

MODELO SIMPLE DE SIMULACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO, FENOLOGÍA Y BALANCE HÍDRICO DE PRADERAS ANUALES DE CLIMA MEDITERRÁNEO

A simple simulation model to estimate pasture growth, phenology and water balance of annual pastures of Mediterranean climate

Giorgio Castellaro G.^{1*} y Fernando Squella N.²

ABSTRACT

This work had as objective to elaborate a simple model of pasture growth, phenology and water balance of annual pastures of Mediterranean climate. The water balance is performed only in one soil stratum (40 cm), where it is supposed the root mass is concentrated. It was considered rainfall and the water losses by evapotranspiration, which was calculated as a function of the potential evapotranspiration, the relative water supply level of the soil and the degree of pasture cover. The model supposes an adequate contribution of nutrients, being climatic variables, availability of photosynthetic material and soil water the main limiting for the grassland growth. Validation was performed with dry matter accumulation and soil water data measured in Mediterranean grassland at the Hidango Experimental Center, belonging to the Agricultural Research Institute (INIA) (34°06' S lat.; 71°47' W long; 296 m.o.s.l.) during the season 1992. The results of the validation indicated that this model explained over 90% of the variation of the observed values of dry matter accumulation and soil water. Some lines of the model development are proposed, such as the incorporation of subroutines that simulate the nutritive value and the effect of N and shrub stratum, on grassland growth.

Key words: system analysis, annual ranges of Mediterranean climate, grassland simulation models.

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo elaborar un modelo simple del crecimiento, fenología y balance hídrico de praderas anuales de clima mediterráneo. El balance hídrico se realizó en un estrato de suelo (40 cm) donde se concentra la masa radicular. Se consideran los aportes de la precipitación y las pérdidas de agua por evapotranspiración, la que se calculó en función de la evapotranspiración potencial, del nivel relativo de agua y el grado de cobertura de la pradera. El modelo supone un adecuado aporte de nutrientes, siendo las variables climáticas, la disponibilidad de material fotosintético y la humedad del suelo, las principales limitantes para el crecimiento. La validación fue realizada con datos de acumulación de fitomasa aérea y humedad del suelo, medidas en praderas de clima mediterráneo del Centro Experimental Hidango, perteneciente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) (34°06' lat. Sur, 71°47' long. Oeste, 296 m.s.n.m.) durante la temporada 1992. Los resultados indican que el modelo explicó sobre el 90% de la variación de los valores observados en la acumulación de MS y la humedad del suelo. Se plantean algunas líneas de desarrollo del modelo, como la incorporación de subrutinas que simulen el valor nutritivo, el efecto del N y el del estrato arbustivo, sobre el crecimiento de la pradera.

Palabras clave: análisis de sistemas, modelos de simulación de praderas, praderas anuales de clima mediterráneo.

¹ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Casilla 1004, Santiago de Chile. E-mail: gicastel@uchile.cl *Autor para correspondencia.

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Rayentué, Centro Experimental Hidango, Casilla 3, Litueche, Chile.

Recibido: 4 de febrero de 2005. Aceptado: 16 de mayo de 2005.

INTRODUCCIÓN

En Chile las praderas de clima mediterráneo se distribuyen desde el norte de la V hasta la VIII Región (32° a 37° lat. Sur), dentro de las provincias ecológicas seco-estival nubosa (Csb_n), seco-estival prolongada (Csb₁), seco-estival media (Csb₂) y seco-estival breve (Csb₃) (Gastó *et al.*, 1993). Su área de distribución ocupa unas 4.500.000 ha. El clima es de tipo mediterráneo, con precipitaciones invernales y sequía estival. Las temperaturas mínimas de los meses más fríos usualmente no descienden de 0°C. La estación húmeda se prolonga por un período de 4 a 9 meses, dependiendo de las condiciones climáticas del área (Ovalle y Squella, 1996).

En dicha área existe una gran diversidad de suelos, tales como los de tipo aluvial de texturas finas y gruesas, depresionales, graníticos de lomajes y cerros (cordillera de la costa), graníticos aluviales de terrazas marinas, pumicíticos y trumaos (Honorato, 2000). En este ambiente, la formación vegetal dominante en los sectores de secano la constituye los espinales. Esta formación vegetal es definida como una pseudosabana (Ovalle *et al.*, 1990), en la cual son claramente diferenciables dos estratas: una de tipo leñosa, dominada por *Acacia caven* Mol. (espino), y una estrata herbácea compuesta principalmente por terófitas naturalizadas de crecimiento invernal, que constituye el principal recurso forrajero para los animales. Entre las principales especies vegetales del estrato herbáceo destacan especies poáceas pertenecientes a los géneros *Avena*, *Aira*, *Bromus*, *Hordeum*, *Vulpia* y *Lolium*. También son comunes en la estrata herbácea especies de la familia Compositae, en especial de los géneros *Hypochaeris*, *Cynara* y *Carthamus*, además de especies de la familia Fabaceae (leguminosas) subfamilia Papilionoideae, pertenecientes a los géneros *Medicago* y *Trifolium*, principalmente (Castellaro *et al.*, 1994; Ovalle y Squella, 1996).

La condición de este tipo de pastizales depende fundamentalmente de la edad de la sucesión vegetal poscultivo, del manejo dado a través del pastoreo, del nivel de fertilidad del suelo, y de la cantidad y distribución de la precipitación (Olivares y Gastó, 1971; Ovalle y Squella, 1996). El crecimiento de estas especies comienza con las primeras lluvias de otoño, alcanzando su máxima tasa en los meses de agosto y septiembre. A fines de septiembre entran en un acelerado proceso de senescencia, lo que

coincide con la formación de semillas y su posterior maduración. La producción de materia seca anual es variable, según el grado de déficit hídrico durante la temporada.

