

1

REVISIÓN CIENTÍFICA

MODELOS PARA LA SIMULACIÓN DINÁMICA DEL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE PASTOS

C. HERNÁNDEZ DÍAZ-AMBRONA¹, J. MARTÍNEZ VALDERRAMA²
Y H. CALVETE SOGO^{1,3}

¹Grupo de Sistemas Agrarios AgSystems. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia. CEIGRAM. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. E-28040 Madrid (España). carlosgregorio.hernandez@upm.es. ²CSIC. Estación Experimental de Zonas Áridas. Almería (España). ³Unidad de Modelización y Ecotoxicidad de la Contaminación Atmosférica, CIEMAT. E-28040 Madrid (España).

RESUMEN

Este trabajo recoge una revisión de los modelos para la simulación dinámica del crecimiento y desarrollo de los pastos y su utilización con animales en pastoreo. Los modelos son herramientas para la toma de decisiones en la explotación ganadera y para la investigación. Un modelo dinámico es la representación matemática de un sistema pastoral que evoluciona en el tiempo forzado por un conjunto de variables conductoras. La simulación es el proceso de ejecución de un modelo por el cual se obtiene unos resultados sobre el estado de cada componente. Los principales componentes de los modelos son: el clima o meteorología, el suelo, la vegetación, los animales y el gestor o tomador de decisiones. En este artículo se presentan los principales procesos modelados sobre el crecimiento y desarrollo de la vegetación herbácea y leñosa, y también algunos referentes a la ingesta de los animales. El desarrollo de modelos es un proceso iterativo nunca concluido, este tipo de modelos trata de explicar el comportamiento del sistema y por tanto parte de la variabilidad que presenta no llega a ser explicada por el modelo al ser una simplificación del sistema real. Estos modelos de simulación han ido evolucionando desde simples relaciones matemáticas a complejos sistemas de ecuaciones diferenciales que tiene una representación sobre el territorio, llegándose a los modelos multi-agente, donde confluyen en el mismo espacio diferentes tomadores de decisiones, tipos de vegetación y animales. Los modelos son posibles por la existencia de un mejor conocimiento y descripción de los componentes y procesos que aparecen en los sistemas agrosilvopastorales.

Palabras clave: Agroforestal, cultivos forrajeros, pastoreo, praderas, procesos.

INTRODUCCIÓN

Un modelo, según la acepción cuarta de la vigésima segunda edición del Diccionario de la lengua española, es un esquema teórico, generalmente expresado en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento (Real Academia Española, 2001). Un modelo es la idealización de alguna cosa de tal forma que se simplifique algo que en su identidad real es sumamente complejo. Para construir un modelo hay que conocer de forma precisa los componentes y procesos que intervienen en el sistema, de tal forma que se pueda expresar mediante fórmulas matemáticas o ecuaciones que relacionan variables de estado, con el propósito de obtener determinada información del sistema (Hooker, 1994). En el caso de los sistemas agrarios, éstos son analizados tanto en sus aspectos estructurales como dinámicos, mediante la interacción entre los elementos o variables que lo componen, y su variación a lo largo del tiempo (Coquillard y Hill, 1997; Whisler *et al.*, 1986). Este tipo de modelos, que se llaman mecanicistas, están amparados en la dinámica de sistemas y se diferencian de los modelos estadísticos o predictivos en que en éstos últimos prima el resultado final mientras que en los primeros es más relevante el conocimiento del proceso que tiene lugar para alcanzar dicho resultado (Ambrosio *et al.*, 1992).

La aplicación de modelos en los sistemas pastorales requiere tener un conocimiento lo más exacto posible de las comunidades de plantas o animales que van a intervenir y las relaciones que hay entre todos los componentes. Estas comunidades de plantas en su parte elemental estarán compuestas por una agregación más o menos regular de individuos (Passioura, 1996; Thornley, 1976). Individuos que formarán parte de una sucesión en el tiempo y/o en el espacio. A su paso por el terreno van a modificar las características del suelo, como son, por ejemplo, el contenido en agua, en materia orgánica o en nutrientes. Tenemos pues tres niveles de agregación: planta, comunidad y sistema. Una vez configurado el modelo de producción primaria o vegetal habrá que superponer el modelo animal, si se trata de sistemas en pastoreo, o del manejo por cortes en los sistemas de siega. En los sistemas en pastoreo se establecen relaciones entre la planta y el animal, siendo la principal relación la defoliación, aunque también adquiere una gran relevancia el comportamiento selectivo del animal. Debido a la complejidad del sistema silvopastoral los parámetros que caracterizan al sistema son numerosos por lo que se suelen aplicar modelos simples en una construcción jerarquizada por niveles de importancia. Cada nivel está vinculado a un recurso, de tal forma que el modelo pueda ejecutarse de forma modular conforme se van implementando todas las interacciones. Si clasificamos los modelos en función de los factores que incluyen tenemos (Penning de Vries *et al.*, 1989): Nivel 1 o Potencial: Cuando el modelo responde únicamente a las variables meteorológicas, obteniéndose producciones potenciales en condiciones ideales

de no estrés hídrico y no estrés de nutrientes; Nivel 2: Añade al nivel anterior el balance hídrico; Nivel 3: Incluye el balance de nitrógeno y de la fertilización nitrogenada sobre el cultivo, y la interacción entre los niveles anteriores; Nivel 4: Se incluyen otros factores, tales como plagas y otros macro nutrientes; Nivel 5 y sucesivos: Incluyen los efectos de otros factores, como la competencia de malas hierbas, enfermedades y estreses atmosféricos como el ozono (González-Fernández *et al.*, 2010). El ir completando niveles de detalle permite que el modelo vaya complicándose conforme se avanza en el conocimiento de cada componente.

La modelización de las comunidades de plantas, incluidos los factores ambientales responsables de la disponibilidad de recursos y las estrategias de manejo que intervienen sobre esos recursos, permite a través de la simulación evaluar cómo diferentes prácticas agrosilvopastorales llevan a un resultado u otro. La expresión cuantitativa y la representación matemática de la dinámica, esto es la evolución en el tiempo, de los sistemas biológicos, son dos pilares elementales en la construcción de los modelos. La simulación es la acción o aplicación de un modelo para obtener unos resultados. La simulación de los sistemas pastorales comienza a desarrollarse con el concepto de índice de área foliar, ya que la defoliación o reducción del área foliar es el principal proceso modelado durante el pastoreo (Parsons *et al.*, 1988). Los primeros trabajos sobre simulación de modelos de pasto herbáceo se encuentran en Innis (1978).

Modelado de sistemas dinámicos

Un modelo de un sistema dinámico se puede representar por sus componentes o variables y las relaciones o flujos que se establecen entre ellos. Los flujos son de materia o de información. Los flujos de materia conectan entre si variables de estado y por ellos circula alguna sustancia, los flujos de información informan sobre algo a las variables (Jones y Luyten, 1998). Al definir un modelo, implícitamente siempre se define una frontera debido a que es imposible abarcar el todo, esta frontera separa lo que el modelo describe de lo que queda fuera. Es importante conocer la frontera ya que no se puede lanzar una pregunta al modelo sobre alguna cuestión o comportamiento que ha quedado fuera. En la construcción del modelo hay que evitar la aparición de comportamientos debidos a la estructura del modelo y no al proceso que se trata de representar produciéndose un artefacto. Variables de entrada son aquellas que recogen los factores del entorno que influyen en el comportamiento del sistema pero que no son influidos por el propio sistema; en este grupo se incluyen las variables exógenas, las variables conductoras y las funciones de entrada. La lluvia, la temperatura del aire o la radiación solar son ejemplos de este tipo de variables. Estas variables van a afectar al contenido de agua en el suelo, al crecimiento del cultivo pero no se ven afectadas por el sistema. Los parámetros o constantes del modelo son valores constantes durante todo el tiempo

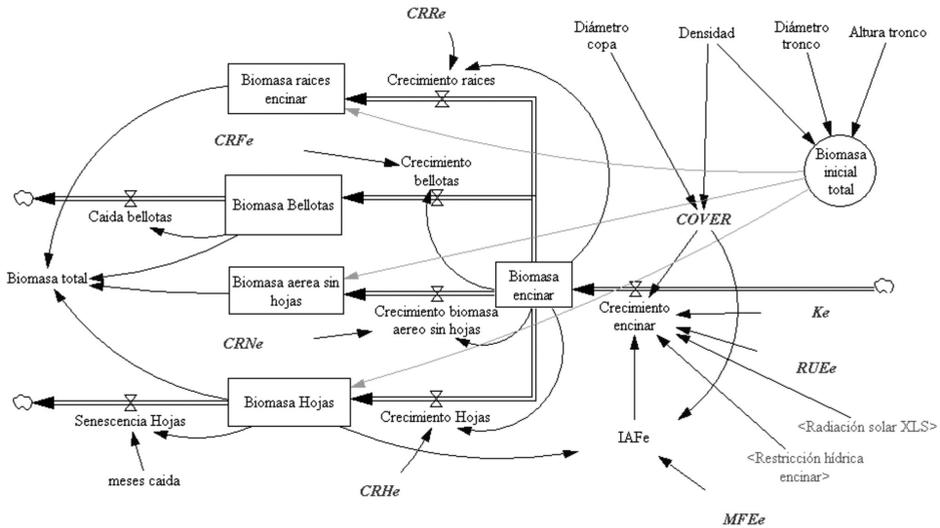
que dura la simulación. Los parámetros se obtienen de condiciones experimentales y suelen variar en función del proceso a simular, la calibración del modelo consiste en ajustar esos valores para que el resultado del modelo sea satisfactorio. Las variables de estado son cantidades que describen la condición en la que están los componentes del sistema. Las variables de estado cambian con el tiempo en los modelos dinámicos ya que los componentes del sistema interactúan sobre ellas y sobre el entorno. Por ejemplo, el contenido de agua en el suelo o el área foliar son dos variables de estado, éstas describen el comportamiento del sistema en cada unidad de tiempo. Estas variables son las responsables de que el sistema pueda ser considerado dinámico. Normalmente estas variables de estado son las que se recogen como salidas (*Outputs*) ya que representan alguna característica del sistema que interesa conocer después de la simulación. Aspectos tales como la cantidad de biomasa, el rendimiento, o consumo de agua, son algunas de las variables de este tipo. Los procesos son las relaciones que se establecen entre los componentes del sistema, unen una o más variables entre sí. Los procesos pueden ser flujos de masa o energía, al conectar entre sí variables de estado lo que circula entre ellas tiene que ser siempre el mismo material. Los flujos o conexiones de información solo proporcionan información acerca de una variable, parámetro o constante del modelo.

La relación fundamental empleada en los modelos de un sistema dinámico se puede reducir en la ecuación vectorial que representa el estado de un conjunto de variables en un momento dado:

$$X_{t+1} = X_t + f(X_t, W_t, U_t, t)$$

Siendo, X_t el vector de variables de estado que representa cómo está el pasto y el suelo en el día t . X_{t+1} el vector de variables que representa el estado del pasto y el suelo en el día $t+1$, ese nuevo estado dependerá del efecto de W_t vector de condiciones climáticas ocurridas el día t sobre las variables de estado, de U_t vector de acciones de control o del manejo del cultivo en el día t . Siendo f la función de relaciones físicas, químicas y biológicas que describen las tasas de cambio de todas las variables de estado del modelo. De esta forma la producción acumulada de pasto Y_T hasta el día T se obtiene integrando la ecuación X , ésta se puede expresar como función de las variables de estado acumuladas hasta el día T , esto es: $Y_T = Y(X_T)$. El resultado final que se consigue con la aplicación de un modelo dinámico es conocer las trayectorias temporales de todas las variables incluidas en el modelo. En este caso la trayectoria temporal está referida al día, que es la unidad temporal (*time step*). Es posible encontrar modelos que reducen aún más la escala temporal, llegando a horas o minutos de tal forma que se pueden simular con más precisión las variaciones fisiológicas que suceden a lo largo del día debidas a la temperatura, radiación solar y disponibilidad de agua (Connor y Fereres, 1999). Por el contrario cuando el modelo contempla principalmente el crecimiento de árboles se acude a escalas mayores con unidades de tiempo expresadas en meses o años.

