

Capacidades del modelo hidrológico TETIS versión 9

Escamilla V.^{a1}, Puertes C.^{a2} y Francés F.^{a3}

^aInstituto Universitario de Investigación en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València:

^{a1}viescam@cam.upv.es, ^{a2}cripueca@cam.upv.es, ^{a3}ffrances@hma.upv.es.

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

RESUMEN

En este artículo se describe las características de un modelo hidrológico distribuido como TETIS así como las posibilidades que permiten su uso. Mediante su empleo se puede realizar una simulación hidrológica en cuencas naturales, así como en otras condiciones empleando algunos de sus sub-modelos implementados: sedimentos, vegetación dinámica o nitrógeno.

El modelo TETIS ha sido ampliamente modificado hasta la fecha, pero con esta nueva versión 9, las posibilidades de empleo aumentarán gracias a las novedades de la inclusión de los sub-modelos de vegetación dinámica y de nitrógeno.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales siempre han cautivado y sorprendido al hombre, tanto por su exuberancia, complejidad y belleza como por su magnitud, frecuencia y peligrosidad. El Ciclo Hidrológico es uno de estos fenómenos, y en muchos casos, es necesario el conocimiento de sus variables de estado para la toma de decisiones en diversas áreas de la actividad humana, como pueden ser la planificación de recursos hídricos y la defensa contra la crecida de los ríos.

La no disposición de un marco matemático que explique satisfactoriamente el comportamiento del flujo dentro de la cuenca ha supuesto que la modelación hidrológica fuese uno de los puntos de interés de la comunidad desde los '80, convirtiéndola en la herramienta utilizada para la toma de decisiones, aunque separando ambas áreas de actuación. Por este motivo, se presenta aquí el modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual, que pretende servir de herramienta tanto para la simulación continua como para la de eventos de crecida. De esta forma, la modelación distribuida ha pasado a ser una de las herramientas clave para la estimación y predicción de eventos de crecida y la evaluación de los recursos hídricos.

Respecto a la tradicional modelación agregada, la modelación distribuida, conlleva una mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro de los procesos hidrológicos, lo que permite un mejor entendimiento de los procesos a nivel de cuenca y de parcela. A pesar de tener un alto requerimiento de información, gracias a la gran evolución de los ordenadores, ésta se encuentra cada vez más disponible.

Para la estimación y la predicción de crecidas, los procesos físicos involucrados más importantes son la lluvia y la escorrentía superficial, lo que ha generalizado en la literatura el término lluvia – escorrentía. Por ello, el estudio de las crecidas se centra básicamente en el análisis de los fenómenos de producción y traslación de la escorrentía. Por otra parte, en la evaluación de los recursos hídricos, los fenómenos de evapotranspiración y de flujo subterráneo son los más importantes. Y todos estos procesos pueden reproducirse con TETIS.

EL MODELO TETIS V9

El modelo TETIS ha sido desarrollado para realizar la simulación hidrológica en cuencas naturales. Tradicionalmente, dispone de sub-modelos que permiten considerar el efecto de los embalses y la simulación del ciclo de sedimentos, y como novedad de la versión 9, es capaz de considerar vegetación como variable de estado, y la simulación del ciclo del nitrógeno.

Para el uso del modelo hidrológico se requiere de una serie de variables de entrada como son la precipitación, la temperatura (en el caso de emplear el modo de fusión de nieve) y la evapotranspiración potencial (ETP), todas ellas de carácter puntual. Internamente, para la generación de información distribuida en el espacio, a partir de estos datos de entrada, TETIS emplea la interpolación según el inverso de la distancia al cuadrado.

La producción de la escorrentía, se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí verticalmente (más un séptimo de cauces, cuando exista en la celda), tal como muestra la Figura 1.

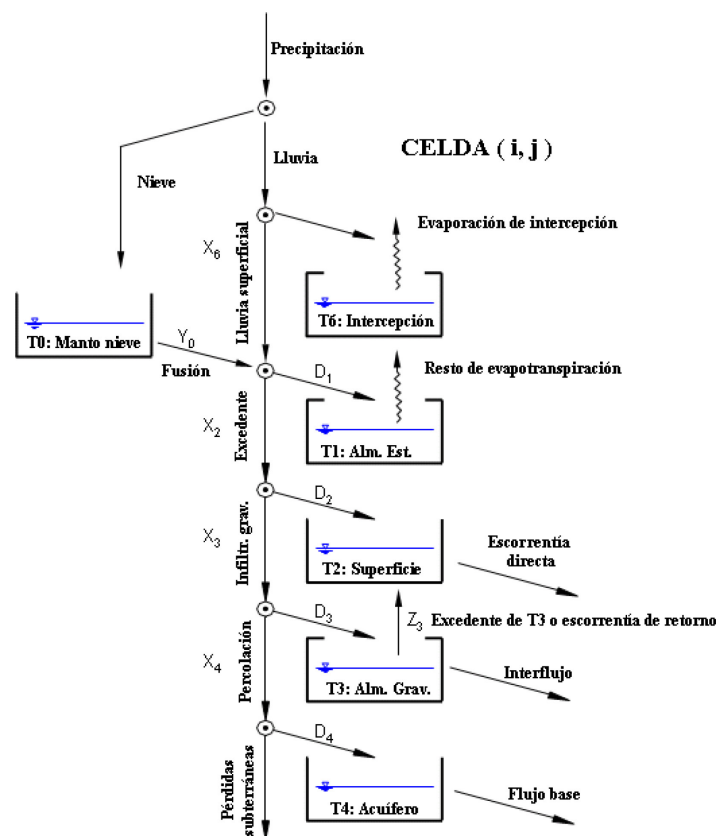


Figura 1 | Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS.

El flujo entre los tanques es función del agua almacenada en ellos, por lo que las variables de estado son los volúmenes almacenados en cada uno de los tanques. La función que relaciona el flujo con estas variables de estado es función del tipo de tanque y de las características morfológicas de la celda e hidrológicas del suelo en la misma.

En realidad, la conceptualización del modelo TETIS es una malla interconectada en tres dimensiones como se puede observar en la Figura 2. Los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente aguas abajo, tal como establecen las direcciones flujo propuestas por el modelo de elevación digital (MED), hasta alcanzar la red de drenaje compuesta por cárcavas y cauces. La longitud de interconexión máxima en cada tanque es definida por el usuario, considerando que tanto para la escorrentía como para el flujo subsuperficial, se asocia al tamaño de las laderas. Para el flujo base, dicha longitud se estima considerando el punto inicial del flujo permanente en el cauce.