Se estima que la acumulación de materia seca (MS) de estas praderas no superaría 800 a 2.500 kg ha⁻¹, dependiendo, principalmente de la pluviometría anual y su distribución dentro del año, así como de la fertilidad natural de los suelos, que generalmente es baja y acentúa aún más los bajos rendimientos normalmente medidos en este tipo de pastizales. Lo anterior confirma la alta heterogeneidad de este tipo de pastizales, producto de la degradación del medio (Acuña *et al.*, 1980; Acuña *et al.*, 1983; Ovalle y Squella, 1996). No obstante, estas praderas son la base de sustentación de los sistemas de producción animal, los cuales son predominantemente de tipo extensivos, donde se destaca la crianza de rumiantes menores (ovinos y caprinos), y la crianza de ganado vacuno de carne, siendo la carga animal promedio del orden de 0,2 unidades animales ha⁻¹ año⁻¹.

La principal limitante para el crecimiento del estrato herbáceo es la disponibilidad hídrica en los primeros 40 cm de suelo, donde se concentra la mayor densidad de raíces. Dado el régimen pluviométrico del sector es de esperar grandes fluctuaciones, tanto interanuales como intraanuales en esta variable.

Dada la naturaleza compleja del sistema suelo-planta-clima-animal, el uso de modelos de simulación parece ser una herramienta útil para la evaluación de diferentes alternativas de manejo de los pastizales, bajo distintos ambientes edafoclimáticos. La mayoría de los modelos relacionados con praderas han sido desarrollados por equipos interdisciplinarios de centros universitarios de los Estados Unidos, que estudian el manejo de praderas naturales (Range Science), abarcando la mayoría de ellos pastizales de tipo perenne (Innis, 1978; Parton *et al.*, 1993; Laurenroth *et al.*, 1993; Hanson *et al.*, 1994). Sólo el modelo propuesto por Pendleton *et al.* (1983) está orientado a simular la dinámica de praderas de tipo anual, en un ecosistema de tipo mediterráneo de California. Los modelos antes citados tienen como propósito principal la investigación, y son complejos, tanto del punto de vista conceptual como computacional, lo cual hace que su uso sea restringido. Sin embargo, y para el caso de praderas anuales de clima mediterráneo, existen algunos modelos simples, los cuales pueden ser

implementados de manera rápida, tales como los propuestos por Smith y Williams (1973), White *et al.* (1983) y recientemente el prototipo de modelo de pastizales anuales para la dehesa española (Villalobos *et al.*, 2002). No obstante lo anterior, se requiere un proceso de validación previo, para evaluar su comportamiento y proceder a su reformulación, mediante el cálculo de parámetros adecuados (Silva, 1993a).

El presente trabajo tuvo como objetivo elaborar y validar un modelo simple del balance hídrico, crecimiento y fenología de praderas de clima mediterráneo, el que puede ser incorporado como una subrutina en modelos de producción pecuaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo se dividió en dos niveles de organización. El primero de ellos está relacionado con la información que alimenta al modelo, su procesamiento y la elaboración de archivos de resultados. En un segundo nivel, se ubican los aspectos biofísicos, para los cuales se hace uso de cuatro submodelos: balance hídrico, fenología, crecimiento y senescencia.

Submodelo balance hídrico

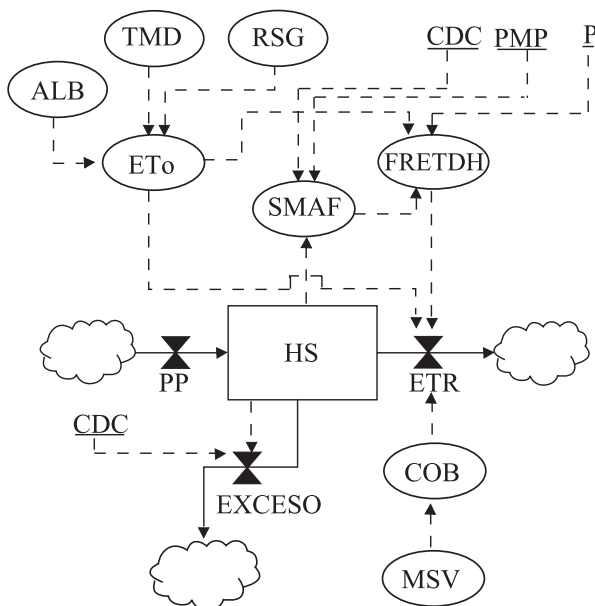
El balance hídrico (Figura 1) se realiza en un solo estrato de suelo, el cual tiene una profundidad de 40 cm y donde se supone se concentra la mayor proporción de raíces. Para calcular el nivel de agua del suelo (HS, mm) se consideran los aportes de la precipitación (PP, mm d⁻¹), las pérdidas por evapotranspiración (ETR, mm d⁻¹), y el exceso de agua del estrato por drenaje y escurrimiento superficial (EXCESO, mm d⁻¹). Para resolver numéricamente este balance, se utilizó un intervalo de integración de un día ($\Delta t = 1$) (Silva, 1993b).

$$HS_t = HS_{t-1} + PP - ETR - EXCESO \quad (\text{Ecuación 1})$$

La ETR se calcula en función de la evapotranspiración de referencia (ET_o, mm d⁻¹), variable que se calculó con la fórmula de Priestley-Taylor (Williams *et al.*, 1990):

$$ET_o = 30,6 \times RN \times \frac{\text{delta}}{\text{delta} + 0,68} \quad (\text{Ecuación 2})$$

En la ecuación anterior, RN es la radiación neta (RN, MJ m⁻² d⁻¹), y el coeficiente *delta* representa la pendiente de la curva presión de vapor a saturación



HS:	humedad de suelo (mm)
PP:	precipitación (mm d ⁻¹)
ETR:	evapotranspiración real (mm d ⁻¹)
EXCESO:	exceso de agua por sobre la capacidad de campo (mm d ⁻¹)
CDC:	capacidad de campo (%)
PMP:	punto de marchitez permanente (%)
P:	sensibilidad al estrés hídrico de la pradera (fracción)
SMAF:	nivel relativo de agua del estrato (fracción)
FRET DH:	función de restricción de la evapotranspiración por efecto del déficit hídrico
ET _o :	evapotranspiración de referencia (mm d ⁻¹)
ALB:	albedo de la vegetación
TMD:	temperatura media diaria (°C)
RSG:	radiación solar global (MJ m ⁻² d ⁻¹)
COB:	cobertura vegetal (fracción)
MSV:	materia seca fotosintetizante de la pradera (kg ha ⁻¹)

