

VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE ESTIMACIÓN DE HUMEDAD SUPERFICIAL CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MONOCANAL Y MULTIESPECTRAL A ESCALA DE CUENCA

Eugenia Chiarito, Erik D. Zimmermann

CURIHAM, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario - CONICET
Ciudad Universitaria, Riobamba 245bis. (2000) Rosario. Santa Fe.
Email: eugechiarito@gmail.com, erikz@fceia.unr.edu.ar
Tel/FAX: (+54 341 4808541).

RESUMEN

Se presenta la validación a escala de cuenca de dos procedimientos que permiten estimar el contenido de humedad superficial del suelo basados en técnicas de teledetección: una monocanal que utiliza una banda en infrarrojo de onda corta, y una multiespectral que combina información de banda térmica con un índice de vegetación conocida como "Método del Triángulo". La primera aprovecha la capacidad de absorción de energía del suelo en presencia de agua para la banda de infrarrojo de onda corta (SWIR), mientras que el segundo procedimiento consiste en ubicar la posición relativa de un píxel de una imagen satelital en una gráfica de temperatura de brillo de la superficie vs. Índice de vegetación, y estimar el contenido de humedad a partir de su posición relativa en la nube de puntos.

En trabajos previos, la metodología fue contrastada con humedades puntuales de superficie (método gravimétrico) de una parcela experimental, obteniendo resultados aceptables.

La aplicación que se pretende dar en el futuro se relaciona con escalas de cuenca. Consecuentemente, el método fue validado comparando láminas de escurrimiento estimadas y observadas en la cuenca del A° Ludueña (Santa Fe, Argentina). Las estimadas se obtuvieron indirectamente aplicando la ecuación de Green y Ampt a precipitaciones históricas, contando con mapas de suelo y la imagen LANDSAT 5 TM correspondiente, para obtener condiciones antecedentes. Las observadas se obtuvieron mediante aforos en la sección de control, siendo los resultados aceptables. Comparando la metodología propuesta con metodologías alternativas, tales como el índice de precipitación antecedente, se deduce que el patrón de distribución espacial de humedad superficial es mucho más detallado, además de mejorar las estimaciones de las láminas de escurrimiento.

Palabras Clave: Humedad superficial del suelo, teledetección, escala de cuenca.

INTRODUCCION

La transición de un estado experimental a uno operativo de las técnicas de teledetección aplicadas a monitoreo de procesos ambientales ha convertido a las imágenes satelitales en una fuente de información significativa, principalmente debido a: su versatilidad para identificar una amplia gama de aspectos de interés, la distribución areal de su información, su sencillez y frecuencia de recopilación de datos sobre un terreno particular. Tal es el caso de las estimaciones de contenido de humedad superficial a escala de cuencas en zonas de escasa pendiente, como la llanura pampeana, en particular para estudios sostenidos en el tiempo, donde la capacidad de recolección de datos por campaña es onerosa y siempre escasa.

Partiremos de la hipótesis que la utilización de la teledetección para la medición indirecta de la humedad del suelo permitiría el monitoreo permanente y rápido de este parámetro a escala regional de útil aplicación en modelos hidrológicos de llanura.

El presente trabajo comprende una instancia de validación indirecta de los métodos de estimación de humedad basados técnicas de teledetección con sensores ópticos, a la par que realiza una comparación entre varias de estas técnicas. Para ello la validación se hará en forma indirecta, comparando láminas de escurrimiento estimadas y observadas en la cuenca piloto adoptada (cuenca del A° Ludueña). Asimismo la comparación se realizará entre: un método multispectral denominado “método del triángulo” (bandas roja, infrarrojo cercano y térmico), y una segunda metodología monocanal que involucra una banda dentro del rango de infrarrojo de onda corta. Se ofrece una breve descripción de estos métodos en apartados más adelante. Finalmente se compararán los datos estimados con los resultados de lecturas in-situ extrapoladas arealmente (que se utilizan en la actualidad en el modelo de la cuenca implementado). Se pretende verificar que, efectivamente, la matriz de datos estimados con métodos de teledetección resulta más idónea que los valores puntuales que ofrece la medición in-situ, para estudios de escala regional.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del Arroyo Ludueña es una cuenca de llanura con pendiente 1,4 por mil, de 740Km² de extensión aproximada, y su cabecera se encuentra en la cota 70 IGN. Ubicada al Sur de la provincia de Santa Fe entre los paralelos 32°45'S y 33°08'S y los meridianos 61°04'O y 60°39'O, su red hídrica principal está compuesta por el Arroyo Ludueña, y los canales Ibarlucea y Salvat, aunque cuenta con aportes de pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales, en época de lluvias.

