

# Un sistema de Alerta Temprana (SAT) de la desertificación en España mediante modelos de Dinámica de Sistemas

## An early warning system for desertification in Spain through System Dynamics modelling

Javier Ibáñez, PhD. <sup>a</sup>, Silvio Martínez, PhD. <sup>b</sup>, Jaime Martínez-Valderrama, PhD. <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Dpto. Estadística y Métodos de Gestión en Agricultura, Universidad Politécnica de Madrid, España

<sup>b</sup> Centro de Ciencias Humanas y Sociales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

<sup>c</sup> Estación Experimental de Zonas Áridas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

javier.ibanez@upm.es  
silvio.martinez@cchs.csic.es  
jaimonides@eeza.csic.es

--Recibido para revisión 2012, aceptado fecha, versión final 2012--

**Resumen**— Naciones Unidas establece la obligatoriedad de elaborar Planes Nacionales de Acción contra la Desertificación (PAND). Dado que la prevención es una de las líneas maestras de estos planes y considerando la esencia multidisciplinar del problema – que se define como la degradación de las tierras resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas- la Dinámica de Sistemas es una herramienta idónea para contribuir al desarrollo de los PAND. En este artículo se da cuenta del desarrollo de una serie de modelos que representan los casos prototípicos de desertificación en España. Además se avanzan detalles sobre la herramienta de cálculo de riesgo de desertificación que se está elaborando para el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, el organismo encargado de llevar a cabo el PAND.

**Palabras Clave**— riesgo de desertificación, alerta temprana, SSD.

**Abstract**— United Nations establish the obligation to develop National Plans to Combat Desertification (NPCD). Since prevention is one of the strengths of these plans and considering the multidisciplinary character of the problem – it is defined as degradation of land as a consequence of climatic variations and human activities- System Dynamics is a suitable tool to help developing NPCD's. In this paper a family of models depicting the main cases of desertification in Spain is presented. In addition

some features about the tool for calculating risk of desertification are advanced. This is a work in progress for the Ministry of Environment, the institution in charge of NPCD implementation.

**Keywords**—desertification risk, early warning, DSS.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 ORIGEN DEL ESTUDIO

El Comité de Ciencia y Tecnología de la Convención de Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULD) establece la obligatoriedad de elaborar Planes de Acción Nacional Contra la Desertificación (PAND). Uno de los puntos básicos de estos planes es contar con Sistemas Integrados de Evaluación y Vigilancia de la Desertificación, cuyo propósito es desarrollar herramientas que permitan conocer con anticipación el avance o la regresión de la desertificación.

En el caso español la responsabilidad de la elaboración de los PAND recae en el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), que ha optado por incluir modelos de simulación construidos mediante Dinámica de Sistemas (DS) para evaluar el riesgo de

desertificación en los principales escenarios<sup>1</sup> establecidos por el PAND [1] en su epígrafe 3.3<sup>2</sup>:

1. Cultivos leñosos afectados por la erosión (CLE)
2. Cultivos extensivos de secano con riesgo de erosión (CES)
3. Sistemas agro-silvo-pastorales afectados de sobrepastoreo (SSP)
4. Sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación (SAR)
5. Matorrales degradados y eriales (MDE)

La idoneidad de la DS para abordar el estudio de la desertificación se hace patente si consideramos la definición de Naciones Unidas [2]: "Desertificación es la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas", la cual ya anuncia la interacción entre variables de tipo económico con variables físicas y biológicas. La propia esencia multidisciplinar del problema de la desertificación exige utilizar herramientas que permitan implementar el enfoque sistémico, como la DS.

## 1.2 PROCEDIMIENTOS Y OBJETIVOS

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 Sistema de Alerta Temprana (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 aportará unas representaciones a escala, o escenarios de desertificación virtuales, sobre los que se van a poder hacer los siguientes análisis:

### 1. Estimación de tendencias esperadas

Esta utilidad no consistirá en otra cosa que en dar a los modelos DS construidos su empleo habitual, esto es, la obtención y representación de trayectorias temporales.

### 2. Estimación de riesgos de desertificación y de plazos previsibles

Esta utilidad se llevará a cabo mediante simulaciones Montecarlo de los modelos DS. Ello

significa que cada modelo será simulado durante un largo periodo de tiempo un gran número de veces (del orden de miles), bajo escenarios de simulación diferentes obtenidos generando valores aleatorios de varios de sus parámetros de escenario. Salvando aquí detalles importantes (véase [3]), el riesgo de desertificación de un sistema se cuantificará como el porcentaje de las simulaciones realizadas que acaben mostrando un sistema desertificado o sumamente degradado.