El modelado de sistemas dinámicos se ha simplificado con la existencia de software específicos que permiten crear modelos sin grandes necesidades de conocimiento de programación (Ford, 1999; Martínez y López, 2000). Programas que se basan en la dinámica de sistemas y que plantean la resolución del problema desde la representación de los diagramas de flujos o relacional (software como STELLA®, Vensim®, Simile®, ModelMaker®). Se trata de componer el correspondiente diagrama de flujos que represente el sistema real que se va a simular (Figura 1). Para ello se definen los componentes y los procesos que los relacionan. Los componentes serán representados por variables de estado que recojan alguna propiedad. Una vez combinados adecuadamente, definidos sus valores iniciales y las funciones que los relacionan, permitirán que el programa resuelva el sistema de ecuaciones diferenciales respecto del tiempo. Utilizando estos programas Trenbath y Stern (1995) presentaron un modelo del crecimiento del pasto herbáceo y del pastoreo en las condiciones de clima mediterráneo de Australia. Es un modelo diario del crecimiento del pasto y del pastoreo desde el establecimiento hasta el final de la estación de pastoreo. En ese modelo el crecimiento de la biomasa del pasto está gobernado por tres ecuaciones que se corresponden a las fases: crecimiento exponencial inicial, crecimiento lineal a la tasa máxima y fase final o crecimiento decelerado. La principal variable de estado del modelo es la biomasa del pastizal, que está afectada por dos flujos, una entrada que depende de la tasa de crecimiento del pasto y un flujo de salida, que es la cantidad de biomasa ingerida en el pastoreo. En el caso inicial el establecimiento del pasto, formado por una comunidad de trébol subterráneo (*Trifolium subterraneum L.*) y raigrás italiano (*Lolium multiflorum Lam.*), se prolonga hasta que el pasto alcanza la tasa máxima de crecimiento a mitad de la estación. La ingestión de hierba por el pastoreo a su vez depende: del manejo (variable lógica, que haya o no pastoreo), del número de animales presentes (en este caso ovejas) y de la cantidad de biomasa que pueden ingerir diariamente. También, incluye un modelo para simular el rendimiento de trigo, característico del *Ley-farming* australiano, siendo para el trigo la variable conductora el contenido total de nitrógeno en el suelo, considerando que el nitrógeno es el principal factor limitante de la producción (Trenbath y Stern, 1995). Este modelo está basado en las ecuaciones que definen el rendimiento del trigo, libre de malas hierbas, ecuaciones que depende de tres factores: el límite potencial marcado por las precipitaciones medias de la zona, la disponibilidad de nitrógeno en el suelo y el efecto que sobre la estructura del suelo tienen los cultivos forrajeros precedentes. El cambio del contenido total de nitrógeno en el suelo durante el cultivo del trigo es calculado como resultado del balance entre ganancias y pérdidas. Las ganancias de nitrógeno vienen de la fertilización añadida, del nitrato disuelto en el agua de lluvia y del nitrógeno contenido en la semilla cuando se sembró. Las pérdidas son la cantidad de nitrógeno retirada con la cosecha, la volatilización y el lavado del nitrógeno del suelo o de la planta.



CRRe: Coeficiente de reparto de raíces; *CRFe* Coeficiente de reparto de flores y frutos; *CRNe*: Coeficiente de reparto de troncos y ramas; *CRHe*: Coeficiente de reparto de hojas; *IAFe*: índice de área foliar de la encina; *MFE*: Masa foliar específica de la encina; *COVER*: superficie del suelo cubierta por las copas de la encina; *Ke*: coeficiente de extinción de la radiación solar de la encina; *RUEe*: eficiencia en el uso de la radiación de la encina.

FIGURA 1

Diagrama causal del submodelo Encina del Modelo Dehesa mostrando las relaciones entre variables, los flujos de material (flechas dobles) y los flujos de información (flecha simple).

Flow chart of Evergreen oak submodel from Dehesa Model shows relationship among variables, stock flows (double arrow) and information flow (single arrow)

Los modelos permiten describir el sistema, pero también ayudan a estructurar y ordenar la información y los conocimientos existentes sobre el sistema. El modelo necesita y se apoya sobre todo en el acervo científico y técnico del conocimiento sobre el funcionamiento del sistema que se pretende modelar. Definidas las variables y flujos, el siguiente paso es asignar los valores iniciales y los valores de las constantes que interviene en el modelo, relacionadas estas últimas con parámetros fisiológicos que se suponen invariantes a lo largo del proceso de simulación. Esto requiere sistematizar y tener disponible toda la información, por lo que la disponibilidad de bases de datos es imprescindible (Figura 2).

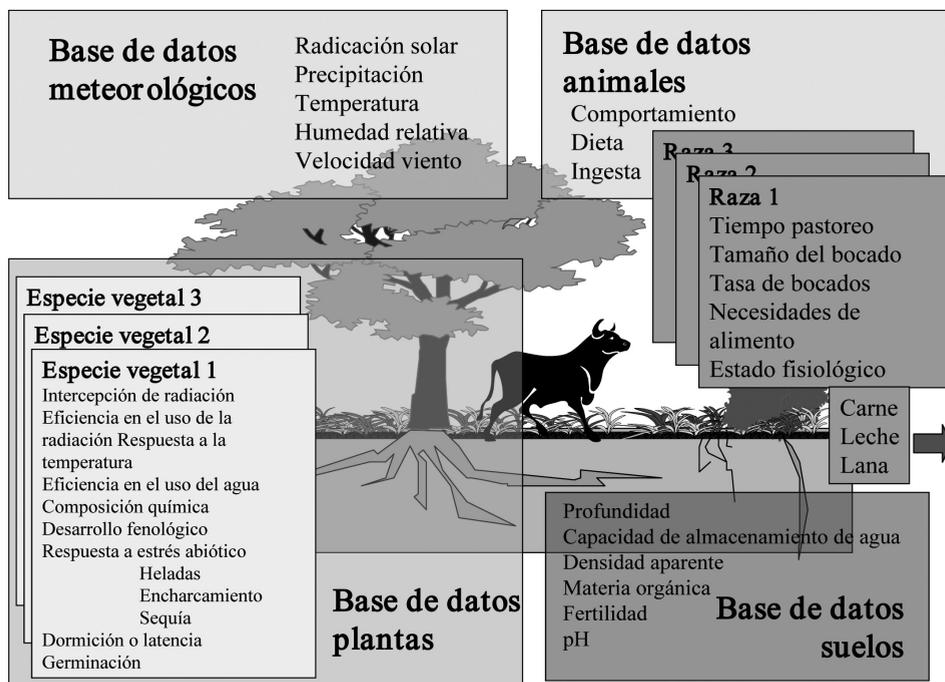


FIGURA 2

Compartimentación de la información necesaria que describe los componentes y los parámetros que caracterizan un sistema agroforestal.

Necessary databases to describe components and parameters in an agroforestry system.

Calibración y validación de los modelos de simulación

Por la tarea de calibración se entiende el ajuste de los distintos parámetros o constantes que requiere el modelo para ser aplicado en unas determinadas condiciones. La calibración debe atender al significado fisiológico de las variables y por ello deben acotarse sus valores a los recogidos en los ensayos de campo, comparando los resultados observados en campo con los simulados. Definidos unos criterios de ajuste, el proceso de calibración consiste en asignar valores a las variables que optimizan ese ajuste. El proceso de calibración es un proceso iterativo y cada paso conduce a revisar el anterior, de tal forma que a medida que se obtiene más información real, el modelo se puede ir ajustando con más precisión, lo que permite obtener respuestas razonables sobre el funcionamiento y respuesta del sistema ante un determinado escenario (Sinclair y Seligman, 1996). El siguiente paso es la validación. La validación del modelo consiste en comparar los datos obtenidos en campo con los datos que proporciona el modelo

cuando se aplica sobre esas mismas condiciones, estos datos de campo deberán ser distintos a los empleados en la calibración (Boons-Prins *et al.*, 1993). Ambos procesos, calibración y validación una vez completados con éxito, permiten aplicar el modelo en cuestión en la zona o región para la que fueron realizados. Algunos de los estadísticos más empleados en estos procesos pueden obtenerse en Yang *et al.* (2000). La validación es una importante tarea, ya que aunque los modelos estén planteados para simular el crecimiento y desarrollo del pasto en cualquier lugar una vez que se introducen todos los datos necesarios para hacer una simulación, hay cierta variabilidad no explicada por el modelo que hay que evaluar en la nueva situación. Muchos son los factores que afectan al crecimiento y desarrollo de una planta o animal, algunos de éstos pueden no estar incluidos en el modelo, y además muchos factores del modelo son meras simplificaciones de la realidad, sujetas a error, de esta forma, la validación se realiza para que los resultados del modelo se ajusten a los resultados del sistema real (Jones y Kiniry, 1986).

Principales procesos modelados en la vegetación

Un modelo puede trabajar a distintos niveles, lo común en Pascolología es el nivel de planta individual o de comunidad. Si lo hace a nivel de planta, cada planta estará representada por unos parámetros que describen sus principales propiedades de crecimiento y desarrollo. Los valores de estos parámetros hay que definirlos inicialmente y no cambiarán a lo largo de un proceso de simulación. De esta forma la planta responde a una determinada pauta de crecimiento y desarrollo que es función de la disponibilidad de recursos. En este caso, la comunidad se obtiene por agregación de plantas individuales. En el segundo caso, en la comunidad, no es necesario descender al detalle de las especies que forman la comunidad, la comunidad de plantas herbáceas queda representada por las características medias ponderadas de cada una de las especies presentes, entonces se puede trabajar como si de una única planta tipo se tratase.

En los modelos de simulación de plantas se distinguen dos procesos: desarrollo y crecimiento (Williams *et al.*, 1990). El desarrollo se establece a partir de la fenología. El crecimiento es la acumulación diaria de biomasa.

Desarrollo fenológico

La fenología define los diferentes estados por los que va pasando la planta en su desarrollo vegetativo y reproductivo (Hodges, 1991). La respuesta fenológica de la planta vendrá determinada por una función de la temperatura y la longitud del día, es decir por la integral térmica o fototérmica y podrá estar corregida por necesidades de vernalización. En el desarrollo fenológico se puede distinguir los siguientes estados: **Preemergencia** o estado seminal, en este periodo no existe desarrollo foliar y por tanto

no hay transpiración, una parte del peso de la semilla es el que formará el área foliar inicial; **Emergencia:** es un estado puntual, para marcar el comienzo del desarrollo foliar, del cálculo del índice de área foliar (IAF), del crecimiento en profundidad de las raíces y de la acumulación de biomasa; **Crecimiento activo:** es la fase de crecimiento vegetativo, en este estado tienen lugar los procesos de transpiración y absorción de nutrientes. **Floración:** en esta fase habrá que distinguir entre especies de crecimiento determinado o indeterminado, el crecimiento radical alcanza el máximo según la especie, lo mismo sucede con el área foliar si se trata de especies de crecimiento determinado, en esta fase continúan los procesos de transpiración y absorción de nutrientes. **Llenado de granos:** fase en la que comienza la translocación de fotoasimilados al grano, durante esta fase se acumula el estrés que pueda afectar al llenado de granos, continúan todos los procesos. **Madurez fisiológica:** la planta alcanza la madurez, finaliza la acumulación de biomasa y el llenado de granos, terminan los procesos de transpiración y absorción de nutrientes en el caso de especies anuales, en el caso de las especies perennes la actividad vegetativa continúa. **Cosecha:** se produce la cosecha del forraje, se retira la biomasa de la parte aérea salvo los residuos que se dejan en el campo, en esta fase no hay transpiración ni absorción de nitrógeno.

Crecimiento de la vegetación

El crecimiento es la acumulación de biomasa en la planta. La biomasa se calcula a partir de la intercepción de la radiación solar que, a su vez, depende del índice de área foliar, el coeficiente de extinción de la radiación solar y la eficiencia en el uso de la radiación. Además este crecimiento está limitado por la temperatura, la disponibilidad de agua para la transpiración y por la cantidad de nitrógeno u otros nutrientes disponibles para el crecimiento. La siega o el pastoreo suponen la remoción de parte del área foliar. Así, la producción diaria de biomasa del cultivo se obtiene como el mínimo entre la biomasa producida como consecuencia de la radiación solar, la biomasa que se puede producir en función de la disponibilidad de agua para la transpiración y la biomasa que se puede producir en función de la disponibilidad de nutrientes. También, el crecimiento depende de un factor de temperatura, función del tipo de especie, que reduce el crecimiento en situaciones de bajas o de altas temperaturas ambientales. La biomasa final viene dada por el valor acumulado de la generada en cada unidad de tiempo.

La simulación del crecimiento de las raíces es necesaria para determinar la capacidad de absorción de agua y la capacidad de movilizar nutrientes, específicamente para el caso de las leguminosas determina la cantidad de nódulos de *Rhizobium*. Las formas más sencillas son las que relacionan el índice de área foliar con la profundidad de raíces o las que suponen un reparto de asimilados a partir del *pool* de biomasa generado.

La siega y pastoreo son procesos que afectan al crecimiento, aunque en algunos casos también afectan al desarrollo. La siega o el pastoreo se pueden producir en cualquier momento del ciclo por lo que pueden afectar a cualquiera de las partes aéreas de la planta, y suponen la eliminación de cierta cantidad de biomasa. En los casos de simulación del comportamiento selectivo (es la conducta que presentan los animales en pastoreo al consumir determinadas plantas o porciones de ellas), éste puede afectar de distinta forma a cada una de las especies que componen la comunidad o a distintas partes de la planta.

