

# CALIBRACIÓN *IN SITU* DEL SENSOR COSMOS PARA DETERMINAR HUMEDAD DEL SUELO EN ESCALAS INTERMEDIAS (~1 KM)

## *In situ* Calibration of COSMOS Sensor to Determine the Soil Moisture at an Intermediate Scale (~1 km)

Fidencio Cruz Bautista<sup>1</sup>, Julio Cesar Rodríguez<sup>1,2</sup>, Christopher J. Watts<sup>2</sup>, Enrique R. Vivoni<sup>3</sup>, Enrico A. Yépez<sup>4</sup>, Agustín Robles Morua<sup>4</sup>, Jaime Garatuza Payan<sup>4</sup>, Tonatzin Tarin<sup>4</sup> y Adam P. Schreiner McGraw<sup>3</sup>

### RESUMEN

La heterogeneidad del suelo influye ampliamente en el contenido de humedad, dificultando la precisa determinación de este parámetro en estudios con fines hidrológicos y ecológicos que requieren de mediciones continuas y representativas para escalas intermedias (~1 km). En este contexto un sensor de neutrón de rayo cósmico The COsmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS) permite cuantificar humedad del suelo de manera continua y a escalas espaciales de cientos de metros. El objetivo de este estudio fue evaluar un esquema de calibración para un sensor COSMOS CRS-1000. El estudio se realizó en una sabana de zacate buffel (*Pennisetum ciliare*) en Rayón Sonora, México. En este sitio se instaló el COSMOS CRS-1000 y para su calibración se realizaron muestreos de suelo en dos etapas. A estas muestras se les determinó el contenido de humedad y su densidad aparente por técnicas gravimétricas. Con el contenido de humedad de estas muestras, expresado en términos volumétricos, se obtuvo por aproximación el parámetro de calibración para el COSMOS CRS-1000. El valor obtenido para este parámetro fue de 4121 conteos por hora (tasa de conteo del neutrón sobre suelo). Con este valor se realizó la corrección a los valores estimados originalmente por el sensor COSMOS CRS-1000. Al realizar esta corrección,

se observó un incremento en el contenido de humedad del suelo de 1 a 2 % con respecto a los valores estimados con el COSMOS CRS-1000 en todo el periodo de análisis. A pesar de la variabilidad espacial en el contenido de humedad del suelo bajo estudio, se observó que el sensor COSMOS CRS-1000 tiene la capacidad de proveer estimaciones razonables del contenido de la humedad del suelo de manera continua a una profundidad de 0 a 40 cm, en una superficie de alrededor de 30 ha.

**Palabras clave:** precipitación, neutrones, rayos cósmicos, Rayón Sonora, zacate buffel.

### SUMMARY

Soil heterogeneity greatly influences moisture content, making it difficult to accurately determine this parameter in hydrological and ecological studies that require continuous representative measurements at intermediate scales (~1 km). In this context, the COsmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS) enables us to quantify soil moisture continuously at spatial scales of hundreds of meters. The objective of this study was to evaluate a scheme for calibrating a COSMOS CRS-1000 sensor. The study was conducted in a buffel grass (*Pennisetum ciliare*) savanna in Rayon, Sonora, Mexico. Here, a COSMOS CRS-1000 was installed, and for calibration, two soil samplings were conducted. These samples were analyzed for moisture content and bulk density by gravimetric techniques. The moisture content of the samples, expressed in terms of volume, was used to obtain the calibration parameter by approximation for the CRS-1000 COSMOS. The value for this parameter was 4121 counts per hour (neutron count rate of soil). With this value, correction to the values originally estimated by COSMOS CRS-1000 sensor was performed. With this correction, there was an increase

<sup>1</sup> Departamento de Agricultura y Ganadería, <sup>2</sup> Departamento de Física, Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

\* Autor responsable (jcrode@guayacan.uson.mx).

<sup>3</sup> School of Earth and Space Exploration, Arizona State University. 781 S Terrace Rd, 85281 Tempe, AZ, USA.

<sup>4</sup> Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora. 5 de Febrero 818 Sur, Col. Centro. Ciudad Obregón, Sonora, México.

in soil moisture content of 1 to 2% compared with the values estimated with the CRS1000 COSMOS throughout the period of analysis. Despite the spatial variability in the moisture content of the soil under study, it was observed that the CRS-1000 COSMOS sensor has the capability of providing a reasonable continuous estimate of moisture content soil to a depth of 0 to 40 cm, in an area of about 30 ha.