El valor que tome un riesgo de desertificación será insuficiente si éste no viene acompañado de una estimación del tiempo esperado para la desertificación. En efecto, un sistema podría arrojar un 100% de riesgo de desertificación pero teniendo ésta lugar al cabo de miles de años. El SAT proporcionará, pues, una estimación del tiempo medio para la desertificación que será la media del número de años que el sistema ha tardado en desertificarse en el conjunto de simulaciones Montecarlo en que ése ha sido el resultado final.

### 3. Clasificación de factores climáticos, socioeconómicos y biofísicos según su influencia en los procesos de desertificación.

Esta utilidad se llevará a cabo mediante análisis de sensibilidad. En concreto se empleará la técnica conocida con el nombre de Plackett-Burman. Se trata éste de un procedimiento estadísticamente riguroso que mide los impactos de cada parámetro de un modelo sobre una serie de variables objetivo, a especificar previamente. Ello es realizado de forma eficiente desde el punto de vista del número de escenarios a establecer y, por tanto, del número de simulaciones del modelo a realizar. 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 promediado sobre variaciones combinadas realizadas sobre el resto de parámetros de escenario.

El SAT incorporará una interfaz de usuario que facilitará la aplicación de sus utilidades a cada estudio de caso. El entorno de funcionamiento de la interfaz se realizará mediante el programa EXCEL® (Microsoft). A través de éste, el usuario interactuará de forma sencilla con el software VENSIM® (Ventana Systems Inc.) que será el empleado para implementar los modelos DS. Las utilidades del SAT estarán pre-programadas, de manera que el usuario sólo tendrá que activarlas una vez que haya definido un escenario de simulación; el SAT proporcionará distintas ayudas para llevar a cabo esta definición. El sistema también ilustrará su funcionamiento para algunos

<sup>1</sup> La acepción de escenario que el MAGRAMA emplea en el PAND se refiere a casos de desertificación.

<sup>2</sup> Los acrósticos empleados para cada escenario no pertenecen al PAND; son propuestos por los autores.

estudios de caso predefinidos correspondientes a varios de los escenarios de simulación modelados.

## 2. LOS MODELOS DS DEL SAT

### 2.1 CARÁCTER GENERAL DE LOS MODELOS

El SAT trabaja sobre la base de una colección de cinco modelos de Dinámica de Sistemas cada uno de ellos referido a un escenario de desertificación. Los modelos recrean mediante ecuaciones matemáticas los principales procesos biofísicos y socioeconómicos que interactúan en cada escenario.

La familia de modelos parte de una estructura común, el GDM (Generic Desertification Model [4]). En esencia, el propósito del GDM es reproducir el balance entre el uso de recursos y su renovación. Para ello considera la influencia de factores climáticos en su tasa de regeneración y el impacto del marco socioeconómico en el que se explota dicho recurso. Es importante resaltar que el consumo es una variable explícita en este modelo, ya que permite capturar la relación dinámica y los feedbacks que definen las interacciones entre ser humano y medioambiente.

### 2.2 DESCRIPCIÓN SINTÉTICA DE LOS MODELOS

#### 2.2.1 Los modelos CLE y CES

La figura 1 trata de dar una imagen global de los procesos incluidos en los modelos CLE y CES. En ella, las relaciones causales entre variables se representan mediante flechas de polaridad positiva o negativa, 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). La degradación en los sistemas CLE y CES es conducida por la erosión. La tasa de erosión dependerá 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 será, en esencia, una variable de escenario (aleatoria). El coeficiente de escorrentía tendrá, en cada instante de una simulación, una componente aleatoria relacionada con la intensidad de la precipitación, pero dependerá además (positivamente) del contenido de humedad del suelo y (negativamente) de la profundidad del mismo. Esto último se debe a que la porosidad va a disminuir con la profundidad, reduciéndose con ello la capacidad de infiltración de agua en el suelo; así, cuando el suelo sea menos profundo, el coeficiente de escorrentía será mayor. Debido también a la mayor densidad aparente de las capas profundas, la erosión se ralentizará conforme el suelo se pierda (relación positiva: a menos suelo, menos erosión).

El contenido de humedad del suelo dependerá positivamente de la profundidad y de la precipitación, y negativamente del coeficiente de escorrentía y de la evapotranspiración. Esta última variable dependerá 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 determinará 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 permitirán evaluar la probabilidad (el riesgo) de que esto ocurra y el plazo estimado para que se produzca una pérdida determinada.

