

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

MODELACIÓN DE LA RESPUESTA VEGETAL ASOCIADA A LA DINÁMICA DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN UN AMBIENTE SEMIÁRIDO

MARCELO SEPÚLVEDA M.¹
BONIFACIO FERNÁNDEZ L.²

RESUMEN

En este estudio se explora la capacidad de describir, de manera conjunta, los procesos hidrológicos y ecológicos que determinan respuestas dinámicas y complejas en la naturaleza. Tomando como base lo que establecen Rodríguez-Iturbe *et al* (1999), Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004), Wilcox *et al* (2003) y Zu *et al* (2008), se consideran como variables centrales la dinámica del agua en el suelo y un índice vegetal mejorado (EVI por sus siglas en inglés) proveniente de imágenes MODIS/TERRA 16 días y 250 m.

En base a lo señalado, se presentan los resultados luego de analizar y modelar la repuesta vegetal en función de la dinámica temporal de la humedad del suelo que experimentan dos unidades de sitio a una profundidad de 30 y 100 cm respectivamente. Lo obtenido hasta el momento indica que la integración de productos provenientes de sensores remotos con herramientas de modelación matemática, se configura como una aproximación metodológica factible de considerar en la exploración del comportamiento de ecosistemas semiáridos, cuya complejidad es necesaria reconocer y cuantificar al momento de proponer medidas tendientes a mejorar la gestión de dichos ambientes, en un marco incierto de ocurrencia de precipitaciones.

¹Programa de Magíster en Ingeniería. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile - mail: jmsepull@ing.puc.cl

²Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile – mail: bfernand@uc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las relaciones dinámicas entre la hidrología y la vegetación determinan ciertos estados de los ecosistemas mediterráneos semiáridos, que le son particulares y por ende los caracterizan. En este sentido, Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004), señalan que es importante entender las condiciones de estabilidad, o pérdida de ésta, de un ecosistema respecto a las variaciones en la disponibilidad de humedad del suelo, para predecir como impactan las actividades humanas o el cambio climático.

El estudio conjunto hidrología-vegetación en ambientes semiáridos, se ha estudiado poco a nivel nacional pero ha sido de creciente interés a nivel internacional. Así lo respaldan investigaciones realizadas por Eagleson (1978, 2002); Laio *et al* (2001); Maestre y Cortina (2002); Porporato *et al* (2004); Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004); Rigby y Porporato (2006), Rodríguez-Iturbe *et al* (2007), Baudena *et al* (2007), Nagler *et al* (2005), Kochendorfer y Ramírez (2008) y Montaldo *et al* (2008), entre otros. Todas las investigaciones señaladas establecen que el suelo representa un dominio interesante para integrar y explorar los diferentes procesos hidrológicos que condicionan la respuesta vegetal. Es en dicho contexto donde se reconoce que la dinámica del contenido de agua del suelo, además de influir directamente en la vegetación, determina la permanencia de los ecosistemas terrestres.

Desde el trabajo de Eagleson (1978a) mejorado y actualizado por Kochendorfer y Ramírez (2008), hasta lo desarrollado por Rodríguez-Iturbe *et al* (1999, 2007), se puede apreciar una evolución en el entendimiento de la importancia de la hidrología para describir respuestas dinámicas de la vegetación. Los esfuerzos se han centrado en establecer las causas de dichas respuestas, tanto en la composición específica (florística) como en sus patrones de disposición y distribución en el espacio. Un indicador muy utilizado para este último aspecto ha sido el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) el cual se ha mejorado y corregido, desarrollándose el EVI (Enhanced Vegetation Index).

El objetivo del artículo es presentar los resultados que se obtienen al modelar conjuntamente la respuesta dinámica de la vegetación, obtenida mediante tratamiento de valores EVI provenientes de imágenes MODIS/TERRA 16-días y 250-m, con la variabilidad temporal a escala mensual que experimenta la humedad del suelo estimada mediante un modelo de balance hídrico puntual, para un suelo arcilloso típico de la zona semiárida de Chile central. Los resultados indican que el uso de productos provenientes de sensores remotos para apoyar el desarrollo de análisis hidrológicos, aporta información relevante respecto al comportamiento de variables complejas que se observan en la respuesta vegetal. De este modo, la integración hidrología-vegetación permite describir procesos dinámicos en ambientes con déficit hídrico como los semiáridos. En este contexto, el modelo propuesto por Rodríguez-Iturbe *et al* (1999) permite un acercamiento cuantitativo al entendimiento de procesos complejos y dinámicos que ocurren en la matriz del suelo, pero que tienen su manifestación en elementos bióticos superficiales de fácil registro.

2. METODOLOGIA

La metodología se compone de tres etapas. La primera etapa fue la implementación de un modelo matemático para la estimación de la humedad del suelo a escala diaria. La segunda, la obtención y posterior tratamiento de imágenes MODIS/TERRA para analizar la dinámica de la vegetación

en base a la observación de una serie temporal del índice EVI, para el mismo período en que se estimó la humedad del suelo y la tercera etapa correspondió a una modelación conjunta de la respuesta vegetal y la humedad del suelo para el ambiente semiárido bajo estudio, usando elementos de regresión dinámica. A continuación se entrega un detalle de lo señalado.

2.1 Estimación del contenido de humedad del suelo

El contenido de humedad el suelo (s), es una variable adimensional que viene dada por el cociente entre el contenido volumétrico de agua en el suelo (θ) y la porosidad del mismo (n). La estimación de la magnitud de esta variable consideró la implementación de un modelo matemático simple de balance hídrico a escala diaria, que integra variables atmosféricas (precipitaciones, temperatura), de sitio (características del suelo, cobertura y tipo vegetal) e hidrológicas (escorrentía, infiltración y evapotranspiración). Dicho modelo (1) corresponde a la resolución de la ecuación diferencial estocástica propuesta por Rodríguez-Iturbe *et al* (1999).

$$nZ_r \frac{ds(t)}{dt} = \phi[s(t),t] - \chi[s(t),t] \quad (1)$$

Donde $\phi[s(t),t] = R(t) - I(t) - Q[s(t),t]$ es la infiltración y $\chi[s(t),t] = E[s(t),t] + L[s(t),t]$ las pérdidas; n , es la porosidad del suelo ($0 \leq n \leq 1$); Z_r , profundidad efectiva de las raíces (ó donde se identifica una mayor concentración de las mismas) (mm); $s(t)$, saturación de humedad del suelo ($0 \leq s(t) \leq 1$); t tiempo (días). Por su parte, $R(t)$ es la altura de agua caída promedio por evento de lluvia (mm); $I(t)$, cantidad de agua interceptada por el follaje (mm); $Q[s(t),t]$, cantidad de agua que escurre superficialmente por unidad de tiempo (mm.día^{-1}); $E[s(t),t]$, cantidad de agua evapotranspirada por unidad de tiempo (mm.día^{-1}) y $L[s(t),t]$, cantidad de agua por unidad de tiempo que traspasa más allá de la profundidad donde se concentran las raíces (mm.día^{-1}). Cabe señalar que la precipitación fue caracterizada en función de lambda (λ , día^{-1}) y alfa (α , mm), que dan cuenta de la ocurrencia y de la cantidad de agua caída, cuantificada esta última como altura de la lámina de agua (h) por evento. Ambos son considerados y tratados como eventos estocásticos. Para los demás términos que componen (1), Rodríguez-Iturbe *et al* (1999), Laio *et al* (2001) y Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004), entregan los procedimientos para su determinación. Análisis más detallados se encuentran en Laio *et al* (2002), Pumo *et al* (2008) y Nordbotten (2008).