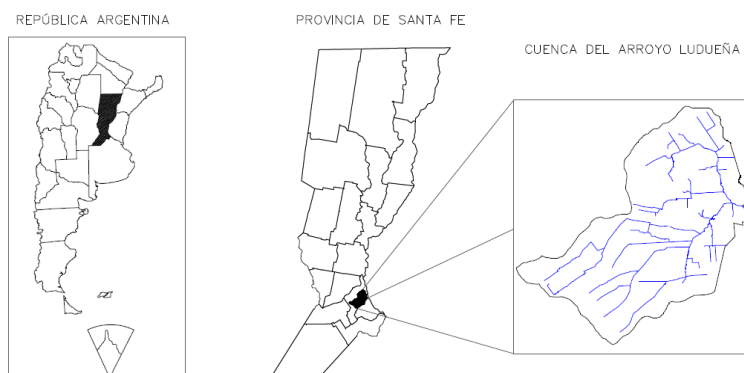


Figura 1. Ubicación geográfica Cuenca Arroyo Ludueña

La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. La red de cursos y canales primaria tiene una extensión de aproximadamente 140 Km, en tanto que con el agregado de cunetas y canales secundarios esta longitud de vías de drenaje alcanza los 360 Km. La densidad de drenaje considerando solamente los cursos naturales es de 0,19 Km/Km², en tanto que al cabo de la alteración antrópica alcanzada a la fecha, la densidad de drenaje asciende a 0,49 Km/Km², lo que conforma un importante indicador del grado de transformación que ha sufrido la cuenca.

Modelación

En trabajos preliminares, se desarrolló el modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-2D denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009). Este sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas y permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. Para la determinación necesaria de lluvia neta en cada celda es posible el uso de las metodologías de Green y Ampt, o del Servicio de Conservación del Suelo de Estados Unidos. El escurrimiento resultante puede ser propagado en un dominio espacial 2D mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación.

Estimaciones de humedad antecedente según VMMHH 1.0

Se realizó una asignación de estado de humedad antecedente a partir de un índice de precipitación antecedente (IPA) confeccionado específicamente para la cuenca en estudio (Zimmermann, 2009), de discretización espacial coincidente con el campo de precipitaciones. Dicho índice fue actualizado diariamente, respondiendo a la expresión:

$$\mathbf{IPA(n) = P(n) + IPA(n-1) \cdot k(n)} \quad (1)$$

donde IPA(n) es el índice de precipitación antecedente correspondiente al día n del año, P(n) es la precipitación del día n, k(n) el coeficiente de decaimiento correspondiente al día n, dado por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{k(n) = k_{ver} + (k_{inv} - k_{ver})\text{sen}^2\left(\frac{\pi}{365}n\right)} \quad (2)$$

donde k_{ver} y k_{inv} son los coeficientes de decaimiento extremos correspondientes a las estaciones de verano e invierno, respectivamente que se estiman en función de las tasas de evapotranspiración estacionales.

Se propuso la siguiente relación (Zimmermann, 2009) entre el IPA y el grado de saturación del perfil, necesarios para la aplicación del método Green y Ampt.

$$S_{en} = \frac{IPA_n - R_{PMP}}{R_{SAT} - R_{PMP}} \quad (3)$$

Donde S_e es el grado de saturación efectiva, R_{PMP} y R_{SAT} son las láminas equivalentes al punto de marchitez permanente y saturación, respectivamente.

Luego, la lluvia neta fue determinada a partir del algoritmo de Green y Ampt tal como se mencionó anteriormente, teniendo en cuenta una pérdida inicial por intercepción en follaje y almacenamiento en microdepressionas superficiales. Los otros parámetros necesarios (conductividad hidráulica vertical del suelo y potencial de succión del frente húmedo) fueron estimados a partir de los parámetros hidráulicos del suelo introducidos en el modelo VMMHH. Finalmente, la condición inicial de humedad, que también es un dato a suministrar en el método se obtuvo a partir de la estimación de la saturación efectiva S_e .