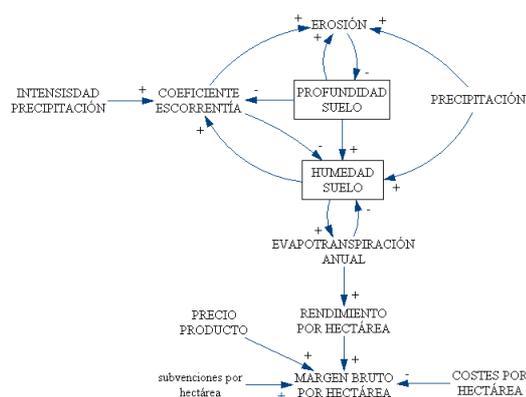


Figura 1.- Diagrama causal de los modelos CLE y CES

### 2.2.2 Los modelos SSP y 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, uso de la misma y manejo del suelo. Por este motivo, es sumamente difícil desarrollar una estructura de ecuaciones que pueda ser particularizada para cualquier caso existente en la realidad. Ante ello, la formulación de los modelos SSP y MDE ha tomado como referencia los casos que se mencionan en el epígrafe 3.3 del PAND, resultando así en una estructura de ecuaciones suficientemente genérica como para ser aplicada al menos a estudios de caso circunscritos a los siguientes tres escenarios tipo:

- i) Zonas pastorales del Sureste español donde no se elimina el matorral y pastadas por ovino o caprino;
- ii) Dehesas del Oeste-Suroeste español donde se elimina el matorral y pastadas por ovino o vacuno;
- iii) Matorrales/eriales Mediterráneos degradados con o sin pastoreo.

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 conseguirá fácilmente sin más que hacer cero distintas variables del escenario de simulación correspondiente. Así, por ejemplo, en el segundo caso habrá 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 2 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 (figura 1). 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 asumía invariable en el tiempo). Así pues, en todo paso de integración 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 en dicho instante, y viceversa.

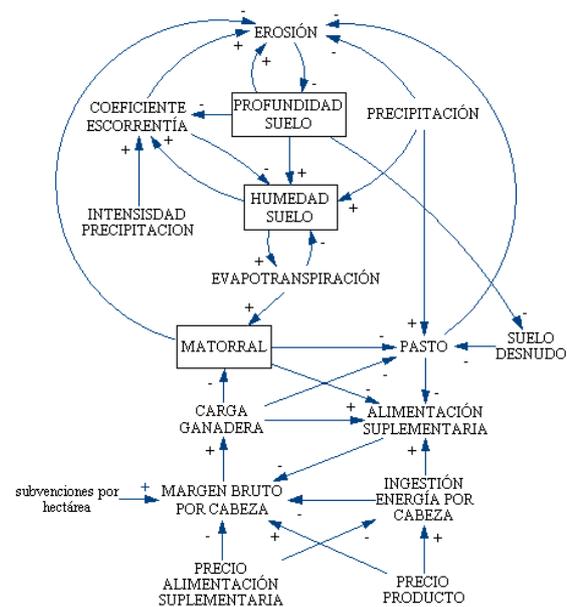


Figura 2.- Diagrama causal de los modelos SSP y MDE

La humedad del suelo se modela igual que en los modelos 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. La formulación de estas variables, con excepción de lo dicho acerca de la erosión, coincide con la de los modelos anteriores. Los modelos representan las superficies de matorral y pasto y sus producciones por unidad de superficie. El crecimiento de la superficie de matorral dependerá positivamente de la evapotranspiración y negativamente de la carga ganadera. Así pues, mientras la erosión no merme excesivamente la profundidad del suelo en una simulación, el matorral será controlado únicamente por el ganado. Si la erosión terminara por reducir severamente la cantidad de suelo, y con ello su capacidad de almacenamiento de agua, el crecimiento del matorral se vería afectado también por ello. La biomasa comestible por unidad de superficie de matorral se supone constante. Dicha biomasa sólo será aprovechada cuando el rebaño modelado sea caprino.

La producción de pasto de cada año simulado tendrá lugar únicamente en la superficie no cubierta por el matorral y que, además, no sea suelo desnudo. Se asume pues que el matorral limita el crecimiento del pasto, pero no a la inversa. La superficie de suelo desnudo dependerá de cuál sea la densidad aparente de la capa superficial del suelo. Así, cuando la erosión

descubra capas profundas, con menor porosidad, la proporción de suelo desnudo aumentará. La producción de pasto por unidad de superficie se relaciona positivamente con la precipitación anual. La cobertura del pasto que participa en la determinación de la tasa de erosión en cada año simulado va a depender negativamente de cuál sea su consumo y, por tanto, de la carga ganadera.