El modelo presentado en los párrafos anteriores fue resuelto considerando métodos numéricos del tipo diferencias finitas explícitas en base a lo propuesto por Pumo *et al* (2008). La formulación general de la solución implementada en MatLab®(R.14) considera primero, una división de los componentes del lado derecho de (1) por nZ_r y un reordenamiento de los términos de la misma ecuación. Así se obtiene una expresión matemática simple, que permite estimar el contenido de humedad del suelo para un tiempo $t+n$ (en días) según unidad homogénea de suelo j , con $j = 1, \dots, 8$. Esta ecuación se resuelve de forma recursiva, necesitando un valor inicial de $s(t=0)$ con el cual obtener $s(t=1)$, resolviendo en pasos diarios (Δt en días) hasta obtener valores de $\phi(t=1)$ y $\chi(t=1)$ y con estos, los valores para los tiempos siguientes de s . La formulación queda como se muestra en (2).

$$s_{t+n}^j = \left(\frac{\varphi_t^j}{nZ_r} - \frac{\chi_t^j}{nZ_r} \right) \cdot \Delta t + s_{t+n-1}^j \quad (2)$$

2.2 Respuesta de la vegetación

La respuesta de la vegetación se analizó en base al comportamiento temporal del índice EVI ($-1 \leq EVI \leq 1$). Este índice considera una serie de bandas espectrales capturadas por un sensor electromagnético y tiene la particularidad de separar la señal procedente del suelo de la proveniente de la vegetación reduciendo la influencia atmosférica. Su determinación se realiza considerando (3)

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 * \rho_{RED} - C_2 * \rho_{BLUE} + L} \quad (3)$$

Donde, ρ_{NIR} , reflectancia en la banda del infrarrojo cercano; ρ_{RED} , reflectancia en la banda del rojo; ρ_{BLUE} , reflectancia en la banda del azul; C_1 , coeficiente de corrección de resistencia atmosférica del rojo; C_2 , coeficiente de corrección de resistencia atmosférica del azul; L , Factor de corrección al brillo que llega desde el follaje (copas) y G , factor ampliación o ganancia. Por lo general, se adopta $C_1 = 6$, $C_2 = 7,5$, $L = 1$ y $G = 2,5$. Un EVI cercano a 1, señala una alta actividad fotosintética de la vegetación.

El EVI es obtenido de imágenes satelitales producto MOD13Q1.5 del sitio web del U.S. Geological Survey (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool). Estas imágenes, disponibles desde febrero de 2000 a la fecha, son capturadas por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ubicado en la plataforma Terra, satélite Terra-EOS (Earth Observing System) cada 16 días. Su resolución espacial llega a los 250 m por píxel, determinando un área mínima de estudio de 6,25 ha.

Para este estudio, se trabajó con las imágenes y valores de EVI de los primeros 15 días de cada mes. El tratamiento de las imágenes se realizó con el programa ENVI 4.2 de Research Systems Inc. con el cual se extrajo una sub-imagen del sitio bajo estudio y se cambió el sistema de referencia de la misma (a coordenadas UTM, Datum WGS84), para posteriormente almacenarlas en formato ASCII. Las 107 sub-imágenes para la serie mensual período febrero 2000 a diciembre 2008, fueron desplegadas y tratadas en ArcMap 9 de ArcGIS 9.2, desde donde se traspasaron a formato raster. Este formato permitió realizar el cruce automático con la información vectorial (polígonos con las unidades de suelo) y así obtener los valores de EVI promedio para dos unidades de suelo descritas para el sitio de estudio.

2.3 Información de base considerada

Se adquirió información de precipitaciones diarias para el período entre 01 de enero de 2000 y 31 de diciembre de 2008, registrados en la estación más cercana que corresponde a la estación Polpaico (33°07' Lat Sur, 70°49' Long Oeste, 541 m s.n.m.), operada por la Dirección Meteorológica de Chile. Por su parte, la caracterización de los suelos se realizó en función de muestreos puntuales, mediante calicatas y bastón pedológico (barreno), ubicados aleatoriamente en el terreno. Las constantes hídricas del suelo, tales como la conductividad hidráulica saturada,

K_s , humedad a la capacidad de campo (s_{fc}), humedad al punto de marchitez permanente (s_w) y humedad al punto higroscópico (s_h) fueron estimadas considerando información de terreno ingresada al programa SPAW¹ (Soil-Plant-Air-Water) (Saxton y Willey, 1999, 2006; Saxton y Rawls, 2006). La evapotranspiración máxima promedio diaria para cada mes (en mm.día⁻¹), se obtuvo de la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith, tal como lo propone Caylor *et al* (2005) y lo realiza Pumo *et al* (2008) mientras que la interceptación de agua que realiza el follaje consideró valores umbral Δ (en mm) según la dominancia de los tipos funcionales vegetales por mes. Laio *et al* (2001), Guswa *et al* (2002) y Ridolfi *et al* (2003) señalan el procedimiento y valores referenciales los que no cambian para el período de análisis considerado.

Las visitas a terreno (3 en total, 1 en invierno y 2 en verano) permitieron realizar un registro de especies vegetales presentes y definir dos tipos funcionales de vegetación para las unidades de suelo bajo análisis. Por un lado, tipo funcional arbóreo (leñosas) con una profundidad de las raíces (Z_r) de 100 cm y representadas por la especie *Acacia caven* (Mol.) Mol. (Espino), y por otro, herbáceas (praderas o pastos), de crecimiento principalmente estacional, con una profundidad de raíces de 30 cm. Todos los parámetros de entrada al modelo de balance hídrico del suelo fueron comparados con los que entrega la bibliografía disponible, tanto de estudios nacionales (por ejemplo: Selker *et al*, 2000; INIA, 2004; Castellaro y Squella, 2005, entre otros) e internacionales (por ejemplo: Laio *et al*, 2001; Rodríguez-Iturbe y Porporato, 2004, Montaldo *et al*, 2008, entre otros) para ambientes similares.

3. RESULTADOS

3.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a un sitio de aproximadamente 1.890 ha (18,9 km²) ubicado a 60 km al norte de la ciudad de Santiago (ver Figura 1), donde predomina un clima semiárido caracterizado por la ocurrencia de lluvias invernales, estación que concentra más del 80% del agua caída anualmente, y una estación seca prolongada con duración de 7 u 8 meses. El promedio total anual, para el período mayo 1957 – marzo 2007, se estimó en 289 mm \pm 175 mm, con un mínimo total anual de 53 mm, registrado en 1968 y un máximo anual de 820 mm, en 1987. La temperatura promedio anual se encuentra en torno a los 14°C, con máximas cercanas a los 31 °C, registrándose en Enero y/o Febrero, y mínimas llegando a los 3°C, en Julio y/o Agosto. La Tabla 1 entrega algunas características de las precipitaciones en el área.

En el sitio bajo estudio se identificaron 8 unidades de suelo en función de características tales como pendiente y pedregosidad superficial. Todas las unidades corresponden a la serie Rungue, caracterizados por tener texturas superficiales altamente arcillosas. De estas unidades se seleccionaron la unidad 1 y la unidad 8, donde los Z_r de cada uno, dada la vegetación dominante, se pueden observar en la Tabla 2.