El método del Triángulo

Es un método que combina la información de temperatura de brillo e índice de vegetación de una región, componiendo una nube de puntos en un sistema de coordenadas ortogonales, tal que (si se representara un número de píxeles lo suficientemente grande) se obtendría en todos los casos una envolvente con forma de triángulo o pirámide trunca. Es factible asumir que estos límites, que se repiten en todas las experiencias, representan límites físicos: contenido de humedad cero, cero cobertura vegetal, y cobertura vegetal completa. Resulta entonces que es la propia distribución de los puntos aquella que fija las condiciones de borde para el modelo, sin demandar información auxiliar atmosférica y de la superficie alguna (Carlson, 2007).

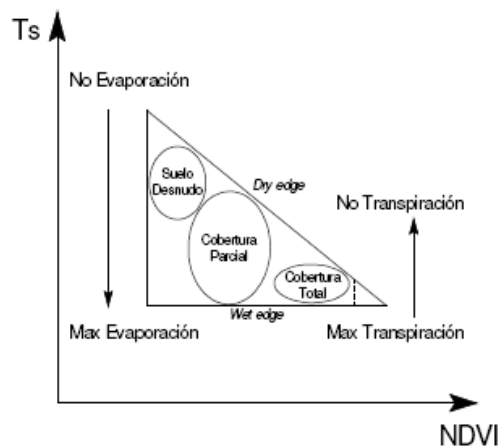


Figura 2. Esquema NDVI/Ts. Fuente: Yang et al., 2008.

La interpretación física a la forma que adopta la nube de datos, donde se observa que para un mismo valor de índice de cobertura vegetal la temperatura medida puede variar sensiblemente, se basa en el hecho que cuando la cobertura dispone de agua para captar, la transpiración actúa enfriando las hojas con gran eficacia, pero a medida que se acerca a la situación de estrés hídrico, la planta tiende a cerrar sus estomas (con la resultante disminución de transpiración, que conduce a un aumento de temperatura de la hoja).

De esta manera, se considera que el “borde seco” o “borde cálido” del triángulo representa el límite superior de evaporación para las distintas condiciones de cobertura dentro de una escena, en oposición al “borde húmedo” o “borde frío”. El borde cálido se asume así como la

representación de la isolínea de cero contenido de humedad extraíble, y el borde frío la respectiva isolínea de humedad correspondiente a capacidad de campo.

Para este trabajo en particular, para confeccionar la nube de puntos se realizaron 4 alternativas: por un lado se utilizaron 2 índices de vegetación (NDVI y EVI), y por otro lado se trabajó con el triángulo de una única escena (previa a la tormenta en estudio) y de la combinación de varias escenas, correspondientes a distintos años, pero de la misma estación, buscando disminuir la incidencia de los períodos húmedo o seco (que no pueden apreciarse en una escena de un único día). Por otro lado se trabajó con los parámetros adimensionalizados respecto de los máximos y mínimos de cada escena para independizar los resultados de las eventualidades del momento y que sus configuraciones puedan ser comparables en el tiempo.

Los triángulos resultantes fueron entonces, para cada tormenta:

Tabla 1. Variantes método del triángulo

ESTACIONAL (3 ESCENAS)	FECHA ÚNICA (UNA ESCENA)
NDVI – TEMPERATURA BRILLO	NDVI – TEMPERATURA BRILLO
EVI- TEMPERATURA DE BRILLO	EVI- TEMPERATURA DE BRILLO

La gran ventaja del método reside en su sencillez, y en no requerir información auxiliar para estimar la humedad, ya que es la propia ubicación del píxel respecto de los bordes la que lo determina. Sin embargo cabe resaltar la alta sensibilidad que tienen los resultados a la ubicación de estos bordes. En este caso, se aplicó un procedimiento normalizado, que en primera instancia descarta un 0,3% de los valores extremos por considerarse que introducen “ruido” en las lecturas, y la división del conjunto en 25 fajas de igual amplitud del índice de vegetación, para determinar los puntos a los que se ajustan las rectas del borde frío y borde cálido por mínimos cuadrados.