El sistema resultante presenta tres elementos diferenciados, definidos por las áreas umbrales para que los diferentes componentes de la escorrentía salgan a la superficie. Estas áreas coinciden con la presencia de incisión permanente en el terreno en donde se concentran los flujos, tanto en cárcavas como en cauces.

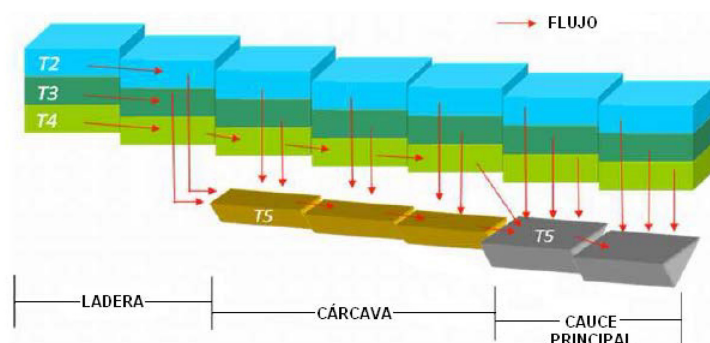


Figura 2 | Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS (simplificación 2D).

En las laderas el flujo superficial tiene lugar en combinación entre flujo laminar y a través de una red de surcos. En TETIS ambos procesos hidrológicos se tratan de manera conjunta, agrupándolos ambos como flujo laminar. En paralelo, el interflujo y el flujo base se generan en las respectivas capas de suelo. Una vez el interflujo, en su recorrido, alcanza una celda con área drenada superior al área umbral para el interflujo, sale a la superficie, integrándose a la escorrentía superficial que fluye en las cárcavas. Lo mismo ocurre cuando el flujo base alcanza una celda cuya área drenada es superior al umbral para el flujo base; a partir de este punto, las tres salidas de agua se concentrarán en un cauce.

La fusión de la nieve

Todo modelo de fusión de nieve tiene dos componentes básicas: una que considere la acumulación, y la otra es la forma en cómo se realiza la fusión. Dada la escasez de información, se emplean métodos tipo índice. La temperatura y cantidad de nieve presente en una cuenca varían fundamentalmente respecto de la elevación sobre el nivel del mar (Dunn y Colohan, 1999), pero sin dejar de considerar otros factores como la cobertura vegetal, la dirección de viento, la orientación de las laderas y la topografía. Para determinar la cantidad de agua almacenada se puede realizar medidas manuales, medición mediante sistemas automáticos y sistemas remotos o satélites.

Para la estimación de la fusión de nieve, TETIS emplea el método índice de Temperatura (grado-día), pues no necesita de información completa acerca de radiación solar neta, energía sensible, energía latente, calor del suelo y energía advectiva. El aumento de la tasa de fusión puede incluirse mediante un aumento del coeficiente de fusión o un incremento de la temperatura base, siendo más lógico el incremento del primero de ellos.

Por otro lado, el modelo TETIS, permite una modelización de la fusión de nieve distribuida en el espacio. Esta conceptualización permite introducir la variabilidad de los factores de fusión por medio de la distribución de los flujos de energía de la radiación de onda corta.

Los procesos kársticos

El karst es una formación geológica formada por una o más capas de sustrato soluble, habitualmente roca carbonatada como caliza o dolomita. Muchas regiones kársticas presentan algunos signos típicos, como endorreísmos o dolinas, pero muchas otras no presentan ningún distintivo típico.

La presencia de una formación kárstica se puede afrontar con una mejor modelación de los procesos de transformación lluvia-escorrentía. Para ello es necesaria la introducción de un nuevo tipo de celda en TETIS. Las celdas pertenecientes a una región kárstica no siguen las reglas de repartición de flujos según las áreas umbrales. Estas celdas no tienen ni cárcava ni canal, por ello la precipitación que se produce sobre ella se puede convertir en escorrentía superficial o infiltrarse en el acuífero

kárstico, propagándose en él hasta alcanzar una salida o un manantial. Ello conlleva que el usuario elija uno o más puntos de manantial, dentro o en el límite de las zonas kársticas.

Esta respuesta del acuífero kárstico se realiza a través del tanque gravitacional y del correspondiente al acuífero. El tanque gravitacional representa la transferencia rápida de flujo del suelo hacia el manantial, mientras que el tanque del acuífero reproduce la respuesta más lenta. De esa manera el flujo se transfiere de celda a celda hasta que alcanza un manantial y sale a superficie.

Laminación en embalses o lagos

La presencia de embalses o lagos es importante dentro de una cuenca, pues suponen puntos de control del hidrograma que circula por el cauce. Para considerar su efecto es necesario tener clara su localización y sus características físicas, dadas por las curvas en función de la altura de la lámina de agua, mediante la curva de embalse y la curva de desagüe.

La simulación del embalse se realiza de distinta forma, según se disponga de información respecto de los volúmenes, de los niveles en el embalse y de los caudales de salida. En caso de conocer los niveles o volúmenes, y los caudales de salida, la estimación del hidrograma de entrada se realiza empleando la ecuación de continuidad del embalse. En cambio, si no se conoce el hidrograma de salida del embalse ni la evolución de sus niveles, es necesario simular el proceso de laminación, para lo que TETIS emplea el método Puls Modificado (Ponce, 1989).

A la hora de localizar el embalse, para efectos de la modelación distribuida, el modelo identifica como embalse únicamente a una celda, siendo su localización lo más cercana a la salida del embalse.

Traslación de la escorrentía

Para la traslación de la escorrentía TETIS presenta una formulación que incluye elementos de la geometría hidráulica, permitiendo realizar un análisis hidráulico razonable de las transferencias entre celdas sin requerir grandes volúmenes de información ni una simplificación de cuenca.

La traslación a lo largo de la cuenca se realiza considerando que el agua no abstraída circula sobre las laderas hasta alcanzar algún canal perteneciente a la red de drenaje natural de la cuenca, siguiendo por la red de drenaje en sí. Para ello TETIS emplea la “onda cinemática”, una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant, al desprestigiar los efectos inerciales y de presión en la ecuación de conservación de la energía. Además, las características hidráulicas de los cauces se obtienen con base a los parámetros propios de la cuenca extraídos de la información geomorfológica, lo que deriva en la metodología de la Onda Cinemática Geomorfológica (OCG)

El modelo TETIS emplea nueve parámetros geomorfológicos (coeficientes y exponentes) para las distintas relaciones potenciales geomorfológicas existentes y que más adelante serán descritos.

INFORMACIÓN BÁSICA, PARÁMETROS Y FACTORES CORRECTORES

Con el fin de dar un poco de claridad a la información, los parámetros y los factores correctores incluidos dentro del modelo TETIS, se presenta a continuación un desglose de éstos.