¹ Programa de libre acceso disponible en <http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/SPAWDownload.html> y utilizado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA según el Sr. Raúl Ferreira, Ing. Agrónomo (MSc) Comunicación personal, Junio de 2009.

Tabla 1. Características de las precipitaciones registradas en el área de estudio

Año	Fecha primer evento de lluvia	Fecha último evento de lluvia	Número de eventos al año	Duración período húmedo, (días)	Lluvia total caída al año, (mm)
2000	11 de febrero	4 de noviembre	25	269	380,7
2001	21 de marzo	29 de septiembre	23	194	286,3
2002	9 de abril	15 de septiembre	32	161	610,2
2003	21 de enero	16 de noviembre	18	300	184,1
2004	30 de marzo	12 de noviembre	25	228	301,1
2005	11 de marzo	23 de noviembre	41	258	207,7
2006	15 de marzo	13 de octubre	22	152	294,4
2007	16 de febrero	24 de agosto	19	191	115,5
2008	27 de marzo	25 de septiembre	17	203	225,5

Figura 1. Ubicación del área de estudio

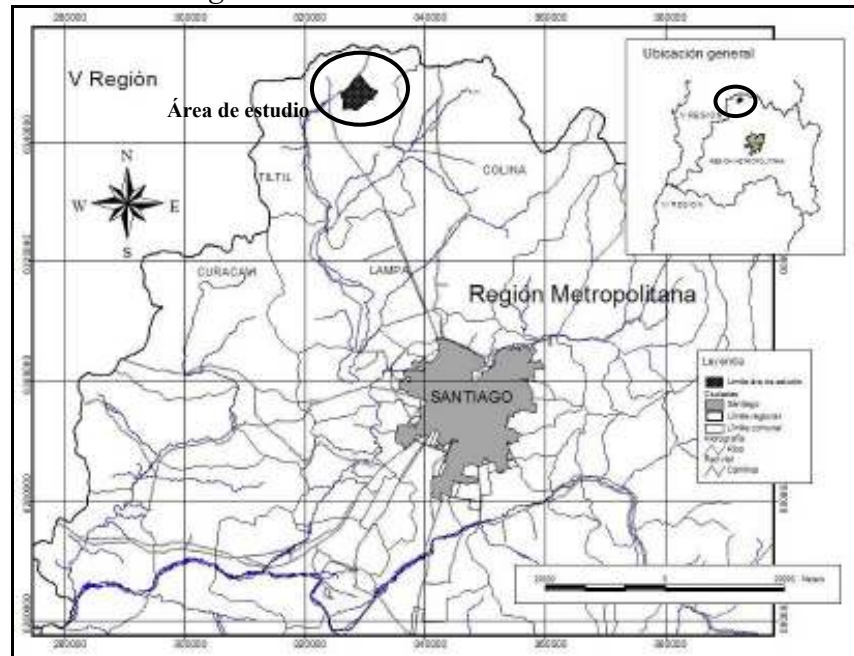


Tabla 2. Valores de los parámetros considerando presencia de *A. caven* y praderas

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia
$s_h^{(1)}$	Adimensional	0,19	Estimado usando SPAW con datos de terreno
$s_w^{(2)}$	Adimensional	0,27	
$s^*^{(3)}$	Adimensional	0,41	
$E_w^{(4)}$	mm.día ⁻¹	0,13	Laio <i>et al</i> (2001), Guswa <i>et al</i> (2002), Ridolfi <i>et al</i> (2003)
$b^{(5)}$	Adimensional	11	Rodríguez-Iturbe <i>et al</i> (1999), Laio <i>et al</i> (2001).
Z_r	mm	1000 (unidad suelo 1)	Medido en terreno
		300 (unidad suelo 8)	Medido en terreno
K_s	mm.día ⁻¹	130 (unidad suelo 1)	Estimado usando SPAW con datos de terreno
		60 (unidad suelo 8)	
n	Adimensional	0,52	Estimado usando datos de terreno

(1), (2) y (3) corresponden a contenidos de saturación de humedad del suelo umbral. s^* , humedad del suelo donde la planta comienza a cerrar los estomas en respuesta al estrés hídrico, s_w , humedad donde la planta comienza a marchitarse, s_h , humedad al punto higroscópico. (4) E_w , representa la evaporación diaria promedio en el punto de marchitez de la planta y (5) b , el índice de distribución del tamaño de poros según Rodríguez-Iturbe *et al* (1999).

3.2 Modelación del contenido de humedad del suelo y serie temporal

El modelo implementado corresponde a una solución unidimensional, discreta en el espacio y continua en el tiempo, de la ecuación (1) para un perfil de suelo compuesto por una capa. La estimación de la variable $s(t)$ requiere conocer un valor inicial de la misma, el cual fue estimado en 0,19 considerando información de terreno. La solución considera a la precipitación como el proceso estocástico central. Para ello se determinaron los valores mensuales de λ y α , que no cambian en el período de simulación. Esto difiere a lo propuesto por Rodríguez-Iturbe *et al* (1999) y Laio *et al* (2001) quienes consideran dos (2) valores por año para cada parámetro: uno para la estación húmeda y otro para la temporada seca (sin lluvias). Las Tablas 2 y 3, entregan los valores de los diferentes parámetros considerados en la modelación.

Tabla 3. Valores estimados para α , λ , Intercepción y Evapotranspiración máxima diaria

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
α (mm)	0,23	2,21	3,05	2,26	8,59	14,74	11,64	7,36	5,87	4,13	3,86	0
λ (días ⁻¹)	0,007	0,008	0,033	0,03	0,14	0,184	0,168	0,165	0,081	0,018	0,022	0
I (mm) ⁽¹⁾	1	1	2	2	2,1	2,3	3	3,5	3	3	2,1	1,5
E_{MAX} (mm.d ⁻¹) ⁽²⁾	5,63	4,94	3,91	2,21	1,25	0,89	0,98	1,44	2,39	3,48	4,61	5,53

(1) Fuente: Eagleson, (2002), Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004), Pumo *et al* (2008) y Montaldo *et al* (2008)

(2) Se estimó usando la ecuación de Penman-Montieth incluida en el programa computacional CropWat 8.0 (FAO, 1979).

Los resultados obtenidos en la modelación a escala diaria, período 01 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2008, para las unidades de suelo 1 y 8, se entregan en la Figura 2. La serie diaria obtenida tiene un comportamiento muy similar al entregado por Rodríguez-Iturbe *et al* (1999), Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004) y Montaldo *et al* (2008). Asimismo, presenta un respuesta directa al comportamiento de las precipitaciones (ver Figuras 3a y 3b).