Figura 1. Diagrama simplificado del balance hídrico de la pradera en los primeros 40 cm del perfil de suelo.
Figure 1. Simplified flow chart of the grassland water balance in the first 40 cm of soil profile.

versus la temperatura del aire. Las variables anteriormente definidas se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$RN = \frac{2 \times \pi}{365} \times RSG \times (1 - ALB) \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde π es una constante (igual a 3,14159), RSG es la radiación solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y ALB es el albedo de la vegetación, coeficiente que es relativamente constante y que normalmente observa valores del orden de 24% ($ALB = 0,24$). La variable δ es función de la temperatura media del aire (TMD , °C) y se calcula según la siguiente ecuación exponencial:

$$\delta = \left(\frac{5304}{(TMD + 273)^2} \right) \times e^{\left(\frac{21.3 \times 5304}{TMD + 273} \right)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El valor de ETP es ajustado por la variable COB , la cual es función del grado de cobertura de la MS existente en la pradera, tanto fotosintetizante (MSV , kg ha^{-1}) como total (MST , kg ha^{-1}), tomando en cuenta el inicio de la germinación de la misma:

$$COB = 1 - 0,8 \times e^{-2 \times \frac{MST}{2500}} \quad \text{Antes de la germinación o cuando la pradera está totalmente seca.} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

$$COB = 1 - 0,6 \times e^{-3 \times \frac{MSV}{2500}} \quad \text{Durante el período de crecimiento de la pradera} \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

Posteriormente, el valor de ETo ajustado por grado de cobertura vegetal, es nuevamente modificado de acuerdo con un multiplicador denominado $FRETDH$, el cual es función del nivel relativo de agua del estrato ($SMAF$) y de la sensibilidad al estrés hídrico de la pradera (P). La variable $SMAF$ se determina en función del contenido de agua del estrato (HS , mm), las constantes hídricas capacidad de campo (CDC , %) y el punto de marchitez permanente (PMP , %).

$$SMAF = \frac{HS - PMP}{CDC - PMP} \quad 0 \leq SMAF \leq 1 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$FRETDH = \frac{SMAF}{P} \quad 0 \leq FRETDH \leq 1 \quad (\text{Ecuación 7})$$

De acuerdo con los postulados anteriores, la ETR queda definida por la siguiente ecuación:

$$ETR = ETP \times COB \times FRETDH \quad (\text{Ecuación 8})$$

El exceso de agua del perfil de suelo es calculado como la diferencia entre el agua del estrato y la capacidad de campo.

Inicio del crecimiento y fenología

El momento en que la pradera inicia su crecimiento se calculó según el algoritmo propuesto por Smith y Williams (1973), en el cual, a partir del día 1 de enero (día juliano = 1), se acumulan las precipitaciones en períodos de 14 días. Si en uno de estos períodos las precipitaciones acumuladas superan los 20 mm, se da inicio al crecimiento. Ocurrido este evento, se asigna un valor inicial de 100 kg ha^{-1} a la MS fotosintetizante (MSV , kg ha^{-1}). En caso contrario, la acumulación de precipitaciones vuelve a cero, la MSV toma un valor de cero y se empieza un nuevo ciclo de acumulación de lluvias. Una vez iniciado el crecimiento de la pradera, y durante los primeros 56 días, se evalúa la humedad de suelo. Si en este período inicial la humedad de suelo baja a valores inferiores al punto de marchitez permanente, el crecimiento se interrumpe, volviendo por lo tanto a repetir el algoritmo que da inicio al crecimiento. De este modo se simula la incidencia de muerte de plántulas por efectos de una sequía temprana, en sus primeras semanas de desarrollo, cuando éstas son más sensibles. Así, el modelo puede simular la incidencia de "partidas falsas" (Smith y Williams, 1973; White *et al.*, 1983). Paralelo al momento en que se da inicio al crecimiento, el modelo acumula grados-día (dg , °C d) por sobre una temperatura umbral (TU , °C) de 4,5°C y en función de estos últimos, se calcula la tasa de desarrollo de la pradera (td , fracción d^{-1}), definida esta variable como la fracción diaria de la acumulación térmica total requerida por la pradera para completar su ciclo de desarrollo:

$$dg = TMD - TU \quad \text{si } TMD > TU \quad (\text{Ecuación 9.1})$$

$$dg = 0 \quad \text{si } TMD < TU \quad (\text{Ecuación 9.2})$$

$$td = \frac{1}{fi} \times dg \quad (\text{Ecuación 10})$$

En la ecuación 10, fi representa los grados-días necesarios para que la pradera llegue a la madurez. Cuando la tasa de desarrollo alcanza un valor de 50% ($td = 0,6$) se produce la floración en la pradera (Castellaro, 1988), siendo el día juliano asociado a

este evento, almacenado en una variable denominada *diaflor*, el que representa el día promedio del año en que ocurre dicho evento fenológico. Este último valor es utilizado posteriormente en el cálculo de la tasa de senescencia de la pradera.

Submodelo de crecimiento y senescencia de la pradera

La MS total de la pradera (*MST*, kg ha⁻¹) es dividida en dos niveles, la MS fotosintetizante (*MSV*, kg ha⁻¹) y la materia seca muerta (*MSM*, kg ha⁻¹), los cuales son el producto de un balance entre los procesos de crecimiento (*TCR*, kg ha⁻¹ d⁻¹), senescencia (*TSEN*, kg ha⁻¹ d⁻¹) y pérdida de material muerto (*TPERD*, kg ha⁻¹ d⁻¹) (Figura 2):

