rebaño reproductor una ecuación acorde con la teoría microeconómica más clásica, evitando reflejar la existencia de animales que perciben primas por cabeza. Así pues, el número de reproductoras se ha relacionado con el margen bruto esperado por hembra.

**La cantidad de alimentación suplementaria depende, en cada año simulado, de las disponibilidades de biomasa vegetal** y del objetivo de ingestión energética por animal. Para determinar esta última variable, los modelos permiten elegir entre dos opciones: asumir que dicho objetivo es constante, lo que se correspondería con un sistema dirigido a obtener unas producciones de referencia (p.e. peso de los terneros vendidos); o asumir que los ganaderos siguen un comportamiento cuasi-óptimo desde un punto de vista económico. Esto último quiere decir que los valores del aporte energético por animal se aproximan a los que maximizan el margen bruto por cabeza, los cuales se obtienen resolviendo un problema de optimización sujeto a los precios de la producción ganadera y de la alimentación suplementaria.

<b>Sistemas agro-silvopastorales (SSP) y matorrales degradados (MDE)</b>	
<p><b>Parámetros de escenario</b>, cuyo valor debe ser asignado para llevar a cabo una aplicación de CLE o CES a un estudio de caso. Los parámetros de escenario modificables para establecer escenarios a futuro se indican con un asterisco.</p>	
Clima	Suelo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de variación del coeficiente de escorrentía en seco [adml]*</li> <li>• Coeficiente de variación de la precipitación total anual [adml]*</li> <li>• Fracción precipitación anual en meses en que precipitación &gt; ETP [adml]* *</li> <li>• Media coeficiente de escorrentía en seco [adml]*</li> <li>• Media de la precipitación total anual [mm/año]*</li> <li>• Meses de recarga del suelo (precipitación &gt; ETP) [meses]*</li> <li>• Vale 1 si precipitación anual sigue una distribución gamma; vale 0 si normal [adml]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de escorrentía en húmedo [adml]</li> <li>• Fracción en peso correspondiente a la capacidad de campo [adml]</li> <li>• Fracción en peso correspondiente al punto de marchitez permanente [adml]</li> <li>• Fracción espacio poroso en la superficie del suelo [adml]</li> <li>• Profundidad suelo donde porosidad se reduce a la mitad de su valor inicial [cm]</li> <li>• Profundidad del suelo [cm]</li> <li>• Tasa de meteorización de la roca madre [cm/año]*</li> <li>• Tasa media de erosión del suelo [tm/(año×ha)]</li> <li>• Tasa media de erosión en suelo desnudo [tm/(año×ha)]</li> </ul>
Cubierta vegetal	Manejo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomasa aprovechable por hectárea de matorral [kg/(ha x año)]</li> <li>• Contenido de energía del matorral [UF/kg]</li> <li>• Contenido de energía del pasto [UF/kg]</li> <li>• Evapotranspiración anual bajo condiciones estándar [cm/año]*</li> <li>• Fracción de cobertura de pasto inicial [adml]</li> <li>• Fracción de cobertura de matorral [adml]</li> <li>• Fracción evapotranspiración del cultivo en meses en que precipitación &gt; ETP [adml]*</li> <li>• Fracción potencial de superficie de matorral en ausencia de ganado [adml]</li> <li>• Media de la producción de pasto por hectárea [kg/(ha x año)]</li> <li>• Precipitación anual mínima para el crecimiento del pasto [mm/año]</li> <li>• Producción mínima de pasto que supone una cobertura total [kg/(ha x año)]</li> <li>• Tiempo desarrollo matorral desde 0 a su superficie potencial sin ganado [años]</li> <li>• Umbral de densidad aparente para el crecimiento del pasto [gr/cm<sup>3</sup>]</li> <li>• Vida media de una planta de matorral [años]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de variación del precio de la alimentación suplementaria [adml]*</li> <li>• Coeficiente de variación del precio de la principal producción (carne o leche) [adml]*</li> <li>• Consumo de biomasa por reproductora [kg/(UGM x año)]</li> <li>• Consumo de suplemento alimenticio por reproductora [kg/(UGM x año)]</li> <li>• Contenido de energía del suplemento alimenticio [UF/kg]</li> <li>• Hembras reproductoras iniciales [UGM/ha]</li> <li>• Ingresos por cabeza de producciones secundarias [€/ (UGM×año)]*</li> <li>• Media del precio de la alimentación suplementaria [€/kg]*</li> <li>• Media del precio de la principal producción (carne o leche) [€/kg]*</li> <li>• Otros costes por cabeza distintos de la alimentación [€/ (UGM×año)]*</li> <li>• % aumento reproductoras si margen bruto aumentara 10% [%]*</li> <li>• Producción principal por reproductora [kg/(UGM×año)]</li> <li>• Producción principal potencial por reproductora [kg/(UGM×año)]</li> <li>• Relación hembras reproductoras/carga ganadera [adml]</li> <li>• Tiempo medio para el alisado del margen bruto [años]*</li> <li>• Total subvenciones por hectárea [€/ (año×ha)]*</li> <li>• Vale 1 si el objetivo de producción es fijo; vale 0 si no [adml]</li> <li>• Vale 1 si el rebaño es caprino; vale 0 si no [adml]</li> </ul>
<p><b>Variables de escenario</b>, que se comportan aleatoriamente durante la simulación</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación total anual</li> <li>• Coeficiente de escorrentía en suelo seco inicial</li> <li>• Precio de la principal producción ganadera</li> <li>• Precio de la alimentación suplementaria</li> </ul>	
<p><b>Variables endógenas</b>, cuyas trayectorias se obtienen por medio de ecuaciones</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humedad del suelo</li> <li>• Humedades de saturación, capacidad de campo y marchitez permanente</li> <li>• Infiltración y escorrentía superficial</li> <li>• Coeficiente de escorrentía</li> <li>• Evapotranspiración</li> <li>• Drenaje y percolación</li> <li>• Suelo</li> <li>• Erosión</li> <li>• Cobertura vegetal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie de matorral</li> <li>• Superficies de suelo improductivo y de pasto</li> <li>• Biomasa disponible para el ganado</li> <li>• Consumos de biomasa y de alimentación suplementaria por reproductora</li> <li>• Producción principal por reproductora</li> <li>• Número de reproductoras y margen bruto por reproductora</li> <li>• Aporte de energía por reproductora</li> </ul>

• **Sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación (SAR)**

El modelo SAR se centra en representar los problemas de degradación ligados a la **sobreexplotación de acuíferos subterráneos**, problemas que, como se indica en el PAND, afectan especialmente a algunas zonas hortofrutícolas costeras y a los sistemas acuíferos de la Mancha. La Figura 6 muestra los procesos más relevantes contemplados por el modelo.

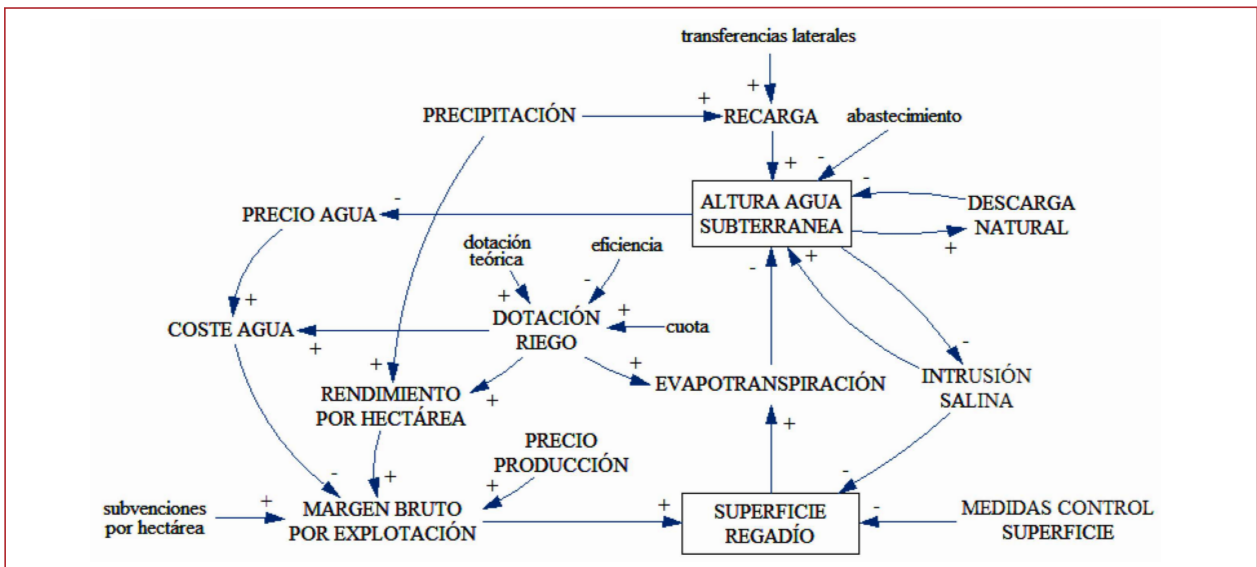


Figura 6. Esquema general del modelo SAR

El modelo representa un *acuífero no confinado*. A lo largo de una simulación, la disponibilidad del recurso subterráneo se evalúa por medio de la **altura media de la columna saturada de agua dulce**, medida desde la base del acuífero. La tasa de variación anual de esta altura es el saldo resultante de restar a la **recarga** del acuífero la **evapotranspiración**, la **descarga** natural y el **bombeo neto**.

La recarga del acuífero es la suma de la precipitación y las transferencias laterales de agua procedente de otros acuíferos. La evapotranspiración toma un valor constante en toda la superficie del acuífero, valor que se incrementa sobre la superficie de regadío en una cantidad proporcional a la dosis de riego. La descarga natural, esto es, el agua evacuada a los ríos y a otros acuíferos adyacentes, se relaciona positivamente con la altura del agua en el acuífero.

El bombeo bruto es la suma de los bombeos demandados para abastecimiento y para riego. El agua para abastecimiento, que sale del sistema, constituye lo que en el modelo se denomina bombeo neto. El agua bombeada para riego regresa al terreno de donde, o bien se pierde por evapotranspiración, o bien regresa al acuífero.

**La evolución de la superficie total regada** con agua del acuífero se relaciona positivamente con el **margen bruto de una explotación**. No obstante, el crecimiento de la superficie de regadío viene limitado por las medidas de control de superficie, caso de existir, y en última instancia, por

la disponibilidad de superficie para la agricultura. En el caso de los **acuíferos costeros**, la superficie potencial de regadío puede verse afectada, además, por la **intrusión de agua marina**, que en el modelo se relaciona inversamente con la altura media del agua dulce en el acuífero.

El precio de la producción es una variable de escenario y el precio del agua se relaciona negativamente con la altura del agua subterránea. Esto último cierra un significativo bucle de autorregulación en el sistema. En efecto, la reducción de la altura del agua en el acuífero implica un mayor coste de extracción, un menor margen bruto por explotación y, con ello, una cierta ralentización del crecimiento de la superficie regada.

El consumo de agua por hectárea es igual a una dotación teórica, que es un parámetro de escenario, dividida por la **eficiencia de los sistemas de riego**. No obstante, el consumo resultante sólo será la realmente aplicado si no supera la cuota de riego por hectárea, caso de existir ésta, o las disponibilidades de agua en el acuífero.

El modelo SAR recrea la interdependencia dinámica existente entre la **altura del agua subterránea** de un acuífero y la **superficie agrícola que se riega** con ella, relación que está **mediatizada** por las **condiciones de los mercados** de productos agrícolas.