Figura 2. Dinámica temporal de $s(t)$. Unidades de suelo 1 y 8

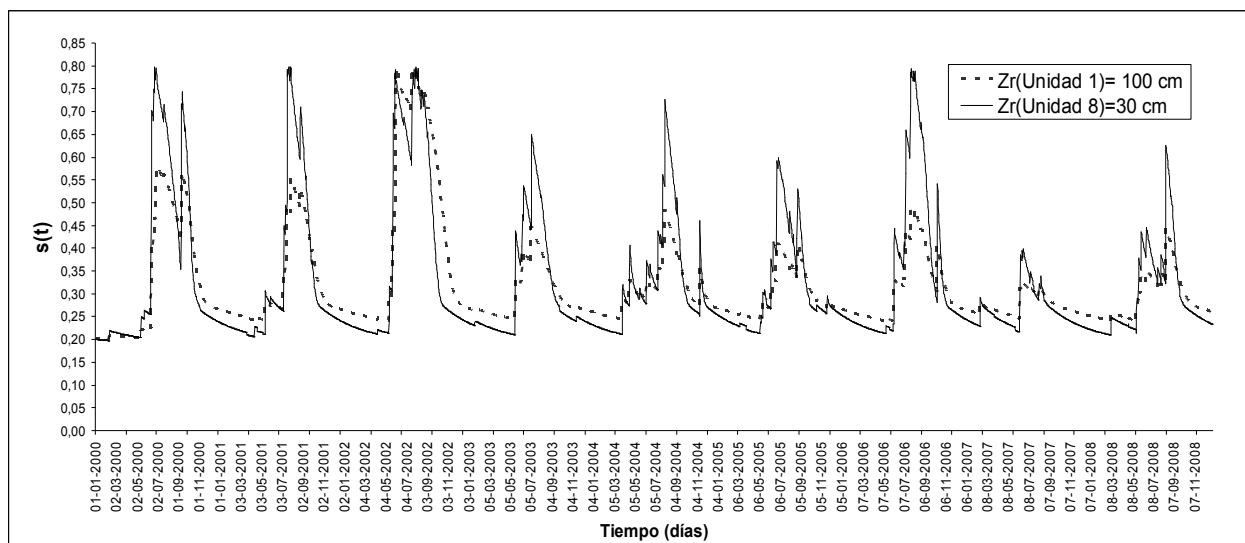


Figura 3a. Serie diaria de $s(t)$ y lluvia registrada. Unidad de suelo 1

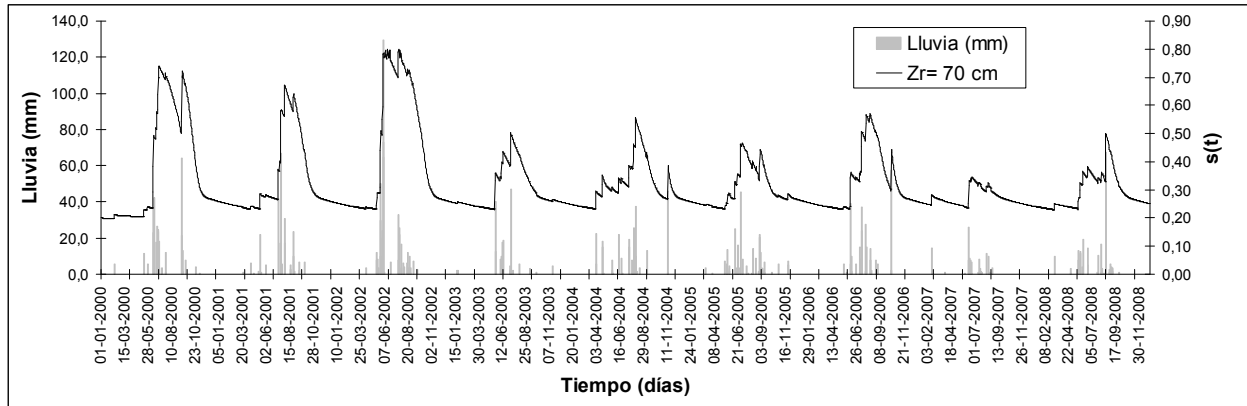
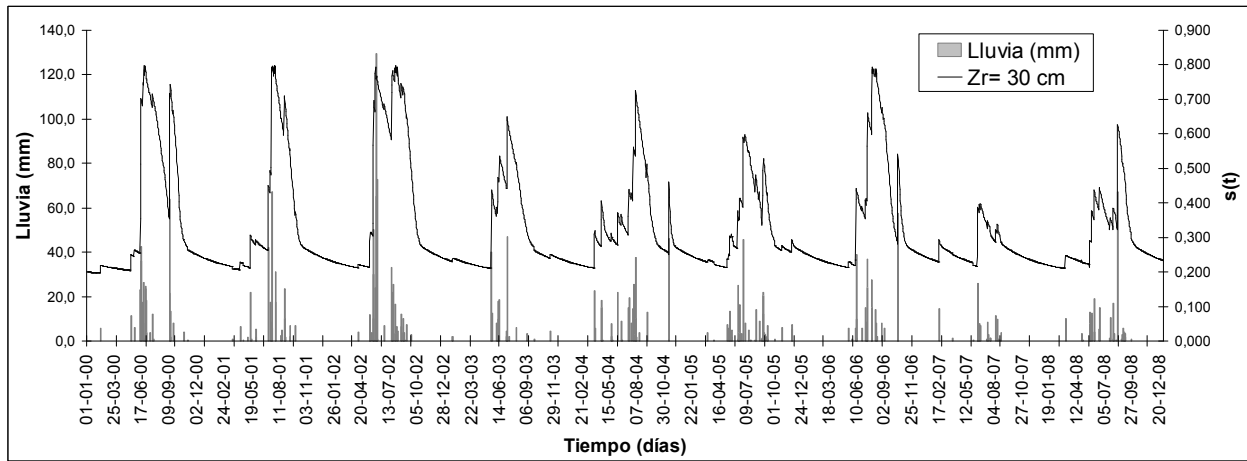


Figura 3b. Serie diaria de $s(t)$ y lluvia registrada. Unidad de suelo 8



3.3 Serie temporal de valores EVI e integración con $s(t)$

Se obtuvieron los valores promedio diario de EVI para cada mes dentro del período bajo análisis, para las dos unidades de suelo (ver Figura 4). Las series mensuales de EVI y de $s(t)$ se analizaron de manera conjunta de acuerdo a los gráficos que entregan las Figuras 5a y 5b.

Como se puede apreciar, son series periódicas con un marcado comportamiento estacional. Los máximos valores de EVI se registran una vez que se han registrado algunos eventos de lluvia que permiten una disponibilidad de agua en el suelo. Así, la vegetación inicia su respuesta (cambio en los valores EVI) de manera desfasada a la ocurrencia de las precipitaciones pero prácticamente en fase con la dinámica de la humedad del suelo. Asimismo, se observa que valores altos de EVI dependerían de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, por lo que variables tales como: textura del suelo, porosidad, profundidad de la zona de raíces, evapotranspiración y tiempo entre eventos de lluvia, tendrían un papel relevante.