$$MSV_t = MSV_{t-1} + TCR - TSEN \quad \text{(Ecuación 11)}$$

$$MSM_t = MSM_{t-1} + TSEN - TPERD \quad \text{(Ecuación 12)}$$

$$MST_t = MSV_t + MSM_t \quad \text{(Ecuación 13)}$$

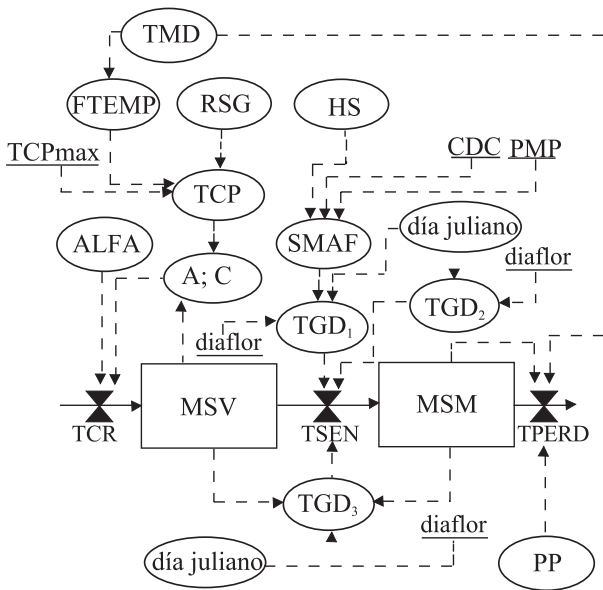
Al igual que en el caso del balance hídrico, para resolver las ecuaciones anteriores se utilizó un intervalo de integración de un día ($\Delta t = 1$).

El submodelo de crecimiento de la pradera supone un adecuado aporte de nutrientes, siendo las variables climáticas (temperatura, radiación solar y precipitaciones), la disponibilidad de material fotosintético y la humedad del suelo, las principales limitantes para el crecimiento del pastizal. Las ecuaciones y parámetros utilizados en la cuantificación de estos procesos, están basados en los propuestos por White *et al.* (1983). Algunos de ellos se modificaron, de acuerdo a información proporcionada por Castellaro (1988) y Smith y Williams (1973).

La tasa de crecimiento potencial de la pradera (*TCP*, kg ha⁻¹ d⁻¹), se calculó en función de un crecimiento potencial máximo (*TCP_{max}*, kg ha⁻¹ d⁻¹), de la radiación solar global (*RSG*, MJ m⁻² d⁻¹) y de una función de temperatura (*FTEMP*) que depende de la temperatura media diaria (*TMD*, °C).

$$TCP = TCP_{max} \times (1 - e^{-0.06463 \times RSG}) \times FTEMP \quad \text{(Ecuación 14)}$$

La función *FTEMP* opera como un multiplicador (valores entre 0 y 1), y se calculó basándose en los datos presentados por White *et al.* (1983), restrin-



- TMD: temperatura media diaria (°C)
- RSG: radiación solar global (MJ m² d⁻¹)
- PP: precipitación (mm d⁻¹)
- FTEMP: función de restricción del crecimiento por efecto de la temperatura (fracción)
- CDC: capacidad de campo (%)
- PMP: punto de marchitez permanente (%)
- TCPmax: tasa de crecimiento potencial máxima (kg ha⁻¹ d⁻¹)
- TCP: Tasa de crecimiento potencial (kg ha⁻¹ d⁻¹)
- A; C: coeficientes que dependen de la TCP
- ALFA: cociente entre la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial (fracción)
- HS: humedad de suelo (mm)
- SMAF: nivel relativo de agua del estrato (fracción)
- día juliano: día correlativo a partir del 1 de enero
- TGD1: senescencia debida a déficit hídrico (fracción diaria)
- TGD2: senescencia fisiológica (fracción diaria)
- TGD3: senescencia por sombreado (fracción diaria)
- diaflor: día juliano en que se produce la floración.
- TCR: tasa de crecimiento real de la pradera (kg ha⁻¹ d⁻¹)
- TSEN: tasa de senescencia (kg ha⁻¹ d⁻¹)
- TPERD: tasa de pérdida de material muerto (kg ha⁻¹ d⁻¹)
- MSV: materia seca fotosintetizante de la pradera (kg ha⁻¹)
- MSM: materia seca muerta (kg ha⁻¹)

Figura 2. Diagrama de flujo simplificado del crecimiento y senescencia de la pradera mediterránea anual.
Figure 2. Simplified flow chart of growth and senescence of the annual mediterranean grassland.

giendo fuertemente el crecimiento de la pradera cuando la temperatura media del aire baja de los 10°C, pero tendiendo a un valor asintótico igual a la unidad cuando la temperatura media supera los 12°C.

$$FTEMP = \frac{1}{1 + 17363,9 \times e^{-1,22039 \times TMD}} \quad (\text{Ecuación 15})$$

De acuerdo con la *TCP* y considerando el efecto de la disponibilidad de MS fotosintetizante presente en la pradera (*MSV*, kg ha⁻¹), se calcula el crecimiento máximo, el cual posteriormente es ajustado por un coeficiente denominado *ALFA*, el cual refleja el grado de restricción hídrica que afecta a la pradera y es calculado como el cociente entre la evapotranspiración real respecto de la evapotranspiración potencial ($ALFA = \frac{ETR}{ETP}$).

Considerando los aspectos anteriores, el crecimiento real de la pradera (*TCR*, kg ha⁻¹ d⁻¹), se calcula con la ecuación siguiente:

$$TCR = A \times (e^{-C \times MSV}) \times MSV \times ALFA \quad (\text{Ecuación 16})$$

En la ecuación anterior los coeficientes *A*, *e* y *C*, reflejan la interacción de la fitomasa fotosintetizante con la radiación solar incidente. Estos coeficientes son calculados en función de la tasa de crecimiento potencial de la pradera (*TCP*). La constante *e*, es la base de los logaritmos naturales (White *et al.*, 1983):

$$A = TCP \times e \times C \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$C = \frac{1}{350 + 33 \times TCP} \quad (\text{Ecuación 18})$$

El proceso de senescencia (*TSEN*, kg MS ha⁻¹ d⁻¹) genera un flujo diario de *MSV* que se transforma en material muerto (*MSM*, kg MS ha⁻¹). La senescencia de las especies anuales cobra especial magnitud una vez iniciada la floración. A partir de este momento, opera una senescencia debida al déficit hídrico (*TGD*₁, fracción d⁻¹), la cual es dependiente del nivel relativo de agua en el suelo (*SMAF*). También, durante esta etapa, es importante la senescencia fisiológica (*TGD*₂, fracción d⁻¹), la que se supone dependiente del día juliano (*diajuliano*) con relación al día del año en que se inicia la floración (*diaflor*). Previo al inicio de la floración, la senescencia es causada solamente por el efecto del som-

breamiento producido por la MS presente en la pradera (*TGD*₃, fracción d⁻¹).