Técnica monocanal banda SWIR

Esta técnica pretende recabar información a partir de la alta absorptividad del agua de ondas de longitud mayor a 1000nm, lo cual hace que las bandas en el rango SWIR presenten sensibilidad al contenido de humedad de la superficie en estudio.

Como consecuencia de tal propiedad, los suelos secos y la vegetación con déficit de agua poseen una alta reflectividad (píxeles de mayor brillo), en contraste con la baja reflectancia de los suelos húmedos. Debe tenerse presente que esta banda es sensible a otras variables en juego, aunque con una magnitud menos significativa que su interacción con el agua. Estas variables son la estructura interna de las hojas, el contenido de materia seca, o el tipo de suelo.

Despreciando la incidencia de estos últimos factores, se propone una ecuación empírica calibrada con 5 escenas, y complementadas con observaciones en campo (Zimmermann, 2012, comunicación personal),

$$M0 = 0,1798 \cdot SWIR^{-0,717028} \quad (4)$$

Donde SWIR es el valor de reflectancia en dicha banda, y M0 el contenido de humedad relativo a capacidad de campo.

Con formato: Sangría: Izquierda: 0 cm, Primera línea: 0 cm

Propuesta de validación

A los efectos de proponer una alternativa a las estimaciones basadas en IPA para introducir el estado de humedad superficial de la cuenca como variable de entrada al modelo VMMHH 1.0, se aplicaron las técnicas arriba descritas: una monocanal en banda SWIR, y una multispectral denominada método del triángulo con 2 variantes: una estacional y una de escena única, para tres tormentas aforadas en una sección de control a la altura de la Circunvalación de la ciudad de Rosario, sobre el cauce del arroyo Ludueña.

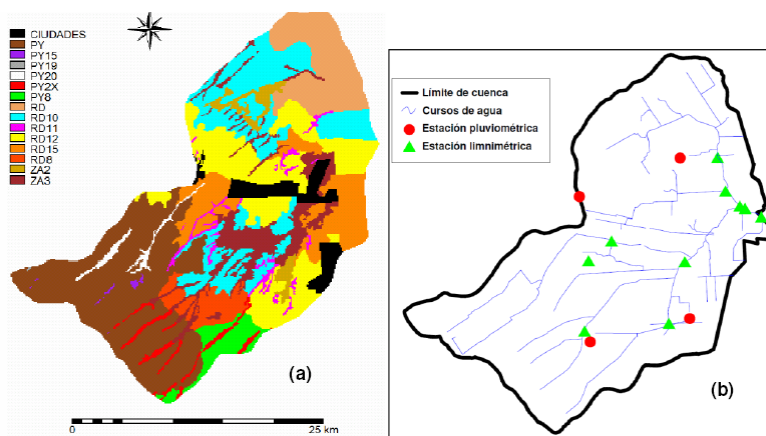


Figura 3. (a) asociaciones de suelos y (b) ubicación de los sensores en la cuenca

Se analizaron las tormentas monitoreadas durante el período de operación de la red de sensores y la superposición cronológica con imágenes disponibles de LANDSAT llegando a obtener tres imágenes sincronizadas. Sin embargo, dado que el período de frecuencia de revisita del satélite es de 16 días, se generó un cierto desfase, variable para cada caso particular, entre la fecha de la tormenta y la fecha de la escena utilizada:

Tabla 2. Fecha de las tormentas estudiadas, de las imágenes satelitales utilizadas, y desfase temporal asociado

FECHA TORMENTA	FECHA IMAGEN LANDSAT 5	DEFASAJE TEMPORAL
29/11/2008	14/11/2008	15 días
20/02/2009	18/02/2009	2 días
03/02/2010	20/01/2010	14 días

Para tener en cuenta los intercambios de agua que pudieran ocurrir en el período entre la captura de la imagen y la tormenta (humedecimiento por precipitaciones y/o evapotranspiración por demanda atmosférica de vapor de agua), se aplicó un coeficiente de corrección agregado en toda la cuenca, definido como la relación entre saturaciones efectivas Se calculadas a la fecha de revisita del satélite y al día previo a la tormenta (Suárez y Zimmermann, 2014):

$$Cac = \frac{Se_{n-1}}{Se_d} = \frac{IPA_{n-1} - R_{PMP}}{IPA_d - R_{PMP}} \quad (5)$$

Donde Cac es un coeficiente de actualización climática, Se_{n-1} y Se_d , son las saturaciones efectivas correspondientes al día antecedente a la tormenta (n-1) y de revisita (d), respectivamente, IPA_{n-1} e IPA_d son los índices de precipitación antecedente correspondiente al día antecedente a la tormenta (n-1) y de revisita (d), respectivamente.