Figura 4. Serie mensual de valores EVI

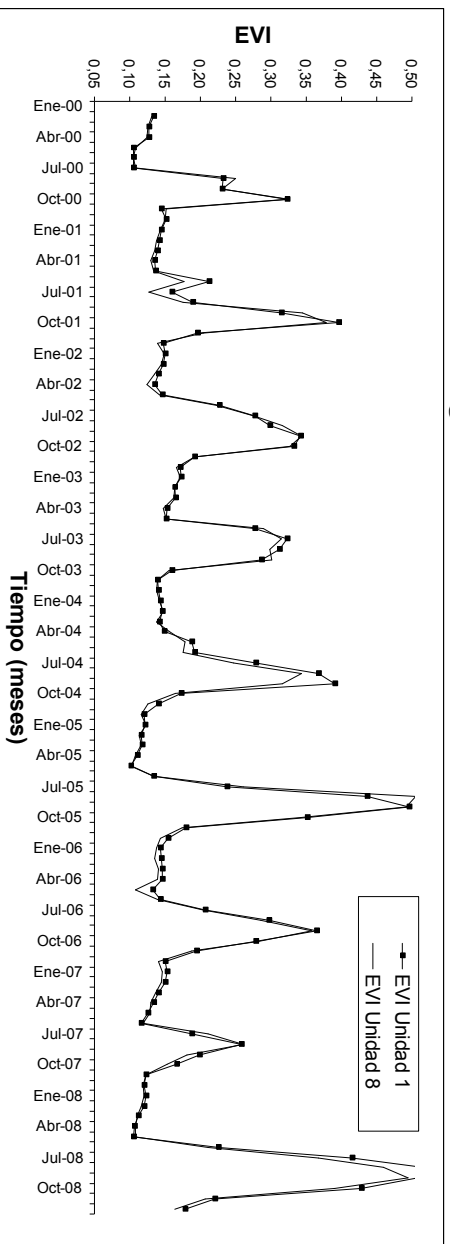


Figura 5a. Integración de las series mensuales EVI y $s(t)$. Unidad de suelo 1

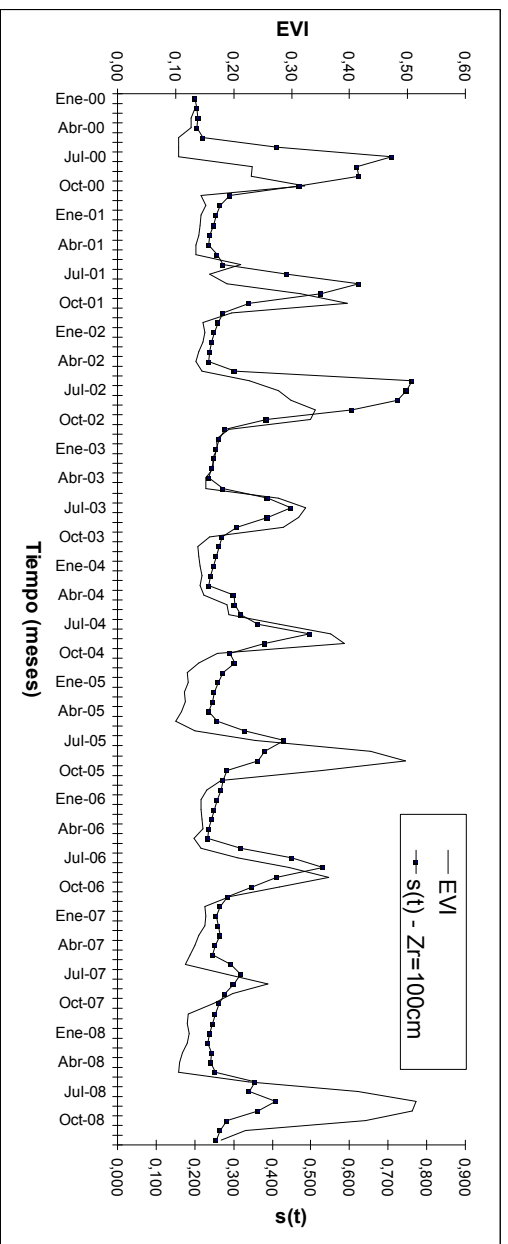
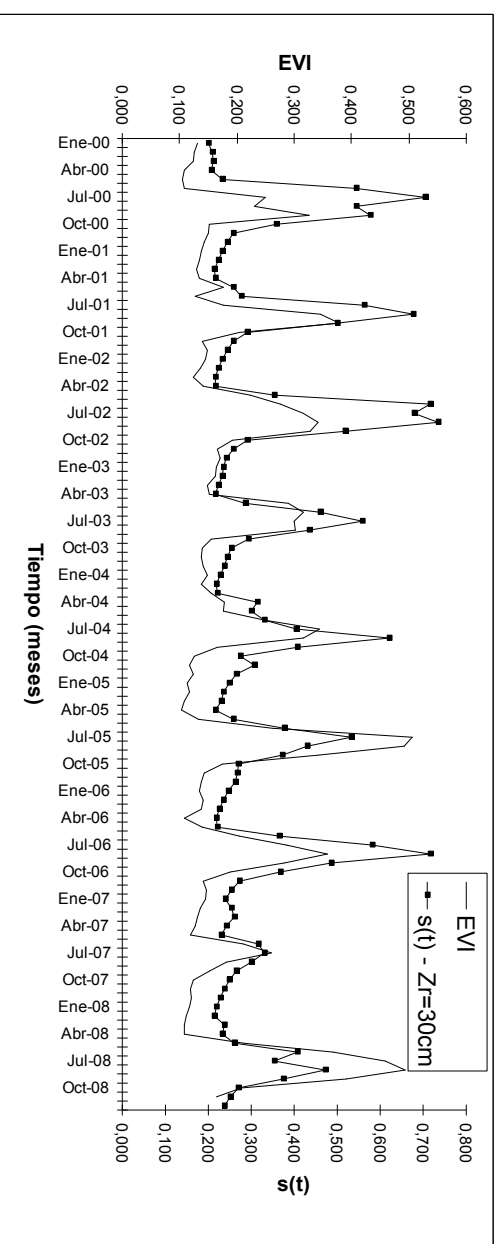


Figura 5b. Integración de las series mensuales EVI y $s(t)$. Unidad de suelo 8



3.4 Modelación conjunta humedad del suelo-EVI

Disponiendo de las series mensuales generadas tanto de EVI como de $s(t)$, se procedió a integrarlas y analizar la influencia de la humedad sobre la vegetación. Para ello, se utilizaron modelos lineales tipo Función de Transferencia de una entrada, considerando como variable dependiente o de respuesta a EVI y variable explicativa o de entrada a $s(t)$. Del correlograma para $s(t)$ (desfase $k=1, \dots, 20$ meses), se observó un marcado comportamiento periódico, por lo que ambas series se estandarizaron periódicamente, es decir, restando la media y dividiendo por la desviación estándar del mes correspondiente. Así se generaron series con promedio cero y varianza uno. La función de correlación simple (FAS, con desfases $k=1, \dots, 20$ meses) para $s(t)$ estandarizada, permitió observar un proceso ergódico, sin periodicidad, de manera que resulta factible de representarse con un modelo autorregresivo de orden 1 (AR(1)), con $\phi_1 = 0,71$ para la unidad de suelo 1, mientras que para la unidad de suelo 8, con un autorregresivo de orden 2 (AR(2)); con $\phi_1 = 0,586$ y $\phi_2 = -0.152$. Al aplicar estos modelos AR(p) parametrizados para $s(t)$ -estandarizada, a la serie EVI-estandarizada fue posible generar dos series X e Y respectivamente. Luego, tomando los residuos resultantes de aplicar los modelos (AR) de la humedad a ambas series y estableciendo las correlaciones cruzadas entre ellos, se estimaron los parámetros ν_k . Con los valores de ν_k , se construyó la función respuesta al impulso (FRI) y observando su comportamiento se determinaron valores para r (coeficiente autorregresivo), s (término de excitación) y b (coeficiente de retardo), del modelo FT.