Información básica

La información básica es aquella proveniente del modelo digital de elevación del terreno (MED), del cual se obtienen los siguientes mapas:

- Mapa de direcciones de drenaje, para establecer las conectividades entre las diferentes celdas.
- Mapa de celdas drenantes acumuladas. Requerida para la estimación de la velocidad y el área del flujo en la metodología de traslación por medio de la onda cinemática geomorfológica (OCG).

- Mapa de pendientes, para determinar la velocidad y el área de flujo mediante la OCG.
- Altura sobre el nivel del mar, es necesaria para la interpolación de la precipitación, la temperatura y de la altura de agua equivalente de nieve en cada celda.

Por otra parte, la información del episodio de lluvia también forma parte de la información básica que necesita el modelo, pero en este caso ésta depende del tiempo. Debe incluir las series temporales de precipitación, los volúmenes y niveles de embalses, caudales de salida en los embalses, caudales en las estaciones de aforo, evapotranspiración, altura equivalente de agua, temperatura y aportes o retenciones de caudal.

Estimación previa de parámetros

Los parámetros del modelo tienen que ser estimados previamente y, por lo tanto, pueden tratarse como información disponible. Básicamente se trata de los parámetros del suelo, de la cubierta vegetal, de los parámetros geomorfológicos con validez regional y de los parámetros de la fusión de nieve.

Parámetros del suelo y la cubierta vegetal

A partir de la información de topología, usos del suelo, litología y geología se obtienen los siguientes mapas con las características del suelo:

- Almacenamiento estático H_u , que incluye la capacidad de almacenamiento capilar del suelo y las abstracciones iniciales
- Permeabilidad superficial o conductividad hidráulica satura del suelo k_s .
- Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo k_{ss} .
- Capacidad de percolación o conductividad hidráulica satura del estrato rocoso k_p .
- Conductividad hidráulica horizontal satura del estrato rocoso k_{sa} .
- Capacidad de percolación profunda o conductividad hidráulica satura del estrato rocoso k_{ps} .
- Velocidad del flujo superficial en ladera v_t .

Parámetros geomorfológicos

El modelo TETIS emplea nueve parámetros geomorfológicos según las relaciones geomorfológicas:

- Área acumulada en la cuenca y caudal a sección llena: $\Lambda = \kappa \cdot Q_b^\varphi$
- Ancho de la sección transversal a sección llena y el caudal a sección llena: $w_b = c_1 \cdot Q_b^{\varepsilon 1}$
- Ancho de la sección transversal y el caudal: $w_t = Q_t^{\varepsilon 2}$
- Diámetro del sedimento, la pendiente y la profundidad del flujo: $d = c_d \cdot (v s_o)^\theta$
- Coeficiente de rugosidad y el diámetro del sedimento: $n = c_n \cdot d^\xi$

En donde κ, c_1, c_d y c_n son coeficientes y $\varphi, \varepsilon 1, \varepsilon 2, \theta$ y ξ corresponden a los exponentes.

Estos coeficientes y exponentes se pueden estimar a partir de un estudio geomorfológico por regiones homogéneas de la evaluación de las características hidráulicas a lo largo de la red de drenaje. Ante la inexistencia de dicho estudio, se pueden utilizar los valores medios recomendados en la literatura.

Parámetros de fusión de nieve

En el caso de los modelos tipo índice, los parámetros necesarios son: temperatura base T_b , coeficiente de fusión M_f incluyendo la lluvia y coeficiente de fusión sin lluvia. Si no se dispone de información sobre estos parámetros se pueden emplear los valores indicados en la literatura. Los tres parámetros son de carácter global, afectando del mismo modo a todas las celdas en todo el intervalo temporal.

Factores correctores

El modelo de producción y el modelo de traslación presentados en TETIS incluyen unos factores correctores que corrigen de forma global los diferentes parámetros, permitiendo una calibración (manual o automática) rápida y ágil de los diferentes procesos representados, aprovechando la información utilizada en su estimación previa.

Estos factores correctores tratan de corregir los errores siguientes:

- De estimación inicial de los parámetros
- En la información hidrometeorológica de entrada al modelo
- En el propio modelo
- Efectos de escala espacio-temporal

Los factores correctores que afectan directamente la producción de escorrentía son:

- FC1. Almacenamiento estático
- FC2. Evapotranspiración
- FC3. Infiltración
- FC4. Escorrentía directa
- FC5. Percolación
- FC6. Interflujo
- FC7. Pérdidas subterráneas
- FC8. Flujo base

Mientras que la traslación de la onda cinemática geomorfológica se emplea otro factor correcto (FC9)

Iniciación de las variables de estado

El estado al inicio del proceso de simulación en cada uno de los posibles almacenamientos dentro de un modelo hidrológico, es la variable que presenta una incertidumbre mayor.

Las variables de estado que necesitan su inicialización son las siguientes:

En el caso de tanques de suelo y vegetación:

- H_1 . El almacenamiento estático, que está dado como un porcentaje de su capacidad máxima.
- H_2 . El almacenamiento superficial, como una cantidad de agua disponible, normalmente nula o muy baja.
- H_3 . El almacenamiento gravitacional, está dado como una cantidad de agua disponible desde el inicio del episodio.
- H_4 . Estado inicial del acuífero, está dado como una cantidad de agua al inicio del evento.
- H_6 . Estado inicial de tanque de intercepción, está dado como un porcentaje del valor máximo de almacenamiento.

Para los cauces:

- H_5 . El almacenamiento inicial que determine el caudal circulante inicial, introducido como un porcentaje del caudal a sección llena.

Para el tanque de nieve será necesario introducir:

- El valor de la altura de agua equivalente en alguna estación, para poder interpolar en el espacio.
- Estimar para ese momento el parámetro β de correlación con la altura.
- Contorno de la capa de nieve, para limitar el área de interpolación, introducido como un mapa.

CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA CON TETIS

TETIS presenta una estructura separada de sus parámetros efectivos, consiguiendo que el valor efectivo de un parámetro en una celda sea el resultado de la multiplicación del valor del mapa correspondiente por un factor corrector, común para todas las celdas, y diferente para cada parámetro (Francés et al., 2007). Esto supone una altísima ventaja en la fase de calibración, ya

que se reduce drásticamente el número de variables a optimizar y pudiéndose incluso realizar calibraciones automáticas. Los elementos que pueden ser calibrados manual o automáticamente en TETIS son:

- Los factores correctores de los procesos de producción y propagación de la escorrentía.
- Los valores iniciales de las variables de estado de almacenamiento.
- Los coeficientes de correlación con la altura para la interpolación espacial.
- Los parámetros agregados del sub-modelo de nieve

La calibración automática puede realizarse de todos o de un subconjunto de los elementos anteriores. Existen diversos algoritmos que permiten la calibración automática, pero en el caso de TETIS, el método empleado para realizar la calibración es el método SCE-UA (Eckhardt y Arnold, 2001; Madsen, 2000; Thyer et al., 1999; Boyle et al., 2000; Yapo et al., 1998; Gan y Biftu, 1996; Duan et al., 1994 y Sorooshian et al., 1993). Este método, desarrollado en la Universidad de Arizona, es un algoritmo robusto y eficiente para la calibración de modelos lluvia-escorrentía (Duan et al. 1994).

Validación de los resultados

La validación del modelo es el proceso de demostrar que se están simulando apropiadamente los procesos físicos dominantes en un sitio específico, siendo capaz de realizar predicciones que satisfagan los criterios de precisión previamente establecidos (Klemeš, 1988; Refsgaars y Knudsen, 1996; Senarath et al., 2000; Andersen et al., 2001). Ésta se realiza en escenarios distintos al de calibración, y en un modelo hidrológico distribuido como TETIS, estos escenarios pueden ser:

- Validación temporal: en otro periodo de tiempo del mismo punto de calibración.
- Validación espacial: en otro punto de la cuenca y mismo periodo de tiempo de calibración.
- Validación espacio-temporal: en otro punto de la cuenca y periodo de tiempo distinto al de calibración.

SUB-MODELO DE SEDIMENTOS

El sub-modelo sedimentológico TETIS (Bussi et al, 2014) está basado en la formulación desarrollada en el modelo CASC2D-SED (Rojas, 2002), pero simulando tanto los procesos en ladera como en canales como unidimensionales.

Una vez una partícula de suelo es erosionada, ésta comienza a hacer parte del flujo y es transportada aguas abajo. Las tasas de producción, transporte y depositación están controlados por dos características: la disponibilidad de sedimentos en la cuenca y la capacidad de transporte de la corriente. Estas dos características limitan el transporte de materiales finos y el de materiales gruesos respectivamente (Julien, 1995).

Para esta consideración, el modelo TETIS separa las partículas de sedimentos agrupándolas en tres categorías de tamaño: arena, limo y arcilla, con las características expuestas por Julien (1995) (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 1 | Tamaño medio del grano y velocidad media de sedimentación en TETIS.

Clase	Diámetro (mm)	Velocidad(mm/s)
Arena	0.35	36
Limo	0.016	0.22
Arcilla	0.001	0.00086

Procesos de ladera

Para los procesos de ladera, el modelo emplea la ecuación de Kilinc y Richardson modificada, permitiendo considerar los efectos de los usos del suelo, las prácticas de cultivo y las características de los suelos, como muestra la siguiente relación:

$$q_t = 23210 S_o^{1.66} \left(\frac{Q}{W} \right)^{2.035} \frac{K}{0.15} C P \quad (\text{tons/m}^2\text{s}) \quad (1)$$

donde qt es el caudal unitario de sedimentos producido por un caudal unitario de agua (caudal, Q , por unidad de ancho, W) en tons/m/s, S_o es la pendiente, K es el factor de erosionabilidad del suelo, C es el factor de cultivo y P es el factor de prácticas de conservación, según la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) (Renard et al., 1994), 23210 es una constante empírica y 0.15 es la erosionabilidad máxima para arenas según la USLE.

En TETIS, la capacidad de transporte calculada se emplea en primer lugar para la propagación de los sedimentos aguas abajo, por fracción de tamaño y como material de lecho. Posteriormente, si permanece capacidad de transporte, el suelo es erosionado proporcionalmente al porcentaje de la fracción de tamaño correspondiente de material parental (Figura 3).

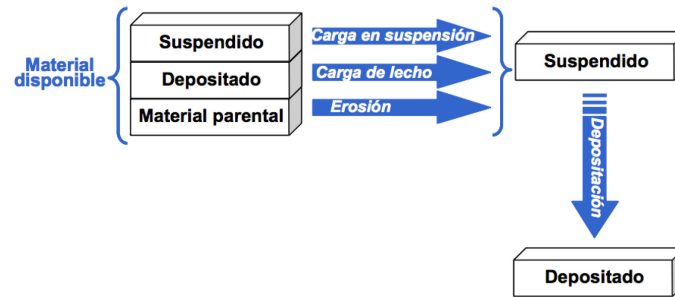


Figura 3 | Esquema de los procesos de ladera en TETIS

Procesos de cárcavas y cauces

El transporte de los sedimentos en cárcavas y cauces se lleva a cabo usando la ecuación de Engelund y Hansen (Engelund y Hansen, 1967; Julien, 1995; Montoya et al., 2006), la cual depende de parámetros hidráulicos y de las características de las partículas:

$$Cw_i = 0.05 * \left(\frac{G}{G-1} \right) * \frac{V * S_f}{\sqrt{(G-1) * g * d_{s_i}}} * \sqrt{\frac{R_h * S_f}{(G-1) * d_{s_i}}} \quad (2)$$

donde G es la gravedad específica de los sedimentos, V es la velocidad promedio del canal [m/s], S_f es el ángulo de fricción del canal [m/m], g es la aceleración de la gravedad [m2/s], d_{s_i} es el diámetro de la fracción de tamaño i [m] y R_h es el radio hidráulico del canal [m].

Por cada fracción de tamaño, una vez se sustrae la cantidad de sedimentos transportados en suspensión por procesos advectivos de la capacidad de transporte, el material del lecho es transportado usando la capacidad de transporte en exceso. La cantidad de material de lecho transportado será la mínima entre la que puede ser transportada por procesos advectivos y la capacidad de transporte en exceso.

El tratamiento diferencial entre el transporte de los materiales finos, como material en suspensión, y de los materiales gruesos, como material de lecho, permite utilizar diferentes capacidades de transporte y diferentes velocidades de reposo para cada fracción de tamaño.

Cabe resaltar el hecho de que en los canales no se considera explícitamente la erosión del material parental, es decir del lecho y de las márgenes. Esto queda justificado puesto que se ha demostrado que, en muchos casos, la fuente más importante de sedimentos transportados en los canales corresponde a los sedimentos suelos depositados por crecidas anteriores, que representan un material más fácilmente removible (Piest et al., 1975). El esquema de los procesos de cárcavas y cauces en TETIS es el mismo que en ladera con la diferencia que no se produce erosión de material parental.