Fuente: A. Domínguez. Universidad de Castilla-La Mancha

<b>Cultivos de regadío (SAR)</b>	
<p><b>Parámetros de escenario</b>, cuyo valor debe ser asignado para llevar a cabo una aplicación de CLE o CES a un estudio de caso.</p> <p>Los parámetros de escenario modificables para establecer escenarios a futuro se indican con un asterisco.</p>	
<b>Clima</b>	<b>Acuífero</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de variación de la precipitación total anual [adml]*</li> <li>• Media de la precipitación total anual [mm/año]*</li> <li>• Vale 1 si precipitación anual sigue una distribución gamma; vale 0 si normal [adml]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura del agua dulce en el acuífero al inicio de la simulación [m]</li> <li>• Altura potencial del agua dulce en el acuífero [m]</li> <li>• Altura media del agua dulce en el acuífero al inicio de la simulación [m]</li> <li>• Coeficiente de almacenamiento del acuífero [adml]</li> <li>• Profundidad del acuífero [m]</li> <li>• Recarga de agua dulce procedente de transferencias laterales [m/año]*</li> <li>• Superficie afectada por salinización al inicio de la simulación [ha]</li> <li>• Superficie total del acuífero [ha]</li> <li>• Vale 1 si el acuífero es costero; vale 0 si no [adml]</li> </ul>
<b>Cubierta vegetal / Características cultivo regadío</b>	<b>Manejo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua útil mínima para que haya producción [m3/(ha x año)]</li> <li>• Agua útil para máximo rendimiento por hectárea [m3/(ha x año)]</li> <li>• Dotación por hectárea deseada para cultivos [m3/(ha x año)]*</li> <li>• Evapotranspiración real anual superficie no regada [mm/año]*</li> <li>• Tasa de retorno al acuífero del agua de riego [adml]</li> <li>• Tiempo de desarrollo del regadío hasta alcanzar su valor actual por primera vez [años]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Año de finalización de las actuaciones de reducción de superficie [año]*</li> <li>• Coeficiente de variación del precio de la energía [adml]*</li> <li>• Coeficiente de variación del precio de la producción agrícola [adml]*</li> <li>• Consumo energético para elevar un m3 de agua un metro [Kwh/(m<sup>3</sup>m)]*</li> <li>• Coste de oportunidad por explotación [€/año]*</li> <li>• Cuota de riego por hectárea [m3/(ha x año)]*</li> <li>• Demanda total de agua para abastecimiento [m/año]*</li> <li>• Eficiencia media de los sistemas de riego [adml]*</li> <li>• Margen bruto por hectárea inicial [€/(ha x año)]</li> <li>• Media del precio de la energía [€/kwh]*</li> <li>• Media del precio de la producción agrícola [€/kg]*</li> <li>• Otros costes del agua distintos de la energía [€/m3]*</li> <li>• Otros costes por hectárea distintos del agua [€/(año×ha)]*</li> <li>• Rendimiento por hectárea del cultivo [kg/(año×ha)]</li> <li>• Superficie media de una explotación agrícola usuaria del acuífero [ha/ud]</li> <li>• Superficie máxima disponible para el regadío [ha]</li> <li>• Superficie de regadío inicial [ha]</li> <li>• Superficie de regadío que no usa el acuífero inicial [ha]</li> <li>• Superficie regadío que no usará el acuífero al acabar actuaciones[ha]*</li> <li>• Tiempo medio para el alisado de la rentabilidad relativa [años]*</li> <li>• Total subvenciones por hectárea [€/(año×ha)]*</li> </ul>
<p><b>Variables de escenario</b>, que se comportan aleatoriamente durante la simulación</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación total anual</li> <li>• Precio de la producción agrícola</li> <li>• Precio de la energía</li> </ul>	
<p><b>Variables endógenas</b>, cuyas trayectorias se obtienen por medio de ecuaciones</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura del agua dulce en el acuífero</li> <li>• Recarga y descarga natural de agua dulce en el acuífero</li> <li>• Bombeo neto y evapotranspiración de agua dulce</li> <li>• Superficie total regada con agua del acuífero</li> <li>• Margen bruto por hectárea</li> <li>• Consumo de agua de riego por hectárea</li> </ul>	



## LAS POSIBILIDADES DEL SAT: ESTUDIOS DE CASO

Analicemos, a través de un conjunto de estudios de caso, las posibilidades de las distintas utilidades del Sistema de Alerta Temprana y los tipos de resultados que se pueden obtener.

### ESTUDIOS DE CASO



Fuente: J.A: Gómez. Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)

#### **Escenario CLE: olivar en el municipio de Obejo (Córdoba)**

Olivar tradicional mecanizable con laboreo convencional. Ladera con pendiente del 21% y longitud de pendiente de 90 m. Densidad de 100 árboles por hectárea. Suelo con textura franco arenosa.

#### **Escenario CES: alternativa trigo-girasol en el municipio de Baena (Córdoba)**

Alternativa a dos años de trigo-girasol con laboreo convencional. Ladera con pendiente del 12% y longitud de pendiente de 131 m. Suelo con textura franco arcillosa.



Fuente: I. Carmona. Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)



Fuente: MAGRAMA

#### **Escenario SSP: pastizal de dehesa tipo en Extremadura**

Hectárea de pastizal desarbolada en una dehesa tipo definida a partir de datos de 22 explotaciones extremeñas. Existe laboreo regular para eliminar el matorral. Rebaño mixto de vacas, ovejas, cerdas y cabras dedicado a la producción de carne. Carga ganadera de 0.6 UGM/ha. Ladera con pendiente del 10% y longitud de pendiente de 50 m. Suelo con textura franco arenosa.

## ESTUDIOS DE CASO



Fuente: A.B. Robles. Estación Experimental del Zaidín (EEZ-CSIC)

### Escenario MDE: albardar en la Sierra de los Filabres (Almería)

Matorral denso con predominio de albaida (*Anthyllis cytisoides*). Cobertura de herbáceas despreciable (crecen en la base de las plantas de matorral). Rebaño de cabras murciano-granadinas con orientación leche-carne en régimen semiextensivo. Carga ganadera de 0,08 UGM/ha. Ladera con pendiente del 40% y longitud de pendiente de 75 m. Suelo con textura franco arenosa.

### Escenario SAR: regadíos del acuífero Mancha Oriental (Albacete)

Superficie de regadío (actualmente en torno a las 82.000 ha) que riega con agua del acuífero Mancha Oriental, en la cuenca hidrográfica del Júcar. Se prevé sustituir con aguas superficiales hasta 80 hm<sup>3</sup> de los actualmente bombeados al acuífero.



Fuente: A. Domínguez. Universidad de Castilla-La Mancha

## Los datos de partida: Fuentes para alimentar la caracterización de los escenarios de simulación.

Es lógico pensar que una de los principales obstáculos para la utilización del Sistema de Alerta Temprana, como en general para cualquier modelo de dinámica de sistemas, pueda ser la *disponibilidad de datos de partida* para caracterizar los estudios de caso y los escenarios de simulación. Un vistazo a la bibliografía de esta publicación puede orientar sobre el tipo de fuentes que se han utilizado para caracterizar los estudios de caso.

Obviamente, buena parte de los parámetros necesarios (meteorológicos, socioeconómicos) se pueden obtener a partir de fuentes oficiales como la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), el Instituto Nacional de Estadística (INE), los Anuarios de Estadística Agraria del MAGRAMA, o incluso de publicaciones e informes técnicos de organismos nacionales o regionales, incluso internacionales, como el caso de la FAO.



Pero hay otro grupo de parámetros, los relacionados fundamentalmente con el suelo y su comportamiento en función del clima y del tipo de cubierta y de manejo, en los que el usuario puede encontrar ciertas dificultades. Siendo cierto de alguna manera, también lo es que el SAT supone una oportunidad para aprovechar los numerosos estudios y trabajos realizados tanto por la administración, por como por los, también numerosos, grupos de investigación dedicados al seguimiento y evaluación de los procesos de desertificación en España.

Afortunadamente nuestro país, uno de los más afectados por la desertificación de entre los países desarrollados, cuenta con una extensa comunidad científico-técnica que ha desarrollado trabajos en todos los paisajes de desertificación que se han modelado en SAT. Todos estos trabajos incluyen exhaustivas tomas de datos en campo, análisis de dichos datos, ensayos de distintas técnicas de manejo del suelo, prospecciones socioeconómicas, etc., mantenidos en muchos casos a lo largo de años de investigación y seguimiento. Suponen, sin duda, excelentes fuentes potenciales de alimentación de los modelos.

Por ejemplo, en los estudios de caso que se presentan en esta publicación, han sido clave los datos procedentes de las líneas de investigación de grupos como:

- Grupo de Investigación GeoAmbiental, del Área de Geografía Física de la Universidad de Extremadura
- Grupo de Pastos y Sistemas Silvopastorales Mediterráneos de la Estación Experimental del Zaidín (CSIC).
- Departamento de Desertificación y Geoecología de la Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA-CSIC).
- Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)

Buena parte de estos datos, sobre todo los relacionados con tasas de erosión y con la escorrentía superficial, proceden de parcelas y cuencas experimentales en las que se realiza un seguimiento a largo plazo del ciclo hidrológico y de la erosión.

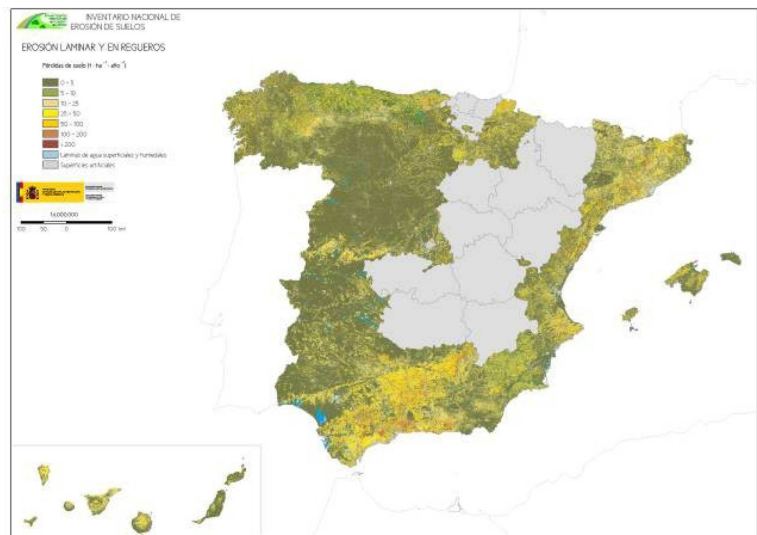
La administración, por su parte, ha dedicado grandes esfuerzos a la puesta en marcha y mantenimiento de instrumentos de medición y seguimiento de la desertificación. A modo de ejemplo se pueden citar:

- El Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES), y su antecedente el Mapa de Estado Erosivos (MEE) del MAGRAMA.
- La Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL), Proyecto LUCDEME, del MAGRAMA.
- Estudios e inventarios de erosión a nivel regional, comarcal o a escala de proyecto.



Fuente: Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)

Figura 7: Vista de la plantación y de las parcelas experimentales de Benacazón, pertenecientes a la Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL)



Fuente: MAGRAMA

Figura 8: Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES). Toma de datos en campo y cartografía de erosión laminar y en regueros.

Para los modelos de sistemas de regadío, son de utilidad los estudios relacionados con la planificación hidrológica de las cuencas hidrográficas, así como los trabajos del Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) del CEDEX, en particular las simulaciones del modelo SIMPA.

De gran interés son también los estudios elaborados por el sector privado, asociaciones o entidades de cualquier tipo relacionadas con el sector agrícola y forestal, que cada vez dedican más recursos a la recopilación y divulgación de datos de utilidad relacionados con su actividad. Como ejemplos de fuentes utilizadas en los estudios de caso que se presentan en esta publicación se pueden citar: los datos de tipo económico y de rendimientos obtenidos de publicaciones de la Asociación Española de Municipios del Olivo (AEMO), o los datos de regadíos de la Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental (JCRM).