Para ambas unidades de suelo, se probaron diferentes modelos FT variando los valores de r , s y b . Estos modelos generaron series de errores o residuos (N_t), para los cuales se calculó la varianza. Optimizando los valores de los componentes δ_r y ω_s , se obtuvieron valores que la minimizan y con los cuales se procedió a estimar nuevamente los valores de la función respuesta impulso, a los cuales se les denominó ν_k -óptimos. Luego, la evaluación de los modelo FT para pronóstico se basó en la estimación de la varianza de los errores, error promedio y error cuadrático medio (ECM), seleccionando aquellos que minimizan estos resultados. Las Tablas 4.a y 4.b entregan los valores obtenidos del análisis para cada unidad de suelo.

Tabla 4.a. Diagnósis de los modelos FT (r,s,b) para EVI. Unidad de suelo 1

MODELO FT(rs b)	FT(1,1,1)	FT(1,1,0)	FT(1,0,0)	FT(1,0,1)	FT(2,1,0)	FT(0,1,1)
Varianza Error	0,367	0,363	0,367	0,386	0,376	0,368
Error promedio	0,016	0,017	0,013	0,019	0,007	0,017
EMC	0,364	0,360	0,364	0,383	0,373	0,365

Tabla 4.b. Diagnósis de los modelos FT (r,s,b) para EVI. Unidad de suelo 8

MODELO FT(rs b)	FT(1,1,1)	FT(1,1,0)	FT(1,0,0)	FT(1,0,1)	FT(2,1,0)	FT(0,1,1)
Varianza Error	0,410	0,461	0,448	0,417	0,411	0,845
Error promedio	0,014	0,016	0,012	0,012	0,013	0,023
EMC	0,406	0,457	0,444	0,414	0,407	0,838

De las tablas anteriores, se observa que los modelos FT (1,1,0) para la unidad de suelo 1 y FT(1,1,1) para unidad de suelo 8, permitirían realizar un buen pronóstico de la variable respuesta en función del comportamiento temporal de $s(t)$. La formulación general de ambos modelos es como lo entrega (4) y (5)

$$\text{Modelo FT (1,1,0); } Y_t^* = \delta_1 Y_{t-1} + \omega_0 X_t + \omega_1 X_{t-1} + \eta_t \quad (4)$$

$$\text{Modelo FT(1,1,1); } Y_t^* = \delta_1 Y_{t-1} + \omega_0 X_{t-1} + \omega_1 X_{t-2} + \eta_t \quad (5)$$

Los valores de los componentes de los polinomios δ_r y ω_s que minimizan la varianza de N_t (con $N_t = Y_t - Y_t^*$) donde Y_t es el valor de la variable respuesta estandarizada periódicamente e Y_t^* los valores estandarizados que entrega la función de transferencia, son los que presenta la Tabla 5. Para obtener los valores reales, tanto de $s(t)$ como de EVI, se debe aplicar el proceso inverso (multiplicar por la desviación estándar y sumar el promedio, ambos correspondientes al mes en cuestión). El comportamiento de dichos valores se entrega en las Figuras 6.a y 6.b.

Tabla 5. Valores de los parámetros que minimizan la varianza de N_t

Parámetros	Unidad de suelo 1 FT (1,1,0)	Unidad de suelo 8 FT(1,1,1)
δ_1	0,080	0,722
ω_0	0,106	-0,318
ω_1	0,110	0,194

Figura 6.a. Comparación entre valores EVI observados con aquellos estimados usando el modelo FT (1,1,0). Unidad de suelo 1

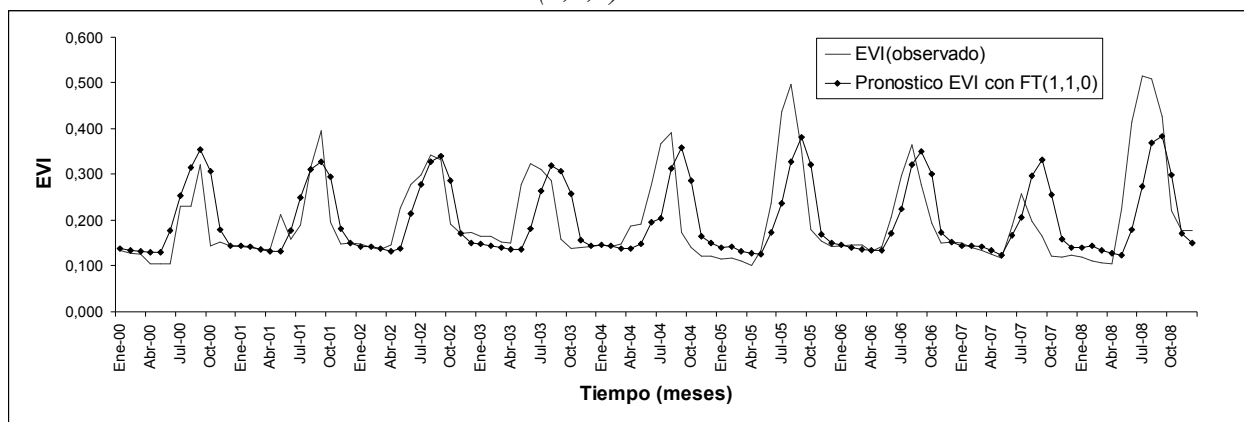
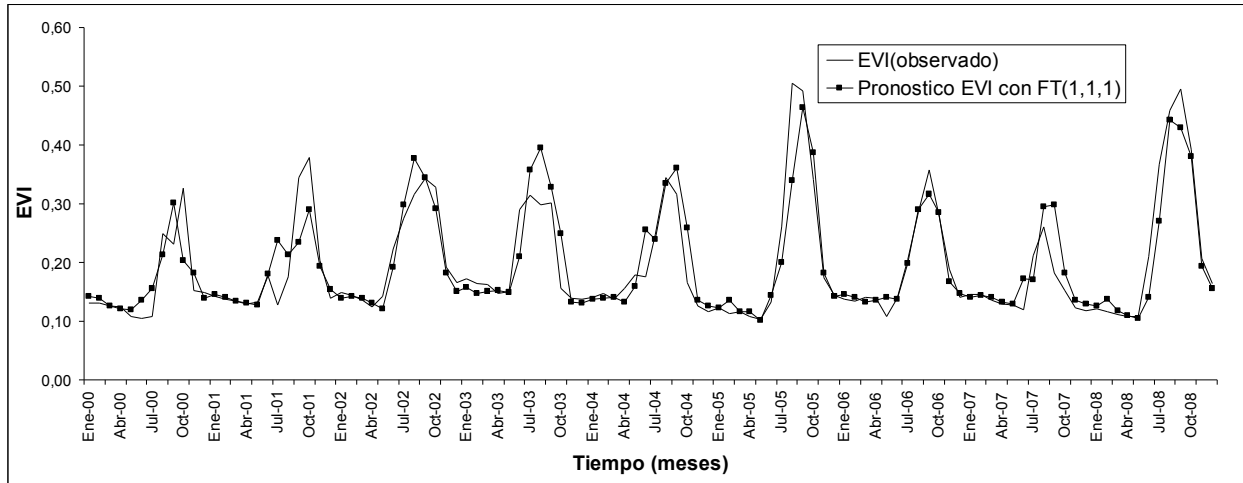
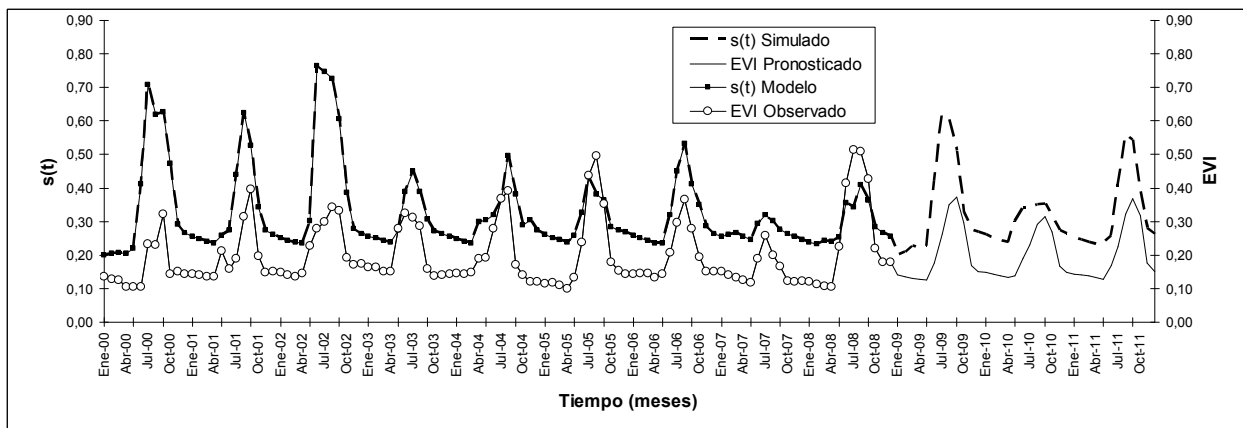