Parámetros del modelo

Como se ha descrito previamente, el modelo de sedimentos de TETIS necesita información distribuida acerca de los tres parámetros de la fórmula USLE (factores C , K y P) y de la textura del suelo (porcentajes de arena, limo y arcilla).

La elevada incertidumbre introducida por estos parámetros en el proceso de simulación, justifica la importancia de la calibración del modelo por comparación con datos observados de caudal de sedimentos. La calibración de TETIS se realiza a través del ajuste de tres factores correctores. El primer de ellos, α , es un coeficiente multiplicativo de la fórmula de Killinc y Richardson modificada, destinado a corregir los errores cometidos en la estimación de los factores USLE. Los otros dos, β_1 y β_2 , son coeficientes multiplicativos de la fórmula de Engelund y Hansen. El primero se emplea para calibrar la capacidad de transporte en cárcava, y el segundo, para la capacidad de transporte en cauce.

Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales de sedimentos depositados en la cuenca afectan de manera sensible al volumen del sedimentograma de salida (Thornes, 1980). Por ello, en TETIS se permite ajustar de manera distribuida las condiciones de los sedimentos depositados en cuenca, diferenciando entre celda de ladera, de cárcava y de cauce, basándose tal diferenciación en el concepto de área umbral, por lo que se definirán dos umbrales de área drenada que dividen la cuenca en las tres zonas.

Los valores de entrada necesarios para el sub-modelo de sedimentos en TETIS son:

- El volumen inicial de sedimentos depositados en las celdas de ladera, dividido por clase de suelo (arena, limo, arcilla)
- El volumen inicial de sedimentos depositados en las celdas de cárcava, dividido por clase de suelo (arena, limo, arcilla)
- El volumen inicial de sedimentos depositados en las celdas de cauce, dividido por clase de suelo (arena, limo, arcilla)

SUB-MODELO DE VEGETACIÓN

El papel clave desempeñado por la vegetación en relación al ciclo hidrológico ha sido demostrado en muchos proyectos y publicaciones científicas (por ejemplo Laio et al., 2001; Huxman et al., 2005). Es por ello que llama la atención que la mayoría de modelos hidrológicos actuales no consideren la vegetación como variable estado sino como un parámetro estático despreciando, de esta manera, el rol activo de la dinámica de la vegetación.

Todo ello llevó a la inclusión en el modelo TETIS de un sub-modelo de vegetación diseñado para ser utilizado en ambientes controlados por la disponibilidad de agua. Este modelo fue inicialmente propuesto por Pasquato et al. (2015) y posteriormente mejorado y adaptado por Ruiz-Pérez (2016). Para poder dar una descripción más detallada, se puede diferenciar entre dos sub-modelos diferentes: (1) el sub-modelo hidrológico y (2) el sub-modelo de vegetación dinámica.

Sub-modelo hidrológico

El acople del modelo de vegetación dinámica al modelo hidrológico TETIS provoca ciertos cambios. De la estructura de tanques original, se ha visto modificado el balance en los tanques de intercepción y de almacenamiento estático (Figura 4).

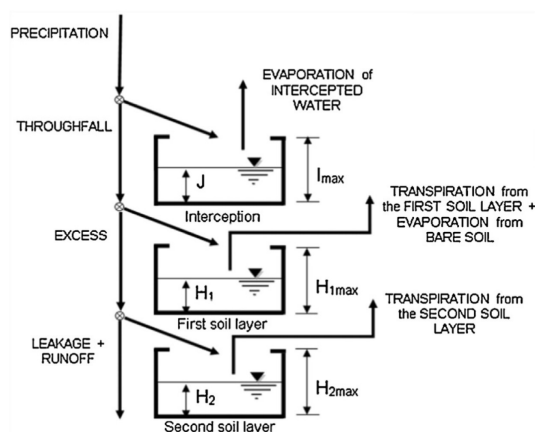


Figura 4 | Modificaciones incluidas en el esquema conceptual de TETIS por el sub-modelo de vegetación dinámica

El tanque de intercepción es aquel que representa el agua retenida por la vegetación. Esta agua sólo puede salir del tanque en forma de evaporación directa. En este tanque, el balance es lleva a cabo según:

$$I_t^* = I_{t-1} + \min(P_{pt} * \Delta t, I_{max} * f_c - I_{t-1}) \quad (3)$$

$$EI_t * \Delta t = \min(ET_{0,t} * \Delta t, I_t^*) \quad (4)$$

$$I_t = I_t^* - EI_t * \Delta t \quad (5)$$

donde t es el tiempo, I es la intercepción (I^* es sólo un paso intermedio), P_{pt} es la precipitación, I_{max} es la intercepción máxima que es calculada como el producto entre la máxima capacidad de almacenamiento foliar y el *Leaf Area Index* (LAI) simulado por el sub-modelo de vegetación dinámica, f_c es el factor de cobertura, EI es la evaporación desde la intercepción y ET_0 es la evapotranspiración de referencia.

Por otro lado, la zona efectiva de raíces (almacenamiento estático) se divide en dos capas de forma similar a lo propuesto por Scanlon y Albertson (2004): una capa superficial en la que se producen los procesos de evaporación desde el suelo desnudo y transpiración por parte de las raíces más superficiales, y una segunda capa en la que se produce la transpiración desde las raíces más profundas.

La transpiración, en ambos casos, es calculada de acuerdo a las recomendaciones de la FAO (Allen et al., 1998). La transpiración es obtenida haciendo uso de la ET_0 multiplicada por un factor de estrés hídrico ($f(H)$) y por un factor relacionado con el LAI simulado por el sub-modelo de vegetación como se muestra en las siguientes ecuaciones, factor a través del cual el estado de vegetación afecta a los flujos del ciclo hidrológico y al almacenamiento de los tanques.

$$H_{1,t}^* = H_{1,t-1} + \min(Thr * \Delta t, H_{1,max} - H_{1,t-1}) \quad (6)$$

$$E_{bs,t} * \Delta t = \min\{(ET_{0,t} - EI_t) * \Delta t * (1 - f_c) * \beta(H_1)_{bs,t}, H_{1,t}^*\} \quad (7)$$

$$T_{1,t} * \Delta t = \min\{(ET_{0,t} - EI_t) * \Delta t * f_c * \beta(H_1)_{bs,t} * \min(1, LAI), H_{1,t}^*\} \quad (8)$$

$$H_{1,t} = H_{1,t}^* - E_{bs,t} * \Delta t - T_{1,t} * \Delta t \quad (9)$$

$$H_{2,t}^* = H_{2,t-1} + \min(Excess * \Delta t, H_{2,max} - H_{2,t-1}) \quad (10)$$

$$T_{2,t} * \Delta t = \min\{(ET_{0,t} - EI_t) * \Delta t * f_c * \beta(H_2)_{bs,t} * \min(1, LAI), H_{2,t}^*\} \quad (11)$$

$$H_{2,t} = H_{2,t}^* - T_{2,t} * \Delta t \quad (12)$$

donde los subíndices 1 y 2 significan capa superficial y profunda respectivamente. Thr es la trascolación, $Excess$ es el flujo vertical entre la primera y la segunda capa de suelo, H_i es el almacenamiento de la capa de suelo i , $H_{i,max}$ es el almacenamiento estático máximo de la capa de suelo i , E_{bs} es la evaporación desde suelo desnudo y z_i es el porcentaje de raíces presentes en la capa de suelo i .