### Estimación de tendencias esperadas (Trayectorias temporales)

Como dijimos, con la utilidad de “Estimación de tendencias esperadas” el SAT nos permite la obtención y representación por medio de un gráfico de las trayectorias temporales de las variables endógenas más relevantes del modelo, es decir, de aquellas que son generadas por medio de una ecuación. La Tabla 1 reúne el conjunto de variables que se pueden visualizar como trayectorias temporales para cada modelo.

SSP, MDE	CLE, CES	SAR
Biomasa disponible	Erosión anual	Altura agua acuífero
Cobertura matorral	Erosión	Consumo por hectárea
Cobertura pasto	Escorrentía	Coste agua por hectárea
Erosión	Evapotranspiración anual	Descarga natural
Escorrentía	Humedad suelo	Evapotranspiración
Hembras reproductoras	Infiltración	Margen bruto por hectárea
Infiltración	Margen bruto por hectárea	Precio agua
Margen bruto por reproductora	Precipitación anual	Precio energía
Precio alimentación suplementaria	Profundidad suelo	Precio producción
Precio producto	Rendimiento por hectárea	Precipitación anual
Precipitación anual		Recarga
Producción pasto por hectárea		Rendimiento por hectárea
Producción pasto		Rentabilidad relativa esperada
Producción por reproductora		Superficie regadío
Profundidad suelo		
Superficie matorral		
Superficie pasto		

Tabla 1. Variables que se pueden visualizar como trayectorias temporales para cada caso.

La aplicación SAT permite **comparar las trayectorias con las de otra simulación**. El usuario puede así realizar y comparar distintos ejercicios de simulación, principalmente de dos maneras:

1. *Sobre un mismo estudio de caso*, modificando determinados valores de los parámetros que caracterizan el “escenario de simulación”, de forma que se puede comparar el comportamiento de las variables ante determinados cambios en el futuro, por ejemplo: en la cantidad de precipitación, en la intensidad de la lluvia (a través del coeficiente de escorrentía), en la temperatura, y por tanto en la evapotranspiración, etc.

En algunos modelos es posible también comparar las tendencias esperadas ante cambios en el escenario relacionados con decisiones de manejo, como puede ser el parámetro de

“aumento de reproductoras si el margen bruto aumenta el 10%”, o con aspectos económicos como la “media del precio de la alimentación suplementaria” o las “subvenciones por hectárea”.

2. *Comparar distintos estudios de caso*, modificando los valores iniciales que lo caracterizan.

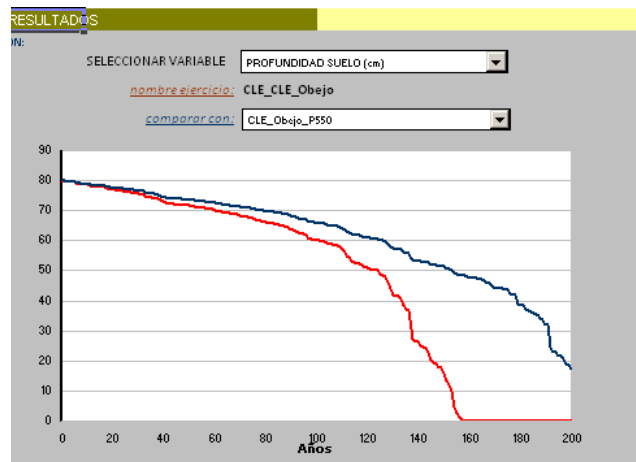
Por ejemplo, se puede estudiar cómo varía la “profundidad del suelo” si en lugar de tomar como variable de partida una tasa de erosión determinada, correspondiente a un laboreo convencional, se considera una tasa correspondiente a prácticas de agricultura de conservación, como la siembra directa o el laboreo mínimo.

Otro ejemplo: modificando el parámetro “profundidad suelo donde porosidad se reduce a la mitad de su valor inicial” se especifican distintas distribuciones de porosidad en el perfil del suelo. En muchos casos esta característica es poco conocida y, sin embargo, juega un papel clave a la hora de determinar el comportamiento dinámico de la tasa de erosión a medio y largo plazo. Utilizando distintos valores del mencionado parámetro es posible evaluar qué diferencias en los resultados traen consigo distintas distribuciones de porosidad posibles

### EJEMPLOS DE MODIFICACIONES DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN

La disminución de la precipitación media anual retrasa el tiempo estimado para la pérdida de suelo

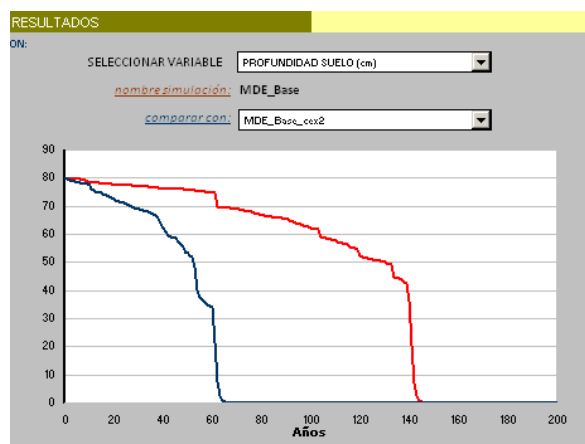
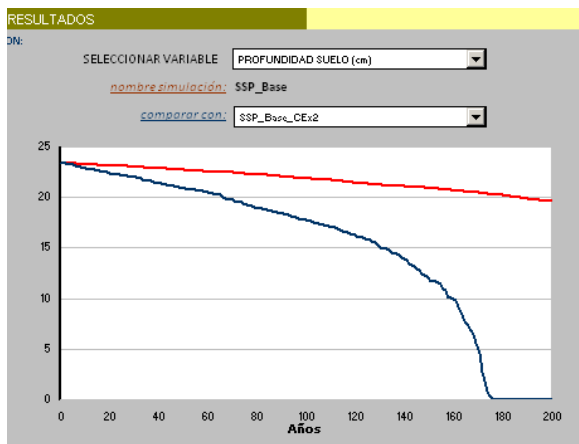
Olivar en Córdoba	Escenario 1	Escenario 2
Precipitación (mm)	618,8	<b>550,0</b>
Coefficiente de escorrentía	0,09	0,09
Tiempo para pérdida de suelo (años)	160	<b>&gt;200</b>



Un aumento del coeficiente de escorrentía adelanta el tiempo estimado para la pérdida de suelo

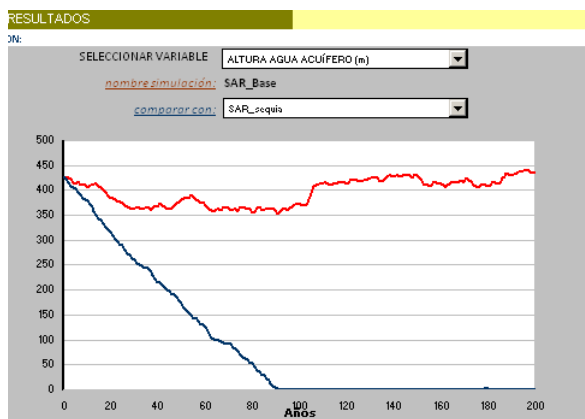
Dehesa extremeña	Escenario 1	Escenario 2
Precipitación (mm)	494,91	494,91
Coefficiente de escorrentía	0,062	<b>0,12</b>
Tiempo para pérdida de suelo (años)	>>>200	<b>180</b>

Matorral S <sup>a</sup> Filabres	Escenario 1	Escenario 2
Precipitación (mm)	300	300
Coefficiente de escorrentía	0,058	<b>0,11</b>
Tiempo para pérdida de suelo (años)	142	<b>62</b>

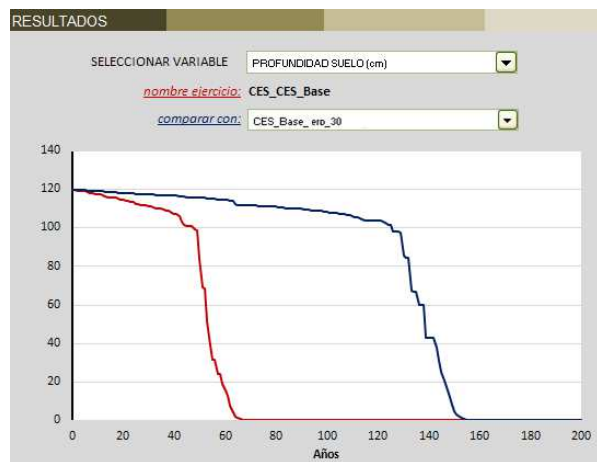


La disminución de la precipitación media anual acelera el tiempo estimado para la pérdida del recurso de agua subterránea.

Regadio La Mancha	Escenario 1	Escenario 2
Precipitación (mm)	358,5	<b>200</b>
Tiempo para agotamiento del acuífero (años)	>>>200	<b>90</b>



### EJEMPLOS DE COMPARACIÓN DE MODIFICACIONES EN LOS VALORES QUE CARACTERIZAN EL ESTUDIO DE CASO



Cereal en Córdoba	Escenario 1	Escenario 2
Precipitación (mm)	618,8	
Media erosión anual inicial (t/ha•año)	27,35	<b>9,12</b>
Tiempo para pérdida de suelo (años)	61	<b>150</b>

Cereal de secano en una ladera con pendiente del 12% y unas tasas de erosión media anual de 27,35 t/ha•año<sup>2</sup>. Suponiendo un cambio de manejo que consiguiera reducir a la tercera parte las pérdidas, el tiempo que la trayectoria simula para la pérdida total del suelo se retrasaría de los 61 a los 150 años

<sup>2</sup> Dato tomado del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES). Provincia de Córdoba.

### Estimación de riesgos de desertificación y de plazos previsible para la degradación

Recordemos que las estimaciones de riesgos y plazos de la desertificación, o en breve, los *análisis de riesgos*, consisten, tal como se ha programado en SAT, en simular 1.000 veces cada modelo DS bajo escenarios diferentes que se obtienen generando trayectorias aleatorias de variables como la precipitación (cantidad e intensidad) o los precios de mercado. Cada una de las simulaciones genera el tiempo que las variables indicadoras de desertificación tardan en agotarse (suelo, producción vegetal, agua del acuífero, superficie agrícola). El riesgo de desertificación de un sistema se cuantifica como el porcentaje de las 1.000 simulaciones que acaban mostrando un sistema degradado antes de un cierto plazo de tiempo que debe ser fijado por el usuario.

Asimismo, recordemos que, además del horizonte temporal para estimar el riesgo de desertificación, es el propio usuario el que especifica los “umbrales de desertificación”.

La Tabla 2 recoge las variables indicadoras para cada paisaje del PAND. En el caso de los sistemas agro-silvo-pastorales y de los matorrales degradados y eriales la invasión de matorral también se contempla como riesgo de desertificación (“desierto verde”).

SSP, MDE	CLE, CES	SAR
Tiempo para invasión matorral	Tiempo para pérdida suelo	Tiempo para sobreexplotación
Tiempo para pérdida matorral		Tiempo para pérdida regadío
Tiempo para pérdida suelo		
Tiempo para pérdida pasto		

Tabla 2. Variables que recogen los resultados de los análisis de riesgo

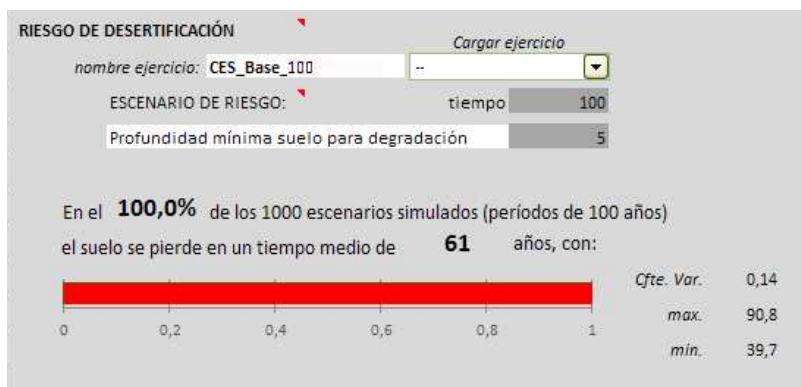
En los estudios de caso de los que se presentan los resultados, se han empleado dos horizontes temporales distintos: 100 y 2.000 años. Con el primero se ha querido localizar aquellos casos con mayores amenazas y con el horizonte a 2.000 años se ha buscado que los riesgos de degradación se sitúen en el 100% para poder así estimar adecuadamente los tiempos esperados para la desertificación.