Balance hídrico

La descripción matemática del continuo suelo-planta-atmósfera está condicionada por la complejidad de los mecanismos de absorción del agua del suelo y la heterogeneidad del sistema suelo-raíz (Campbell y Stöckle, 1993; Hector *et al.*, 1993). Encontramos básicamente dos procedimientos para el cálculo del balance hídrico: uno es el sistema de pistón o cascada de Campbell y Díaz (1988), y otro mediante la aplicación de la ecuación de Richards (van Bavel y Hanks, 1983).

El sistema en cascada opera en la unidad de tiempo con la simulación de entradas, pérdidas y acumulación de agua en las distintas capas del suelo. El suelo se divide en un número determinado de capas a las que se les asignan las propiedades hidráulicas que lo caracterizan en función de la profundidad. En este caso, las distintas capas del suelo se comportan como depósitos en serie que admiten un contenido de agua, cuando se supera empiezan a drenar a la capa inferior siguiente, considerando el movimiento del agua en el suelo unidireccional y en sentido descendente. Este modelo del balance hídrico supone el suelo como una sucesión de depósitos de agua que se rellenan o vacían en función de los flujos de entrada (precipitación o riego) y salida (evaporación, transpiración y percolación), estima por un lado las pérdidas de agua por transpiración y por otro la modificación del contenido de agua en el suelo (Campbell, 1991; Campbell y Stöckle, 1993). En la modelización es importante calibrar el espesor de la primera capa de suelo, ya que es donde se produce la evaporación.

Los modelos de diferencias finitas resuelven la ecuación de Richards por una aproximación numérica. En este caso la variación del contenido de agua en el suelo en la unidad de tiempo es igual a la variación del flujo de agua en profundidad. El movimiento del agua puede ser ascendente y descendente, aunque unidireccional, en función de la diferencia de potencial entre las distintas capas del suelo (van Bavel y Hanks, 1983). Este modelo es más exacto cuando se trata de suelos con peor drenaje o con alto contenido en partículas finas. Aunque, ambos procedimientos son comparables (Huang *et al.*, 2011), utilizar uno u otro dependerá de la información de partida y del problema a resolver.

Balance de nitrógeno

El nitrógeno es el nutriente mejor modelado. La simulación del nitrógeno incluye: el transporte de nitrógeno, la transformación del nitrógeno, la adsorción de amonio y la absorción de nitrógeno por el cultivo. Para el transporte de nitrógeno se aplica un simple balance de masas. El balance de nitrógeno se simula a partir de las necesidades del cultivo y del aporte de nitrógeno por el suelo debido a la mineralización de la materia orgánica, la fijación de nitrógeno por las leguminosas, la descomposición de los residuos o por el fertilizante añadido. El movimiento del nitrógeno depende del movimiento de agua en el suelo, de tal forma que parte del nitrógeno presente en el suelo se puede perder con el agua que abandona la zona radical. Las transformaciones que se incluyen son la mineralización neta, nitrificación y desnitrificación. La mineralización depende de la cantidad de nitrógeno contenido en la materia orgánica, de la tasa de mineralización (tasa que depende de la temperatura del suelo) y de la humedad del suelo (que es función del contenido de agua y de la densidad aparente del suelo). A esta mineralización de la materia orgánica presente en el suelo se le añade la que se produce por descomposición de los residuos, que depende de su descomposición diaria, de su contenido en carbono y de la relación carbono/nitrógeno. El proceso de nitrificación se describe de forma similar al de mineralización mediante la tasa de nitrificación que depende también de la temperatura y humedad del suelo. El proceso de desnitrificación depende de la cantidad de nitrato disponible para ser desnitrificado y de la tasa de desnitrificación que a su vez depende de la temperatura del suelo y de la humedad. La adsorción de amonio es la cantidad que es adsorbida por la fase sólida del suelo o disuelta en el agua del suelo y, en este caso, va a moverse junto con ésta. La absorción de nitrógeno por la planta viene dada por el valor mínimo entre la demanda de nitrógeno para su crecimiento y la capacidad potencial de absorción de nitrógeno. La demanda de nitrógeno es la cantidad de nitrógeno que la planta precisa para cubrir su crecimiento diario más la demanda deficitaria, esta última es la diferencia entre la concentración máxima de la planta y la concentración de nitrógeno actual de la planta antes del nuevo crecimiento. Mientras, la capacidad potencial de absorción de nitrógeno depende de la cantidad de agua que absorben las raíces y de la concentración de nitrógeno disponible en el agua del suelo. En el caso de las leguminosas, la tasa de fijación de nitrógeno se establece en función del crecimiento y de la concentración de nitrógeno en los tejidos (Williams *et al.*, 1990). Esta tasa se ve afectada por la disponibilidad de agua, el contenido de nitrógeno mineral en la zona radical y la temperatura del suelo. La fijación de nitrógeno por las leguminosas presenta en la mayoría de los modelos un valor máximo alrededor de $6 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y cesa cuando el contenido de nitrógeno del suelo es superior a 300 kg N ha^{-1} (Williams *et al.*, 1990). El resto de macronutrientes como fósforo o azufre es modelado a partir de funciones de transferencias de nutrientes (Dougherty *et al.*, 2004; Saggarr *et al.*, 1990). Estos modelos explican el proceso físico-químico de la movilización del fósforo

a partir del estado en el que se encuentra en el suelo. Aunque a medida que el modelo gana en complejidad la utilidad para el usuario final disminuye debido al mayor número de datos e información necesario para su aplicación.

Manejo

El manejo incluye las decisiones del ganadero sobre los cultivos, el pasto y los animales. El ganadero puede modificar la disponibilidad de recursos como el agua, si decide regar, el balance de nutrientes mediante la adición de fertilizantes, puede labrar el suelo, puede modificar la composición de especies y su arquitectura, y controla el pastoreo (qué especies, la carga ganadera y el tiempo de pastoreo). En el manejo se sigue la lógica: cuándo, qué y cómo se hace cada operación. De tal forma se definen las fechas en que se realiza la labor y apero utilizado. Los simuladores permiten la opción de definir un calendario de operaciones o hacerlo de forma automática siguiendo unos determinados criterios de decisión. El laboreo supone una modificación de la superficie del suelo, de la cantidad de residuos que permanecen sobre el suelo y de la disponibilidad de agua. El riego en los modelos supone una entrada de agua en el sistema. El procedimiento puede ser: automático, en función de las necesidades del cultivo; o conforme un calendario preestablecido en el cual se fija, la fecha de riego o la fase del cultivo en la que se quiere regar, la dotación y el contenido de sales del agua de riego. Para la fertilización hay que indicar la fecha, el tipo de fertilizante empleado (orgánico o inorgánico), la fuente de nitrógeno, si es en forma de amonio o nitrato, y la cantidad aplicada. La siega también se simula respecto a un calendario segándose una cantidad determinada de forraje o a una altura sobre el suelo, también se puede relacionar la cantidad segada con un determinado índice de área foliar. El pastoreo desde el punto de vista de los modelos es similar a la siega, si bien el pastoreo viene determinado por la carga ganadera, los tipos de animales y sus necesidades nutricionales, y dependiendo del detalle del modelo también se podrá simular el comportamiento selectivo del animal. Mediante la siembra se modifica la composición botánica. La siembra de una determinada especie va acompañada por un conjunto de parámetros que definen el comportamiento de esa especie.

MODELOS DE SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE PASTOS

Como usuarios de modelos debemos elegir entre utilizar un modelo específico o uno generalista. El proceso de selección del modelo más adecuado para nuestro estudio va a depender del objeto de investigación y de la disponibilidad inicial de información. Esta información define el estado inicial del sistema. Aunque, desde el punto de vista matemático, no estamos trabajando con modelos estocásticos ya que los resultados del

modelo no varían si los datos de partida son los mismos en simulaciones sucesivas, sin embargo por su carácter dinámico pequeñas modificaciones de los valores iniciales pueden dar lugar a grandes diferencias en el resultado final (Mandelbrot, 1983). Los modelos generalistas son aquellos que no se establecen para ninguna especie vegetal o animal en particular. Permiten, al modelador o usuario construir a su medida su propia especie vegetal o animal, a partir de una serie de parámetros que los caracterizan. Normalmente, estos parámetros están relacionados con sus características fisiológicas, por ejemplo para plantas sería su integral fototérmica, número máximo de hojas y tallos, eficiencia en el uso de la radiación; para los animales sería la especie y raza, el peso del animal, el tamaño del bocado, entre otros.

Modelos generalistas

Como modelo generalista para cultivos forrajeros se puede utilizar el modelo CropSyst, acrónimo de *Cropping Systems Simulation Model* (Stöckle *et al.*, 1994; Stöckle *et al.*, 2003). CropSyst (<http://www.bsyse.wsu.edu/CropSyst>) permite simular cualquier cultivo previamente calibrado. Facilita el acceso del usuario a todas las variables, parámetros o constantes que caracterizan el cultivo. Confalonieri y Bechini (2004) han calibrado el CropSyst para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en Italia demostrando la robustez y validez de este modelo para la simulación de cultivos forrajeros perennes, también se han simulado cultivos forrajeros de avena (*Avena sativa* L.), centeno (*Secale cereale* L.) y raigrás italiano (Abraha y Savage, 2008). CropSyst ha sido empleado para modelar el crecimiento del maíz forrajero (*Zea mays* L.) y analizar la sostenibilidad de explotaciones lecheras (Moriondo *et al.*, 2010). En Francia se ha aplicado con éxito el modelo STICS-Prairie (http://www.avignon.inra.fr/agroclim_stics) (Di Bella *et al.*, 2005). También el paquete informático DSSAT (<http://www.icasa.net/dssat/>) que integra los modelos CERES o SOYGRO ha sido aplicado para simular cultivos forrajeros, como el CERES-Maize utilizado por Sau *et al.* (2010) en España. Otros modelos generalistas, menos utilizados, han sido el SUCROS, *Simple and Universal Crop Growth Simulator* de Goudriaan y Van Laar (1994). SUCROS permite simular la producción potencial de los principales cultivos herbáceos de la Unión Europea, en función del suelo y las condiciones meteorológicas de cada zona, de forma similar al modelo WOFOST, *World Food Studies* (Boons-Prins *et al.* 1993; Supit *et al.*, 1994).

Modelos de la cubierta vegetal

La base de los modelos de simulación está en la formación de biomasa a partir de la intercepción de la radiación solar (Charles-Edwards *et al.*, 1986; Donatelli, 1995; Penning de Vries *et al.*, 1989). La intercepción de la radiación solar por las plantas es

el factor primordial para la formación de la biomasa y del rendimiento. Por esta causa, la gran mayoría de los modelos tienen como subrutina para el cálculo de la acumulación de biomasa y sus diferentes formas la correspondiente a la intercepción de la radiación solar incidente por la cubierta vegetal (Boons-Prins *et al.*, 1993). La disposición de las plantas en el espacio puede ser aleatoria o venir dada por parámetros agronómicos, especialmente en los cultivos forrajeros o en praderas, como densidad de siembra, separación entre líneas y distancia entre plantas dentro de la línea, también depende de la arquitectura de la planta. La disposición determina la superficie efectivamente expuesta a la radiación solar y, en definitiva, de alguna manera, la capacidad productiva del cultivo. En general las cubiertas vegetales, al igual que en el caso concreto de los pastos herbáceos, se han tratado como una estructura homogénea y se pueden caracterizar con dos parámetros, el índice de área foliar y el coeficiente de extinción de la radiación solar. El índice de área foliar es una variable auxiliar que el modelo calcula dividiendo la cantidad de biomasa que hay en hojas por el área foliar específica. En el caso de especies anuales habrá un valor mínimo del índice de área foliar en función de la proporción del peso seminal que da lugar a las primeras hojas, en el caso de las especies perennes siempre habrá una cantidad de biomasa disponible para la formación de nuevas hojas. Por lo que semillas en un caso y capacidad de rebrote en otro serán responsables de los ciclos de crecimiento de la planta, y claves en la dinámica del modelo. Para una cubierta vegetal completa la cantidad de radiación interceptada, en condiciones del medio no limitantes, depende de la radiación solar incidente, de las propiedades ópticas de las plantas, de la densidad de plantas y de su arquitectura (Chen *et al.*, 1994). Normalmente, la radiación interceptada por el cultivo se describe por adaptación de la Ley de Beer's que asume que las cubiertas vegetales son continuas y homogéneas. Sin embargo, este patrón no siempre se cumple, por ejemplo en los estados iniciales del cultivo no hay continuidad de la cubierta. Ahora bien, esta aproximación se ha puesto en entredicho (Sinoquet, 1989). La cubierta ha sido representada o modelada de muy distintas formas. Lo cierto es que en la vida de una comunidad de plantas ésta va pasando por muy diferentes estados: al comienzo, la cubierta se corresponde con una distribución dispersa de plantas individuales; más adelante se puede hablar de cultivos en líneas y al final se alcanza una cubierta cerrada que se podrá considerar como homogénea, siempre que los parámetros ecofisiológicos lo permitan. Sin embargo, esto no ocurre así en muchos casos, el ejemplo más claro lo encontramos en numerosos cultivos arbóreos, en los cuales la discontinuidad de la cubierta suele ser lo más normal (Boissard *et al.*, 1990; Dauzat y Eroy, 1997).