**Index words:** *precipitation, cosmic rays, neutrons, Rayon Sonora, buffel grass.*

## INTRODUCCIÓN

VARIABLES biofísicas, tales como el área foliar, la biomasa vegetal y humedad del suelo deben ser monitoreadas para aplicaciones con fines ecohidrológicos, hidrometeorológicos y agrometeorológicos a escala regional y global (Zakharova *et al.*, 2012). Específicamente la humedad del suelo es un elemento determinante en la estimación de la partición de la precipitación en infiltración y escurrimiento; la partición de la energía disponible en calor latente y calor sensible, el drenaje del agua al acuífero o sobre la superficie y el desarrollo de la vegetación, la respiración del suelo y la productividad biológica (Teuling *et al.*, 2006; Williams *et al.*, 2009; Yepez y Williams, 2009; Dorigo *et al.*, 2011). Sin embargo, la humedad es altamente variable en espacio y tiempo como resultado de la heterogeneidad del suelo, tipo de vegetación, topografía, uso de suelo, precipitación y evapotranspiración (Bosch *et al.*, 2006). Por lo tanto el conocimiento de su dinámica es esencial en la modelación hidrometeorológica para un mejor entendimiento de la interacción entre la superficie y la atmósfera (Juglea *et al.*, 2010). Por otra parte el poco entendimiento del acoplamiento entre el ciclo hidrológico y de carbono es mayormente debido a la falta de mediciones de humedad del suelo (Rebel *et al.*, 2012). Siendo México un país en buena medida controlado por la estacionalidad de la lluvia, el monitoreo de la variabilidad de la humedad del suelo a escalas amplias (~40 km) es fundamental para avanzar en el conocimiento en esta área y establecer redes de monitoreo en amplias zonas de flujos ecosistémicos de agua y carbono, a largo plazo (Entekhabi *et al.*, 2004; Vargas *et al.*, 2012; 2013).

La humedad del suelo puede ser estimada mediante sensores colocados bajo la superficie con técnicas

electromagnéticas (reflectometría o capacitancia), dispersor de neutrones, sicrómetros o sensores colocados sobre la superficie, microondas montados sobre vehículo o plataformas satelitales y por conteo de neutrones como es el caso del COsmic-ray Soil Moisture Observing System COSMOS (Kerr *et al.*, 2010; Seneviratne *et al.*, 2010; Dorigo *et al.*, 2011). La medición directa de la humedad del suelo con buena resolución temporal es puntual y su espacialización es difícil por el número de mediciones y el tiempo requerido en ambientes heterogéneos. Las estimaciones de humedad mediante la instalación de sensores de humedad automatizados en el suelo permiten resolver el problema de temporalidad y con frecuencia su espacialización, si se conforman redes de medición y el uso de técnicas geoestadísticas para su interpolación. Sin embargo, la medición directa usando sensores bajo la superficie son métodos invasivos que modifican la matriz del suelo y pueden producir sesgos en las mediciones. Los microondas proporcionan información sobre humedad del suelo (SMOS, humedad de suelo y salinidad oceánica) sobre grandes superficies (50 × 50 km) de resolución, ancho de medición de 900 km y periodicidad de revisita de 2 a 3 días, lo cual le permite evaluar la superficie del suelo de manera continua, teniendo como limitación su baja penetración en el suelo (0 a 10 cm) y con una precisión de 4% afectado por la densidad de la vegetación (Kerr *et al.*, 2010).

En el otro extremo de la resolución espacial sobre sensores de medición de humedad en superficies del orden de hectáreas se ubica el sensor COSMOS, método alternativo basado en la técnica de rayos cósmicos, el cual estima la humedad del suelo en campo, en un perfil (0 a 70 cm) a una escala intermedia (~1 km) (Franz *et al.*, 2012b; Zreda *et al.*, 2012). Este método de rayos cósmicos tiene su principio de funcionamiento en la moderación de neutrones, a través de la desaceleración y la termalización de éstos al interactuar con el hidrógeno del agua en el suelo (Zreda *et al.*, 2008; Desilets *et al.*, 2010; Zreda *et al.*, 2012). Al llegar los neutrones cósmicos a la atmósfera terrestre desde el espacio, se introducen en la superficie terrestre generando un espectro de neutrones, los cuales son moderados por el contenido de hidrógeno en el suelo (Shuttleworth *et al.*, 2010). De tal modo que la termalización y emisividad de los neutrones están inversamente correlacionadas con el contenido de humedad del suelo. Este tipo de técnicas permite obtener un gran número de medidas de forma

continua y sin perturbar las propiedades del suelo. Sin embargo, requiere de una calibración detallada, sobretodo en suelos con elevada salinidad, elevados contenidos de materia orgánica, o una densidad aparente alta (Sentek, 1999; 2001).