El procedimiento de validación consistió en los siguientes pasos:

(a) estimación de un mapa de humedades de la cuenca con una resolución espacial acorde a la imagen satelital (120 m, correspondiente a la banda infrarroja térmica del LANDSAT5) aplicando el método del triángulo con los distintos índices de vegetación normalizados y las variantes estacional o diaria; y por otro lado la ecuación monocanal aplicada a banda 7 (correspondiente a SWIR, agregada a 120m).

(b) Adecuación del mapa de humedades a la discretización del modelo (250 m). Se desarrolló un programa de agregación escrito en FORTRAN que lee las coordenadas de centros de celdas, la asociación de series de suelos a la que pertenece cada celda y el mapa de humedades con resolución de 120 m. Seguidamente, consulta la base de datos de parámetros hidráulicos del suelo y asigna los parámetros de interés (humedades límites y densidad aparente) acorde a las asociaciones de cada celda, transforma fracciones de capacidad de campo a contenido de humedad y saturación efectiva y los agrega a tamaño de grilla 250 m- (criterio utilizado “vecino más cercano”).

(c) Con las precipitaciones registradas en el período de operación de los sensores (2008-2010), se construyeron valores de IPA para las 4 estaciones pluviométricas y se obtuvieron valores medios areales de Se aplicando la metodología de Thiessen. Con esta información se obtuvieron los “Cac” para cada tormenta considerada, se actualizaron los índices de saturación efectiva Se .

(d) Aplicación de la subrutina del modelo VMMHH 1.0 que construye los hietogramas netos de cada celda aplicando la metodología de Green y Ampt, partiendo del campo de precipitaciones correspondientes a cada tormenta, que fue desagregado a un tamaño de grilla de 250 m.

RESULTADOS

A los efectos de lograr una comparación se presenta a continuación una tabla resumen de valores agregados a nivel de cuenca, con cierre en la sección de Circunvalación. Se consignan las láminas de lluvia, lluvia efectiva (descontando intercepción) y lluvia neta observadas para las tormentas analizadas. Cabe aclarar que debido a incertidumbres en los hidrogramas derivados de los limnigramas registrados se optó por estimar un rango de lluvia neta para los eventos.

Tabla 3. Comparación lámina neta estimada para cada tormenta según los distintos métodos aplicados

Fecha tormenta	Lámina lluvia (mm)	Fecha Imagen	Rango lámina neta observada (mm)	LÁMINA NETA ESTIMADA (mm)					
				IPA	MÉTODO TRIÁNGULO				BANDA SWIR
					DIARIO		ESTACIONAL		
				NDVI-T	EVI-T	NDVI-T	EVI-T		
29/11/2008	50,2	14/11/2008	13-17	12,5	14,6	14,1	10,4	10,0	26,8
20/02/2009	72,4	18/02/2009	12-16	24,0	12,2	12,1	13,1	13,6	17,7
03/02/2010	96,8	20/01/2010	28-33	35,0	24,9	24,9	26,8	26,4	29,8

0.0000	1.0000	0.6874	0.2064	0.0000	1.0000	0.6970	0.2035
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