Según lo expuesto anteriormente, una vez iniciada la floración, las variables anteriores quedan definidas por las siguientes ecuaciones:

$$TGD_1 = 3 + 80 \times e^{-4,5 \times SMAF} \quad (\text{Ecuación 19.1})$$

$$TGD_2 = 0,05 \times \left(\frac{\text{diajuliano} - \text{diaflor}}{7} \right)^3 \quad (\text{Ecuación 20.1})$$

$$TGD_3 = 0 \quad (\text{Ecuación 21.1})$$

Antes de la floración, las ecuaciones anteriores, toman los siguientes valores:

$$TGD_1 = 0 \quad (\text{Ecuación 19.2})$$

$$TGD_2 = 0 \quad (\text{Ecuación 20.2})$$

$$TGD_3 = 0,0021 \times (MSV + MSM) - 1,56 \quad (\text{Ecuación 21.2})$$

La senescencia de la pradera es calculada como la suma de las senescencias hídrica, fisiológica y la debida al sombreamiento:

$$TSEN = MSV \times (TGD_1 + TGD_2 + TGD_3) \times 0,001 \quad (\text{Ecuación 22})$$

El proceso de pérdida natural (*TPERD*, kg MS d⁻¹) se supuso dependiente de la lluvia (*PP*, mm d⁻¹) y la temperatura media diaria (*TMD*, °C), según la ecuación propuesta por Blackburn y Kothmann (1989):

$$TPERD = MSM \times (1 - e^{0,003077 \times PP} + 0,0005 \times TMD) \quad (\text{Ecuación 23})$$

Validación

La validación del subsistema clima-suelo-pradera se realizó utilizando datos climáticos (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar diaria), acumulación de fitomasa aérea total (kg ha⁻¹) y humedad del suelo en los primeros 40 cm (mm), medidos en una pradera anual ubicada en el Centro Experimental Hidango, durante la temporada 1992. El clima del sector corresponde a uno de tipo mediterráneo, con 87,5% de las precipitaciones concentradas entre los meses de mayo y septiembre, con un promedio de 833,5 mm anuales en el periodo años 1971-2004. (Fernando Squella, 2006, Instituto de Investigaciones Agro-

pecuarias, Centro Regional de Investigación Rautu. Comunicación personal). Los suelos donde se realizó este ensayo corresponden a terrazas marinas en posición de lomajes suaves, de textura franco-arcillosas, profundos, no hidromórficos, siendo clasificados como Typic Palexeralfs (Soil Survey Staff, 1992). Los valores promedios de capacidad de campo, punto de marchitez permanente (ambos expresados en porcentaje base peso suelo seco) y densidad aparente (g cm^{-3}) de los primeros 40 cm del perfil de suelo, se determinaron mediante análisis físico, el que se efectuó en el Laboratorio de Física de Suelos y Riego del Centro Regional de Investigación La Platina, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Los valores obtenidos para capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente fueron 22,2%; 11,0% y $1,53 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. La pradera en cuestión se fertilizó con 50 unidades de N ha^{-1} y 50 unidades de $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, de tal modo de no afectar el crecimiento por el efecto de estos macronutrientes. Los coeficientes fisiológicos utilizados en la caracterización de la pradera para efectuar la simulación se presentan en el Cuadro 1.

Las mediciones de humedad de suelo durante la temporada de crecimiento, se obtuvieron mediante muestras tomadas a tres profundidades: 0-10; 10-20 y 20-40 cm. Inmediatamente, las muestras se almacenaron en cápsulas de aluminio, se pesaron y después se sometieron a deshidratación en un horno de ventilación forzada hasta que alcanzaron un peso constante. El contenido de humedad de las muestras se expresó en porcentaje gravimétrico, obteniéndose un promedio para las tres profundidades antes señaladas. El inicio del crecimiento de la pradera se estimó visualmente, apreciando el porcentaje de recubrimiento y establecimiento de las plántulas.

Cuando este recubrimiento y establecimiento superó el 80%, se consideró como iniciada la estación de crecimiento de la pradera. Posteriormente, las muestras de acumulación de MS se obtuvieron mediante un corte a ras de suelo de todo el material aéreo circunscrito en un área de 2 m^2 , utilizando dos repeticiones en cada época de evaluación. Este material se guardó en bolsas de papel y se deshidrató en un horno de ventilación forzada hasta alcanzar peso constante. Los valores de MS de las muestras se promediaron y se expresaron en kg de MS ha^{-1} . El valor inicial de humedad de suelo (mm) al primero de enero, se supuso en 70 mm, valor cercano al punto de marchitez permanente del suelo. A la MSM inicial se le asignó un valor de cero, ya que al comenzar las mediciones de MS en el ensayo, se procedió a eliminar los restos de MS de la temporada anterior.

La bondad de ajuste del modelo se evaluó a través del cálculo de mínimos cuadrados para un modelo lineal entre los valores observados (X) y los valores simulados (Y) (Shannon, 1988). Los parámetros de tales ecuaciones se evaluaron planteando pruebas de hipótesis simultáneas para el intercepto ($H_0: a = 0$) y para la pendiente ($H_0: b = 1$) mediante la prueba "t" de Student y un valor $P \leq 0,05$ (Steel y Torrie, 1988). Adicionalmente, se calculó la raíz del error cuadrado medio de la predicción (RMSE), expresando el resultado en unidades absolutas, como también en unidades porcentuales en relación al valor promedio obtenido en las observaciones reales (Kabat *et al.*, 1995). Este coeficiente indica el grado de sobre o subestimación que realiza el modelo respecto del promedio de los valores observados:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ValSim_i - ValObs_i)^2}{n}} \times \frac{100}{ValObsProm}$$

(Ecuación 24)

Cuadro 1. Coeficientes fisiológicos que caracterizan a la pradera mediterránea utilizada en la validación. Centro Experimental Hidango, VI Región, Chile. Temporada 1992.