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar el parámetro de calibración, tasa de conteo del neutrón sobre suelo seco (*No*), para un sensor de neutrón de rayo cósmico COSMOS CRS-1000 instalado en una sabana de zacate buffel (*Pennisetum ciliare*) en la localidad de Rayón Sonora, México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de Estudio

Este estudio se realizó en verano de 2012, en una sabana con zacate buffel (*Pennisetum ciliare*) y palo fierro (*Olneya tesota*) en la localidad de Rayón Sonora, México (29° 44' 12" N, 110° 30' 20" O) a una altitud de 650 m, que se encuentra ubicado sobre la cuenca del Río Sonora en la región del monzón mexicano (Figura 1). Esta área presenta una precipitación media anual de 545 mm, correspondiendo el 66% a verano (julio-septiembre) y una evapotranspiración potencial media anual de 2086 mm, con índice de aridez de 0.26, clasificado como una región semiárida (Safriel *et al.*, 2005); presenta una temperatura media anual de 21.3 °C y temperaturas medias máximas y mínimas anuales de 30.8 y 11.8 °C, respectivamente. La vegetación alrededor del sitio es característica de matorral subtropical. El suelo se caracteriza como un franco arenoso, con contenido de materia orgánica pobre y bajo contenido de salinidad, pero con un grado de compactación fuerte y una densidad aparente de 1.93 g cm<sup>-3</sup> (Cuadro 1).

### Sensor de Neutrón de Rayo Cósmico (The COsmic-ray Soil Moisture Observing System COSMOS)

En el sitio de estudio (Figura 1), se instaló un sensor de neutrón de rayo cósmico The COsmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS) modelo CRS-1000 de la compañía Hydroinnova LLC, Albuquerque, NM, USA. Este sensor permite cuantificar humedad del suelo a través del método de rayos cósmicos (Zreda *et al.*, 2008, 2012) y forma parte de

la red de sensores COSMOS <http://cosmos.hwr.arizona.edu/Probes/probemap.php>. El COSMOS CRS-1000 mide neutrones de baja intensidad y registra su tasa de conteo por hora. La interacción e intensidad de los neutrones en el aire sobre la superficie del suelo está controlado principalmente por el número de átomos de hidrógeno en el sistema suelo-aire (estructura mineral del suelo, vegetación, vapor de agua, cuerpos de agua). Por lo cual, un pequeño cambio en la tasa de conteo de los neutrones se correlaciona directamente con un cambio en el contenido de agua del suelo (Zreda *et al.*, 2008). En estudios previos se ha encontrado que el sensor COSMOS tiene influencia en un área de un círculo de aproximadamente 335 m en radio a nivel del mar y una incidencia en el perfil del suelo de ~76 cm cuando el suelo se encuentra relativamente seco y hasta ~12 cm cuando el suelo está a saturación (Zreda *et al.*, 2008).