Dada la implantación actual del desacoplamiento de las ayudas de la PAC y su más que previsible generalización a los sectores aún restantes (téngase en cuenta que las simulaciones de los modelos del SAT arrancarán ya dentro del periodo post 2013<sup>3</sup>), la carga ganadera estará positivamente relacionada con la rentabilidad económica, representada ésta por el margen bruto por cabeza. Entre las variables carga ganadera, alimentación suplementaria y margen bruto por cabeza se establecerá, pues, un bucle de realimentación negativa: en condiciones *ceteris paribus*, cuanto mayor sea la carga ganadera, mayores serán las necesidades de alimentación suplementaria y menor será, por tanto, el margen por cabeza. Este bucle refleja el riesgo que supone la decisión de aumentar la carga ganadera.

La cantidad de alimentación suplementaria dependerá en cada año simulado de las disponibilidades de biomasa vegetal y del objetivo de ingestión energética por animal. Los modelos asumen que, de cara a determinar esta última variable, los ganaderos siguen un comportamiento cuasi-óptimo desde un punto de vista económico. Ello quiere decir que los valores del aporte energético por animal no coincidirán exactamente, sino que co-variarán manteniendo un cierto error sistemático, con los que maximizarían el margen bruto por cabeza. Estos valores óptimos se obtienen resolviendo, cada año simulado, un problema de optimización sujeto a los precios de la producción ganadera y de la alimentación suplementaria.

### 2.2.3 El modelo 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 3 muestra los procesos más relevantes contemplados por el modelo.

El modelo se refiere a 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 descarga natural y el bombeo neto.

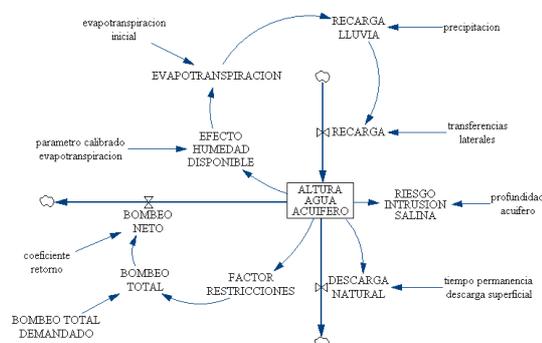


Figura 3.- Diagrama causal del modelo SAR

Una componente de la recarga viene dada por la diferencia entre precipitación y evapotranspiración. La otra sería el total de las transferencias laterales de agua procedente de otros acuíferos, caso de conocerse su valor. La precipitación es una variable de escenario, como en los modelos anteriores; la evapotranspiración, en cambio, es ahora un parámetro de escenario. En efecto, por tratarse de cultivos de regadío, su valor se asume constante e igual a la evapotranspiración bajo condiciones estándar. 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 neto es el resultante de descontar al bombeo bruto total la fracción de agua que retorna al acuífero. El bombeo bruto al inicio de una simulación será la suma de los bombeos demandados para abastecimiento y para riego. El primero de ellos es un parámetro de escenario; el segundo resulta de multiplicar la superficie total regada por la dotación de riego por hectárea, incrementada ésta en función de la eficiencia media de los sistemas de riego. El bombeo al acuífero inicial se verá restringido a lo largo de la simulación si la disponibilidad del recurso disminuye suficientemente.

La evolución de la superficie total regada con agua del acuífero se relaciona positivamente con la del ratio entre el margen bruto y el coste de oportunidad de una explotación. No obstante, el crecimiento de la superficie de regadío vendrá limitado por la disponibilidad de superficie para la agricultura. En el caso de los acuíferos costeros, la superficie potencial de regadío puede afectada, además, por la intrusión de agua marina, que en el

<sup>3</sup>[http://ec.europa.eu/agriculture/cap-post-2013/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/cap-post-2013/index_en.htm)

modelo se relaciona inversamente con la altura media del agua dulce en el acuífero.

Dado el nivel de tecnificación existente en la moderna agricultura de regadío, el modelo asume que la dotación de riego demandada en cada año simulado es la óptima desde un punto de vista económico. No obstante, esa dotación sólo será la realmente aplicada si no supera la cuota de riego por hectárea, caso de existir, y por supuesto, si la disponibilidad de agua en el acuífero es suficiente para satisfacerla. El modelo determina la dosis anual óptima a partir del tipo de cultivo, del precio percibido por la producción, del precio del agua, de la precipitación y de la eficiencia del sistema de riego. El precio de la producción es una variable de escenario. El precio del agua, en cambio, se relaciona negativamente con la altura del agua subterránea, lo cual cierra un significativo bucle de autorregulación en el sistema. En efecto, la reducción de la altura del agua en el acuífero implicará un mayor coste de extracción, un menor margen bruto por explotación y, con ello, cierta ralentización del crecimiento de la superficie regada.