En cuanto a los umbrales de degradación asignados, en todos los casos se ha considerado que el sistema se degrada cuando pierde la práctica totalidad de un recurso. Este criterio puede parecer poco exigente (la degradación se produce *antes* de llegar a esa pérdida extrema) pero al menos evita ser calificado de subjetivo. Así, en relación al suelo, se ha considerado que en una simulación un estudio de caso se degrada cuando su profundidad desciende por debajo del *valor entero* más próximo al 5% de la profundidad inicial (esto es, cuando prácticamente se pierden todos los horizontes del suelo).

El caso que ha manifestado un nivel de alerta más crítico es el de los cultivos herbáceos de secano en Baena. Este sistema se degradó en el 100% de las 1000 simulaciones realizadas hasta el año 100 (riesgo del 100% a 100 años). En ellas, la estimación del tiempo medio para la pérdida del suelo fue de 61 años. Los regadíos del acuífero Mancha Oriental también han manifestado un nivel de alerta importante, aunque aquí el riesgo de degradación no afectaría al recurso subterráneo sino a la superficie regada con él. En efecto, esta superficie mostró un riesgo de desaparición del 88.2% a 100 años. El plazo medio para esa pérdida se situó en 58 años. Los casos del olivar en Obejo y del matorral en la Sierra de los Filabres muestran niveles de alerta moderados, con plazos medios estimados para la pérdida del suelo de 169 y 186 años, respectivamente. El pastizal de dehesa extremeña es el que mostró un menor nivel de alerta al cifrarse el tiempo medio para la pérdida del suelo en 352 años.

## EJEMPLOS DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

### Alternativa de trigo-girasol en Baena (Córdoba)



Fuente: I. Carmona. Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)

Puesto que en el 100% de las simulaciones el suelo ya se ha perdido antes de 100 años, no fue necesario realizar el análisis a 2.000 años.

Partiendo de una tasa media de erosión inicial empleada de 27,35 t/ha•año, el tiempo medio estimado para dicha pérdida es de 61 años.

#### *Nivel de alerta crítico*

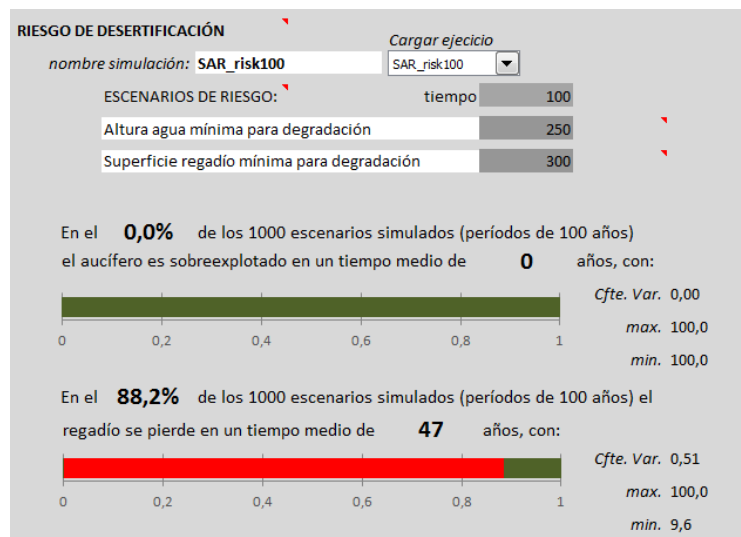
A pesar de que, en este caso, la pendiente elevada (12%) contribuye al alto riesgo de desertificación, la pérdida total del suelo en seis décadas parece una estimación poco realista, si es tomada en sentido literal. Pero es preciso reiterar que los resultados obtenidos con los análisis de riesgos del SAT no deben ser considerados predicciones cuantitativas sino cualitativas, esto es, evaluaciones de tendencias y del nivel de alerta que afecta a cada estudio de caso. Este es el objetivo del SAT, alertar con anticipación de aquellas situaciones que requieren atención temprana.



## EJEMPLOS DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

### Regadíos del acuífero Mancha Oriental (Albacete)

En este caso la *altura del agua en el acuífero* no desciende por debajo del umbral mínimo establecido para ella en ninguna de las simulaciones realizadas.

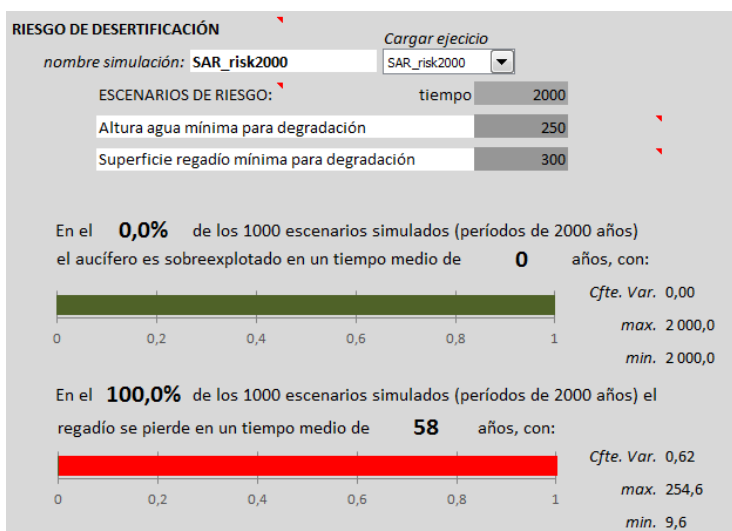


En cambio, la *superficie de regadío* prácticamente desaparece en un 88,2% de las 1.000 simulaciones llevadas hasta el año 100. Se trataría de un riesgo de degradación, no a nivel medioambiental, sino económico y social.

Aquí el riesgo no afectaría al acuífero sino a la superficie regada con él. Se trataría de un riesgo de degradación, no a nivel medioambiental, sino económico y social.

Estos resultados indican que el número de años que se mantiene la actividad agraria de regadío en una simulación es muy sensible a cómo resulten en ella las series generadas aleatoriamente de precios (percibidos y pagados) y de precipitación (frecuencia de aparición de sequías e intensidad de las mismas).

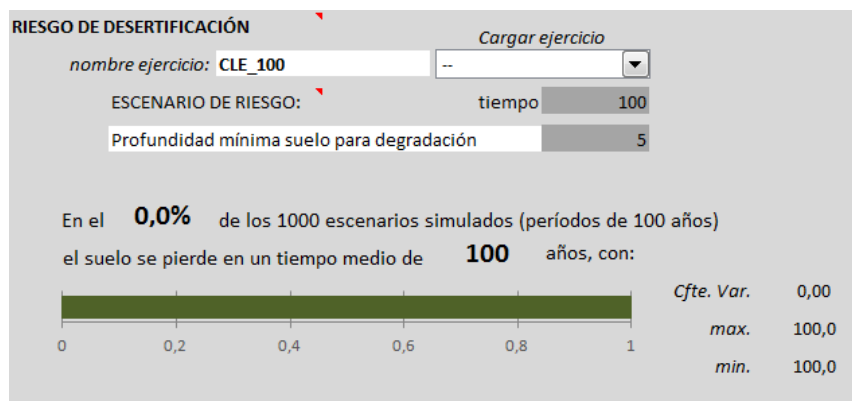
Ello estaría indicando que la agricultura de regadío se movería, en la zona de estudio, dentro de márgenes de rentabilidad muy cortos, por lo que su evolución resulta muy sensible *incluso al mero azar*.



Fuente: A.Domínguez. Universidad de Castilla-La Mancha

## EJEMPLOS DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

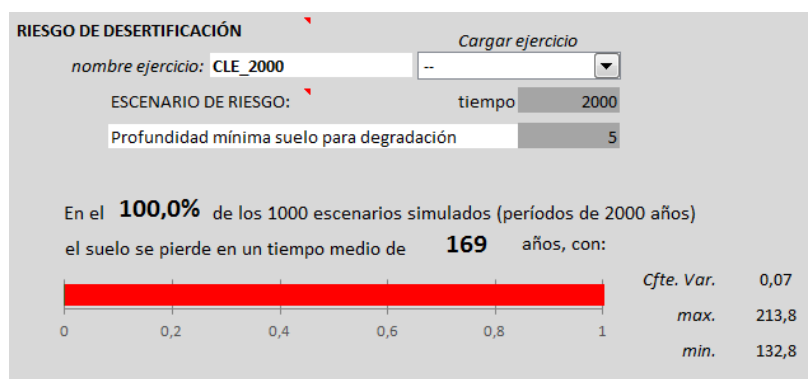
### Olivar en Córdoba



El riesgo de degradación a 100 años es del 0%

La simulación muestra que, en el olivar en Obejo, el suelo se pierde en 169 años, con coeficiente de variación del 7% y rango mínimo/máximo de 133 a 214 años.

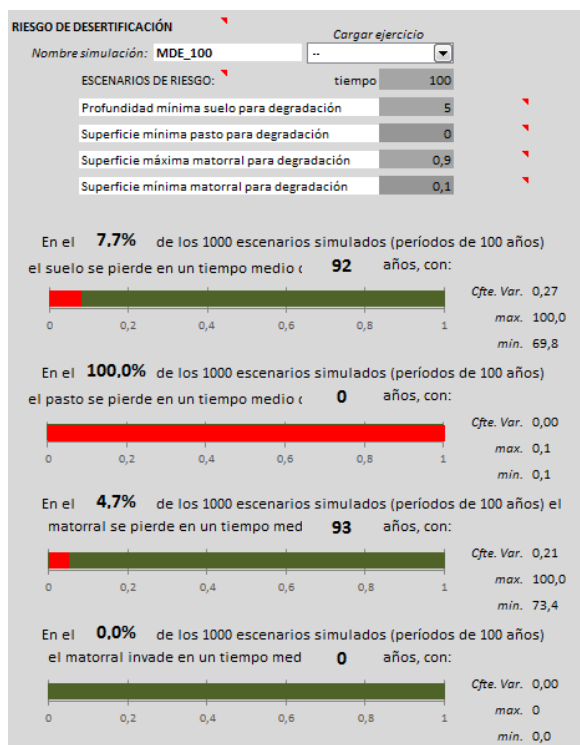
*Nivel de alerta moderado.*



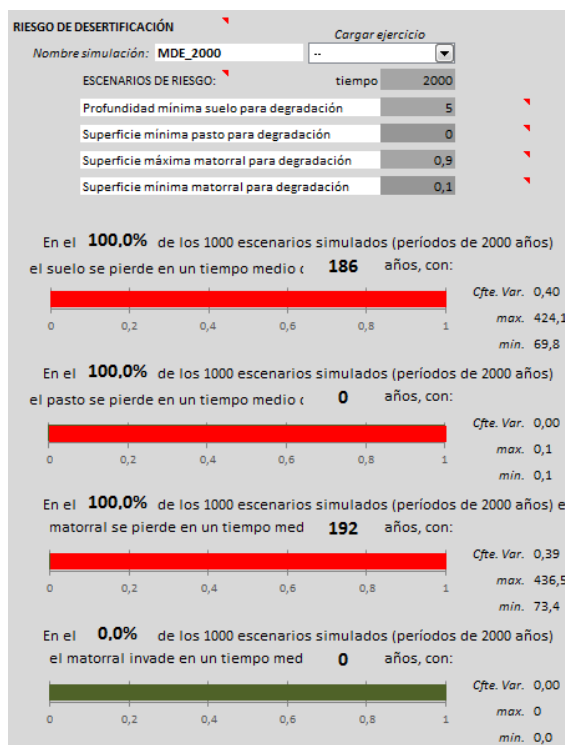
Fuente: J.A: Gómez. Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)