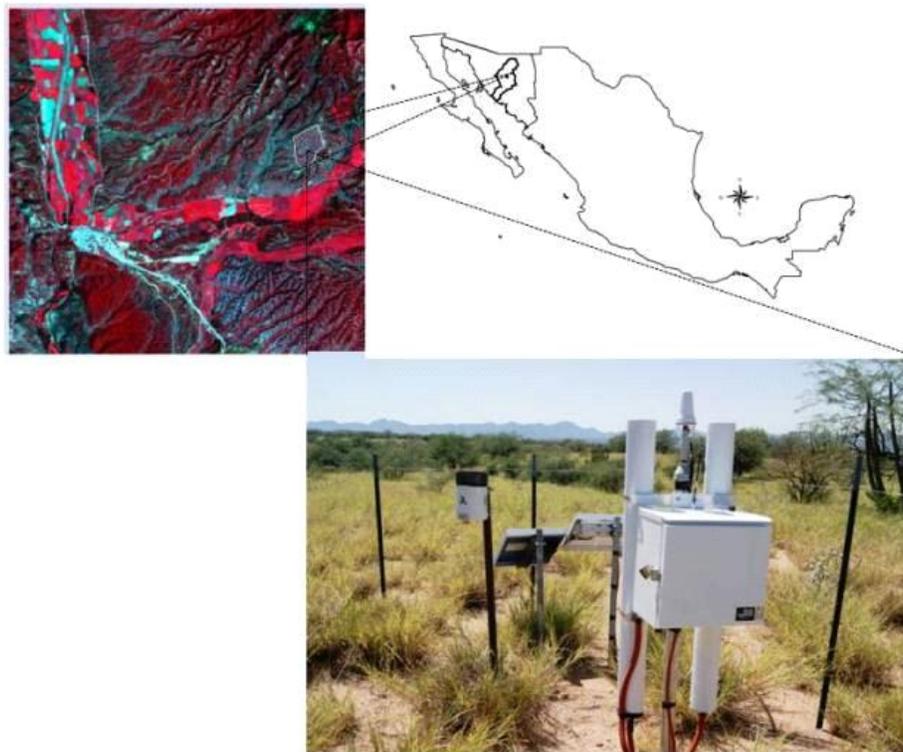
### Muestreo en Campo

Para evaluar el esquema de calibración del sensor COSMOS CRS-1000, contenido de humedad del suelo en términos volumétricos, se realizaron dos muestreos de suelo, siguiendo el procedimiento descrito por Zreda *et al.* (2012). El primer muestreo se hizo en Agosto del 2012, cuando se instaló el COSMOS CRS-1000, y el segundo en Octubre del mismo año. Los muestreos se realizaron en seis transectos a cada 60 grados del 0 al 360 y en distancias radiales de 25, 75, 150 y 300 m, y por estratos a profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 y de

**Cuadro 1. Capacidad de retención de humedad, propiedades físicas e hidráulicas del suelo de una sabana de buffel donde se instaló el sensor COSMOS CRS-1000 en Rayón, Sonora, México.**

Variable	Unidad	
Capacidad de campo	14.2	%V
Punto marchitez permanente	2.2	%V
Saturación	27.3	%V
Humedad disponible	0.12	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
Densidad aparente	1.93	g cm <sup>-3</sup>
Conductividad hidráulica	10.29	mm hr <sup>-1</sup>
Compactación	1.16	
Arena	79	%
Limo	11	%
Arcilla	10	%
Textura	Franco-arenoso	

%V = contenido de humedad porcentual base volumétrico.



**Figura 1. Localización del sensor COSMOS CRS-1000 en la pradera de buffel, en la localidad de Rayón, sobre la cuenca del Río Sonora, en el Noroeste de México.**

30- 40 cm (Figura 2). De esta manera se obtuvieron 56 muestras ( $14 \times 4$ ) en 14 sitios en el primer muestreo y 82 muestras ( $(24 \times 4)$ -14 inconsistentes) en 24 sitios para el segundo muestreo. A cada una de estas muestras se les determinó el contenido de humedad por gravimetría, mediante el secado de las muestras en horno de convección a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 h (método estándar). De manera paralela se determinó la densidad aparente para los sitios muestreados, a los estratos señalados previamente, usando cilindros de aluminio de cinco por cinco cm de diámetro y altura respectivamente. Esto permitió calcular el contenido de humedad del suelo del sitio de estudio en términos volumétricos.

### **Calibración del Sensor de Neutrón de Rayo Cósmico (COSMOS CRS-1000)**

El sensor COSMOS CRS-1000 mide la interacción y la termalización de neutrones por los átomos de hidrógeno presentes en el sistema suelo-aire, no la humedad del suelo, por lo cual esta intensidad medida

por el COSMOS debe convertirse en contenido de humedad a través de la siguiente función de calibración (CRS-1000 User's Guide, 2010):

$$\theta_m = \frac{1}{0.079} \left( \frac{0.640}{\left( \frac{N}{N_0} \right) - 0.370} - 0.910 \right) \quad (1)$$

donde:  $\theta_m$  es el contenido de agua ( $\text{m m}^{-3}$  o  $\text{kg kg}^{-1}$ );  $N$  es la tasa de conteo del neutrón corregido por variaciones de presión del lugar, latitud geomagnética y vapor de agua en la atmósfera;  $N_0$  es la tasa de conteo del neutrón sobre suelo seco bajo las mismas condiciones. Así mismo, Desilets *et al.* (2010) proponen la siguiente ecuación de calibración para el sensor COSMOS, desarrollada a partir de la teoría de física nuclear. Esta ecuación es simple, casi invariable con las propiedades químicas y textura del suelo (contenido de limo, arcilla y arena).