### 3. ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE DESERTIFICACIÓN Y SUS PLAZOS

El riesgo de desertificación se implementa mediante simulaciones Montecarlo. El procedimiento es el siguiente. En primer lugar, se asignan distribuciones de probabilidad a un grupo de parámetros del modelo, el cual podría contener parámetros de calibración. Posteriormente, el modelo se simula un gran número de veces (del orden de miles) especificando cada uno de los escenarios de simulación mediante muestreo aleatorio dentro de las distribuciones asignadas a los parámetros.

Es posible obtener una estimación del riesgo de desertificación dentro de un cierto escenario de desertificación llevando a cabo el procedimiento general anterior con las siguientes particularidades:

- Todas las simulaciones serán no estocásticas, esto es, todas las variables de escenario (y, por supuesto, todos los parámetros) tomarán valores constantes dentro de una misma simulación. El objeto es permitir que las trayectorias temporales de todas las variables endógenas lleguen a alcanzar estados de equilibrio (trayectorias finales horizontales) dentro de cada simulación. Esto sólo es posible si el escenario de la simulación permanece constante en el tiempo. De esta manera, cada simulación mostrará el estado que

alcanza el sistema en el largo plazo bajo la combinación particular de valores paramétricos de escenario con la que ha sido realizada. Dado que se realizan muchas simulaciones y dado que los escenarios son distintos y elegidos al azar, el análisis Montecarlo mostrará los estados de equilibrio alcanzados por el sistema bajo una gran cantidad de escenarios posibles. Así, por ejemplo, el estado de equilibrio alcanzado en una simulación corresponderá a un escenario de precios percibidos altos, precios pagados bajos, precipitación alta, pero de intensidad media-baja; el estado de equilibrio alcanzado por otra simulación estará asociado a un escenario de precios percibidos bajos, precios pagados bajos, precipitación baja y de intensidad media-alta; un tercer estado de equilibrio corresponderá a un escenario de precios percibidos medios, precios pagados sumamente altos, precipitación normal, de intensidad media-alta, y así para miles de combinaciones posibles de los valores de escenario.

- Todas las simulaciones se realizarán durante un mismo periodo de tiempo, suficientemente grande como para asegurar que todas las variables lleguen a alcanzar sus equilibrios finales. El análisis de estabilidad mediante el cálculo de isóclinas nos asegura la existencia de dichos equilibrios ([3], [4], [5]).

- Se seleccionará un número reducido de variables del sistema (preferiblemente una o dos), relevantes desde el punto de vista de la desertificación, y se registrarán los valores de equilibrio que las mismas alcanzan en las simulaciones. Se obtendrán así miles de puntos cuyas coordenadas serán las variables seleccionadas. Por ejemplo, en el modelo SSP podrían elegirse la altura del suelo (AS), relevante para medir el riesgo de desertificación por erosión, y la superficie de matorral (SM), relevante para evaluar el riesgo de degradación de un pastizal por invasión de matorral (desierto verde). Se obtendrían entonces miles de puntos de equilibrio a largo plazo de coordenadas (AS, SM).

- Se cuantificará el riesgo de desertificación de un sistema como el porcentaje de puntos que resultan dentro de una determinada 'región de desertificación'. Esta región vendrá definida por uno o más valores umbral de las variables relevantes seleccionadas. Para un mismo sistema podría existir más de una región de desertificación, cada una asociada a un riesgo distinto. Volviendo al ejemplo anterior, podría definirse la 'región de desertificación por erosión' de una zona pastoral como aquella con un suelo inferior a, pongamos, 10 cm. Podría definirse además la 'región de degradación por invasión de

matorral' como aquella con una superficie de matorral superior al 90% de la superficie total, por ejemplo. Los riesgos estimados serán, pues, iguales a los porcentajes de puntos de equilibrio que, tras las simulaciones Montecarlo, queden dentro de las regiones de desertificación especificadas. Nótese que los riesgos medidos mediante este procedimiento lo son stricto sensu, desde el punto de vista del modelo. En efecto, el riesgo se corresponderá con la frecuencia de estados a largo plazo del sistema que han resultado en desertificación, una vez generados un gran número de ellos y bajo una gran variedad de escenarios posibles. Es importante resaltar que el procedimiento evalúa el largo plazo, lo cual es esencial en el estudio de la desertificación. Nótese también que si se incluyera, entre aquellos a los que se asigna una distribución de probabilidad, parámetros cuyo valor es incierto, los riesgos obtenidos tendrá en cuenta la incertidumbre atribuible a la escasez de información para la construcción de los modelos.