Figura 6.b. Comparación entre valores EVI observados con aquellos estimados usando el modelo FT (1,1,1). Unidad de suelo 8



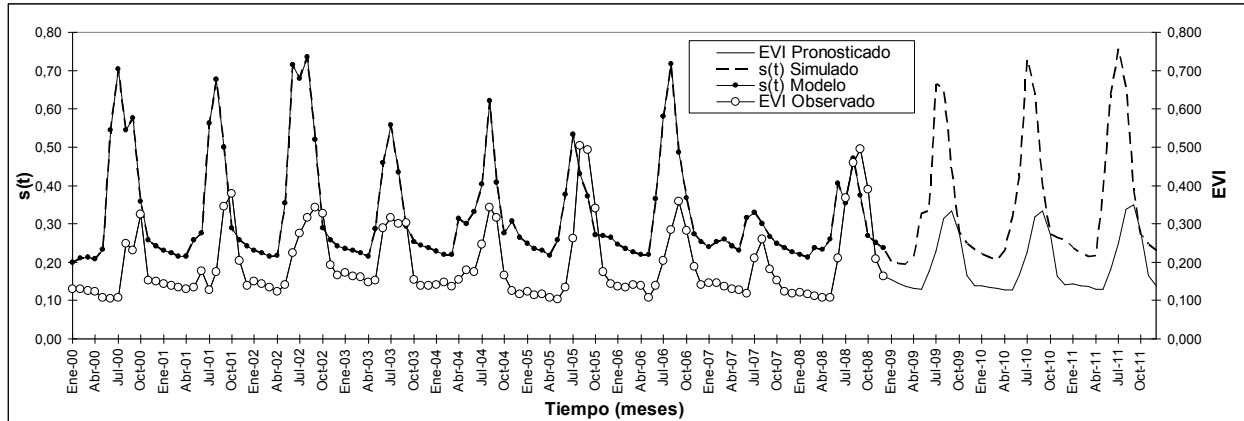
La determinación de los valores esperados de la respuesta vegetal (EVI) para cada unidad de suelo, se realizó considerando valores simulados de $s(t)$, usando para ello el modelo de balance hídrico presentado, para tres estaciones de lluvias (enero 2009 a diciembre 2011), el comportamiento de la respuesta vegetal se presenta en las Figuras 7.a y 7.b.

Figura 7.a. Valores esperados de la respuesta vegetal (EVI) para el período enero 2009 – diciembre 2011. Unidad de suelo 1



Considerando las ecuaciones (4) y (5) y los valores entregados en la Tabla 5, es posible estimar la ganancia (G) y el tiempo de respuesta medio o de retardo (T) de cada modelo FT según unidad de suelo bajo análisis. Para el primer caso, se tiene una ganancia que varía entorno a 0,234 y 0,272 unidades EVI y un retardo medio entre 0,65 y 4,9 meses para las unidades de suelo 1 y 8 respectivamente. Estos últimos valores permiten señalar que la respuesta máxima de la vegetación a cambios en la humedad del suelo determinada por un comportamiento estocástico de las precipitaciones, se podría manifestar al cabo de 3 semanas y en un máximo de aproximadamente 19 semanas.

Figura 7.b. Valores esperados de la respuesta vegetal (EVI) para el periodo enero 2009 – diciembre 2011. Unidad de suelo



4. DISCUSIÓN

La respuesta de la vegetación a la dinámica temporal de la humedad del suelo, estimada mediante un modelo de balance hídrico puntual, presenta una cierta dependencia no sólo con esta variable sino que con su comportamiento en el pasado. Lo anterior tiene sentido, pensando en que un aumento de la cobertura vegetal genera un efecto sombra que influye en una disminución de la temperatura a nivel de la superficie del suelo y por ende afectando la cantidad de agua que se pierde por transpiración y aquella que, por la resultante de la gravedad y la tensión, se redistribuye dentro del suelo. En este contexto, la dinámica vegetal es ciertamente afectada por las precipitaciones y por las propiedades del suelo y éstas, simultáneamente, ejercen un control sobre el balance hídrico a nivel de micrositio.

El comportamiento de $s(t)$, señalado en la Figura 2, indica que Z_r tiene un papel relevante en la cantidad de agua que queda disponible para uso por la vegetación, siendo mayor en la medida que el suelo efectivamente ocupado por las raíces aumente. Por su parte, la respuesta vegetal no presenta diferencias estadísticamente significativas en sus medianas para el período observado entre ambas unidades de suelo. La similitud anterior está determinada por la resolución de las imágenes disponibles (píxel de 6,25 ha). Ambas series mensuales analizadas son marcadamente periódicas y estacionales, quedando reflejado en los mejores modelos FT usados para pronosticar valores de EVI.

Tanto los modelos univariantes considerados para el preblanqueo de las series originales estandarizadas (del tipo AR(p)), como los modelos FT ajustados para estimar los valores esperados, indican que hay una relación directa pero con desfase en el tiempo. Para la unidad de suelo 1, el tiempo de respuesta o retardo medio ha sido estimado en 0,65 meses, equivalente a 3 semanas, lo que es razonable pensando que esta unidad posee tipos funcionales arbóreos y una alta participación de la pradera, de rápida respuesta a cambios en el contenido de humedad del suelo. Por su parte, la unidad 8 presenta un tiempo de retardo máximo cercano a los 5 meses, explicado porque corresponde a terrenos escarpados, donde el proceso de infiltración se dificulta y dominados por tipos funcionales del tipo arbóreo principalmente, dispuestos sobre una superficie altamente pedregosa.