Se han desarrollado modelos específicos sobre la evolución dinámica de la arquitectura de la planta siguiendo las propuestas de Prusinkiewicz y Lindenmayer (1990), son modelos tridimensionales que se consiguen aplicando los llamados sistemas de Lindenmayer. Estos modelos de crecimiento tienen un amplio campo de aplicación

en la investigación agronómica (Hanan, 1997), en particular, en los sistemas pastorales donde el pastoreo sucede a nivel de planta, especialmente en plantas leñosas, casos en los que la distribución espacial de las hojas y frutos es relevante de cara a la aprehensión. Estos modelos toman la idea de la planta como unidad elemental de una comunidad vegetal (Thornley, 1976), pero sin perder de vista al conjunto, es decir, estudiar el comportamiento individual de la planta dentro del conjunto. Estos modelos permiten mejorar todo lo relativo a densidades de siembra e intercepción de la radiación solar por las plantas en cualquier fase de su crecimiento (Díaz-Ambrona *et al.*, 1998). Este tipo de modelos tienden a un ajuste pragmático a la realidad (Sinclair y Seligman, 1996), sin embargo esta aproximación requiere muchos parámetros difíciles de calibrar por lo que su uso fuera de la investigación es muy limitado.

Modelos de simulación del crecimiento de pastos herbáceos

Aunque la modelización de pastizales se puede realizar desde la base de los modelos generalistas, los modelos específicos para pastos herbáceos son más recomendables por incluir aspectos particulares a estas comunidades vegetales (Bergez y Msika, 1996; Hanson *et al.*, 1994). Los modelos conceptuales tuvieron su inicio en el proyecto *Hurley Pasture Model* desarrollado para zonas templadas húmedas. *Hurley Pasture Model* es un modelo dinámico, determinista y mecanicista basado en procesos que describen los ciclos de carbono, nitrógeno y agua del sistema suelo-herbáceas-animal (Johnson y Thornley, 1985; Thornley y Cannell, 1997; la descripción completa está recogida en Thornley (1998)). Sobre esta base se han desarrollado: ERHYM-II (White, 1987), SPUR (Hanson *et al.*, 1988), CCGRASS (Verberne, 1992), GEMT (Chen y Coughenour, 1994) o GRASIM (<http://engineering.purdue.edu/~grasim>) (Mohtar *et al.*, 1997).

El modelo SPUR, *Simulation of production and utilization of rangelands*, es un modelo de tipo generalista de pastos herbáceos, ya que permite elegir y combinar comunidades vegetales, incluye componentes para la simulación de las interacciones agua-herbáceas-animal, SPUR ha sido ampliamente utilizado en los Estados Unidos (Hanson *et al.*, 1988; Wight y Skiles, 1987). Los procesos que modela son el crecimiento diario de cuatro grupos de especies herbáceas perennes y matorral, el ciclo de carbono y del nitrógeno, el flujo de agua en el suelo, la hidrología superficial y la erosión hídrica, el consumo de forraje por la fauna salvaje y la economía de la producción de carne de vacuno. Desarrollos posteriores de SPUR se centran en la simulación del crecimiento de los animales (vacas y terneros). Posteriormente se añade el modelo *Colorado Beef Cattle Production Model* (Baker *et al.*, 1992), que simula el crecimiento del animal en sus distintas fases fisiológicas, desde el nacimiento hasta la muerte del animal, considerando diferentes demandas de nutrientes y energía en la dieta. El modelo calcula la ingesta diaria de los animales a partir de la simulación de la tasa de ingestión, que depende del

tamaño y número de bocados, y del tiempo de pastoreo de cada animal. Posteriormente se añade el modelo CENTURY (<http://www.nrel.colostate.edu/projects/century5/>) (Parton *et al.*, 1993) para la simulación de la evolución de la materia orgánica del suelo.

El modelo GrazeGro (Barrett *et al.*, 2005) describe los procesos fisiológicos de la planta a nivel de tallos y hojas. Las variables conductoras son la radiación solar, la temperatura y la disponibilidad de agua y nitrógeno, la calidad del pasto se representa por la variación del contenido en proteína bruta. Jouven *et al.* (2006) elaboran un modelo mecanicista de la dinámica de la producción que incorpora nuevos aspectos sobre la estructura y la digestibilidad de pradera, de tal forma que el modelo simula las variaciones estacionales y anuales de la dinámica de las plantas. En este modelo las relaciones planta-animal dependen de los regímenes de defoliación, que varían en función de la digestibilidad de las plantas y de la palatabilidad que presentan en cada momento para el animal. Por ello el modelo puede llegar a simular el comportamiento selectivo del animal por determinadas especies, lo cual impacta en la composición botánica del sistema.

Los modelos desarrollados para zonas áridas o semiáridas y pastos anuales son menos abundantes que para los de las zonas húmedas templadas (Baker *et al.*, 1992). Para pastos anuales los primeros modelos se realizan para el pastoreo de trébol subterráneo con ovejas en Australia (Galbraith *et al.*, 1980). Posteriormente le siguen los modelos realizados por Hunt *et al.* (1991) en Colorado (Estados Unidos). En zonas áridas el balance de agua es la pieza clave del modelo ya que permite evaluar el impacto de la sequía sobre el pastizal (Trnka *et al.*, 2006). El modelo DESPAS (DESertificación por sobrePAsstoreo) es un modelo dinámico con base temporal anual, construido con el fin de caracterizar de forma general la dinámica de un sistema ideal ganado-pasto-suelo en ambientes mediterráneos (Martínez-Valderrama, 2005), de tal forma que permite simular sus modos de comportamiento posible. Es un modelo del tipo de competencia y depredación, integra los trabajos de Noy-Meir (1975, 1978) que aplica el modelo predador-presa a los sistemas de ganadería extensiva y los de Thornes (1985, 1990) que estudió la erosión como una relación ecológica de competencia por el agua entre el suelo erosionado y la cubierta vegetal.

Modelos de simulación del crecimiento de pastos arbolados

La incorporación de árboles y otras plantas leñosas en los modelos pastoriles ha sido realizada casi desde sus inicios. McMurtrie y Wolf (1983) presentaron un modelo de competitividad entre árboles y gramíneas sobre los principales recursos: radiación solar, agua y nutrientes. Ese modelo calcula la producción de materia seca dividiendo la arquitectura de la vegetación en capas que con diferente área foliar van interceptando una parte de la radiación solar (Figura 3). Los sistemas agrosilvopastorales son

complejos. Muchos componentes interactúan simultáneamente y en algunos casos presentan un comportamiento caótico. El crecimiento del pasto se ve afectado por factores meteorológicos, la condición física y química del suelo, insectos, enfermedades, malas hierbas, el animal en pastoreo y la interacción de estos factores entre sí (Jones y Luyten, 1998).

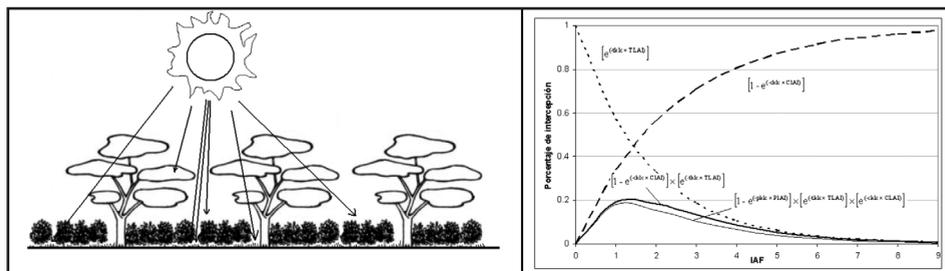


FIGURA 3

(Izquierda) Esquema de un sistema agroforestal con tres niveles de vegetación arbórea, arbustiva y herbácea y (derecha) Correspondencia matemática que representa la interceptación de la radiación solar en cada nivel de vegetación, siendo k_{lc} el coeficiente de extinción de la radiación solar e IAF el índice de área foliar (IAF) de la especie i (adaptado de Díaz-Ambrona *et al.*, 2008).

(Left) Representation of an agroforestry system with three vegetation levels: grass, scrub and trees, and (Right) mathematical approach to solar radiation interception to each vegetation levels, where k_{lc} is the attenuation coefficient for solar radiation and IAF is the leaf area index (IAF) for the i species (adapted from Díaz-Ambrona *et al.*, 2008).

Para las dehesas se comienza con la modelización separada de la parte herbácea y arbórea. Hay algunos trabajos sobre pastoreo (Herrero *et al.*, 1998) y modelos forestales de masas arboladas (Gracia *et al.*, 1999). La descripción sobre la dinámica de pastizales recogida por Thornley (1998) es un buen punto de referencia para su adaptación a los pastos herbáceos que aparecen en nuestras dehesas. Las relaciones pasto-arbolado fueron estudiadas por el ya clásico trabajo de González-Bernáldez *et al.* (1969) para el caso del monte de El Pardo de Madrid. El trabajo de González-Aldama y Allue (1982) presentó evidencias de la competencia radical entre el encinar y el pasto herbáceo. Las relaciones arbolado-cultivo, de los sistemas agroforestales, las podemos encontrar en el recopilatorio de Ong y Huxley (1996). Si bien no incluye los aspectos particulares de los sistemas mediterráneos tipo dehesas, muchos de los estudios que presentan se realizan sobre sistemas de tipo sabana y por ello podemos encontrar similitudes experimentales aplicables a la dehesa. La clave de la relación pasto herbáceo arbolado está en cómo se establece la competencia por los mismos recursos que son la base de la formación de la biomasa entre las distintas plantas que forman el sistema (Hilbert y Canadell, 1995). GOTILWA+ (*Growth Of Trees Is Limited by Water*) es un modelo dinámico de procesos

ecológicos del bosque mediterráneo, calcula los flujos de agua y carbono a nivel de parcela a partir del cálculo de la transpiración de cada componente de la vegetación, en el balance de carbono se tiene en cuenta los costes de respiración y construcción en la síntesis de biomasa, sin embargo en la simplificación que hacen del sistema no simulan su parte herbácea (Gracia *et al.*, 1999). La estructura del arbolado en sistemas silvopastorales difiere al del mencionado bosque mediterráneo. Normalmente, los árboles están más dispersos y por lo común nunca llegan a cubrir todo el suelo. Aunque, este modelo puede ser un buen punto de partida para el modelado de espacios arbolados. El modelo PATUMOD de Gillet *et al.* (2002) reproduce el impacto que el pastoreo ejerce sobre la dinámica de la vegetación en zonas arboladas. En este caso el arbolado sólo tiene dedicación forestal, en muchos casos, y en particular en las dehesas, prima la producción de fruto frente a la acumulación de madera por lo que los aspectos a modelar son diferentes. Por otra parte, Bergez y Msika (1996) y Bergez *et al.* (1999) proponen ALWAYS un modelo biofísico para los sistemas silvopastorales europeos basado en un módulo físico que tiene en cuenta el suelo y el microclima, un módulo biológico formado por el arbolado, el pasto herbáceo y el rebaño y un módulo de manejo. Jacques-Eric y Bruno (1995) presentan un modelo silvopastoral con un modelo sencillo donde abundan las relaciones empíricas entre una pradera y un arbolado de tipo caducifolio. El Modelo Dehesa se centra en la transferencia de radiación entre el arbolado y el pasto herbáceo, en el efecto de las temperaturas sobre el crecimiento y en el balance de agua en el suelo, con todo ello simula el crecimiento diario del pasto herbáceo y la producción de bellotas del encinar (Almoguera, 2007; Etienne *et al.*, 2008). El modelo ha sido aplicado para los pastos adehesados extremeños (Díaz-Ambrona *et al.*, 2009). En los sistemas mediterráneos el balance de agua es el principal aspecto modelado. El cálculo del balance hídrico se establece a partir de la capacidad de retención de agua por el suelo y en la forma que especies herbáceas y leñosas absorben ésta para satisfacer su demanda de transpiración (Hector *et al.*, 1993; Leenhardt *et al.*, 1994). Lo mismo ocurre con el Modelo Dehesa en el cual las variables conductoras son la disponibilidad de agua, la temperatura y la radiación solar.