## EJEMPLOS DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

### Albaidar en la Sierra de los Filabres (Almería)<sup>3</sup>

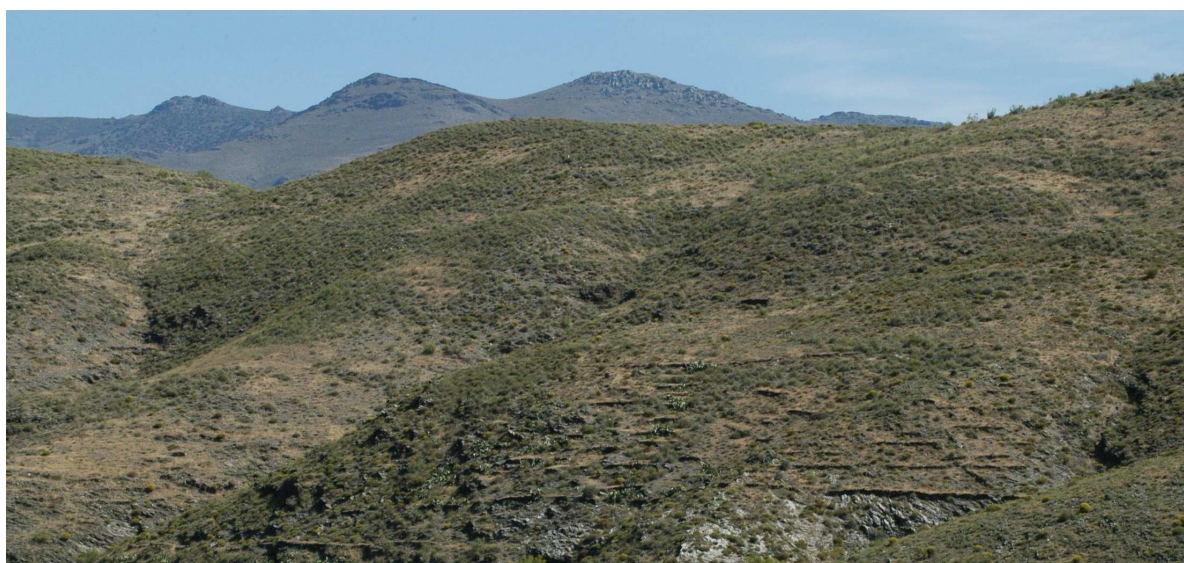


Los riesgos de pérdida del suelo y matorral antes de 100 años son del 7,7% y del 4,7%, respectivamente



El suelo se pierde en un plazo medio de 186 años y el matorral en un tiempo medio de 192 años

*Nivel de alerta moderado*

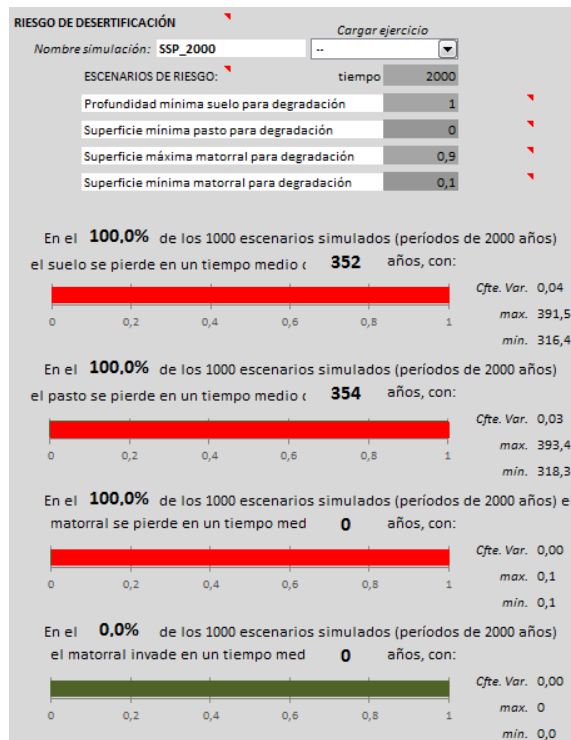
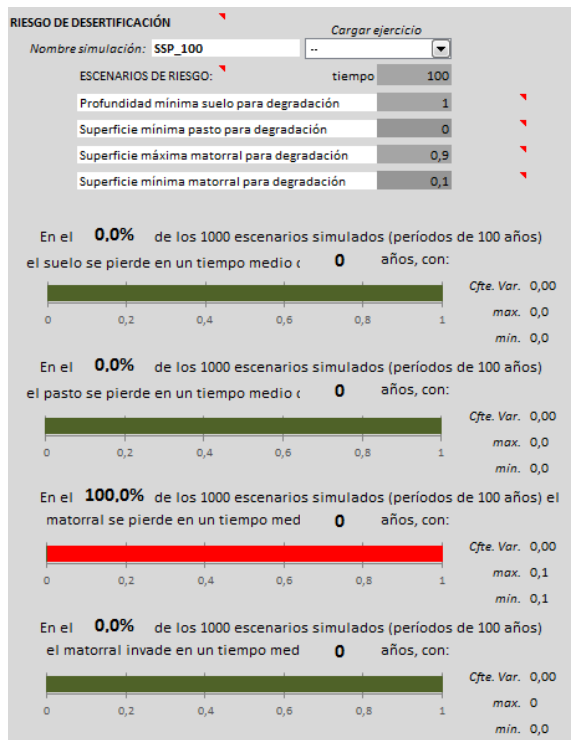


Fuente: A.B. Robles. Estación Experimental del Zaidín (EEZ-CSIC)

<sup>3</sup> En este estudio de caso no existe cobertura de pasto (de herbáceas), de ahí que el sistema indique que éste se pierde en 0 años en el 100% de las simulaciones.

## EJEMPLOS DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

### Pastizal de dehesa tipo en Extremadura<sup>4</sup>



El riesgo de degradación a 100 años es del 0% Los tiempos estimados para la pérdida tanto del suelo como del pasto, están cercanos a los 350 años

La imagen muestra la degradación del suelo por erosión hídrica en una dehesa extremeña con ganado ovino provocada por la concentración de los animales en una parte de la finca

De los casos estudiados, el pastizal de dehesa extremeña es el que mostró un *menor nivel de alerta de degradación* no obstante, son frecuentes situaciones de degradación, generalmente causadas por un manejo ineficiente del ganado.



Fuente: S. Schnabel. Universidad de Extremadura

<sup>4</sup> En este estudio de caso no existe cobertura de matorral, de ahí que el sistema indique, por un lado, que éste se pierde en 0 años en el 100% de las simulaciones y, por otro, que el matorral invade la hectárea modelada en el 0% de las simulaciones.

### **Clasificación de factores según su impacto en los procesos de desertificación.**

El SAT permite analizar, mediante el procedimiento de análisis de sensibilidad conocido como Plackett-Burman, los impactos de los parámetros de escenario a futuro (es decir, sobre los que conforman el escenario de simulación propiamente dicho, no los valores iniciales) sobre las variables objetivo seleccionadas (es decir las variables indicadoras de desertificación o los “*tiempos hasta la degradación*”).

La utilidad de la aplicación SAT “Ordenar factores de riesgo” genera la relación de parámetros y sus impactos ordenados de mayor a menor sobre las siguientes variables objetivo:

#### *Modelos CLE-CES*

- Tiempo hasta la caída de la profundidad del suelo por debajo de su umbral mínimo

#### *Modelos SSP-MDE*

- Tiempo hasta la caída de la superficie de pasto por debajo de su umbral mínimo
- Tiempo hasta la caída de la profundidad del suelo por debajo de su umbral mínimo
- Tiempo hasta que la superficie de matorral supera su umbral máximo

#### *Modelo SAR*

- Tiempo hasta la caída de la superficie de regadío por debajo de su umbral mínimo
- Tiempo hasta la caída de la altura del agua en el acuífero por debajo de su umbral mínimo

Los cuadros siguientes recogen los resultados de la clasificación de factores según su impacto para los estudios de caso analizados. Recuérdese que los impactos que proporciona el SAT indican el *porcentaje de variación experimentado por el "tiempo hasta la degradación" al aumentar en un 10% el valor de un cierto parámetro*. Así, los resultados deben interpretarse de la siguiente forma: un aumento del 10% en los parámetros de la columna de la izquierda conlleva un aumento (% con signo positivo) o disminución (% con signo negativo) del tiempo de pérdida de la variable objetivo de que se trate.

Al evaluar los cinco estudios de caso mediante análisis de sensibilidad se ha encontrado que, en todos ellos, la **precipitación anual media es el factor con mayor impacto sobre la degradación (o sobre la sostenibilidad)**. Al aumentar dicha variable se ha anticipado la degradación en los casos analizados de olivar, cultivos herbáceos de secano y pastizal de dehesa. Ello se debe a que, en tales casos, el efecto más importante del aumento de la precipitación es el del incremento de las escorrentías superficiales y, por tanto, de las tasas de erosión. En cambio, aumentar la precipitación media ha supuesto retrasar tanto la degradación del matorral como la desaparición de los regadíos analizados. En el primero, porque la precipitación ha tenido una incidencia mayor sobre el desarrollo de la vegetación que sobre las escorrentías; en el segundo, porque la precipitación ha supuesto mayor abundancia de agua subterránea para los regadíos. **La importancia de**

**la media de la precipitación ha sido significativamente mayor que la de su intensidad** (asumiendo tasas de variación similares) en los cuatro casos en los que la erosión es el agente de la degradación.

Las **variables económicas** forman parte intrínseca de las estructuras de ecuaciones de tres de los cinco sistemas evaluados: pastizales de dehesa, matorral y regadíos. **En los estudios de caso de matorral y regadíos han resultado ser importantes factores potenciales de degradación.** En efecto, variaciones tendentes a incrementar el margen por reproductora, y con ello la carga ganadera, adelantan significativamente la degradación del albardar de la Sierra de los Filabres. Por el contrario, variaciones tendentes a reducir los márgenes por hectárea en la Mancha Oriental adelantan de forma importante el abandono de los regadíos. Los cambios en las variables económicas apenas han mostrado efectos sobre la degradación del pastizal de dehesa.