- El valor que tome un riesgo de desertificación es insuficiente si éste no viene acompañado de una estimación del tiempo esperado para la desertificación. En efecto, un sistema podría arrojar un 100% de riesgo de desertificación pero ésta podría tener lugar al cabo de miles de años. El sistema proporcionará, pues, una estimación del tiempo medio para la desertificación que será, simplemente, la media del número de años que el sistema ha tardado en desertificarse en el conjunto de simulaciones Montecarlo en que ése ha sido el resultado final.

#### 4. CLASIFICACIÓN DE FACTORES SEGÚN SU IMPACTO EN DESERTIFICACIÓN

La técnica para realizar análisis de sensibilidad conocida como Plackett-Burman (en adelante ASPB) es descrita con detalle en Beres and Hawkins [6]. Estos autores describen con detalle el método, enumeran sus virtudes y llevan a cabo una aplicación del mismo.

De forma abreviada, se trata de un procedimiento estadísticamente riguroso que mide los impactos de cada parámetro de un modelo ( $\pi_i$  con  $i = 1, \dots, n$ ) sobre una serie de variables objetivo a especificar previamente ( $V_j$  con  $j = 1, \dots, k$ ). Ello es realizado de forma eficiente desde el punto de vista del número de escenarios a establecer y, por tanto, del número de simulaciones a realizar con el modelo.

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 promediado sobre variaciones combinadas realizadas sobre el resto de parámetros del escenario.

Desde un punto de vista práctico, el ASPB requiere asignar a cada parámetro del conjunto a analizar un valor superior y uno inferior. Puede decidirse que éstos sean, por ejemplo, un  $\pm 10\%$  de los valores asignados inicialmente por el usuario. El siguiente paso consiste en diseñar  $2d$  escenarios, donde  $d$  es cualquier múltiplo de 4 mayor que el número de parámetros a evaluar ( $n$ ). Si se toma el valor de  $d$  más pequeño entre los posibles, será preciso realizar un menor número de simulaciones sucesivas del modelo.

El ASPB muestrea los  $n$  valores paramétricos de cada escenario entre los superiores e inferiores asignados. Para ello se emplea una ristra o patrón de signos  $\pm$  de entre los muchos que propusieron Plackett y Burman (1946) [7]. A los parámetros que les corresponde un signo  $+$  dentro de un patrón, se les asigna su valor superior en el escenario asociado; a los que les corresponde un signo menos, se les asigna su valor inferior. Los patrones son tales que hacen que cada valor superior quede incluido en  $d$  escenarios y cada valor inferior lo sea en los otros  $d$  escenarios.

El análisis requiere definir un instante de tiempo (un año, en el caso de los modelos del SAT) en el que se van a medir los valores de las variables objetivo. Una vez realizadas las  $2d$  simulaciones se obtienen  $2d$  valores de cada una de dichas variables. Para estimar el impacto del parámetro  $\pi_i$  sobre la variable  $V_j$  se asigna un signo  $+$  a los  $d$  valores obtenidos para ella bajo los  $d$  escenarios en los que  $\pi_i$  tuvo signo positivo, y se asigna un signo  $-$  a los  $d$  valores de  $V_j$  que resultan bajo los  $d$  escenarios en que  $\pi_i$  tuvo signo negativo. El impacto de  $\pi_i$  sobre  $V_j$  resulta de sumar los  $2d$  valores de la última, con sus signos correspondientes, y de dividir dicha suma entre  $d$ . Estos impactos se expresarán en tantos por ciento. Ordenando de mayor a menor los impactos estimados se obtiene la clasificación, por orden de mayor a menor relevancia, de las causas de las variaciones ocurridas en las variables objetivo. Si estas últimas son variables relevantes de un determinado síndrome de desertificación, se habrán clasificado las causas de la misma por orden de significación. El conjunto de parámetros incluirá los coeficientes de variación de las variables de escenario. De esta forma, se evaluarán también los impactos que las variabilidades (no sólo los valores medios) de la precipitación, de su intensidad y de los precios suponen sobre el sistema modelado.

Tentativamente, las variables objetivo de los ASPB podrían ser:

- Modelos CLE y CES: altura de suelo y años transcurridos hasta su pérdida y/o hasta la reducción del margen bruto por debajo de un umbral mínimo.

- Modelo SSP: altura de suelo, superficie de matorral y años transcurridos hasta la pérdida total de la biomasa de herbáceas.

Modelo MDE: altura de suelo, superficie de matorral y años transcurridos hasta la caída de esta última por debajo de un umbral mínimo y/o la pérdida del suelo.