Modelo de las relaciones pasto-animal

Los primeros modelos parten de aplicación de relaciones deterministas acción-respuesta (Udo y Brouwer, 1993). En éstos la ingesta es simulada en función del tamaño y estado fisiológico del animal y de la disponibilidad, digestibilidad y el contenido de proteína bruta del alimento, el modelo determina la condición animal en función de la ingesta, el grado de madurez y el potencial genético (Sanders y Cartwright, 1979). El modelo *Edinburgh Cattle Production Systems Model* (Thorne, 1998) integra modelos de cultivos con modelos ganaderos, señala tres aspectos claves en el

modelo la disponibilidad de recursos orgánicos (esto es, que la alimentación animal sea proporcionada por los cultivos o pastos de la explotación o también tenga aportes externos), del uso de la tierra por los animales (hay que distinguir si los animales están estabulados o en pastoreo, o los tiempos que pasan en una situación u otra) y de la utilidad de los recursos alimenticios por el animal. Los modelos de las relaciones pasto-animal se encuadran dentro de los modelos ecológicos de poblaciones y, en particular, dentro de los denominados genéricamente sistemas predador-presa. Esta relación se estudia desde el conocimiento fisiológico del consumo de la vegetación (Smallegange y Brunsting, 2002). El software de ayuda a la decisión GRAZPLAN desarrollado por el CSIRO en Australia incluye un conjunto de modelos sobre las relaciones pasto-animal, incluye el modelo GrassGro y GrazFeed, ambos incluidos en el paquete APSIM (<http://www.apsim.info>). Los procesos modelados son el desarrollo y crecimiento del pasto, tanto en producción como en calidad, medida como digestibilidad de la materia seca, y calcula la ingesta en función de las necesidades de energía y proteína (Clark *et al.*, 2000).

El balance térmico del ganado afecta a la ingesta y a su eficiencia productiva por lo que los modelos animales incorporan este proceso, en el modelo GRAZE la descripción del comportamiento y respuesta del animal se realiza a una escala de minutos, los procesos biológicos modelados en la parte animal son la composición corporal, la transferencia de calor corporal, la ingesta y digestión, y la demanda de energía y nutrientes (Loewer, 1998). La ingesta en los animales en pastoreo depende del comportamiento selectivo del animal, del bocado y del número de bocados en función del tiempo de pastoreo. El modelo GrazeIn se basa en el concepto de unidad lastre del INRA, de tal forma que el modelo calcula el consumo voluntario de alimento, que es función de la capacidad de ingesta de las vacas lecheras y del valor alimenticio del forraje, y le aplica un coeficiente de proporcionalidad que depende de factores no nutritivos del pasto herbáceo: disponibilidad de pasto y manejo del pastoreo (Delagarde *et al.*, 2011a, 2011b; Faverdin *et al.*, 2011).

Modelos de cubiertas vegetales estructurales y funcionales

Los sistemas agrosilvopastorales se componen de un complejo sistema de estructuras vegetales que no siempre forman cubiertas homogéneas y continuas, por lo que es preciso considerar los elementos estructurales a nivel espacial (Fourcaud *et al.*, 2008). La heterogeneidad de esa cubierta vegetal obliga a modificar los modelos de medio turbido que se aplican para calcular la intercepción de la radiación solar a través del índice de área foliar, de tal forma que ese modelo continuo se descompone en función de la geometría de la planta (Andrieu *et al.*, 1995; Goel y Grier, 1986). La forma que presenta la planta afecta a la transferencia de energía radiante, para tener en cuenta esos efectos la

forma de la planta se incorpora a los modelos de crecimiento y desarrollo de los cultivos, abriendo camino a la modelización en tres dimensiones (Anisimov y Fukshansky, 1993; Goel y Norman, 1992; Jackson y Pinter, 1986; Kuusk, 1995; Sinoquet, 1993; Sinoquet *et al.*, 1993; Sinoquet *et al.*, 1997). Teniendo en cuenta este comportamiento, los modelos para estudiar las propiedades ópticas de la cubierta son (Goel y Norman, 1992):

- **Modelos geométricos clásicos:** en los que la cubierta se supone compuesta por figuras geométricas (esferas, conos, cilindros), dispuestos de forma regular o aleatoria, tomándose como reflectancia de la cubierta la media de todas las reflectancias tanto de las plantas soleadas como de las que están en sombra (Gilabert y Meliá, 1990; Gilabert *et al.*, 1994).
- **Modelos de medio turbido diferenciales:** los elementos vegetales son tratados como pequeñas partículas con propiedades ópticas determinadas, distribuidos aleatoriamente en capas horizontales y orientadas en una determinada dirección. Se trata de un modelo unidimensional, obteniéndose un modelo más simple. Presentan buenos resultados cuando se trata de cubiertas densas, homogéneas, horizontales y compuestas por elementos vegetales pequeños (Sinoquet *et al.*, 1993).
- **Modelos multicapa:** la cubierta vegetal se divide en capas de pequeño espesor entre las que hay un cambio elemental de las propiedades que caracterizan cada capa. Estos se utilizan para modelar la interacción de las coberturas vegetales con la atmósfera que les rodea (Kondo y Watanabe, 1992; Raupach, 1991).
- **Modelos híbridos:** mezcla del modelo de medio turbido diferencial y del modelo multicapa, la cubierta se aproxima a una distribución geométrica de plantas.
- **Modelos de descomposición poligonal:** son modelos que simulan la disposición y orientación de los elementos vegetales en pequeñas áreas o polígonos distribuidos por toda la cubierta. La simulación de la intercepción de la radiación se realiza sometiendo a todos los polígonos a una «lluvia» de rayos, mediante la simulación de Monte Carlo, determinando el flujo de rayos que abandona un polígono y llega a un receptor. Tienen la ventaja de ser más realistas. Recogen una mejor representación de la arquitectura de la planta, que deja de tener una forma geométrica definida, para pasar a una representación más realista que permite aplicar con más precisión estos últimos modelos (Drouet, 1998).
- **Modelos geométricos reales:** la estructura de la planta es modelada respetando al máximo su arquitectura real (Dauzat y Eroy, 1997; Fournier y Andrieu, 1998; Prusinkiewicz, 1998). Simulada esta imagen hay distintas formas de proceder para analizar la intercepción de la radiación solar, ya sea por las formas clásicas tratando a la cubierta como un cultivo del que se conoce el índice de área foliar y el porcentaje de suelo cubierto, o bien empleando generadores de rayos y

contabilizando el número de rayos que interceptan las hojas u otros órganos del vegetal.

Cuando no hay homogeneidad de la cubierta vegetal hay la necesidad de una aproximación tridimensional (Asrar *et al.*, 1992; Barczy *et al.*, 1997; Dupuy *et al.*, 2007; Lecoustre *et al.*, 1997; Moulia y Sinoquet, 1993; Myneni, 1991; Reffye *et al.*, 1997; Sinoquet y Andrieu, 1993). Jackson y Palmer (1979) señalan la dificultad que las cubiertas discontinuas, no homogéneas y no aleatoriamente distribuidas presentan a la hora de modelar la intercepción de la radiación. Por esas razones, las cubiertas discontinuas requieren una mejor descripción geométrica para su modelización (Sinoquet y Andrieu, 1993). Sinoquet y Andrieu (1993) descomponen la planta en función de la orientación de sus órganos fotosintéticos: tallos, nudos y hojas, órganos que guardan una determinada relación y que están dispuestos en una estructura determinada, de este modo la radiación solar puede o no llegar de una forma determinada y con una intensidad concreta a cada punto fotosintéticamente activo, por tanto cada punto de la planta va tener una actividad fotosintética diferente (Drouet, 1998; Drouet y Pages, 2007; Fournier y Andrieu, 1999). Es un paso más en el modelado al trabajar al nivel de detalle de la hoja y de las distintas partes de la planta, el modelo trabaja a nivel plantas individuales perfectamente distinguibles y totalmente definidas, aun siendo complejos permiten con gran detalle modelar un pasto herbáceo (Durand *et al.*, 1999). Verdenal *et al.* (2008) aplican este tipo de modelo para estudiar la respuesta del raigrás inglés (*Lolium perenne* L.) a diferentes condiciones ambientales y de siegas, encontrando un gran paralelismo con el comportamiento observado en campo. A este nivel estructural es más sencilla la simulación de la selección que realizan los animales, tanto a nivel de especie vegetal como de la parte de la planta más apetecida.

Con los modelos morfológicos de la planta la radiación solar incidente se puede descomponer en sus distintas longitudes de onda y direcciones conforme se va encontrando con los distintos elementos vegetales, modificándose la calidad espectral de la radiación al atravesar la cubierta (van der Hage, 1993). El interés de esta aproximación está en que la calidad espectral afecta a la diferenciación morfológica de los metámeros de la planta (Evers *et al.*, 2007). Ivanov *et al.* (1995) demuestran una gran similitud entre un cultivo virtual de maíz y las medidas reales de intercepción. De esta forma toma relevancia la distribución y orientación de los fito-elementos de la planta. La orientación de las hojas se determina a partir de los ángulos cenitales y azimutales que presenta la normal de la hoja o se toma la referencia del tallo central o eje vertical. Las hojas aprovechan más intensamente la componente horizontal de la radiación solar de las horas de sol de la mañana y de la tarde. Está claro que estos modelos tridimensionales son más interesantes para estructuras discontinuas y discretas como los árboles ya que permiten un mejor acercamiento a la intercepción de la radiación (Chen *et al.*, 1994; Dautat, 1993).

La pradera virtual

La pradera virtual es un modelo tridimensional realizado mediante ordenador (llamados en la terminología anglosajona «*computer abstractions*») que contienen suficiente información espacial que permite generar sucesivamente las imágenes que adquieren las plantas en los distintos estados de desarrollo conforme a una distribución determinada sobre una superficie que representa el terreno (Green, 1997; Mèch y Prusinkiewicz, 1996; Prusinkiewicz, 1994; Prusinkiewicz, 1998; Prusinkiewicz y Lindenmayer, 1990; Room *et al.*, 1996). Una pradera virtual se denomina a una simulación realizada mediante ordenador en la cual múltiples plantas virtuales se agregan (Prusinkiewicz *et al.*, 1988). Por planta virtual se entiende las simulaciones que mediante un ordenador se realizan sobre el desarrollo y crecimiento de una planta en un espacio de tres dimensiones. El modelo que genera la planta contiene las reglas y la información necesaria para la construcción de una nueva planta o una parte de la misma, y para los cambios que se producen en su desarrollo morfológico. Una planta virtual no es una simple imagen generada en un ordenador, es un modelo en el sentido de que es una representación de una planta en un momento determinado. Planta que a su vez interactúa con el entorno que le rodea, integrándose dentro de los modelos ecofisiológicos, al nivel de detalle de órganos o partes de plantas. Al estar formada la planta por unidades independientes, ésta evoluciona de forma diferenciada pero regida por las relaciones que se establecen entre individuos por competencia por los mismos recursos. Esta individualización de la pradera en unidades elementales permite simular mejor el distinto comportamiento de las comunidades en sistemas en pastoreo, ya que se puede conocer con exactitud qué ocurre en cada punto del terreno. Descender a este grado de detalle permite evaluar a este nivel el uso que se hace de los distintos recursos y en consecuencia establecer las estrategias agronómicas más apropiadas, mediante el empleo de sistemas de información geográfica que permiten llevar a la práctica este tratamiento diferenciado de cada punto del terreno. El modelado de la arquitectura de la comunidad o de los movimientos de animales por la cubierta es útil en el diseño de equipos y estrategias de manejo (Hanan, 1997; Hanan y Room, 1997; Pradal *et al.*, 2009). Este tipo de modelos está siendo aplicado a nivel de plantaciones forestales (Sheppard y Salter, 2004) y para la gestión forestal sostenible (De Miguel *et al.*, 2011), aunque todavía quedan muchas cuestiones por resolver cuando se desciende al detalle de la simulación de plantas individuales o de sus órganos (Tardieu, 2010).

Modelos multi-agentes para la toma de decisión en la ordenación agroforestal

La gestión del territorio en los sistemas agrosilvopastorales es compleja. Integrar los tres niveles de complejidad finca, monte y paisaje es lo que pretenden los modelos multi-agentes (Etienne, 2007). Este tipo de modelos incorporan el componente social

o decisorio de los agentes implicados en la gestión del entorno, tratando de integrar en la dinámica del modelo las decisiones que los agentes van tomando en función de aquella. Un ejemplo de modelo multi-agente es SylvoPast (Etienne, 2003). SylvoPast acopla un modelo silvopastoral con un juego de rol (Barreteau *et al.*, 2001). El principio básico para el diseño de los modelos multi-agente es que en el manejo de los recursos naturales intervienen diferentes agentes que ven afectados sus intereses por la dinámica que siga el sistema agrosilvopastoral y que esa afección es diferente tanto en la escala temporal como espacial, lo que se trata es de llegar a una solución de compromiso que sea adecuada para la cría de animales del ganadero, para la producción de madera del agente forestal o para la conservación de la naturaleza del conservacionista. El caso que proponen Etienne *et al.* (2003) es que a cada pixel o polígono en el que se divide el territorio se aplican una serie de modelos biofísicos que reproducen el crecimiento mensual del pasto herbáceo, otros calculan el crecimiento anual de los árboles mientras cada punto recibe información sobre el tipo de suelo y las condiciones meteorológicas, introducido el rebaño el modelo propondrá un manejo del pastoreo que garantice el máximo aprovechamiento del forraje, sucesivamente se irán incorporando otras decisiones de manejo del agricultor que afectarán a la rotación de cultivos y a la disponibilidad de forrajes, del agente forestal que afectarán al uso que se debe hacer del bosque o del arbolado. A diferencia de los modelos anteriores éste permite la presencia de diferentes actores (ganaderos, agricultores, agentes forestales, cazadores, conservacionistas) de tal forma que en el proceso de simulación se vayan generando distintas alternativas para encontrar aquella que satisface los objetivos de todos los agentes. Se establecen fases de negociación entre agentes para facilitar el encuentro de una solución común. Durante el proceso de modelado los agentes intervienen en cuatro pasos: 1) Opinión: cada agente expresa cuáles son sus necesidades sobre un recurso y cómo lo va a manejar; 2) Mapeo: representación espacial del punto de vista u opinión de cada agente; 3) Indicadores: conjunto de indicadores seleccionados por los agentes que permiten monitorizar la dinámica de su sistema; 4) Escenarios: propuestas de manejos para alcanzar los objetivos propuestos. Finalmente, el modelo multi-agente permite identificar los acuerdos y estrategias de actuación en el monte. La solución es una solución compromiso entre el conjunto de soluciones posibles.