Table 1. Physiological coefficients that characterize the Mediterranean grassland used in the validation. Hidango Experimental Center, VI Region, Chile. Season 1992.

Coeficiente	Valor	Referencia
Tasa de crecimiento potencial máxima, $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$	120	Sther, 1982; Castellaro, 1988.
Índice de déficit hídrico crítico, fracción	0,8	Wight y Hanks, 1981.
Temperaturas umbral de desarrollo, °C	4,5	Castellaro, 1988.
Grados-día de emergencia a madurez, ° día	1300	Castellaro, 1988.
Tasa de desarrollo a inicio de la floración, fracción	0,6	Castellaro, 1988

En la ecuación anterior, $ValSim_i$ y $ValObs_i$, representan los valores de las observaciones simuladas y las medidas en terreno, respectivamente. $ValObsProm$ es el promedio de las observaciones reales y n representa el número de pares de datos utilizados en el cálculo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicio del crecimiento y fenología

De acuerdo con el algoritmo utilizado para simular el inicio del crecimiento de la pradera mediterránea anual, para el año 1992, este evento ocurrió el día juliano N° 113, lo que corresponde al 23 de abril. La fecha anterior es consistente con las observaciones empíricas efectuadas en terreno, ya que a fines del mes de abril, en dicho año, la mayoría de las plantas constituyentes de la pradera se encontraban establecidas. La fecha asociada al inicio de la floración fue simulada el día juliano N° 240 (28 de agosto). Finalmente, de acuerdo con la simulación, el cese del crecimiento y desarrollo de la pradera ocurrió el día juliano N° 298 (25 de octubre). Según estas cifras, el ciclo de crecimiento y desarrollo de la pradera duró 186 días. Los eventos anteriores son consistentes con observaciones efectuadas en praderas mediterráneas de la zona (Ovalle y Squella, 1996).

Acumulación de MS

En la Figura 3 se presentan los valores reales y simulados, correspondientes a la acumulación de MS. Al analizar dicha figura se desprende que este modelo, a pesar de su simpleza, reproduce la tendencia de la variación en esta variable. Al relacionar los valores simulados (Y) y los valores reales medidos en terreno (X) mediante análisis de regresión, se obtuvo una regresión significativa ($P \leq 0,05$), con un coeficiente de determinación de 96,26% y un error estándar de 334,8 kg ha⁻¹. Respecto de los valores del intercepto y la pendiente de la línea de regresión calculada, estos parámetros no difirieron significativamente de cero y uno, respectivamente ($P > 0,05$), lo que indica la inexistencia de sesgo (Figura 4). La RMSE entre los valores simulados y los medidos en terreno fue de 245,7 kg ha⁻¹, lo que representa un desvío porcentual de un 13,9% respecto del promedio de los valores medidos en terreno.

Humedad del suelo

La variación simulada del contenido de agua en los primeros 40 cm del perfil y los valores reales medidos en esta variable, se presentan en la Figura 5. Al igual que en el caso de la acumulación de MS, el modelo reproduce la tendencia observada en esta variable. La recta de regresión calculada entre los

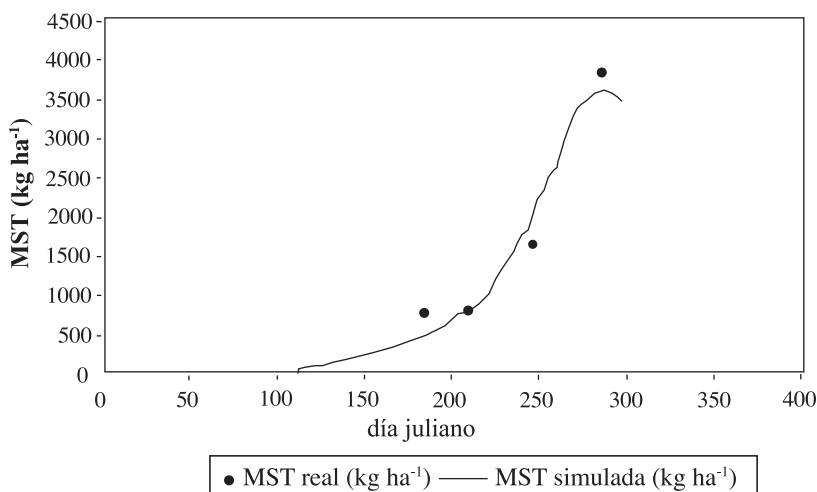


Figura 3. Variación de la acumulación de MS total (MST) según el día juliano. Valores simulados (—) y valores reales (•) medidos en experimento de campo. Hidango, temporada 1992.

Figure 3. Variation of total DM accumulation (MST) according to the Julian day. Simulated (—) and real values (•) measured in field experiment. Hidango, season 1992.

valores simulados (Y) y los valores reales medidos en terreno (X), fue también significativa ($P \leq 0,05$), y obtuvo en este caso, un coeficiente de determinación de 91,28%, con un error estándar de 9,03 mm. Los valores del intercepto y la pendiente de la línea de regresión calculada (Figura 6), no difirieron significativamente de cero y uno, respectivamente ($P > 0,05$), lo que denota la inexistencia de sesgo. La RMSE entre los valores simulados y los medidos en terreno fue de 7,8 mm, lo que representa un desvío porcentual de un 6,7%, respecto del promedio de los valores observados.

Proyecciones futuras

Uno de los aspectos que cabe recordar es que este modelo, en su primera versión, supone que los aportes de macronutrientes son óptimos, especialmente nitrógeno y fósforo, por lo cual la disponibilidad de los mismos no afecta el crecimiento de la pradera. Indudablemente éste debiera ser un aspecto a incluir en una versión posterior, ya que la fertilización es una estrategia importante en el manejo de estas praderas. Siguiendo con el enfoque con que se desarrolló este modelo, en la literatura existen modelos simples de la dinámica de N, como el propuesto recientemente por Paul *et al.* (2002), el cual podría ser incorporado como subrutina en el presente modelo. Otro aspecto que cobra especial

relevancia al momento de utilizar este modelo en la simulación de sistemas pastoriles de zonas de clima mediterráneo, es la cuantificación de los aspectos que dan cuenta de la variación de la calidad nutritiva de los componentes de la MS de la pradera, específicamente la concentración de proteína y la digestibilidad de los mismos. Finalmente, la interacción entre estrata arbustiva y herbácea, es otro aspecto de interés a desarrollar, para que el presente modelo adquiera un mayor realismo en la simulación de ecosistemas mediterráneos.