Sub-modelo de vegetación

Las dinámicas de la biomasa de la vegetación son modeladas aplicando un balance de masa, donde la variación está basada en el proceso de fotosíntesis, simulado a través de la Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR) y el índice Light Use Efficiency LUE (Arora, 2002).

Muchos estudios para estimar la producción de biomasa (Field et al., 1995; Running et al., 2004; Montaldo et al., 2005; Pasquato et al., 2015) están basados en el concepto del índice LUE. El índice LUE es la proporcionalidad entre la producción de biomasa de la planta y la radiación absorbida fotosintéticamente activa en condiciones óptimas, y puede verse afectado por la humedad del suelo, temperatura del aire (Landsber y Waring, 1997; Sims et al., 2006), y niveles de nutrientes (Gamon et al., 1997; Ollinger et al., 2008).

El LUE-Model simula la biomasa foliar (BI , kg/m²ground) según la siguiente expresión (Pasquato et al., 2015):

$$\frac{dB_t}{dt} = (LUE * \varepsilon * PAR * fPAR - Re) * \varphi_l(B_l) - k_l * B_l \quad (13)$$

donde ε tiene la reducción del LUE debido a las fuentes de estrés. El modelo es diseñado para cuencas controladas por el agua, por lo que los factores de estrés considerarán la disponibilidad de agua y el estrés derivado de la temperatura. El factor de estrés hídrico es el que conecta el sub-modelo de vegetación con el sub-modelo hidrológico. Re es la respiración, $\varphi_l(B_l)$ es un factor de distribución de la biomasa y k_l es la constante natural de senescencia

PAR y $fPAR$ (más información en Pasquato, 2013) son la radiación fotosintéticamente activa y la fracción de PAR absorbida por la vegetación respectivamente. La $fPAR$ se calcula usando la ley de Beer-Lambert según la siguiente ecuación:

$$fPAR = 0.95 * (1 - e^{-k*LAI}) \quad (14)$$

donde k es el coeficiente de extinción lumínica y el LAI es simulado a través de *Specific Leaf Area* (SLA) y el factor de cobertura vegetal (fc) de acuerdo a:

$$LAI = B_l * SLA * f_c \quad (15)$$

Parámetros del modelo

La siguiente tabla el conjunto de parámetros a calibrar en la simulación dinámica de la vegetación. Como puede observarse, a pesar de conllevar cambios en el modelo hidrológico, los factores correctores empleados son los mismos. Esto se debe a que el factor corrector para el almacenamiento estático máximo en la capa superior del suelo y el almacenamiento estático máximo en la capa inferior del suelo, por coherencia es el mismo.

Tabla 2 | Conjunto de parámetros a calibrar en cada uno de los sub-modelos implicados en la simulación de la dinámica de la vegetación

Modelo	Factores correctores o parámetros	Modelo	Factores correctores o parámetros
SUB-MODELO HIDROLÓGICO	FC1 Máximo almacenamiento estático	SUB-MODELO VEGETACIÓN DINÁMICA	Almacenamiento máximo foliar
	FC2 Evapotranspiración		LUE
	FC3 Infiltración		Factor de cubierta
	FC4 Velocidad de ladera		Distribución de raíces
	FC5 Percolación		LAI máximo
	FC6 Interflujo		Coefficiente de extinción lumínica
	FC7 Percolación profunda		SLA
	FC8 Flujo base conectado		Temperatura Óptima
	FC9 Onda Cinemática Geomorfológica		

SUB-MODELO DE NITRÓGENO

El sub-modelo de nitrógeno TETIS está basado en la formulación desarrollada en los modelos INCA-N (Wade et al., 2002) y EU-Rotate_N (Rahn et al., 2007). El modelo INCA-N es un modelo espacialmente semidistribuido que simula los procesos del ciclo del nitrógeno en suelo y cauce a escala de cuenca. En cambio, el modelo EU-Rotate_N es un modelo desarrollado a escala de parcela que simula el ciclo del nitrógeno únicamente en el suelo, pero que considera la vegetación como una variable de estado. De esta forma, este modelo es capaz de realizar un cálculo más preciso del nitrógeno extraído del suelo por parte de la vegetación.

En el modelo TETIS el ciclo del nitrógeno se modeliza de igual forma que en el modelo INCA-N, con la diferencia de que se ha incorporado el nitrógeno orgánico como forma nitrogenada a evaluar y su acoplamiento al ya existente sub-modelo de sedimentos. Esta última mejora, permite evaluar no sólo el volumen de nitrógeno transportado en disolución, sino también el transportado adsorbido a los sedimentos. Además, en las zonas de cultivos, para poder modelizar de forma adecuada la

asimilación de nitrógeno por parte de la vegetación, el modelo TETIS incorpora una subrutina de crecimiento de los cultivos basada en el modelo EU-Rotate_N, que permite calcular la extracción potencial diaria de los mismos.

Conceptualización del sub-modelo de nitrógeno

De igual forma que en el sub-modelo de sedimentos, el sub-modelo de nitrógeno diferencia los procesos según las zonas de ladera, cárcava y cauce. En las zonas de ladera (Figura 5) se modelizan tanto los procesos que se producen en el suelo, como los que se producen en el flujo de escorrentía directa, en cambio, en las zonas de cárcava y cauce (Figura 6) no se modeliza ningún proceso en el suelo.