CONCLUSIONES

Los modelos de simulación del crecimiento y desarrollo de los pastos han ido evolucionando desde simples relaciones matemáticas a complejos sistemas de ecuaciones diferenciales. Los modelos son posibles por la existencia de un mejor conocimiento y descripción de los componentes y procesos que aparecen en los sistemas agrosilvopastorales. Los modelos se deben concebir como herramientas de ayuda a la

toma de decisiones, en particular los modelos mecanicistas nos ayudan a entender los procesos que ocurren en la naturaleza y en los sistemas intervenidos por el hombre. El objetivo de estos modelos es entender el funcionamiento del sistema y no el encontrar una correlación perfecta entre el objeto real y el modelo. En cualquier caso hay que tener presente que un modelo es una simplificación de la realidad y por ello no debemos esperar nada más allá del interés para el que ha sido concebido.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado en la continuación del proyecto de investigación AGL2005-03665: "Modelo Teórico Agro-Forestal para la Simulación de Sistemas Adehesados" financiado por el MEC y en el proyecto AGRISOST de la Comunidad de Madrid S-2009/AGR-1630 Sistemas Agrarios Sostenibles: Producción de biomasa y manejo de C, N y agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHA, M.G.; SAVAGE, M.J., 2008. The soil water balance of rainfed and irrigated oats, Italian rye-grass and rye using the CropSyst model. *Irrigation Science*, **26**, 203-212.
- ALMOGUERA, J., 2007. *Modelo Dehesa: sobre las relaciones pastizal-encinar-ganado*. Trabajo Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España). Disponible en: <http://oa.upm.es/1251/>
- AMBROSIO, L.; VILLA, A.; ALONSO, R., 1992. Modelos agrometeorológicos para la predicción del rendimiento de cosechas de cereales de invierno. *Investigación Agraria: Economía*, **7(1)**, 121-146.
- ANDRIEU, B.; IVANOV, N.; BOISSARD, P., 1995. Simulation of light interception from a maize canopy model constructed by stereo plotting. *Agricultural and Forest Meteorology*, **75**, 103-119.
- ANISIMOV, O.; FUKSHANSKY, L., 1993. Light-vegetation interaction: a new stochastic approach for description and classification. *Agricultural and Forest Meteorology*, **66**, 93-110.
- ASRAR, G.; MYNENI, R.B.; CHOUDHURY, B.J., 1992. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: a modeling study. *Remote Sensing Environment*, **41**, 85-103.
- BAKER, B.B.; BOURDON, R.M.; HANSON, J.D., 1992. FORAGE: A simulation model of grazing behaviour for beef cattle. *Ecological Modelling*, **60**, 257-279.
- BARCZI, J.F.; REFFYE, PH. DE; CARAGLIO, Y., 1997. Essai sur l'identification et la mise en œuvre des paramètres nécessaires à la simulation d'une architecture végétale: le logiciel AMAPsim. En: *Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux*, 205-254. Ed. J. BOUCHON *et al.* Institut National de la Recherche Agronomique. Paris (Francia).
- BARRETEAU, O.; BOUSQUET, F.; ATTONATY, J.M. 2001. Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigation systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, **4(2)**, 5.
- BARRETT, P.D.; LAIDLAW, A.S.; MAYNE, C.S., 2005. GrazeGro: a European herbage growth model to predict pasture production in perennial ryegrass swards for decision support. *European Journal of Agronomy*, **23 (1)**, 37-56.

- BERGEZ, J.E.; ÉTIENNE, M.; BALANDIER, P., 1999. ALWAYS: a plot-based silvopastoral system model. *Ecological Modelling*, **115**, 1-17.
- BERGEZ, J.E.; MSIKA, B., 1996. A biophysical silvopastoral model for Europe. En: *Western european silvopastoral systems*, 207-220. Ed. M. ÉTIENNE. INRA. Paris (Francia).
- BOISSARD, P.; GUYOT, G.; JACKSON, R.D., 1990. Factors affecting the radiative temperature of a vegetative canopy. En: *Applications of remote sensing in agriculture*, 45-72. Ed. M.D. STEVEN, J.A. CLARK. Butterworth-Heinemann. Londres (Reino Unido).
- BOONS-PRINS, E.R.; KONING, G.H.J. DE; DIEDEN, C.A. VAN; PENNING DE VRIES, F.W.T., 1993. *Crop specific simulation parameters for yield forecasting across the European community. Simulation Report*, CABO-TT n°32, 43 pp. Wageningen (Holanda).
- CAMPBELL, G.S., 1991. Simulation of water uptake by plants roots. *Agronomy Monograph*, **31**, 273- 285.
- CAMPBELL, G.S.; DIAZ, R., 1988. Simplified Soil-Water Balance Models to Predict Crop Transpiration. En: *Drought Research Priorities for the Dry Land Tropics*, 15-26. Ed. F.R. BIDINGER; C. JOHNSON. ICRISAT, Patancheru (India).
- CAMPBELL, G.S.; STÖCKLE, C.O., 1993. Prediction and simulation of water use in agricultural systems. En: *International Crop Science I*, 63-73. Ed. D.R. BUXTON *et al.* Crop Science Society of America, Madison, Wisconsin (EE.UU.).
- CHARLES-EDWARDS, D.A.; DOLEY, D.; RIMMINGTON, G.M., 1986. *Modelling plant growth and development*. Academic Press Australia, 235 pp. Sydney (Australia).
- CHEN, D.X.; COUGHENOUR, M.B., 1994. GEMT a general model for energy and mass transfer of land surfaces and its application at the Fife sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, **68**, 145-171.
- CHEN, S.G.; CEULEMANS, R.; IMPENS, I., 1994. A fractal-based populus canopy structure model for the calculation of light interception. *Forest Ecology and Management*, **69**, 97-110.
- CLARK, S.G.; DONNELLY, J.R.; MOORE, A.D., 2000. The GrassGro decision support tool: its effectiveness in simulating pasture and animal production and value in determining research priorities. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **40**, 247-256.
- CONFALONIERI, R.; BECHINI, L., 2004. A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. *European Journal of Agronomy*, **21** (2), 223-237.
- CONNOR, D.J.; FERERES, E., 1999. A dynamic model of crop growth and partitioning of biomass. *Field Crops Research*, **63**, 139-157.
- COQUILLARD, P.; HILL, D.R.C., 1997. *Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Masson, 273 pp. Paris (Francia).
- DAUZAT, J., 1993. Simulated plants and radiative transfer simulations. En: *Crop structure and light microclimate, characterization and applications*, 271-278. Ed. C. VERLET-GRANCHER *et al.* INRA Editions, Paris (Francia).
- DAUZAT, J.; EROY, M.N., 1997. Simulating light regime and intercrop yields in coconut based farming systems. *Developments in crop science*, **25**, 87-98.
- DE MIGUEL, S.; BONET, J.A.; PUKKALA, T.; SOLANO, D., 2011. Modelización, simulación y optimización para el manejo de sistemas forestales: La investigación como base de la planificación forestal en países empobrecidos. En: *Libro de actas I congreso de investigación en agricultura para el desarrollo*, 66-67. Ed. A. MORENO *et al.* Editorial Agrícola Española, Madrid (España).
- DELAGARDE, R.; FAVERDIN, P.; BARATTE, C.; PEYRAUD, J., 2011a. GrazeIn: a model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 2. Prediction of intake under rotational and continuously stocked grazing management. *Grass and Forage Science*, **66**, 45-60.

- DELAGARDE, R.; VALK, H.; MAYNE, C. S.; ROOK, A.-J.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, A.; BARATTE, C.; FAVERDIN, P.; PEYRAUD, J.-L., 2011b. GrazeIn: a model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 3. Simulations and external validation of the model. *Grass and Forage Science*, **66**, 61-77.
- DI BELLA, C.; FAIVRE, R.; RUGET, F.; SEGUIN, B., 2005. Using VEGETATION satellite data and the crop model STICS-Prairie to estimate pasture production at the national level in France. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **30(1-3)**, 3-9.
- DÍAZ-AMBRONA, C.H.; GONZÁLEZ DE MIGUEL, C.; MARTÍNEZ-VALDERRAMA, J., 2008. Three layer coffee plantation model. *Acta Horticulturae*, **802**, 319-324.
- DÍAZ-AMBRONA, C.H.; ETIENNE, A.; MARTÍNEZ-VALDERRAMA, J., 2009. Producciones potenciales de herbáceas, de bellota y carga ganadera en las dehesas de Extremadura. *Pastos*, **XXXVIII(2)**, 243-258.
- DÍAZ-AMBRONA, C.H.; TARQUIS, A.; MÍNGUEZ, I., 1998. Faba bean canopy modelling with a parametric open L-system: a comparison with the Monsi and Saeki model. *Field Crops Research*, **58**, 1-13.
- DONATELLI, M., 1995. *Sistemi nella gestione integrata della coltura*. Pubblicazione speciale dell'Istituto Sperimentale Agronomico, ISA-Sezione di Modena, 133 pp. Modena (Italia).
- DOUGHERTY, W.J.; FLEMING, N.K.; COX, J.W.; CHITTLEBOROUGH, D.J., 2004. Phosphorus Transfer in Surface Runoff from Intensive Pasture Systems at Various Scales: A Review. *Journal of Environmental Quality*, **33**, 1973-1988.
- DROUET, J.L., 1998. *Variations de la disposition spatiale et de la teneur en azote des feuilles d'un peuplement de maïs en phase végétative. Etude pas simulation de l'influence de ces variations sur la photosynthèse potentielle du couvert*. Thèse pour l'obtention du titre de Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, INA, INRA, 192 pp. Paris (Francia).
- DROUET, J.L.; PAGES, L., 2007. GRAAL-CN: A model of GRowth, Architecture and ALlocation of Carbon and Nitrogen dynamics within whole plants formalised at the organ level. *Ecological Modelling*, **206**, 231-249.
- DUPUY, L.; FOURCAUD, T.; LAC, P.; STOKES, A., 2007. A generic 3D finite element model of tree anchorage integrating soil mechanics and real root system architecture. *American Journal of Botany*, **94**, 1506-1514.
- DURAND, J.L.; SCHÄUFELE, R.; GASTAL, F., 1999. Grass leaf elongation rate as a function of developmental stage and temperature: morphological analysis and modelling. *Annals of Botany*, **83**, 577-588.
- ETIENNE, A.; MARTÍNEZ-VALDERRAMA, J.; DÍAZ-AMBRONA, C.H., 2008. Productive model of evergreen oak and annual pastures in Extremadura (Spain). *Options méditerranéennes, Serie A: Séminaires Méditerranéennes*, **79**, 65-68.
- ETIENNE, M.; LE PAGE, C.; COHEN, M., 2003. A step-by-step approach to building land management scenarios based on multiple viewpoints on multi-agent system simulations. *Journal of Artificial Societies & Social Simulations*, **6(2)**, 2.
- ETIENNE, M., 2003. SYLVOPAST a multiple target role-playing game to assess negotiation processes in silvopastoral management planning. *Journal of Artificial Societies & Social Simulations*, **6(2)**, 5.
- ETIENNE, M., 2007. Sistemas multi-agentes aplicados al manejo silvopastoral. En: *Los sistemas forrajeros: entre la producción y el paisaje*, 473-480. Ed. SEEP, Vitoria (España).
- EVERS, J.B.; VOS, J.; CHELLE, M.; ANDRIEU, B.; FOURNIER, C.; STRUIK, P.C., 2007. Simulating the effects of localized red: far-red ratio on tillering in spring wheat (*Triticum aestivum*) using a three-dimensional virtual plant model. *New Phytologist*, **176**, 325-336.