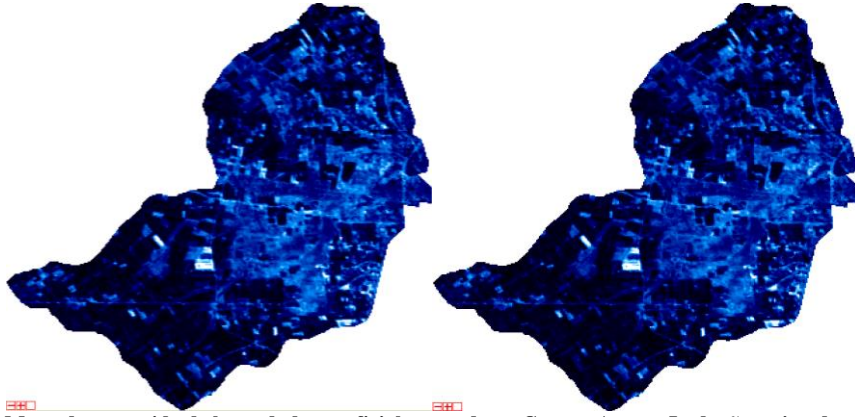


Figura 4. Mapa de contenido de humedad superficial antecedente Cuenca Arroyo Ludueña estimado con Método del Triángulo de escena única, fecha 19/01/2010, con Índices de vegetación NDVI y EVI respectivamente.

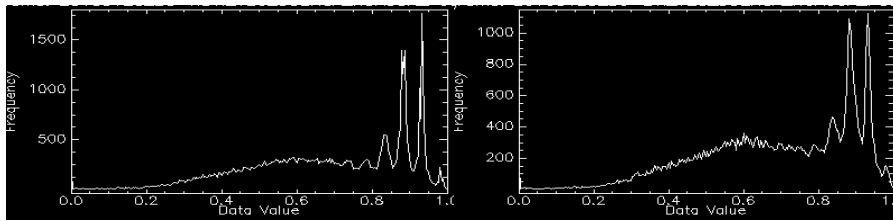


Figura 5. Curvas de distribución de frecuencias del contenido de humedad estimado, relativo a la Capacidad de Campo, fecha 19/01/2010, con Índices de vegetación NDVI y EVI respectivamente.

MÉTODO DEL TRIÁNGULO ESTACIONAL

Tabla 6. Valores máximo, mínimo media y desvío estándar del contenido de humedad estimado relativo a la Capacidad de Campo.

B6-NDVI_EST				B6-EVI_EST			
MIN	MAX	Media	Desv.Est	MIN	MAX	Media	Desv.Est
0.0000	1.0000	0.7891	0.1555	0.0000	1.0000	0.7729	0.1557

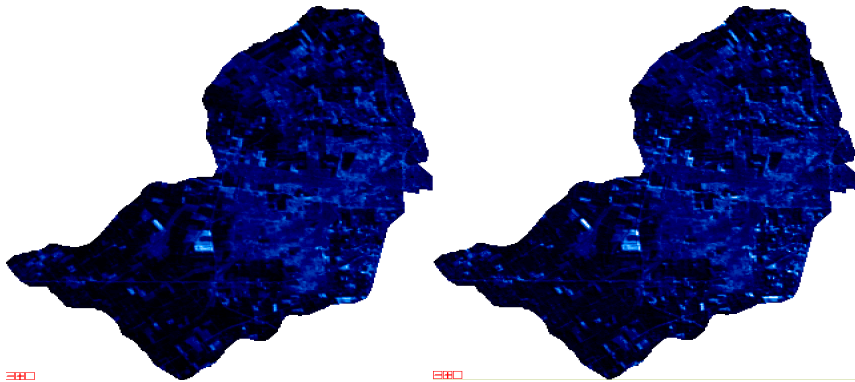


Figura 6. Mapa de contenido de humedad superficial antecedente Cuenca Arroyo Ludueña estimado con Método del Triángulo variante estacional, fecha 19/01/2010, con Índices de vegetación NDVI y EVI respectivamente.

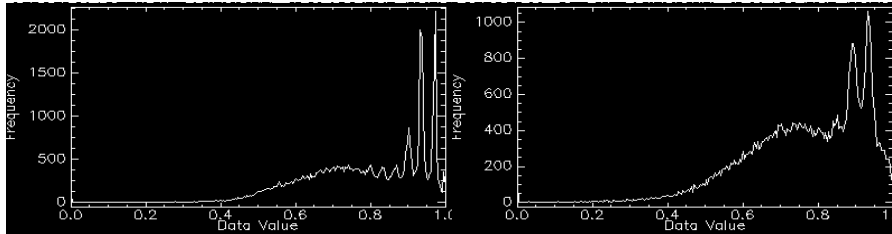


Figura 7. Curvas de distribución de frecuencias del contenido de humedad estimado, relativo a la Capacidad de Campo, fecha 19/01/2010, con Índices de vegetación NDVI y EVI respectivamente.