CONCLUSIONES

Utilizando algoritmos sencillos, basados en la acumulación de precipitaciones en períodos cortos, así como la utilización de la acumulación de grados-día, fue posible estimar el inicio del crecimiento de la pradera anual de clima mediterráneo, la fecha en que se produce la floración y el largo del ciclo fenológico de este tipo de praderas.

También fue factible simular la acumulación de MS y la variación del contenido de agua en la zona radicular de la pradera anual mediterránea subhúmeda, utilizando un modelo simple, mediante la adecuada elección y/o cálculo de parámetros con significancia fisiológica.

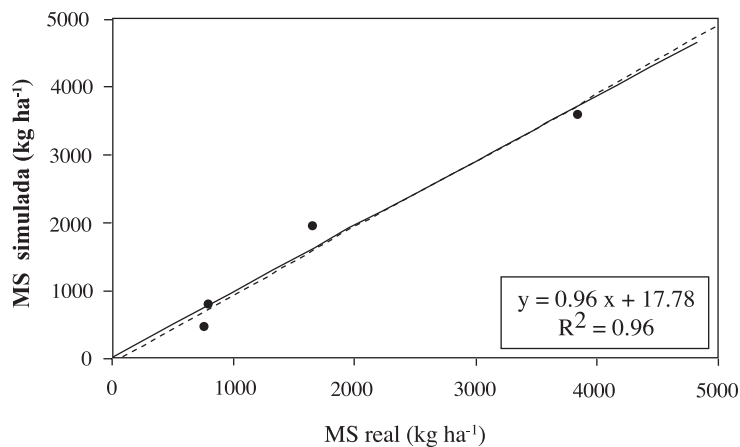


Figura 4. Ecuación de regresión entre los valores simulados de acumulación de MS (Y) y los medidos en experimento de campo (X). Hidango, temporada 1992. La línea punteada indica la bisectriz (Y = X).

Figure 4. Regression equation between simulated dry matter accumulation values (Y) and measured values obtained in field experiment (X). Hidango, season 1992. The dotted line indicates the bisectrix (Y = X).

Bajo este enfoque, el modelo elaborado explicó en gran medida (> 90%) la variación de las dos principales variables de estado del sistema, la acumulación de MS y la humedad del suelo en los primeros 40 cm del perfil, obteniéndose errores porcentuales medios inferiores al 14 y 7%, respectivamente.

Como proyección futura, para mejorar el realismo de este modelo de simulación, es necesario incorporar aspectos relacionados con la disponibilidad de N en la zona radicular y el efecto del estrato arbustivo sobre el crecimiento de la pradera, así como establecer los algoritmos que den cuenta del valor nutritivo de la misma.

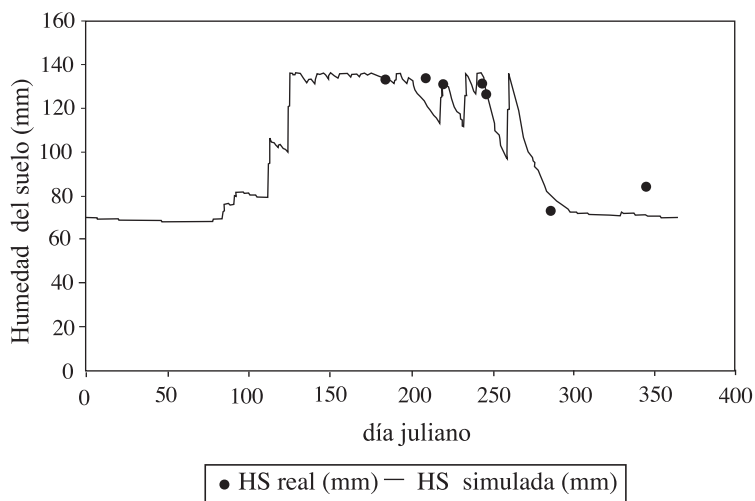


Figura 5. Variación de la humedad del suelo (HS) en los primeros 40 cm del perfil, según el día juliano. Valores simulados (—) y valores reales (•) medidos en experimento de campo. Hidango, temporada 1992.

Figure 5. Variation of the soil water (HS) in first 40 cm of soil profile, according to the Julian day. Simulated (—) and real values (•) obtained measured in field experiment. Hidango, season 1992.

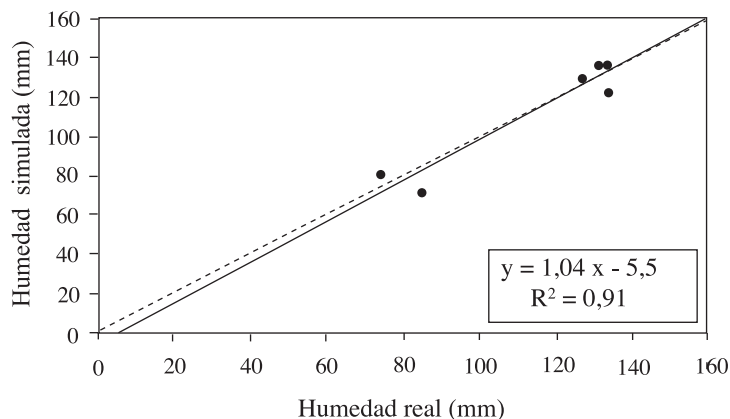


Figura 6. Ecuación de regresión entre los valores de humedad de suelo simulados (Y) y reales obtenidos en experimento de campo (X), en los primeros 40 cm del perfil. Hidango, temporada 1992. La línea punteada indica la bisectriz (Y = X).

Figure 6. Regression equation between the simulated values of soil water (Y) and actual measured values obtained in field experiment (X), in the first 40 cm of soil profile. Hidango, season 1992. The dotted line indicates the bisectrix (Y = X).