Análisis de sensibilidad en cultivos leñosos (CLE) y extensivos de secano (CES) con riesgo de erosión	Olivar en Obejo (Córdoba)	Alternativa trigo-girasol en Baena (Córdoba)
	VARIABLES OBJETIVO	VARIABLES OBJETIVO
<b>Factores que intervienen en los modelos CLE y CES</b>	Tiempo pérdida suelo	Tiempo pérdida suelo
1) Media precipitación anual	-22,2%	-22,9%
2) Media coeficiente escorrentía en seco	-6,1%	-8,1%
3) Meses recarga suelo	-3,5%	3,0%
4) Evapotranspiración anual cultivo condiciones estándar	2,1%	4,1%
5) Fracción evapotranspiración meses recarga suelo	1,2%	3,3%
6) Cfte. variación del coeficiente de escorrentía en seco	1,0%	-6,9%
7) Coeficiente variación precipitación anual	-0,6%	0,8%
8) Fracción precipitación meses recarga suelo	-0,5%	-5,7%
9) Meteorización	0,1%	0,3%
<p>Un aumento de la <i>precipitación media anual</i> en un 10% supone un acortamiento del tiempo para la pérdida del suelo del 22,2% en el olivar de Obejo y del 22,9% en los cultivos herbáceos de Baena</p> <p>Al aumentar la media del <i>coeficiente de escorrentía en seco</i> (variable que, recordemos, emula a la <i>intensidad de la precipitación</i> en los modelos DS) en un 10%, el tiempo transcurrido hasta la pérdida del suelo se acorta un 6,1% en el olivar en Obejo y un 8,1% en los cultivos herbáceos en Baena.</p> <p>La variabilidad de la precipitación anual y de su intensidad, esto es, de sus coeficientes de variación, no muestra efectos significativos sobre la pérdida del suelo en ninguna de las dos aplicaciones.</p>		
<p>A la vista de que los <b>impactos asociados a la cantidad de precipitación son bastante mayores que los asociados a su intensidad</b>, cabría esperar que, un escenario futuro en donde las precipitaciones anuales se redujeran, pero donde aumentasen sus intensidades medias en <i>tasas porcentuales similares</i>, trajera consigo cierto retraso de la pérdida del suelo.</p>		

Análisis de sensibilidad en sistemas agro-silvo-pastorales afectados de sobrepastoreo (SSP)	Pastizal de dehesa tipo en Extremadura	
	Variables objetivo	
Factores que intervienen en el modelo SSP	Tiempo pérdida suelo	Tiempo pérdida pasto
1) Media precipitación anual	-22,80%	-22,50%
2) Media coeficiente escorrentía en seco	-10,50%	-10,30%
3) Evapotranspiración anual condiciones estándar	-3,20%	3,10%
4) Fracción evapotranspiración meses recarga suelo	3,10%	3,10%
5) Fracción precipitación meses recarga suelo	-2,80%	-2,70
6) Coeficiente variación precipitación anual	-2,60%	-2,60%
7) Media precio producto	-2,20%	-2,20%
8) Meteorización	-1,00%	1,00%
9) Otros costes por reproductora	1,00%	-1,00%
10) Subvención por hectárea	-1,00%	1,00%
11) Coeficiente variación coeficiente escorrentía en seco	1,00%	-1,00%
12) Media precio alimentación suplementaria	0,30%	0,30%
13) Meses recarga suelo	0,30%	0,30%
14) Ingresos por reproductora otras producciones	-0,10%	-0,10%
15) Aumento reproductoras si margen bruto aumenta	0,00%	0,00%
16) Tiempo alisado margen bruto	0,00%	0,00%
17) Coeficiente variación precio producto	0,00%	0,00%
18) Coeficiente variación precio alimentación suplementaria	0,00%	0,00%
Los factores cuya variación en un futuro más podrían acelerar la degradación en el caso de estudio de la dehesa extremeña son los relacionados con la <i>cantidad</i> y la <i>intensidad de la precipitación</i> .	Los factores de tipo económico no parecen entrañar riesgos de degradación para la dehesa, al menos a gran escala	

Análisis de sensibilidad en matorrales degradados y eriales (MDE)		Albaidar en la Sierra de los Filabres (Almería)	
		Variables objetivo	
Factores que intervienen en el modelo MDE		Tiempo pérdida suelo	Tiempo pérdida matorral
1)	Media precipitación anual	109,40%	110,20%
2)	Ingresos por reproductora otras producciones	-40,10%	-39,60%
3)	Media precio producto	-32,60%	-32,20%
4)	Coefficiente variación coeficiente escorrentía en seco	18,30%	17,40%
5)	Media precio alimentación suplementaria	15,40%	15,20%
6)	Otros costes por reproductora	12,20%	12,10%
7)	Subvención por hectárea	-5,70%	-5,70%
8)	Meses recarga suelo	4,00%	4,00%
9)	Coefficiente variación precipitación anual	-3,40%	-3,40%
10)	Aumento reproductoras si margen bruto aumenta 10%	-2,20%	-2,20%
11)	Meteorización	2,00%	2,10%
12)	Media coeficiente escorrentía en seco	-1,90%	-2,00%
13)	Tiempo alisado margen bruto	-1,60%	-1,60%
14)	Evapotranspiración anual condiciones estándar	-1,60%	-1,50%
15)	Coefficiente variación precio producto	-1,40%	-1,50%
16)	Coefficiente variación precio alimentación suplementaria	1,20%	1,30%
17)	Fracción precipitación meses recarga suelo	1,10%	1,10%
18)	Fracción evapotranspiración meses recarga suelo	-0,70%	-0,60%

<p><b>El albaidar de la Sierra de los Filabres se muestra extremadamente sensible a variaciones en el valor medio de la precipitación anual.</b></p> <p>Un aumento del 10% del mismo provoca que los tiempos para la pérdida del suelo y del matorral se alarguen en un 109,4% y un 110,2%, respectivamente.</p> <p>Pese a que parece razonable que en una zona árida la cobertura vegetal sea sensible a un aumento de la cantidad de precipitación, lo extremo de los resultados obtenidos sugiere la conveniencia de ahondar en cómo es la relación entre la humedad del suelo y el crecimiento del matorral en la zona de estudio, de forma que sea posible avanzar en su modelado</p>	<p>Los factores que influyen en el margen por reproductora y, a través de él, en la carga ganadera, ocupan por lo general posiciones elevadas en la clasificación por impactos. Aumentos del 10% en los ingresos obtenidos por la producción de carne y leche (que aumentan los márgenes y, por tanto, la carga ganadera) acortan los tiempos de pérdida del suelo y del matorral en porcentajes que se mueven entre el 32% y el 40%. Las subvenciones a la hectárea juegan un papel más modesto. Aumentarlas en un 10% trae consigo un acortamiento de los plazos hasta la degradación del suelo y del matorral de un 5,7%.</p>
--	--



Análisis de sensibilidad en sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación (SAR)		Regadíos del acuífero Mancha Oriental (Albacete)	
		Variable objetivo	
Factores que intervienen en el modelo SAR		Tiempo pérdida agua subterránea	<p>La clasificación de factores por su impacto en la <i>pérdida del agua subterránea</i> no proporciona información que pueda ser tenida en cuenta, fundamentalmente porque no es posible estimar impactos sobre la degradación de algo que prácticamente no se degrada.</p> <p>Esto debe tenerse presente siempre que un análisis de riesgo produzca resultados muy reducidos (0%, en caso de la altura del agua en el acuífero).</p>
1)	Media precipitación anual	4,90%	
2)	Evapotranspiración anual superficie no regada	-4,90%	
3)	Coefficiente variación precipitación anual	-1,50%	
4)	FMedia precio energía	1,10%	
5)	Otros costes por hectárea	1,00%	
6)	Recarga transferencias laterales	0,80%	
7)	Media precio producción	-0,70%	
8)	Eficiencia riego	-0,70%	
9)	Coefficiente variación precio energía	0,50%	
10)	Otros costes agua	-0,50%	
11)	Coste oportunidad por explotación	-0,40%	
12)	Dotación deseada por hectárea	-0,40%	
13)	Máxima superficie regadío no usa acuífero	0,40%	
14)	Agua abastecimiento	-0,30%	
15)	Tiempo alisado rentabilidad relativa	-0,20%	
16)	Consumo energético para elevar un m <sup>3</sup> un m	-0,20%	
17)	Coefficiente variación precio producción	0,20%	
18)	Año finalización actuaciones	0,10%	
19)	Subvención por hectárea	0,10%	
20)	Cuota riego por hectárea	-0,10%	

Análisis de sensibilidad en sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación (SAR) (continuación)		Regadíos del acuífero Mancha Oriental (Albacete)	
		Variable objetivo	
Factores que intervienen en el modelo SAR		Tiempo pérdida superficie regadío	
1)	Media precipitación anual	42,80%	<p>Siete de los ocho factores con impactos claramente significativos sobre la pérdida del regadío tienen una relación directa con el margen de explotación, y todos ellos apuntan en la dirección esperable: una modificación de los factores que implique un aumento del margen por hectárea retrasa el abandono de los regadíos.</p> <p>Destacan la media de la precipitación anual y la eficiencia de los sistemas de riego: incrementar estos factores en un 10% supone retrasar la pérdida del regadío cerca de un 42%.</p>
2)	Eficiencia riego	42,60%	
3)	Media precio producción	34,40%	
4)	Media precio energía	-28,80%	
5)	Consumo energético para elevar un m <sup>3</sup> un m	-27,90%	
6)	Evapotranspiración anual superficie no regada	-23,80%	
7)	Otros costes por hectárea	-21,00%	
8)	Dotación deseada por hectárea	-17,10%	
9)	Coefficiente variación precipitación anual	-14,20%	
10)	Coste oportunidad por explotación	10,10%	
11)	Subvención por hectárea	8,00%	
12)	Otros costes agua	-3,90%	
13)	Tiempo alisado rentabilidad relativa	3,30%	
14)	Máxima superficie regadío no usa acuífero	-2,70%	
15)	Recarga transferencias laterales	-2,30%	
16)	Coefficiente variación precio producción	-1,60%	
17)	Coefficiente variación precio energía	-1,20%	
18)	Cuota riego por hectárea	0,30%	
19)	Año finalización actuaciones	0,20%	

La clasificación de factores viene a confirmar la idea de que los regadíos en la Mancha Oriental estarían operando con márgenes de rentabilidad escasos, lo que los hace muy sensibles al comportamiento de las variables que alteran esa rentabilidad.

### **Un ejemplo de aplicación del SAT: evolución de los paisajes de desertificación bajo los escenarios de cambio climático**

Con objeto de ensayar la aplicación SAT y su funcionalidad, se ha realizado el ejercicio de estimar la evolución de los paisajes de desertificación representados en los estudios de caso bajo los escenarios de cambio climático. Se han utilizado los datos procedentes de los “Escenarios-PNACC 2012”: Nueva colección de escenarios de cambio climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) 2012.

Es importante poner de manifiesto que los expertos consideran que existe una alta incertidumbre en el comportamiento de los modelos climáticos en los valores extremos, sobre todo en lo relativo a las precipitaciones. Así, por ejemplo, para la variable de precipitación máxima diaria, que es uno de las variables que proporcionan las distintas proyecciones de cambio climático, no se están obteniendo resultados concluyentes en el signo y la magnitud del cambio. Es decir, en general, los cambios en las precipitaciones máximas diarias no reflejan tendencias significativas ni de disminución ni de aumento de las precipitaciones máximas. Esta cuestión condiciona a su vez las estimaciones a futuro de las intensidades de la lluvia, y por lo tanto de su capacidad de generar escorrentía y pérdidas de suelo.

El cuadro adjunto resume los resultados del ejercicio de comparar las trayectorias temporales en el caso del modelo para cultivos leñosos (CLE) comparando el escenario de partida del caso del olivar en Obejo (Córdoba) con un escenario de cambio climático. Se han planteado dos hipótesis de futuro: la primera considerando el pronóstico de incremento de temperatura (y por lo tanto de la evapotranspiración) y de disminución de precipitación; la segunda añadiendo además un aumento del coeficiente de escorrentía como consecuencia de un hipotético aumento en la frecuencia e intensidad de los episodios extremos de precipitación, hipótesis apuntada por numerosos expertos, pero que, sin embargo, como hemos dicho, no se ve bien reflejada en los modelos de cambio climático. Los resultados afianzan la conclusión obtenida con el análisis de sensibilidad, en el sentido de que el modelo refleja una mayor influencia en la pérdida de suelo de la disminución de precipitación que del aumento de la intensidad.