TÉCNICA MONOCANAL BANDA SWIR

Tabla 7. Valores máximo, mínimo media y desvío estándar del contenido de humedad estimado relativo a la Capacidad de Campo.

HUMB7-EDZ			
MIN	MAX	Media	Desv.Est
0.0000	4.3241	0.9138	0.1983

Con formato: Sangría: Primera línea: 0 cm

Con formato: Izquierda, Sangría: Primera línea: 0 cm

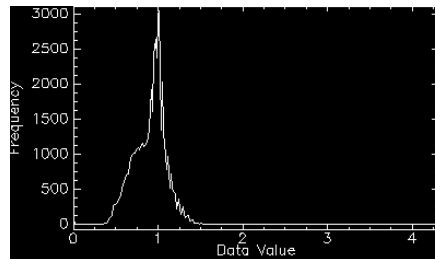


Figura 8. Mapa de contenido de humedad superficial antecedente Cuenca Arroyo Ludueña estimado con técnica monocanal banda SWIR y curva de distribución de frecuencias relativo a la Capacidad de Campo, fecha 19/01/2010

CONCLUSIONES

En este trabajo nos hemos abocado a la validación de la estimación de contenido de humedad superficial a escala de cuenca, por medio de una técnica multispectral llamada “Método del Triángulo” y una monocanal basada en la reflectividad del terreno en rango SWIR. El primero fue validado con observaciones realizadas en campo (relevamiento puntual de contenido de humedad por método gravimétrico), expuestas en trabajos previos al presente donde las imágenes no fueron corregidas atmosféricamente. Las mismas observaciones fueron utilizadas para la correlación empírica que da forma a la ecuación del segundo método.

Al Método del Triángulo se le introdujeron algunas variables para analizar su sensibilidad frente a las mismas, y encontrar la alternativa que ofreciera los mejores resultados. Por un lado se trabajó con dos índices normalizados de vegetación: NDVI y EVI. Múltiples autores afirman que la expresión de EVI presenta mayor sensibilidad en regiones con alta presencia de biomasa, donde un índice simplificado como NDVI tiene tendencia a saturarse cuando el área foliar es importante. No obstante ello, para los casos de estimación de humedad estudiados, el método no presentó grandes variaciones al alternar los métodos, por lo cual nos inclinamos por optar por la implementación del NDVI, evitando la utilización de una ecuación más compleja y que comprometa la utilización de una banda más, con escasa incidencia en el resultado final. La otra variación analizada fue la confección del triángulo utilizando una única escena (aquella previa a la tormenta), o bien la integración de la nube de puntos de varias escenas en la misma estación, pero distintos años, buscando que en el sistema queden representadas las situaciones extremas estacionales y que sean éstas la que determinen los bordes seco y húmedo del triángulo, abarcando la totalidad de los posibles estados del terreno. Esto demostró tener efectividad, ya que son los resultados que mejores valores arrojaron en las estimaciones.

Por otro lado, dado el desfase entre la imagen satelital obtenida y la fecha de ocurrencia de la tormenta aforada, fue necesario incorporar un coeficiente de ajuste climático que reflejara los intercambios de vapor de agua entre la masa de suelo y la atmósfera, y las posibles precipitaciones locales que se presentaran en dicho período. La metodología híbrida desarrollada IPA-SAT para estimar la humedad superficial antecedente ha demostrado ofrecer buenos resultados.

Finalmente se resalta la robustez del método de triángulo para la estimación de humedad superficial a escala de cuenca. Respecto de las alternativas estacional y de escena única, si bien el error cuadrático medio de ésta fue ligeramente menor al de aquella, se advierte la posibilidad de que esta tendencia se invierta frente a un estudio de casos mayor que el que ocupa el presente trabajo. Cabe destacar no sólo la mejora introducida en los resultados finales, sino también la propiedad intrínseca de esta herramienta, que de por sí ofrece un desarrollo areal de la distribución de la variable, de la cual las estimaciones utilizando IPA carecían.