- Modelo SAR: altura del agua en el acuífero, número de explotaciones y años transcurridos hasta el vaciado del acuífero y/o la caída del número de explotaciones por debajo de un umbral mínimo.

El ASPB estará también pre-programado dentro de la aplicación a construir. El usuario únicamente tendrá que accionar su ejecución para un determinado modelo bajo un determinado escenario de referencia. La aplicación le devolverá entonces la relación de parámetros y sus impactos ordenados de mayor a menor.

## 5. SISTEMA DE SOPORTE A LA DECISIÓN (SSD) DEL SAT

Los programas que existen en el mercado para implementar modelos de Dinámica de sistemas han evolucionado mucho desde sus orígenes para facilitar al modelador su tarea. Así, éste puede dedicarse a pensar sobre el modelo y no gastar tiempo en complicados lenguajes de programación. Sin embargo los avances no han llegado al punto de facilitar a usuarios no familiarizados con estos programas y tipos de modelos el uso de los mismos. El SAT cuenta con una interfaz de usuario que permite a usuarios no familiarizados con los modelos de simulación llevar a cabo los ejercicios propuestos anteriormente.

La aplicación informática SAT consiste en un conjunto de ficheros que se manejan un libro de Excel. Ésta actúa como interfaz de usuario y desde ella se pueden simular los modelos que han sido codificados en VENSIM® (Ventana Systems Inc.).

El lenguaje de programación que se ha utilizado es Visual Basic. Concretamente se ha utilizado la versión que incorpora Excel 2007. Mediante este código se accede a la librería de funciones prediseñadas de Vensim, denominada Vensim.dll.

Inicialmente será dirigido al Menú principal, desde donde podrá acceder a cada uno de los modelos.



Figura 4.- Menú principal del SSD del SAT

El menú principal consiste en una pantalla desde la que se puede acceder a cada uno de los escenarios de desertificación considerados y a una serie de documentos que cubren cuatro aspectos:

- ¿Qué es el SAT? Se describe de forma breve la aplicación que el usuario se dispone a manejar y los objetivos principales que persigue el sistema.

- Metodología. Se comenta en qué consisten los modelos empleados así como los procedimientos desarrollados para calcular el riesgo de desertificación. Se ofrecen referencias para ahondar en detalles.

- Manual del Usuario. Se describe cómo utilizar la aplicación.

- Créditos. Se informa acerca de los autores y propietarios del trabajo.

Para establecer el escenario de simulación, el usuario debe dar valores a los parámetros que se muestran en pantalla, incluido el 'FINAL TIME', es decir, la longitud del período de simulación. En el prototipo actual, manteniendo el cursor sobre una pestaña de color rojo que hay al final del nombre de cada parámetro, aparece una caja donde se indica el significado del mismo, se dan sus unidades y, en algunos casos, también un rango de valores verosímiles, tal y como se muestra en la figura 5.

ESCENARIO	FINAL TIME	30
Meteorización	cm/año	
Profundidad suelo	Tasa anual de transformación de roca madre en suelo	
Erosión media anual inicial	precipitación anual (sin sequía)	559,54
Espacio poroso total inicial	precipitación anual	0,5454
Fracción marchitez pmte.	Meses recarga suelo	7,07
Fracción c. campo inicial	F. precip. mesés recarga	0,8484
Prof. suelo mitad porosidad	F. ETP meses recarga	0,3838
Subvención por hectárea	Media cfte. esc. en húmedo	0,5252
Coste laboreo por ha	Media cfte. esc. en seco	0,3333
Otros costes por ha	ETP anual cultivo	51,308
Media precio producto	ET real anual	26,599
CV precio producto	<input type="checkbox"/> Sequía	
Rdto medio seco	Precip. anual (con sequía)	200
Rdto medio regadío	Duración sequías	3
	Periodicidad sequías	13

Figura 5.- Escenario de uno de los modelos que debe completar el usuario

Se han habilitado tres botones para llevar a cabo los ejercicios propuestos. Tras pulsar el botón ‘Trayectorias temporales’ el modelo se simula, generando una serie temporal para cada uno de las variables incluidas en el modelo. Es posible representar gráficamente cualquiera de estas trayectorias. Además se podrá comparar con la de otra simulación.

El botón ‘Riesgo de desertificación’ desencadena la simulación del modelo mil veces, utilizando otros tantos escenarios. Éstos se construyen automáticamente utilizando los valores medios de ciertas variables estocásticas proporcionados por el usuario. Los resultados relativos al riesgo de desertificación se presentan de dos formas: i) mediante una barra gráfica de color rojo sobre fondo verde que representa el porcentaje de escenarios que han acabado como desertificación; y ii) mediante dos resultados numéricos: el porcentaje representado en el gráfico anterior y el tiempo medio de desertificación.