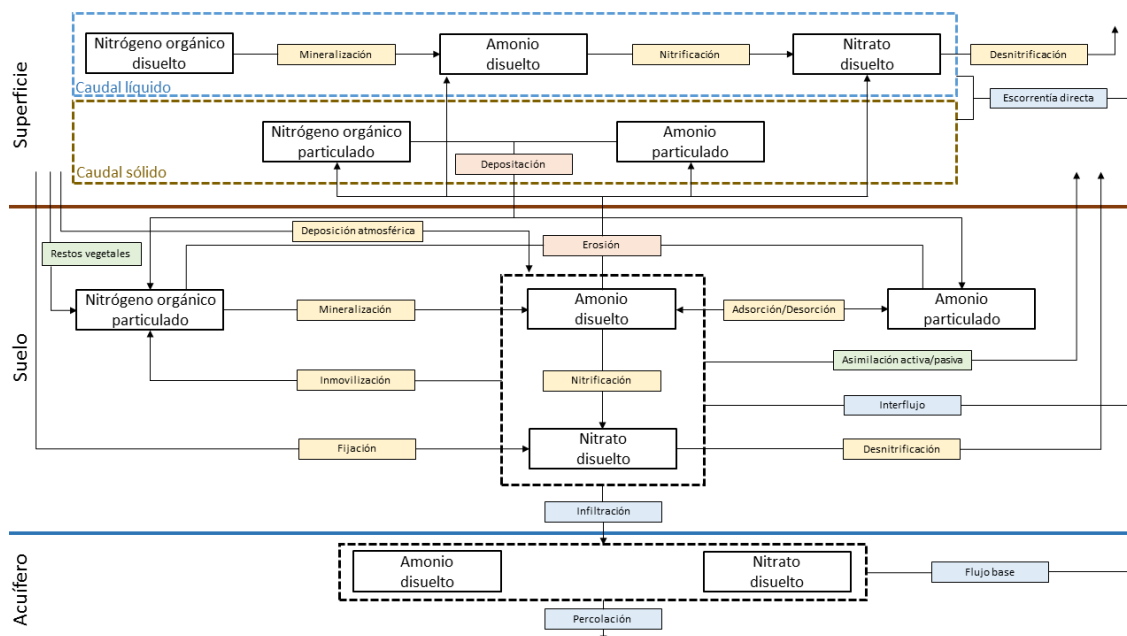


Figura 5 | Esquema conceptual del ciclo del nitrógeno para una celda de ladera.

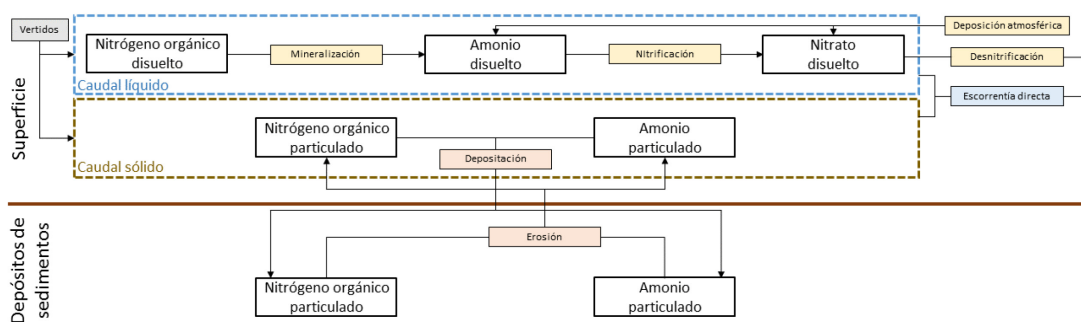


Figura 6 | Esquema conceptual del ciclo del nitrógeno para celdas de cárcava y cauce.

Los procesos de transformación del nitrógeno (coloreados en amarillo en la Figura 6 y Figura 7) están representados mediante cinéticas de primer orden corregidas por temperatura y humedad (Ecuación 16), a excepción de los procesos de fijación y deposición atmosférica que están representados por cinéticas de orden cero y los procesos de adsorción y desorción de amonio que se modelizan a través del coeficiente de partición que mantiene el equilibrio entre ambas fases. La transmisión vertical y horizontal del nitrógeno disuelto se modeliza mediante transporte advectivo con la masa de agua y siguiendo el esquema de conexiones verticales y horizontales del modelo hidrológico. El transporte de nitrógeno por los procesos de erosión y deposición, en caso de estar activa el sub-modelo de sedimentos, se modelizan de forma similar mediante un balance de masas

en el volumen de nitrógeno y el volumen de sedimentos. En el caso del acuífero, puesto que se dan condiciones de anoxia, no se modeliza ningún proceso.

$$P_i = k_i f(\vartheta) f(T) N_i \quad (16)$$

La asimilación de nitrógeno por parte de la vegetación está dividida en asimilación pasiva, aquella que se produce como consecuencia de la transpiración, y asimilación activa, aquella que realiza la planta mediante un flujo difusivo. La asimilación pasiva se modeliza como un movimiento advectivo con el flujo de transpiración, en cambio, la asimilación activa se modeliza mediante la parametrización de un coeficiente de difusión y una extracción potencial diaria y constante durante todo el año.

En el caso de que se quiera modelizar una zona con cultivos de regadío o cultivos herbáceos de secano, la metodología para modelizar la asimilación de nitrógeno descrita anteriormente no puede ser empleada. Al tratarse de cultivos, los requisitos de nitrógeno son muy diferentes según el cultivo y la fase de desarrollo en la que se encuentre. Por ello, se emplea una subrutina que simula el crecimiento de la vegetación y permite considerar una rotación anual de cultivos en la misma celda. De esta forma la extracción potencial diaria es calculada día a día según el estado de la vegetación.

Parámetros del sub-modelo de nitrógeno

En el caso del ciclo del nitrógeno, los parámetros que rigen los procesos dependen más del tipo de vegetación que de las características del suelo, salvo en el caso de los procesos de adsorción/desorción que dependen principalmente del contenido y tipo de arcilla del suelo. Por ello los parámetros en este caso son según los usos del suelo, a excepción del coeficiente de partición que es el que gobierna los procesos de adsorción/desorción y que presentará un valor para cada celda como en el caso del modelo hidrológico y el sub-modelo de sedimentos. El resto de parámetros tendrá un valor para cada uso del suelo. De esta forma será necesario definir las constantes de mineralización, inmovilización, nitrificación y desnitrificación para cada uso del suelo, así como el coeficiente de difusión y la extracción potencial por parte de la vegetación. Además, habrá que definir los valores de las constantes de mineralización, nitrificación y desnitrificación para los procesos en cauces.

Para la subrutina que simula el crecimiento de los cultivos y su extracción potencial diaria de nitrógeno, será necesario definir el número de cultivos que están en rotación, con sus respectivas fechas de siembra y cosecha, el peso seco en la fecha de plantación y el coeficiente de cubierta, y el peso seco esperado en la fecha de cosecha y su coeficiente de cubierta, así como la temperatura base para el crecimiento y los coeficientes a y b que permiten el cálculo del crecimiento y que se encuentran tabulados según cultivo.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de TETIS ha sido soportado económicamente a lo largo del tiempo por muchas instituciones, empresas y proyectos de I+D+i, y en los últimos años por el proyecto de Plan Nacional TETISMED (CGL2014-58127-C3-3-R).