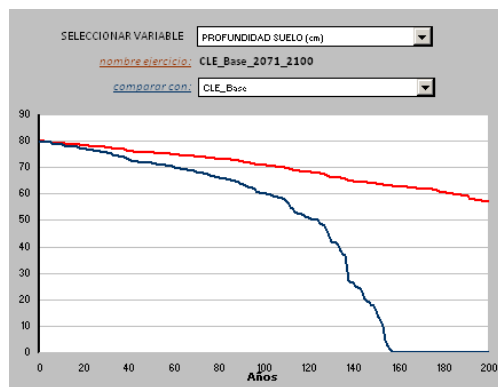
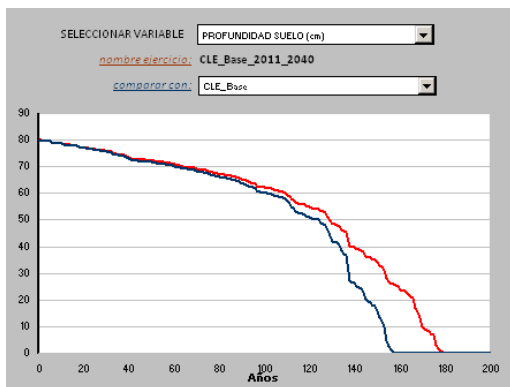
## Olivar en Obejo (Córdoba). Utilización del ejercicio de trayectorias temporales del SAT comparando el escenario de partida con un escenario de cambio climático

	Actual	2011-2040	2071-2100
Evapotranspiración anual del cultivo bajo condiciones estándar [cm/año]	51,04	54,72	60,01
% Variación respecto valor actual		7,21%	17,57%
Media de la precipitación total anual [mm/año]	618,79	600,69	463,72
% Variación respecto valor actual		-2,92%	-25,06%
Media coeficiente de escorrentía en seco [adml]	0,088	0,09	0,11
% Variación respecto valor actual 40		2,92%	25,06%

A los datos de la estación meteorológica utilizada en el caso de estudio se le han aplicado los porcentajes de variación de P y T obtenida en una de las proyecciones del proyecto ESTCENA utilizando el escenario de emisiones A1B (A1B\_ESTCENA FIC\_CN3)

**Hipótesis 1:** Disminución de la precipitación y aumento de la temperatura, sin contemplar variación en la intensidad de precipitación (el mismo coeficiente de escorrentía).

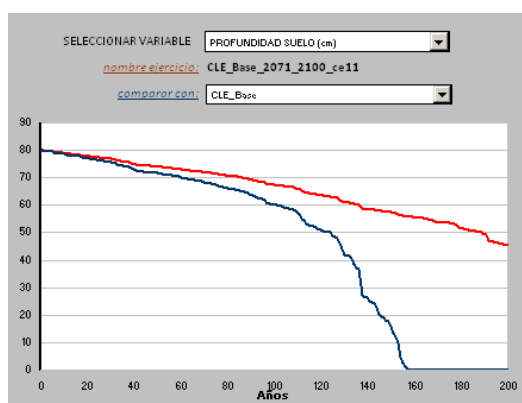
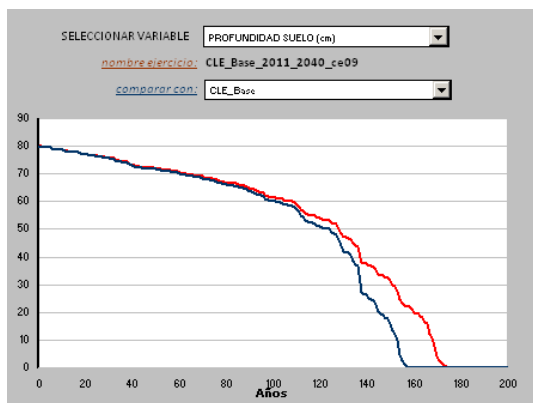
En rojo, la trayectoria temporal con los valores pronosticados para el periodo 2011-2040, en azul el escenario actual



Un escenario futuro con menor precipitación anual pero con igual intensidad de precipitación retrasa la pérdida del suelo, en pocos años con una reducción del 3% y un largo periodo para una reducción del 25%, que es la pronosticada para el periodo 2071-2100 por la proyección utilizada en este ejercicio.

**Hipótesis 2:** Disminución de la precipitación y aumento de la temperatura, suponiendo además un incremento del coeficiente de escorrentía en un porcentaje igual a la disminución de la precipitación. Intenta reflejar un escenario futuro en el que se produzcan más episodios de precipitación de levada intensidad.

En rojo, la trayectoria temporal con los valores pronosticados para el periodo 2011-2040, en azul el escenario actual



Suponiendo además un incremento de la intensidad de la precipitación de un porcentaje igual a la disminución de la precipitación, el retraso en la degradación es algo inferior, pero como se puede observar, el modelo refleja una mayor influencia de la disminución de precipitación que del aumento de la intensidad.

## CONCLUSIONES

Se ha hecho hincapié en que no se puede esperar que el SAT aporte predicciones, a la vista del sinnúmero de incertidumbres que condicionan cualquiera de los análisis que con él pueden realizarse. Esta indicación, que por un lado no es más que una obviedad, puede, por otro, llevar a plantearse hasta qué punto merece la pena la realización de todo el trabajo que aquí se ha expuesto. La cuestión puede plantearse en términos más concretos de la siguiente manera: esa evaluación no predictiva, o en cierto modo cualitativa, que aporta el SAT sobre el nivel de alerta de degradación que tiene un cierto estudio de caso ¿no es igualmente aportada por algunos indicadores muchísimo menos elaborados, en particular, la tasa media de erosión en los casos en que éste es el agente de la degradación, o la relación recarga/descarga en el caso de un acuífero?

La respuesta, claro está, depende del nivel de fiabilidad que se le quiera atribuir a un indicador. No obstante, trataremos de justificar por qué, a nuestro juicio, esos indicadores más sencillos admiten niveles de fiabilidad mucho menores que los resultados del SAT.

Una tasa de erosión anual media permite hacer una estimación sumamente sencilla del tiempo para la pérdida de un suelo. Basta para ello con dividir la profundidad de dicho suelo entre la tasa media de erosión, una vez que ésta se ha convertido, mediante la densidad aparente, en la altura media de suelo que se pierde anualmente. La tabla siguiente muestra, para los estudios de caso considerados en este trabajo, cuáles son los tiempos para la pérdida del suelo calculados de esta manera, llamémosla "ingenua" (segunda columna), los tiempos estimados con el SAT (tercera columna) y los porcentajes de desviación referidos a la estimación "ingenua" (cuarta columna).

Estudio de caso	Años estimación "ingenua"	Años estimación SAT	% Variación
Cultivos herbáceos Baena	200	61	-69%
Olivar Obejo	657	169	-74%
Albaidar Sierra de los Filabres	1.045	186	-82%
Pastizal dehesa Extremeña	1.739	349	-80%

Se observa que, de manera general, la estimación "ingenua" aporta plazos para la degradación mucho más largos que los obtenidos con el SAT. En términos generales, las diferencias son debidas al hecho de que los indicadores "ingenuos" tienen carácter estático mientras que, por el contrario, el SAT hace uso de modelos dinámicos, esto es, modelos que tienen en cuenta la dinamicidad de las variables en el tiempo. En efecto, la estimación "ingenua" emplea una única tasa de erosión media cuyo valor sería, previsiblemente, una estimación de la tasa media *actual*. Sin embargo, es sumamente inverosímil que la tasa actual permanezca invariable en el futuro, especialmente cuando la degradación es un proceso que, por lo general, se extiende hasta el medio o largo plazo.

Así, sólo a modo de ejemplo, la tasa de erosión media podrá variar porque lo haga la cobertura vegetal, y ésta hacerlo porque la carga ganadera cambie, lo cual podrá deberse, a su vez, a cambios en los precios de los mercados ganaderos.

En términos más concretos, las diferencias observadas entre las estimaciones "ingenuas" y las proporcionadas por el SAT son, en buena medida, el resultado de los procesos de realimentación positiva que tienen lugar conforme el suelo se pierde a lo largo del tiempo. En efecto, la erosión provoca que se vayan poniendo al descubierto capas de suelo cuya densidad aparente es cada vez mayor, o lo que es igual, cuya porosidad es cada vez menor. Una primera consecuencia es que las tasas de infiltración van a ir disminuyendo a lo largo del tiempo, por término medio, provocando así escorrentías cada vez mayores y, con ello, un *crecimiento acelerado* de la tasa media de erosión. Una segunda consecuencia del aumento progresivo de la densidad aparente superficial, que afecta a los casos en que existe vegetación natural (pastos y matorrales), es que la germinación de las semillas se ve dificultada, lo que se traduce en un aumento de la superficie de suelo desnudo que contribuye también al crecimiento acelerado de las tasas de erosión.

En definitiva, las estimaciones "ingenuas", dado su carácter estático, asumen que la pérdida de suelo evolucionará en el futuro de forma lineal, o con velocidad constante. Sin embargo, existen fundados motivos para pensar que esa evolución no será lineal sino que experimentará un crecimiento acelerado. Por esta razón el SAT, que sí tiene en cuenta los procesos más relevantes que pueden alterar la tasa de erosión a lo largo del tiempo, incluidos los mencionados bucles de realimentación positiva, arroja plazos para la degradación mucho más reducidos. En la figura 9 puede verse con claridad la no linealidad del proceso de pérdida del suelo que tiene lugar en el SAT.

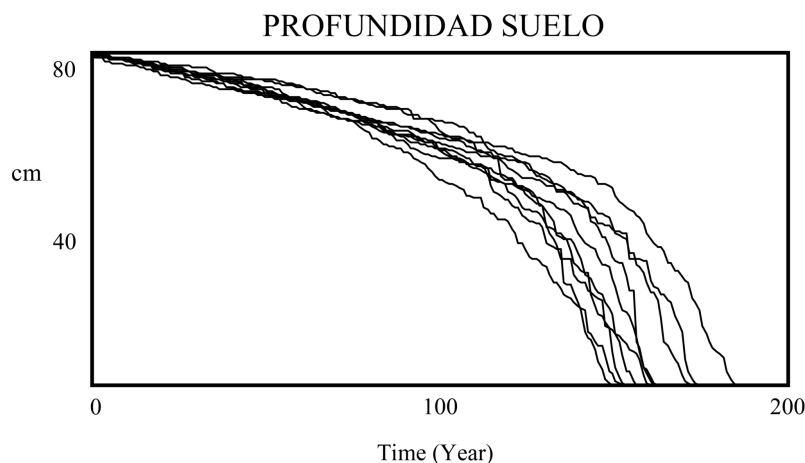


Figura 9. Trayectorias no lineales seguidas por la profundidad del suelo en 10 simulaciones distintas de uno de los modelos del SAT.

Las limitaciones que conlleva el carácter estático del indicador recarga/descarga en el caso de los regadíos sobre un acuífero son también muy claras. Se podría decir que un acuífero es explotado de forma sostenible por una superficie de regadío ya estabilizada, esto es, que ha dejado ya de desarrollarse, cuando la altura del agua subterránea, pese a la explotación, se mantenga en un

cierto nivel de equilibrio. Este nivel podrá oscilar debido a variaciones en la precipitación, o en las recargas laterales, o incluso en los bombeos del agua de riego, pero el calificativo de sostenible implica que el agua subterránea *más o menos* permanece estable aun en presencia de los bombeos.