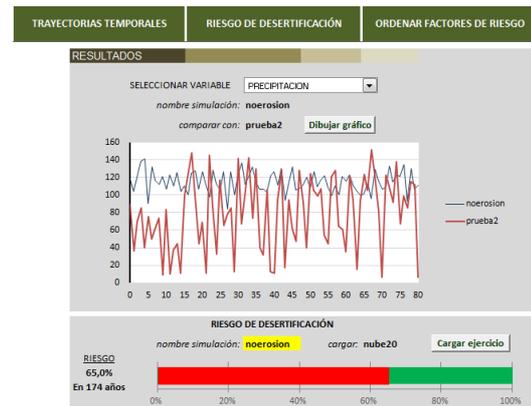


Figura 6.- Arriba: botones para ejecutar los ejercicios pre-programados. Abajo: Outputs de la aplicación: trayectorias temporales de las variables y porcentaje de riesgo de desertificación

Por último, al accionar el botón de la utilidad ‘Ordenar factores de riesgo’ se ejecuta el ASPB generando listas que muestran, por orden de importancia, los impactos que los diferentes parámetros evaluados han tenido sobre las variables objetivo seleccionadas.

ORDEN DE LOS FACTORES DE RIESGO			
Efecto en la Profundidad del suelo		Efecto en el Margen Bruto	
CV precipitación anual	11,97	CV precipitación anual	-473,92
Profundidad suelo inicial	2,13	Otros costes por ha	-21,45
Erosión media anual inicial	-1,30	ET real anual	-15,92
Media cfte. esc. en húmedo	-1,24	Subvención por hectárea	14,74
Espacio poroso total inicial	-0,85	Profundidad suelo inicial	13,63
ETP anual cultivo	0,48	Media cfte. esc. en húmedo	-13,18
F. ETP meses recarga	0,37	Rdto medio seco	11,72
Fracción c. campo inicial	0,32	Espacio poroso total inicial	-11,71
Fracción marchitez pmte.	-0,29	ETP anual cultivo	9,50
Meses recarga suelo	0,14	Erosión media anual inicial	-9,38
Meteorización	0,13	Fracción c. campo inicial	9,34
Prof. suelo mitad porosidad	0,10	Coste laboreo por ha	-7,66
Rdto medio regadío	0,00	Meses recarga suelo	-5,63
Rdto medio seco	0,00	F. ETP meses recarga	4,11
CV precio producto	0,00	Fracción marchitez pmte.	-2,92
F. precip. meses recarga	0,00	Prof. suelo mitad porosidad	-2,80
Otros costes por ha	0,00	F. precip. meses recarga	-2,70
Subvención por hectárea	0,00	Rdto medio regadío	-2,66
Media precio producto	0,00	Meteorización	0,94
Precipitación anual (sin sequ)	0,00	CV precio producto	-0,27
Media cfte. esc. en seco	0,00	Precipitación anual (sin sequ)	-0,09
ET real anual	0,00	Media precio producto	0,07
Coste laboreo por ha	0,00	Media cfte. esc. en seco	-0,03

Figura 7.- Resultados de la clasificación de factores de riesgo

## 6. REFERENCIAS

[1] MAGRAMA, 2003. Programa de Acción Nacional Contra la Desertificación. Madrid. <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/tema/s/lucha-contra-la-desertificacion/la-desertificacion-en-espana/>

[2] UNEP, 1991. Status of Desertification and Implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification. United Nations. Nairobi.

[3] J. Martínez-Valderrama; J.Ibáñez; F.J. Alcalá; A. Domínguez; M. Yassin y J. Puigdefábregas, "The use of a hydrological-economic model to assess sustainability in groundwater-dependent agriculture in drylands" Journal of Hydrology. 2011. Vol 402: 80-91.

[4] J. Ibáñez; J. Martínez-Valderrama y J. Puigdefábregas, "Assessing desertification risk using system stability condition analysis". Ecological Modelling. 2008 Vol 213 (2): 180 - 190.

[5] J. Ibáñez; J. Martínez-Valderrama y J. Puigdefábregas, "Assessing overexploitation in Mediterranean aquifers using system stability condition analysis". Ecological Modelling. 2008 Vol 218: 260 - 266.

[6] D.L. Beres y D.M. Hawkins, "Plackett-Burman technique for sensitivity analysis of many-parametered models". Ecological Modelling. 2001 Vol 141: 171-183.

[7] R.L. Plackett y J.P. Burman. "The design of optimum multifactorial experiments". Biometrika. 1946 Vol 33: 305- 325.