- FAVERDIN, P.; BARATTE, C.; DELAGARDE, R.; PEYRAUD, J.-L., 2011. GrazeIn: a model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 1. Prediction of intake capacity, voluntary intake and milk production during lactation. *Grass and Forage Science*, **66**, 29-44.
- FORD, A., 1999. *Modelling the Environment*. Island Press. Washington (EE.UU.).
- FOURCAUD, T.; ZHANG X.; STOKES A.; LAMBERS H.; KÖRNER, C., 2008. Plant Growth Modelling and Applications: The Increasing Importance of Plant Architecture in Growth Models. *Annals of Botany*, **101(8)**, 1053-1063.
- FOURNIER, C.; ANDRIEU, B., 1998. A 3D architectural and process-based model of maize development. *Annals of Botany*, **81**, 233-250.
- FOURNIER, C.; ANDRIEU, B., 1999. ADEL-maize: an L-system based model for the integration of growth processes from the organ to the canopy. Application to regulation of morphogenesis by light availability. *Agronomie*, **19**, 313-327.
- GALBRAITH, K.A.; ARNOLD, G.W.; CARBON, B.A., 1980. Dynamics of plant and animal production of a subterranean clover pasture grazed by sheep: Part 2- Structure and validation of the pasture growth model. *Agricultural systems*, **6**, 23-43.
- GILABERT, M.A.; MELIÁ, J., 1990. A simple geometrical model for analysing the spectral response of a citrus canopy using satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, **11(8)**, 1391-1403.
- GILABERT, M.A.; SEGARRA, D.; MELIÁ, J., 1994. Simulation of citrus reflectance by means of geometrical canopy model. *International Journal of Remote Sensing*, **15(13)**, 2559-2582.
- GILLET, F.; BESSON, O.; GOBAT, J.M., 2002. PATUMOD: a compartment model of vegetation dynamics in wooded pastures. *Ecological Modelling*, **187(3)**, 267-290.
- GOEL, N.S.; GRIER, T., 1986. Estimation of canopy parameters for inhomogeneous vegetation canopies from reflectance data. II. Estimation of leaf area index and percentage of ground cover for row canopies. *International Journal of Remote Sensing*, **7(10)**, 1263-1286.
- GOEL, N.S.; NORMAN, J.M., 1992. Biospheric models, measurements and remote sensing of vegetation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **47**, 163-188.
- GONZÁLEZ-ALDAMA, A.; ALLUE, J.L., 1982. Producción, persistencia y otros estudios alternativos en la dehesa extremeña. *Anales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Serie: Forestal*, **5**, 93-169.
- GONZÁLEZ-BERNÁLDEZ, F.; MOREY, M.; VELASCO, F., 1969. Influences of *Quercus ilex rotundifolia* on the herb layer at the El Pardo forest (Madrid). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Biología)*, **67**, 265-284.
- GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, I.; BERMEJO, V.; ELVIRA, S.; SANZ, J.; GIMENO, B.S.; ALONSO, R., 2010. Modelling annual pasture dynamics: Application to stomatal ozone deposition. *Atmospheric Environmental*, **44**, 2507-2517.
- GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H.H., 1994. *Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises: Current Issues in production ecology*, 238 pp. Kluwer Academic publishers, Dordrecht (Holanda).
- GRACIA, C.; TELLO, E.; SABATÉ, S.; BELLOT, J., 1999. GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth. *Ecological Studies*, **137(12)**, 163-180.
- GREEN, D.G., 1997. Modelling plants in landscapes. En: *Plants to ecosystems. Advances in Computational Life Sciences*, 85-96. Ed. M.T. MICHALEWICZ. CSIRO Publishing, Canberra (Australia).
- HANAN, J.S., 1997. Virtual plants - integrating architectural and physiological models. *Environmental Modelling and Software*, **12**, 35-42.

- HANAN, J.S.; ROOM, P.M., 1997. Practical aspects of virtual plant research. En: *Plants to ecosystems. Advances in Computational Life Sciences*, 28-44. Ed. M.T. MICHALEWICZ. CSIRO Publishing. Canberra (Australia).
- HANSON, J.D.; BAKER, B.; BOURDON, R.M., 1994. *Documentation and user guide for SPUR2*. USDA-ARS, GPSR Technical Report N° 1, 43 pp. Fort Collins, Colorado (EE.UU.).
- HANSON, J.D.; SKILES, J.W.; PARTON, W.J., 1988. A Multispecies Model for Rangeland Plant Communities. *Ecological Modelling*, **44**, 89-123.
- HECTOR, D.J.; GREGSON, K.; MCGOWAN, M. 1993. A computer simulation describing water extraction by crop root systems. *Field Crops Research*, **32**, 287-304.
- HERRERO, M.; DENT, J.B.; FAWCETT, R.H., 1998. The plant-animal interface in models of grazing systems. En: *Agricultural Systems Modelling and Simulation*, 495-542. Ed. R. Peart, B. Curry. Marcel Dekker, New York (EE.UU.).
- HILBERT, D.W.; CANADELL, J., 1995. Biomass partitioning and resource allocation of plants from Mediterranean-type ecosystems: possible responses to elevated atmospheric CO₂. En: *Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems*, 76-101. Ed. W.C. Oechel, J. Moreno. Springer. Berlin (Alemania).
- HODGES, T., 1991. *Predicting crop phenology*. CRC Press, Boca Ratón, Florida, 233 pp.
- HOOKER, C.A., 1994. Value and system: notes toward the definition of agri-culture. *Journal of Agriculture and Environmental Ethics*, **7(supplement)**, 1-84.
- HUANG, M.; ELSHORBAGY, A.; BARBOUR, S.L.; ZETTL, J.D.; SI, B.C. 2011. System dynamics modeling of infiltration and drainage in layered coarse soil. *Canadian Journal of Soil Science*, **91**, 185-197.
- HUNT, H.W.; TRLICA, M.J.; REDENTE, E.F.; MOORE, J.C.; DETLING, J.K.; KITTEL, T.G.F.; WALTER, D.E.; FOWLER, M.C.; KLEIN, D.A.; ELLIOTT, E.T., 1991. Simulation model for the effects of climate change on temperate grassland ecosystems. *Ecological Modelling*, **53**, 205-246.
- INNIS, G.S., 1978. *Grassland simulation model*. Springer-Verlag, 298 p. New York (EE.UU.).
- IVANOV, N.; BOISSARD, P.; CHAPRON, M.; ANDRIEU, B., 1995. Computer stereo plotting for 3D reconstruction of a maize canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, **75**, 85-102.
- JACKSON, R.; PALMER, D., 1979. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. *Annals of Botany*, **44**, 381-383
- JACKSON, R.D.; PINTER, P.J., 1986. Spectral response of architecturally different wheat canopies. *Remote Sensing of Environment*, **20**, 43-56.
- JACQUES-ERIC, B.; BRUNO, M., 1995. A silvopastoral model for the EU. *Cahiers Options Méditerranéennes*, **12**, 231-234.
- JOHNSON, I.R.; THORNLEY, J.H.M., 1985. Dynamic model of the response of a vegetative grass crop to light, temperature and nitrogen. *Plant, Cell & Environment*, **8(7)**, 485-499.
- JONES, C.A.; KINIRY, J.R., 1986. *CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development*. A & M University Press, 194 pp. Texas (EE.UU.).
- JONES, J.W.; LUYTEN, J.C., 1998. Simulation of biological processes. En: *Agricultural systems modeling and simulation*, 19-62. Ed. R.M. PEART, R.B. CURRY. Marcel Dekker. New York (EE.UU.).
- JOUVEN, M.; CARRERE, P.; BAUMONT, R., 2006. Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures – 1: Model description, 2: Model evaluation. *Grass and Forage Science*, **61**, 112-133.

- KONDO, J.; WATANABE, T., 1992. Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model. *Journal of the Atmospheric Science*, **49**, 2183-2199.
- KUUSK, A., 1995. A Markov chain model of canopy reflectance. *Agricultural and Forest Meteorology*, **76**, 221-236.
- LECOUSTRE, R.; SAITO, K.; KUMAGAI, Y.; HONJO, T.; REFFYE, P.H. DE, 1997. Simulation d'un paysage forestier à partir d'un SIG et de la technique de modélisation des plantes. En: *Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux*, 425-434. Ed. J. BOUCHON *et al.* Institut National de la Recherche Agronomique, Paris (Francia).
- LEENHART, D.; VOLTZ, M.; BORNAND, M., 1994. Propagation of the error of spatial prediction of soil properties in simulating crop evapotranspiration. *European Journal of Soil Science*, **45**, 303-310.
- LOEWER, O.J., 1998. Graze: A beef forage model of selective grazing. En: *Agricultural System Modeling and Simulation*, 301-417. Ed. R.M. PEART, R.B. CURRY. CRC Marcel Dekker Inc. New York (EE.UU.).
- MANDELBROT, B.B., 1983. *The fractal geometry of Nature*. W. H. Freeman, 468 pp. New York.
- MARTÍNEZ S.; LÓPEZ, E., 2000. *Iniciación a la Simulación Dinámica*. Editorial Ariel, S.A. Barcelona (España).
- MARTINEZ VALDERRAMA, J., 2005. *Estudio de la desertificación por sobrepastoreo mediante un modelo de simulación dinámica*. Tesis doctoral, 159 pp. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España).
- MCMURTRIE, R.; WOLF, L., 1983. A model of competition between trees and grass for radiation, water and nutrients. *Annals of Botany*, **52**, 449-458.
- MÈCH, R.; PRUSINKIEWICZ, P., 1996. Visual models of plants interacting with their environment. *Computer Graphics*, **1996**, 397-410.
- MOHTAR, R.H.; JABRO, J.D.; BUCKMASTER, D.R., 1997. A grazing simulation model: GRASIM B: Field testing. *Transactions of the ASAE*, **40(5)**, 1495-1500.
- MORIONDO, M.; PACINI, C.; TROMBI, G.; VAZZANA, C.; BINDI M., 2010. Sustainability of dairy farming system in Tuscany in a changing climate. *European Journal of Agronomy*, **32(1)**, 80-90.
- MOULIA, B.; SINOQUET, H., 1993. Three-dimensional digitizing systems for plant canopy geometrical structure: a review. En: *Crop structure and light microclimate, characterization and applications*, 183-193. Ed. C. Verlet-Grancher *et al.* INRA Editions, Paris (Francia).
- MYNENI, R.B., 1991. Modeling radiative transfer and photosynthesis in three dimensional leaf canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, **55**, 323-344.
- NOY-MEIR, I., 1975. Stability on grazing systems: an application of predator-prey graphs. *Journal of Ecology*, **63**, 459-481.
- NOY-MEIR, I., 1978. Stability in simple grazing models: effects of explicit functions. *Journal of Theoretical Biology*, **71**, 347-380.
- ONG, C.K.; HUXLEY, P., 1996. *Tree-crop interactions: a physiological approach*. CAB International and International Centre for Research in Agroforestry, 386 pp. Nairobi (Kenya).
- PARSONS, A.J.; JOHNSON, I.R.; WILLIAMS, J.H.H., 1988. Leaf age structure and canopy photosynthesis in rotationally and continuously grazed swards. *Grass and Forage Science*, **43**, 1-14.
- PARTON, W.J.; SCURLOCK, J.M.O.; OJIMA, D.S.; GILMANOV, T.G.; SCHOLES, R.J.; SCHIMEL, D.S.; KIRCHNER, T.; MENAUT, J.C.; SEASTEDT, T.; GARCIA MOYA, E.; KAMNALRUT, A.; KINYAMARIO, J.L., 1993. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, **7**, 785-809.