Para que esa estabilidad sea posible, la recarga del acuífero y la descarga total del mismo (la descarga natural más los bombeos) deben ser, por término medio, iguales. Es decir, el indicador recarga/descarga debe valer aproximadamente uno. Pese a ser esto así, el equilibrio de la altura del agua subterránea con bombeos será, por lo general, inferior a la altura en equilibrio que tenía el agua antes de que existieran los bombeos. Y aquí está lo importante de este razonamiento. La única manera de que la altura del agua descienda desde el equilibrio (sostenible) sin bombeos hasta el equilibrio (sostenible) con bombeos es que exista un *periodo transitorio*, coincidente con el periodo de desarrollo de la superficie de regadío, en el que la descarga total sea superior a la recarga. Por tanto, incluso en un acuífero actualmente explotado de forma sostenible habrá existido, por necesidad, un periodo transitorio inicial en el que el indicador recarga/descarga fue inferior a uno, señalando con ello la posible sobreexplotación futura del acuífero (que luego no ocurrió).

Así pues, como pasa con la tasa media de erosión, el ratio recarga/descarga da idea de la situación *actual* del sistema, pero ignora que tanto el numerador como el denominador evolucionan dinámicamente. De esta forma, un valor menor que uno del indicador recarga/descarga *hoy* es condición necesaria, pero no suficiente, para la sobreexplotación en el futuro. Lo relevante sería dar respuesta a cuestiones como: ¿Cuál es la evolución previsible de la superficie regada? ¿Puede volver a valer uno el indicador recarga/descarga en algún momento? ¿Cuánto puede tardar en hacerlo? ¿Qué nivel tendrá el acuífero por entonces?

Aproximar la respuesta a estas preguntas significa tener en cuenta el conjunto de procesos dinámicos involucrados, o al menos los más notorios. Entre ellos se encuentran, por supuesto, las condiciones de los mercados y las políticas agrarias, pero también, una vez más, los bucles realimentados. En este caso, el más relevante es el bucle de realimentación negativa que existe entre la superficie en regadío, la altura del agua en el acuífero, el coste del bombeo y la rentabilidad de la actividad agraria. Este bucle juega a favor del recurso subterráneo y en detrimento del desarrollo de la superficie regada, aunque en modo alguno garantiza que sus efectos vayan a sentirse antes de que el acuífero haya sido esquilado. Ello dependerá de las condiciones particulares que se den en cada caso. El SAT, que reproduce dicho bucle en sus ecuaciones, permite evaluar su comportamiento en los distintos estudios de caso que con él se analicen.

Es evidente que resulta complejo conocer cuál puede ser el saldo final de toda la amalgama de procesos dinámicos que interactúan en un mismo sistema. Esta es una de las incertidumbres inherentes a este trabajo que nos impide aspirar a obtener con él predicciones. Pero el hecho de que en el SAT, no sólo se tenga en cuenta, sino que se represente de una forma coherente, la dinamicidad de los principales procesos que afectan a la degradación de los sistemas considerados nos lleva a

afirmar que sus estimaciones aseguran un grado de fiabilidad significativamente mayor que cualquier estimación estática.

Por otra parte, el SAT permite al usuario dar forma a las funciones mediante las cuales las distintas variables interactúan dentro de los procesos representados, asegurando siempre que se salvaguarda la coherencia y consistencia de las mismas. Ello aporta una gran flexibilidad a la hora de diseñar y realizar análisis en profundidad de los procesos de degradación y a la hora de explorar sus causas.

En suma, podemos concluir que la construcción del SAT supone un importante avance en el estudio de la desertificación en nuestro país y mejora nuestra capacidad para evaluar sus riesgos.

Sólo queda esperar que los distintos tipos de potenciales usuarios (investigadores, técnicos gestores, técnicos de asesoramiento de explotaciones agrarias, divulgadores, etc.) del Sistema de alerta temprana y estimación de riesgos de desertificación puedan encontrar de utilidad esta nueva herramienta, al mismo tiempo que contribuyan a su mejora continua.



## BIBLIOGRAFÍA

- AEMO. 2010. *Aproximación a los costes del cultivo del olivo: Cuaderno de conclusiones del seminario AEMO*. Asociación Española de Municipios del Olivo.  
[http://www.aemo.es/get.php?pathext=descargas/Costes\\_AEMO.pdf](http://www.aemo.es/get.php?pathext=descargas/Costes_AEMO.pdf)
- BERES, D.L., Hawkins, D.M. 2001. *Plackett-Burman technique for sensitivity analysis of many-parametered models*. Ecological Modelling 141: 171-183.
- CAMBERO MUÑOZ, P. 1998. *Cuaderno de la explotación de vacuno de carne*. Servicio Agrario de Caja Duero, Salamanca.
- CHJ. 2007. *Evolución del regadío en la Unidad Hidrogeológica 08.29 - Mancha Oriental*. Confederación Hidrográfica del Júcar, MAGRAMA.  
<http://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Paginas/MejoradelConocimiento.aspx>
- DÍAZ, F. 2003. *La rentabilidad de las explotaciones de cabras lecheras*. En Especial la cabra, Feria de Armilla. Revista La Cabra, febrero 2003.  
<http://www.lacabra.org/Revistarxiu.html>
- FAO. 2006. *Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO sobre riego y drenaje, 56. FAO, 322 pp.
- GARCÍA DORY, M.A., MARTÍNEZ VICENTE, J.S., VELA HERRERO, S. 1985. *Sistemas ganaderos extensivos*. Instituto de Economía Agraria y Desarrollo Rural, Madrid.
- GARIJO, L. 2010. *Experiencias de los Centros de Intercambio de Derechos en la Cuenca del Júcar*. Confederación Hidrográfica del Júcar, MAGRAMA.  
[http://www.aeuas.org/resources/pdf/lagunas\\_ruidera/04.pdf](http://www.aeuas.org/resources/pdf/lagunas_ruidera/04.pdf)
- GÓMEZ, J.A., GIRÁLDEZ, J.V., VANWALLEGHEM, T. 2008. *Comments on "Is soil erosion in olive groves as bad as often claimed?"* by L. Fleskens and L. Stroosnijder. Geoderma 147: 93-95.
- IBÁÑEZ, J.; MARTÍNEZ VALDERRAMA, J.; TAGUAS, E.V.; GÓMEZ, J.A. 2014. *Long-term implications of water erosion in olive-growing areas in southern Spain arising from a model-based integrated assessment at hillside scale*. Agricultural Systems. 127: 70-80
- IBÁÑEZ, J.; LAVADO CONTADOR, J.F.; SCHNABEL, S.; PULIDO FERNÁNDEZ, M.; MARTÍNEZ VALDERRAMA, J. 2014. *A model-based integrated assessment of land degradation by water erosion in a valuable Spanish rangeland*. Environmental Modelling & Software. 55, 201-213.
- IBÁÑEZ, J.; MARTÍNEZ VALDERRAMA, J.; PUIGDEFÁBREGAS, J. 2008. *Assessing desertification risk using system stability condition analysis*. Ecological Modelling. Vol 213 (2): 180 - 190.
- IBÁÑEZ, J.; MARTÍNEZ VALDERRAMA, J.; PUIGDEFÁBREGAS, J. 2008. *Assessing overexploitation in Mediterranean aquifers using system stability condition analysis*. Ecological Modelling. Vol 218: 260 - 266.
- IBÁÑEZ, J.; MARTÍNEZ VALDERRAMA, J.; SCHNABEL, S. 2007. *Desertification due to overgrazing in a dynamic commercial livestock-grass-soil system*. Ecological Modelling. Vol 205 (3-4): 277-288.
- ITAP. 2008. *Anuario Técnico ITAP*. Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete. Diputación de Albacete, Albacete. <http://www.itap.es/ITAP-Publicaciones/4Publicaciones/Publicaciones.asp>
- JUNTA DE ANDALUCÍA. Sin fecha. *Capacidad de uso y erosión de los suelos en el Valle central del río Guadalquivir*. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente. Junta de Andalucía.  
[http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques\\_Tematicos/Publicaciones\\_Divulgacion\\_Y\\_Noticias/Documentos\\_Tecnicos/Uso\\_y\\_erosion/PDFs/evaluacion10.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/Uso_y_erosion/PDFs/evaluacion10.pdf)

MARTÍNEZ VALDERRAMA, J.; IBÁÑEZ, J.; ALCALÁ, F.J.; DOMÍNGUEZ, A.; YASSIN, M.; PUIGDEFÁBREGAS, J. 2011. *The use of a hydrological-economic model to assess sustainability in groundwater-dependent agriculture in drylands*. Journal of Hydrology. Vol 402: 80-91.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, MAGRAMA. 2010. *Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Andalucía en 2009*. Subdirección General de Análisis, Prospectiva y Coordinación. MAGRAMA.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, MAGRAMA. *Inventario Nacional de Suelos (INES)*.

<http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-nacional-de-erosion-de-suelos/default.aspx>

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, MAGRAMA. *Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL) del Proyecto LUCDEME*. [http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-y-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch\\_resel.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-y-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch_resel.aspx)

ORTEGA, J.F., DE JUAN, J. A., TARJUELO, J.M. 2004. *Evaluation of the water cost effect on water resource management: Application to typical crops in a semiarid region*. Agricultural water management 66: 125-144.

PERNÍA, J.M., MOLINERO, A. 2006. *Estado de la masa de agua subterránea de la Mancha Oriental mediante indicadores cuantitativos y cualitativos*. IGME, 78 pp.

PLACKETT, R.L., BURMAN, J.P. 1946. *The design of optimum multifactorial experiments*. Biometrika 33: 305-325.

PUIGDEFÁBREGAS, J. (y 10 autores más). Sin fecha. *Estación experimental de Rambla Honda (Almería)*. EEZA-CSIC.

[http://www.eeza.csic.es/eeza/documentos/RAMBLA%20HONDA\(EEZA-CSIC\).pdf](http://www.eeza.csic.es/eeza/documentos/RAMBLA%20HONDA(EEZA-CSIC).pdf)

PUIGDEFÁBREGAS, J., SOLÉ, A., GUTIERREZ, L., DEL BARRIO, G., BOER, M. 1999. *Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain*. Earth-Science Reviews 48: 39-70.

PULIDO, F., HERNÁNDEZ, J.A., PULIDO, A.F. 2010. *Aproximación a la historia de la agricultura en Extremadura (y V). España en democracia (2010)*. La agricultura y la ganadería extremeñas, Informe 2010, pp. 237-253. Caja de Badajoz, Badajoz, Spain.

ROBLES, A.B. 1990. *Evaluación de la oferta forrajera y capacidad sustentadora de un agrosistema semiárido del sureste ibérico*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada.

ROBLES, A.B., GONZÁLEZ, J.L., PASSERA, C.B., BOZA, J. 2001. *Pastos de zonas áridas y semiáridas del sureste ibérico*. Archivos de Zootecnia 50: 501-505.

RODRÍGUEZ-ESTÉVEZ, V., GARCÍA, A., PEREA, J., MATA, C., GÓMEZ, A.G. 2007. *Producción de bellota en la dehesa: Factores influyentes*. Archivos de Zootecnia 56: 25-43.

ROJAS, R., ROLDÁN, J., LÓPEZ, R., ALCAIDE, M., CAMACHO, E. 1996. *El riego del olivar en la provincia de Jaén (II): Planificación de riegos*. Ingeniería del agua 3: 43-52.

SANZ, D., GÓMEZ-ALDAY, J.J., CASTAÑO, S., MORATALLA, A., DE LAS HERAS, J., MARTÍNEZ-ALFARO, P.E. 2009. *Hydrostratigraphic framework and hydrogeological behaviour of the Mancha Oriental System (SE Spain)*. Hydrogeology Journal 17: 1375-1391.

STERMAN, J.D. 2000. *Business Dynamics*. McGraw-Hill. Boston.

THORNES, J.B. 1990. *The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes*. En J. B. Thornes (Editor), *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*. John Wiley & Sons. Chichester, pp. 1-53.

USDA. 2001. *Rangeland soil quality – Compaction. Soil Quality Information Sheet. Rangeland Sheet 4*. <http://soils.usda.gov/sqi/management/files/RSQIS4.pdf>