Resta explorar en investigaciones futuras la posibilidad de trabajar con plataformas con mayor resolución temporal (menor frecuencia de revisita) para compensar el limitante que genera la cobertura nubosa en la disponibilidad de imágenes (motivo por el cual no fue posible analizar otras tormentas aforadas), a costa de sacrificar la resolución espacialtemporal, obligando a trabajar con píxeles de mayor tamaño.

BIBLIOGRAFÍA

- Carlson T. N., Dodd J. K., Benjamin S. G., y Cooper J. N., 1981.** Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia, Journal of Applied Meteorology, Volume 12, Issue: 1, publisher: NOAA Central Library, Department of Commerce.
- Carlson T. N. 2007;** An overview of the "Triangle Method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery; Sensors, 7, 1612-1629.
- Chiarito E y E. Zimmermann. 2013.** Hidrología ambiental para sistemas de llanura: estimación de la humedad superficial del suelo mediante teledetección. Primer Congreso Iberoamericano De Protección, Gestión, Eficiencia, Reciclado Y Reúso Del Agua. Córdoba. Argentina.
- Riccardi Gerardo A., Erik D. Zimmermann, Pedro A. Basile, Hernán R. Stenta, Carlos M. Scuderi, Marina L. García, Juan P. Rentería. 2009.** "El Modelado Del Escurrimiento Superficial En Cuencas Del Sur De La Provincia De Santa Fe, Argentina". Capítulo 1. En: Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura (Riccardi Gerardo A., Pedro A. Basile, Erik D. Zimmermann, Hernán R. Stenta, Carlos M. Scuderi, Juan P. Rentería, Marina L. Garcia). UNR editora. Rosario. Argentina. ISBN 978-950-673-691-0. pp 3-20.
- Riccardi Gerardo, Erik Zimmermann, Pedro Basile, Stenta Hernán, Carlos Scuderi, Juan Rentería. 2010.** "Experiencias de Simulación Físicamente Basada de Escurrimiento Superficial en Cuencas de Llanura en Ambientes Rurales y Urbanos". I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina. Trabajo completo. Vol. II. Pp 163-170.

- Stenta Hernán, Erik Zimmermann, Gerardo Riccardi, Pedro Basile, Juan Rentería, Carlos Scuderi. 2010.** “Comparación de la respuesta hidrológica en una cuenca de Llanura mediante el uso del modelo HECHMS y el Modelo de Aproximación Difusiva VMMHH 1.0”. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina. Vol. II. Pp 555-562.
- Yang X., Wu J. J., Shi P. J., Yan F. 2008.** Modified Triangle Method to estimate soil moisture status with moderate resolution Imaging spectroradiometer (MODIS) products; The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, Volume XXXII Part B8 commission VII; ISPRS Congress Beijing.
- Zimmermann, E; Basile, P. 2007.** Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones no lineales con propiedades físicas y granulométricas. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán. Argentina.
- Zimmermann Erik y Pedro Basile. 2008.** “Uso De Funciones De Pedotransferencia Para La Estimación De Parámetros Hidráulicos En Suelos Limosos (Llanura Argentina)”. Boletín Geológico y Minero de España (Journal of Earth Sciences). Vol. 119 (1). p71-80.
- Zimmermann Erik D., Carlos M. Scuderi, Gerardo A. Riccardi, Hernán R. Stenta, Pedro A. Basile, Marina L. García, Juan P. Rentería. 2008.** “Asignación De Parámetros Hidráulicos De Suelos Utilizando Funciones De Pedotransferencia Con Información De Las Cartas De Suelo Del INTA”. Capítulo 2. En: Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura (Riccardi Gerardo A., Pedro A. Basile, Erik D. Zimmermann, Hernán R. Stenta, Carlos M. Scuderi, Juan P. Rentería, Marina L. Garcia). UNR editora. Rosario. Argentina. ISBN 978-950-673-691-0. p145-156.
- Zimmermann Erik D., Pedro A. Basile, Carolina López, Gerardo Riccardi, Hernán Stenta, Carlos Scuderi y Juan P. Rentería. 2009.** “Condiciones Antecedentes para la Tormenta de Diseño en el Área del Gran Rosario”. XXII Congreso Nacional del Agua y V Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Trelew. Argentina. vol. 1, CD, núm. T201, 11 pp.