La estimación de valores esperados para el período de 3 años siguientes (36 meses) en ambas unidades de suelo, permite observar que estos recogen la tendencia del período anterior y representan, al cabo de un par de temporadas, a los valores medios de largo plazo. Para la unidad de suelo 1, el modelo necesita como entrada el comportamiento de la variable explicativa al menos de 1 mes antes, mientras que el modelo para la unidad de suelo 8, necesita la información de dos meses anteriores de la variable explicativa y la del mes anterior para la variable respuesta.

En general, la combinación de técnicas de modelación con las de pronóstico sobre series temporales permite tener un acercamiento a la explicación y cuantificación de procesos ambientales dinámicos. En este caso se comprueba que la hidrología determina la dinámica vegetal de un ecosistema semiárido, con respuestas en desfase determinadas por las características físicas del sitio y la fenología de los tipos vegetales presentes, cuya evolución a su vez, determina el comportamiento general del ecosistema en el largo plazo.

Se debe seguir investigando el comportamiento de ecosistemas complejos sometidos a déficit hídricos. En este sentido, contar con información de terreno continua en el tiempo para variables como humedad del suelo y temperatura, permitirá ajustar tanto la aproximación metodológica como la herramienta matemática aquí presentada, a otros sitios y ambientes. Lo anterior llevará a ampliar el conocimiento que se tiene en cuanto a la respuesta de la vegetación a fluctuaciones hidrológicas y climáticas y preparar con anticipación, medidas para hacer frente a períodos prolongados de sequía.

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Marcelo Miranda-Salas de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la UC, por el apoyo en la obtención y tratamiento de imágenes MODIS/TERRA utilizadas en esta investigación. A la empresa Aguas Andinas S.A. por facilitar información de terreno y resultados de laboratorio sobre caracterización de suelos para el área de estudio.

REFERENCIAS

- Baudena, M., Boni, G., Ferraris, L., von Hardenberg, J y Provenzale, A. (2007) Vegetation response to rainfall intermittency in drylands: Results from a simple ecohydrological box model. *Advances in Water Resources* 30 (2007) 1320–1328
- Castellaro, G. y Squella, F. (2006) Modelo Simple de Simulación para la Estimación del Crecimiento, Fenología y Balance Hídrico de Praderas Anuales de Clima Mediterráneo. *Agricultura Técnica* (Chile) 66(3):271-282 (Julio-Septiembre).
- Caylor, K. K., Manfreda, S., and Rodríguez-Iturbe, I. (2005) On the coupled geomorphological and ecohydrological organization of river basins. *Adv. Water Resour.*, 28, 69–89, 2005.
- D'Odorico, P. y Porporato, A. (2006) Ecohydrology of Arid and Semiarid Ecosystem. An Introduction. En: *Dryland Hydrology*. P. D'Odorico y A. Porporato (eds). Springer. ISBN-10 1-4020-4260-4 (e-book)
- Eagleson, P. S. (1978a) Climate, soil, and vegetation: 1. Introduction to water balance dynamics. *Water Resources Research*, 14 (5): 705–712.
- Eagleson, P. S. (2002) *Ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 443 pp., 2002.
- Food and Agricultural Organization (FAO) (1979) Yield response to water. Irrigation and Drainage paper N° 33. Part A. Roma, Italia.

- Guswa, A.J., Celia, M. A. y Rodríguez-Iturbe, I. (2002) Model of soil moisture dynamics in ecohydrology: a comparative study. *Water Resources Research*, 38(9), 1166-1181.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) (2004) Manejo y prácticas conservacionistas del suelo para un desarrollo sustentable del secano. Riquelme, Pérez y Yoshikawa Eds. Boletín INIA N° 124. 200 pags.
- Kochendorfer, J. y Ramírez, J. (2008a) Modeling the monthly mean soil-water balance with statistical-dynamical ecohydrology model as coupled to a two-component canopy model. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 5, 579–648, 2008.
- Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L. y Rodríguez-Iturbe, I. (2001) Plants in Water-controlled Ecosystems: Active Role in Hydrological Processes and Response to Water Stress: II Probabilistic Soil Moisture Dynamics. *Adv. Water Res.* 24, (7), 707– 723
- Montaldo, N., Albertson, J. y Mancini, M. Vegetation dynamics and soil water balance in a water-limited mediterranean ecosystem on Sardinia, Italy. *Hydrol. Earth Syst. Sci* (en proceso de publicación)
- Mestre, F. y Cortina, J. (2002) Spatial patterns of surface soil properties and vegetation in a mediterranean semiarid steppe. *Plant and Soil* 241: 279–291.
- Nagler, P., Scott, R., Westenburg, C., Clevery, J., Glenn, E. y Huete, A. (2005) Evapotranspiration on western U.S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. *Remote Sensing of Environment* 97: 337 – 351.
- Nordbotten, J. (2008) Stability analysis of probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in Water Resources* 31 (2008) 418 – 423.
- Pumo, D., Viola, F. y Noto, V. (2008) Ecohydrology in Mediterranean areas: a numerical model to describe growing seasons out of phase with precipitations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12: 303-316.
- Ridolfi, L., D’Odorico, P., Porporato, P. y Rodríguez-Iturbe, I. (2003) Stochastic soil moisture dynamics along a hillslope. *Journal of Hydrology*, 272, 264-275.
- Rodríguez-Iturbe, I., Porporato, A., Ridolfi, L., Isham, V. y Cox, D. (1999) Probabilistic Modelling of Water Balance at a Point: The role of Climate, Soil and Vegetation. *Proc. R. Soc. London*, 455: 3789-3805.
- Rodríguez-Iturbe, I. y Porporato, A. (2004). *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Rodríguez-Iturbe, I., D’Odorico, P., Laio, F., Ridolfi, L y Tamea, S. (2007) Interactions of water table and unsaturated zone with climate, soil, and vegetation. *Water Resources Research*, 43. W09301 doi:10.1029/2007WR006073.
- Saxton, K.E. y Willey, P. H. (1999) Agricultural wetland and pond hydrologic calculations using the SPAW-II Model. Conf. Proc. ASAE. Toronto, ON, 18–21 July 1999. ASAE, St. Joseph, MI.
- Saxton, K. E. y Rawls, J. (2006) Soil water characteristics estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1569 – 1578.
- Saxton, K.E. y Willey, P. H. (2006) The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. p. 401–435. En: V.P. Singh y D.K. Frevert (ed.) *Watershed models*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Scanlon, T., Albertson, J., Caylor, K. y Williams, C. (2002) Determining Land Surface Fractional Cover from EVI and Rainfall Time Series for a Savanna Ecosystem. *Remote Sensing of Environment* 82 (2002) 376–388-
- Scanlon, T., Caylor, K. y Manfreda, S. (2005) Dynamic response of grass cover rainfall variability: Implications for the function and persistence of savanna ecosystems. *Advances in Water Resources* 28 (2005) 291–302
- Selker, J., Rupp, D., Lenanm, M. y Uribe, H. (2000) Estudio hidrológico en el secano interior. Resultados preliminares del proyecto piloto en Portezuelo. Informe técnico, INIA. Chillán, Chile. 41 pags.
- Wilcox, B., Breshears, D. y Allen, C. (2003) Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: Effects of scale and disturbance. *Ecological Monographs*, 73(2): 223–239.
- Zu, Ch., Breshears, D., Newman, B., Wilcox, B., Gard, M. y Rich, P. (2008) Soil water dynamics under low versus high ponderosa pine tree density: ecohydrological functioning and restoration implications. *Ecohydrology* 1: 309–315.