LITERATURA CITADA

- Acuña, H., J. Avendaño, y P. Soto. 1980. Productividad de la pradera natural del secano interior de la zona mediterránea subhúmeda de Chile. p. 417-425. *In* L.S. Verde y A. Fernández (eds.) IV Conferencia Mundial de Producción Animal, Memorias Vol. II. Asociación Argentina de Producción Animal (AAPA), Buenos Aires, Argentina.
- Acuña, H., J. Avendaño, y C. Ovalle. 1983. Caracterización y variabilidad de la pradera natural del secano interior de la zona mediterránea subhúmeda. *Agric. Téc. (Chile)* 43:27-38.
- Blackburn, H.D., and M.M. Kothmann. 1989. A forage dynamics model for use in range or pasture environments. *Grass Forage Sci.* 44:283-294.
- Castellaro, G. G. 1988. Elaboración de un modelo de simulación del crecimiento y fenología de la pradera mediterránea anual. 155 p. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Escuela de Agronomía, Santiago, Chile.
- Castellaro, G.G., M. Silva, y F. Santibáñez. 1994. Efecto de la radiación solar y la temperatura sobre las fenofases de las principales especies del pastizal mediterráneo anual. *Av. Prod. Anim.* 19:65-75.
- Gastó J., F. Cosío, y D. Panario. 1993. Clasificación de ecorregiones y determinación de sitio y condición. Manual de aplicación a municipios y predios rurales. 254 p. Red de Pastizales Andinos. Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (CIID-Canadá), Santiago, Chile.
- Hanson, J.D., B.B. Baker, and R.M. Bourdon. 1994. Spur 2. Documentation and user guide. GPSR Technical Report N° 1. 46 p. USDA, Agricultural Research Service, Great Plains Systems Research Unit, Fort Collins, Colorado, USA.
- Honorato, P.R. 2000. Manual de edafología. 267 p. 4ª ed. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Innis, G. S. (ed.). 1978. Grassland simulation model. 298 p. Springer-Verlag, New York, USA.
- Kabat, P.M., B.J. van den Broek, B. Marshall, J. Vos, and H. van Keulen. 1995. Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system. A comparison of potato growth models. 520 p. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Laurenroth, W.K., D.L. Urban, D.P. Coffin, W.J. Parton, H.H. Shugart, T.B. Kirchner, and T.M. Smith. 1993. Modelling vegetation structure-ecosystem process interactions across sites and ecosystems. *Ecol. Modell.* 67:49-80.
- Olivares, A., y J. Gastó. 1971. Comunidades de terofitas en subseres postaradura y en exclusión en la estepa de *Acacia caven* (Mol.) Hook et Arn. *Boletín Técnico* N° 34. p. 1-24. Universidad de Chile, Estación Experimental Rinconada, Santiago, Chile.
- Ovalle, C., J. Aronson, A. Del Pozo, and J. Avendaño. 1990. The espinal: agroforestry systems of the mediterranean type climate region of Chile. *Agroforestry Systems* 10:213-239.
- Ovalle, M.C., y F. Squella. 1996. Terrenos de pastoreo con pastizales anuales en el área de influencia climática mediterránea. Capítulo 39. p. 429-466. *In* Ruiz, N.I. (ed.) Praderas para Chile. 2ª ed. Instituto de Investigaciones Agro-pecuarias (INIA), Santiago, Chile.
- Parton, W.J., M.O. Scurlock, D.S. Ojima, T.G. Gilmanov, R.J. Scholes, D.S. Schimel, *et al.* 1993. Observations and modelling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles* 7:785-809.
- Paul, K.L., P.J. Polglase, A.M. O'Connell, J.C. Carlyle, P.J. Smethurst, and P.K. Khanna. 2002. Soil nitrogen availability predictor (SNAP): a simple model for predicting mineralisation of nitrogen in forest soil. *Aust. J. Soil Res.* 40:1011-1026.
- Pendleton, D.F., J.W. Menke, W.A. Williams, and R.G. Woodmansee. 1983. Annual grassland ecosystem model. *Hilgardia* 51:1-44.
- Shannon, E. 1988. Simulación de sistemas. Diseño, desarrollo e implantación. 427 p. Editorial Trillas, México DF.
- Silva G., M. 1993a. Papel del enfoque de sistemas en la investigación en producción animal. Capítulo XII. p. 148-164. *In* Silva G.M., y M. A. Mansilla (eds.). Análisis de sistemas en producción animal. Teoría y aplicaciones. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago, Chile.
- Silva G., M. 1993b. Estructura de un sistema dinámico. Capítulo V. p. 33-41. *In* Silva G., M., y M. A. Mansilla (eds.). Análisis de sistemas en producción animal. Teoría y aplicaciones. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago, Chile.
- Smith, R.C.G., and W. Williams. 1973. Model development for a deferred-grazing systems. *J. Range Manage.* 26:454-460.
- Soil Survey Staff. 1992. Keys to soil taxonomy. 5th ed. Technical Monograph N°19. 541 p. United States Department of Agriculture-Soil Conservation Service, Pocahontas Press, Blacksburg, Virginia, USA.

- Steel, R.G.D., y J.H. Torrie. 1988. *Bioestadística. Principios y procedimientos*. 622 p. McGraw-Hill, New York, USA.
- Sther, W.K. 1982. *Regulación de la fenología y extracción de nitrógeno de la pradera mediterránea anual*. Tesis Ingeniero Agrónomo. 82 p. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales, Escuela de Agronomía, Santiago, Chile.
- Villalobos, J., L. Mateos, F. Orgaz, y E. Federes. 2002. *Fitotecnia, bases y tecnologías de la producción agrícola*. 496 p. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- White, D.H., P.J. Bowman, F.H.W. Morley, W.R. MacManus, and S. J. Filan. 1983. A simulation model of a breeding ewe flock. *Agric. Syst.* 10:149-189.
- Wight, J.R., and R.J. Hanks. 1981. A water-balance, climate model for range forage production. *J. Range Manage.* 34:307-311.
- Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke. 1990. The epic model. Technical Bulletin N° 1768. p. 3-92. *In* Sharpley A.N., and J.R. Williams (eds.). EPIC. Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model documentation. U.S. Department of Agriculture (USDA), Madison, Wisconsin, USA.