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., et al., 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO *Irrigation and Drainage Paper* 56, vol. 300. FAO, Rome, pp. 6541.
- Arora, V., 2002. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Rev. Geophys.* 40, <http://dx.doi.org/10.1029/2001RG000103>, 3-1-13-.
- Bussi, G., Francés, F., Montoya, J.J., Julien, P. 2014. Distributed sediment yield modelling at Goodwin Creek: importance of initial sediment conditions. *Environmental Modelling & Software*, 58, 58-70, doi:10.1016/j.envsoft.2014.04.010.
- Duan, Q., Sorooshian, S. y Gupta, V. K., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, Vol. 158, p. 265-284.

- Dunn, S. M. y R. J. E. Colohan. 1999. Developing the snow component of a distributed hydrological model: a step-wise approach based on multi-objective analysis. *Journal of Hydrology*, 223, p 1-16.
- Eckhardt, K. y Arnold, J. G., 2001. Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, Technical note, Vol. 251, p. 103-109.
- Engelund, F., Hansen. E. 1967. *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Monogr, Danmarks Tekniske Universitet, Hydraulic Laboratory.
- Field, C.B., Randerson, J.T., Malmstrom, C.M., 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 51, 74–88.
- Francés, F., Vélez, J.I., Vélez, J.J. 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1-2), 226–240.
- Gamon, J.A., Serrano, L., Surfus, J.S., 1997. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia* 112, 492–501.
- Gan, T. Y. y Biftu, G. F., 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Optimization algorithms, catchment conditions, and model structure. *Water Resources Research*, Vol. 32, N° 12, p. 3513-3524.
- Huxman, T.E., Wilcox, B.P., Breshears, D.D., Scott, R.L., Snyder, K.A., Small, E.E., Hultine, K., Pockman, W.T., Jackson, R.B., 2005. Ecohydrological implication of woody plant encroachment. *Ecological Society of America* 86 (2), 308–319.
- Julien, P. Y. 1995. Erosion and sedimentation. *Cambridge University Press*.
- Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L., Rodriguez-Iturbe, I., 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress II. Probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in Water Resources*. 24, 707–723.
- Landsber, J.J., Waring, R.H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*. 95, 209–228.
- Montaldo, N., Rondena, R., Albertson, J.D., Mancini, M., 2005. Parsimonious modeling of vegetation dynamics for ecohydrologic studies of water-limited ecosystems. *Water Resources Research*. 41, W10416.
- Montoya, JJ, F. Francés, J.J. Vélez y P. Julien (2006). Desarrollo de un modelo distribuido de producción, transporte y deposición de sedimentos. Aplicación en una cuenca experimental. *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ciudad Guayana (Venezuela), publicado en CD 10 pp y en Actas 140-141.
- Ollinger, S.V., Richardson, A.D., Martin, M.E., Hollinger, D.Y., Frohking, S., Reich, P.B., Plourde, L.C., Katul, G., Munger, J.W., Oren, R., Smith, M.L., Paw, U., Bolstad, K.T., Cook, P.V., Day, B., Martin, M.C., Monson, T.A., Schmidt, R.K.H.P., 2008. Canopy-nitrogen, carbon assimilation, and albedo in temperate and boreal forests: functional relations and potential climate feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. U.S.A. 105, 19335–19340.
- Pasquato, M., 2013. *Comparison of Parsimonious Dynamic Vegetation Modeling Approaches for Semiarid Climates*. Universitat Politècnica de València, PhD Thesis.
- Pasquato, M., Medici, C., Friend, A.D., Francés, F. 2014. Comparing two approaches for parsimonious vegetation modelling in semiarid regions using satellite data. *Ecohydrology*, 8, 1024-1036, doi:10.1002/eco.1559.
- Piest, R. F, J. M. Bradford, y G. M. Wyatt. 1975. Soil erosion and sediment transport from gullies. *Journal of the Hydraulics Division* 101, no. 1: 65–80.
- Ponce, Victor Miguel. 1989. Engineering hydrology: Principles and practices. *Prentice Hall Inc*. New Jersey, USA.

- Rahn C. R., Zhang K., Lillywhite R., Ramos C., Doltra J., de Paz J.M., Riley H., Fink M., Nendel C., Thorup-Kristensen K., Pedersen A., Piro F., Venezia A., Firth C., Schmutz U., Rayns F., Strohmeyer K., 2010. EU-Rotate_N – a Decision Support System – to Predict Environmental and Economic Consequences of the Management of Nitrogen Fertiliser in Crop Rotations. *European Journal of Horticultural Science* 75(1), 20-32.
- Renard, K. G., J. M. Laflen, G. R. Foster, y D. K. McCool. 1994. The revised universal soil loss equation. *Soil erosion research methods*: 105-124.
- Rojas, R. 2002. GIS-based upland erosion modeling, geovisualization and grid size effects on erosion simulations with CASC2D-SED. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Ruiz-Pérez, G., González-Sanchís, M., del Campo, A., Francés, F. 2016. Can a parsimonious model implemented with satellite data be used for modelling the vegetation dynamics and water cycle in water-controlled environments? *Ecological Modelling*, 324, 45-53.
- Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H., 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience* 54, 547–560.
- Scanlon T.M., Albertson J.D., 2004. Canopy scale measurements of CO₂ and water vapor exchange along a precipitation gradient in southern Africa. *Global Change Biology* 10:329–341
- Sims, D.A., Luo, H., Hastings, S., Oechel, W.C., Rahman, A.F., Gamon, J.A., 2006. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO₂ exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem. *Remote Sensing of Environment*. 103, 289–303.
- Sitch S., Smith B., Prentice I. C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J. O., Levis S., Lucht W., Sykes M. T., Thonicke K., Venevsky S.. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology* 9 (2), 161-185.
- Sorooshian, S., Duan, Q. y Gupta, V. K., 1993. Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: Correlated and Heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, Vol. 29, N° 4., p. 1185-1194
- Thornes, J. B. 1980. *Erosional processes of running water and their spatial and temporal controls: a theoretical viewpoint*. *Soil Erosion*, edited by J. B. Kirkby and R. P. C.: 129 - 182.
- Wade, A.J., Durand, P., Beaujouan, V., Wessel, W.W., Raat, K.J., Whitehead, P.G., Butterfield, D., Rankinen, K., Lepisto, A. 2002. A nitrogen model for European catchments: INCA, new model structure and equations. *Hydrology and Earth System Sciences* 6(3), 559-582, doi:10.1016/j.ecolmodel.2016.01.002.