- PASSIOURA, J.B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education or engineering. *Agronomy Journal*, **88(5)**, 690-694.
- PECO, B., 1989. Modelling Mediterranean pasture dynamics. *Vegetatio*, **83**, 269-276.
- PENNING DE VRIES, F.W.T.; JANSSEN, D.M.; TEN BERGE, H.F.M.; BAKEMA, A., 1989. *Simulation of Ecological Processes of Growth in Several Annual Crops*. Pudoc, Wageningen (Holanda).
- PRADAL C.; BOUDON, F.; NOUGUIER, C.; CHOPARD, J.; GODIN, C., 2009. PlantGL: A Python-based geometric library for 3D plant modelling at different scales. *Graphical Models*, **71(1)**, 1-21.
- PRUSINKIEWICZ, P., 1994. Visual models of morphogenesis. *Artificial Life*, **1**, 61-74.
- PRUSINKIEWICZ, P., 1998. Modeling of spatial structure and development of plants: a review. *Scientia Horticulturae*, **74**, 113-149.
- PRUSINKIEWICZ, P.; LINDENMAYER, A., 1990. *The algorithmic beauty of plants*. Springer Verlag. New York (EE.UU.).
- PRUSINKIEWICZ, P.; LINDENMAYER, A.; HANAN, J., 1988. Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes. *Computer Graphics*, **22**, 141-150.
- RAUPACH, M.R., 1991. Vegetation-atmosphere interaction in homogeneous and heterogeneous terrain: Some implications of mixed layer dynamics. *Vegetatio*, **91**, 105-120.
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, 2001. *Diccionario de la lengua española* (22ª ed.). Madrid (España).
- REFFYE, F. DE; BLAISE, F.; FOURCAUD, T.; HOULIER, F.; BARTHELEMY, D., 1997. Un modèle écophysiological de la croissance et de l'architecture des arbres et de leurs interactions. En: *Actes du Séminaire sur la Modélisation Architecturale*, 129-135pp. Ed. B. Andrieu. Institut National de la Recherche Agronomique. Paris (Francia).
- ROOM, P.; HANAN, J.; PRUSINKIEWICZ, P., 1996. Virtual plants: new perspectives for ecologists, pathologists and agricultural scientists. *Trends in Plant Science*, **1(1)**, 33-39.
- SAGGAR, S.; MACKAY, A.D.; HEDLEY, M.J.; LAMBERT, M.G.; CLARK, D.A., 1990. A nutrient-transfer model to explain the fate of phosphorus and sulphur in a Grazed Hill-Country pasture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **30(3-4)**, 295-315.
- SANDERS, J.O.; CARTWRIGHT, T.C., 1979. A general cattle production systems model. I: Structure of the model. *Agricultural Systems*, **4(3)**, 217-227.
- SAU, F.; LÓPEZ CEDRÓN, F.X.; CONFALONE, A.E.; LIZASO, J.I., 2010. Modelos de simulación del cultivo de maíz: fundamentos y aplicaciones en España. *Pastos*, **40(2)**, 117-138.
- SHEPPARD, S.R.J.; SALTER, J.D., 2004. The Role of Visualization in Forest Planning. En: *Encyclopedia of Forest Sciences*, 486-498. Ed. J. BURLEY. Elsevier, Oxford (Reino Unido).
- SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G., 1996. Crop modeling from infancy to maturity. *Agronomy Journal*, **88(5)**, 698-704.
- SINOQUET, H., 1993. Modelling radiative transfer in heterogeneous canopies and intercropping systems. En: *Crop structure and light microclimate, characterization and applications*, 229-252. Ed. C. VERLET-GRANCHER *et al.* INRA Editions. Paris (Francia).
- SINOQUET, H., 1989. Modelling of solar radiation interception in row crops. I: Theoretical considerations. *Agronomie*, **9**, 125-135.
- SINOQUET, H.; ADAM, B.; VARLET-GRANCHER, C., 1997. Partage de la lumière entre les poisses de la couronne d'un arbre. En: *Actes du Séminaire sur la Modélisation Architecturale*, 73-78. Ed. B. ANDRIEU. Institut National de la Recherche Agronomique. Paris (Francia).

- SINOQUET, H.; ANDRIEU, B., 1993. The geometrical structure of plant canopies: characterization and direct measurement methods. En: *Crop structure and light microclimate, characterization and applications*, 131-158. Ed. C. VERLET-GRANCHER *et al.* INRA Editions. Paris (Francia).
- SINOQUET, H.; VERLET-GRANCHER, C.; BONHOMME, R., 1993. Modelling radiative transfer within homogeneous canopies: basic concepts. En: *Crop structure and light microclimate, characterization and applications*, 207-228. Ed. C. VERLET-GRANCHER *et al.* INRA Editions. Paris (Francia).
- SMALLEGANGE, I.M.; BRUNSTING, A.M., 2002. Food supply and demand, a simulation model of the functional response of grazing ruminants. *Ecological Modelling*, **149**, 179-192.
- STÖCKLE, C.O.; DONATELLI M.; NELSON R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, **18**, 289-307
- STÖCKLE, C.O.; MARTIN, S.; CAMPBELL, G.S., 1994. CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems*, **46**, 335-339.
- SUPIT, I.; HOOIJER, A.A.; VAN DIEPEN, C.A., 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMs, Volume 1: Theory and Algorithms. Agriculture Series, 146 pp. Office for official Publications of the European Commission. Bruselas (Bélgica).
- TARDIEU, F., 2010. Why work and discuss the basic principles of plant modeling 50 years after the first plant models? *Journal of Experimental Botany*, **61(8)**, 2039-2041.
- THORNE, P.J., 1998. *Crop-Livestock Interactions. A Review of Opportunities for Developing Integrated Models*, 67 pp. Report to the ILRI-SLP. Stirling Thorne Associates. Llangefni (Reino Unido).
- THORNES, J.B., 1985. The ecology of erosion. *Geography*, **70(3)**, 222-236.
- THORNES, J.B., 1990. The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes. En: *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*, 1-53. Ed. J. B. THORNES. John Wiley & Sons. Chichester (Reino Unido).
- THORNLEY, J.H.M., 1976. *Mathematical models in plant physiology*. Academic Press. Nueva York (EE. UU.).
- THORNLEY, J.H.M., 1998. *Grassland Dynamics: An Ecosystem Simulation Model*, 256 pp. CAB International. Oxon (Reino Unido).
- THORNLEY, J.H.M.; CANNELL, M.G.R., 1997. Temperate Grassland Responses to Climate Change: an Analysis using the Hurley Pasture Model. *Annals of Botany*, **80**, 205-221.
- TRENBATH, B.R.; STERN, W.R. 1995. *WASP: a virtual farm with Wheat and Sheep Pastures*, 146 pp. Department of Agriculture Western Australia Miscellaneous Publication 13/95. Perth (Australia).
- TRNKA, M.; EITZINGER, J.; GRUSZCZYNSKI, G.; BUCHGRABER, K.; RESCH, R.; SCHAUMBERGER, A., 2006. A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland. *Grass and Forage Science*, **61**, 253-271.
- UDO, H.M.J.; BROUWER, B.O., 1993. A computerised method for systematically analysing the livestock component of farming systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, **9(4)**, 335-356.
- VAN BAVEL, C.H.M.; HANKS, R.J., 1983. Water conservation: principles of soil water flow, evaporation, and evapotranspiration. *Agronomy Monograph*, **23**, 25-34.
- VAN DER HAGE, J.C.H., 1993. The horizontal component of solar radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, **67**, 79-93.
- VERBERNE, E.L.J., 1992. *Simulation of the nitrogen and water balance in a system of grassland and soil*. Nota 258. DLO-Institut voor Bodemvruchtbaarheid, Oosterweg 92, 9750 RA, Haren (Holanda).

- VERDENAL, A.; COMBES, D.; ESCOBAR-GUTIÉRREZ, A.J. 2008. A study of ryegrass architecture as a self-regulated system, using functional-structural plant modelling. *Functional Plant Biology*, **35**, 911-924.
- WHISLER, F.D.; ACOCK, B.; BAKER, D.N.; FYE, R.E.; HODGES, H.F.; LAMBERT, J.R.; LEMMON, H.E.; MCKINION, J.M.; REDDY, V.R. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*, **40**, 141-208.
- WHITE, J.R., 1987. *ERHYM-II: Model Description and User Guide for the BASIC Version*. United States Department of Agriculture, Agriculture Research Service, ARS-59. Washington, D.C. (EE.UU.).
- WIGHT, J.R.; SKILES, J.W., 1987. *SPUR: Simulation of production and utilization of rangelands. Documentation and user guide*. United States Department of Agriculture. ARS-63. Washington, D.C. (EE.UU.).
- WILLIAMS, J.R., JONES, C.A.; DYKE, P.T., 1990. The EPIC model. En: *EPIC-Erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation*, 3-92. Ed. A.N. SHARPLEY, J.R. WILLIAMS. United States Department of Agriculture. Technical Bulletin n°1768. Washington, D.C. (EE.UU.).
- YANG, J.; GREENWOOD, D.J.; ROWELL, D.L.; WADSWORTH, G.A.; BURNS, I.G., 2000. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N_ABLE. *Agricultural Systems*, **64**, 37-53.

DYNAMIC MODELS OF PASTURE GROWTH AND DEVELOPMENT

SUMMARY

This paper reviews dynamic simulation models for growth and development of pastures and their use for grazing animals. Models are a tool for decision making in the farm and for research. A dynamic model is a mathematical representation of a pastoral system which evolves in time forced by conducting a set of variables. Simulation is the process of running a model by which to obtain results on the status of each component. The main components of the model are: weather, soil, vegetation, animals and the decision maker. This article presents the main processes modeled on the growth and development of herbaceous and woody vegetation, and also some references to the intake of the animals. The model building is an iterative process and therefore never conclusive. The mechanistic models attempt to explain the behavior of the system and therefore part of the variability that has not come to be explained by the model, they are a simplification of the real system. These simulation models have evolved from simple to complex mathematical relationships of differential equations that have a representation on the grassland. Reaching the multi-agent models, where the same space is converge by different decision-makers, types of vegetation and animals. The models are made possible by the existence of a better understanding and description of the components and processes that appear in agroforestry systems.

Key words: Agroforestry, forage crops, grassland, pastures, processes.

GLOSARIO

Área foliar específica: Es la superficie de hoja dividida por la cantidad de materia seca de la hoja.

Calibración: Es el proceso de ajuste de los parámetros o constantes de un modelo.

Coefficiente de extinción: Representa la fracción de radiación luminosa interceptada por unidad de índice de área foliar.

Comportamiento selectivo: Es la conducta que presentan los animales en pastoreo al consumir determinadas plantas o porciones de ellas.

Constante: Un elemento del modelo que no cambia de valor durante todo el proceso de simulación.

Crecimiento determinado: Plantas en las cuales el crecimiento vegetativo cesa porque la floración supone la conversión de los meristemos apicales de los tallos a estructuras reproductivas.

Crecimiento indeterminado: Cuando la floración progresa desde meristemos axilares mientras que el meristemo apical continúa produciendo nuevas hojas y nuevas posiciones axilares.

Crecimiento: Es la acumulación de biomasa.

Desarrollo: Es el cambio en morfología y función de la planta.

Diagrama de flujos: Es la representación gráfica y formal de las relaciones entre los elementos de un sistema a través de las variables de estado, flujos y variables auxiliares.

Eficiencia en el uso de la radiación: es la cantidad de materia seca producida por cada unidad de luz solar interceptada.

Escenario: Conjunto de valores a partir del cual se realiza una simulación. Estos valores pueden mantenerse constantes durante todo el período de simulación o variarse de un paso de tiempo a otro. Incluyen los valores iniciales de las variables de nivel así como las constantes o parámetros que el modelador elija.

Índice de área foliar: Es la relación entre la superficie de todas las hojas (por una sola cara) respecto de la superficie de suelo.

Integral fototérmica: Es la acumulación de temperatura y horas de iluminación que hace que se complete una fenofase.

Integral térmica: Es una medida del tiempo térmico, se mide la acumulación de temperatura que hace que se complete una fenofase.

Modelo: Representación formal de un sistema.

Modelo descriptivo: Es aquel se construye a partir de una ecuación matemática. Este tipo de modelos describen las relaciones entre los factores y las respuestas del cultivo sin explicarlas. También se denominan modelos empírico-estadísticos.

Modelo determinista: Es aquel que solo presenta una consecuencia para el conjunto de las condiciones iniciales del sistema, es decir el input determina el output.

Modelo explicativos: Expresa las relaciones entre los factores y las respuestas del cultivo a través de modelos físico-matemáticos.

Modelo mecanicista: Es un modelo que trata de describir que es lo que ocurre dentro de un sistema, basado principalmente en la reproducción de los mecanismos físicos que lo constituyen.

Modelo multi-agentes: Es un modelo que incorporan el componente social o decisorio de los agentes implicados en la gestión del sistema.

Necesidades de frío: Es el tiempo que requiere una planta con bajas temperaturas para inducir una diferenciación en su desarrollo morfológico.

Parámetro: es una variable auxiliar cuyo valor es constante durante toda la simulación.

Paso de tiempo (*time step*): Es la unidad de tiempo que define los cambios del estado del sistema, suele ser el día, el mes o el año en función de la construcción del modelo.

Planta virtual: Se entiende por las simulaciones que mediante un ordenador se realizan sobre el desarrollo y crecimiento de una planta en un espacio de tres dimensiones.

Pradera virtual: Es un modelo tridimensional realizado mediante ordenador en el que cada individuo es una planta virtual.

Simulación: Es el conjunto de resultados de todas las variables del modelo para un determinado escenario y unas ciertas condiciones iniciales.

Sistema: Conjunto de cosas que de forma ordenada contribuyen a un fin.

Validación: Proceso que consiste en cotejar los resultados producidos por el modelo con la realidad.

Variables auxiliares: Son variables de ayuda en la edición del modelo. Su papel auxiliar consiste en colaborar en la definición de las variables de flujo y en documentar el modelo haciéndolo más comprensible.

Variables conductoras: Son aquellas que influyen sobre una variable de estado.

Variables de estado: Representa la acumulación en el tiempo de una cierta magnitud.

Variables de flujo: representa un cambio de estado del sistema, y expresan de manera explícita la variación por unidad de tiempo de las variables de estado.

Variables de información: Es una variable auxiliar que representa una cantidad con un cierto significado.

Vernalización: Es la respuesta del desarrollo de una planta a las bajas temperaturas.