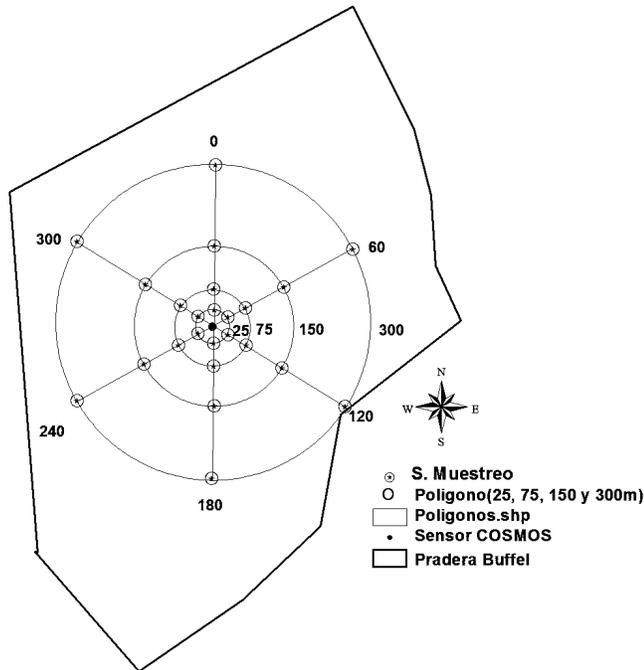


Figura 2. Sitios de muestreo de humedad de 0 a 40 cm de profundidad en el pastizal de buffel, donde se localiza el sensor COSMOS CRS-1000 sobre la cuenca del Río Sonora, en el Noroeste de México.

$$\theta(N) = \left( \frac{0.0808}{\left(\frac{N}{N_0}\right) - 0.372} - 0.115 \right) \quad (2)$$

donde:  $\theta(N)$  es el contenido de agua ( $m^3 m^{-3}$  o  $kg kg^{-1}$ ).

Para calibrar el COSMOS CRS-1000, es necesario determinar la tasa de conteo del neutrón sobre suelo seco ( $N_0$ ) que es el parámetro desconocido, bajo las mismas condiciones. Este parámetro varía significativamente de un sitio a otro y en el tiempo, aun en el mismo sitio, debido a la presencia de otras fuentes de hidrógeno (Franz *et al.*, 2012b; Hornbuckle *et al.*, 2012). Un procedimiento para encontrar el valor de  $N_0$  es proponiendo un valor inicial para  $N_0$ , a un valor conocido de  $N$ , usando la Ecuación 1. El resultado obtenido con esta ecuación se compara con el valor del contenido de humedad del suelo obtenido en campo (CRS-1000 User’s Guide, 2010). El valor correcto de  $N_0$  se obtiene cuando este valor está de acuerdo con el contenido de humedad del suelo obtenido en campo.

En este trabajo los valores  $N_0$  se estimaron por aproximación utilizando la Ecuación 1. Se usaron como variables ( $N$ ) medidos con el COSMOS CRS-1000 y ( $\theta_m$ ) en términos volumétricos, derivado de 138 muestras de 38 sitios del muestreo de campo. Los valores de  $N_0$  se calcularon primero por áreas y por estratos, y luego con el valor de la media general del contenido de humedad de toda el área y el perfil. Se consideró la fecha y hora en que se tomaron las muestras en campo, de tal forma que las condiciones físicas y climáticas del sitio fuesen lo más fielmente representadas en la estimación del parámetro  $N_0$ . Es así que se obtuvo un total de 40 valores para  $N_0$  lo que permitió determinar el valor más apropiado para  $N_0$  en términos estadísticos, el cual se usó para la calibración del COSMOS CRS-1000. La Ecuación 2 se usó como modelo de comparación de los resultados obtenidos con la Ecuación 1; debido al origen de dicha ecuación, que es casi invariable con las propiedades químicas y textura del suelo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor obtenido para la tasa de conteo del neutrón sobre el suelo ( $N_0$ ) fue de 4121 conteos por hora, con una desviación estándar de 306. Este valor de  $N_0$  es el promedio de un total de 40 valores que se estimaron con la Ecuación 1. Los valores para  $N_0$ , se obtuvieron de los 38 sitios de muestreo, organizado por áreas y por estratos, y después con el valor de la media general del contenido de humedad de toda el área y el perfil (Cuadro 2).

Por otro lado, la media general del contenido de humedad del suelo, de toda el área de influencia del sensor COSMOS CRS-1000 en este estudio, a un perfil

Cuadro 2. Resumen de los valores de contenido de humedad, base volumétrica, y parámetro  $N_0$  para la calibración del sensor COSMOS.

Variables	Humedad volumétrica	Conteo de neutrón sobre suelo seco ( $N_0$ )
n = 40	%	Cont $h^{-1}$
Valor máx	8.08	4532
Valor mín	1.89	3783
Rango	6.19	749
Promedio	5.26	4121
Desviación estándar	1.72	306

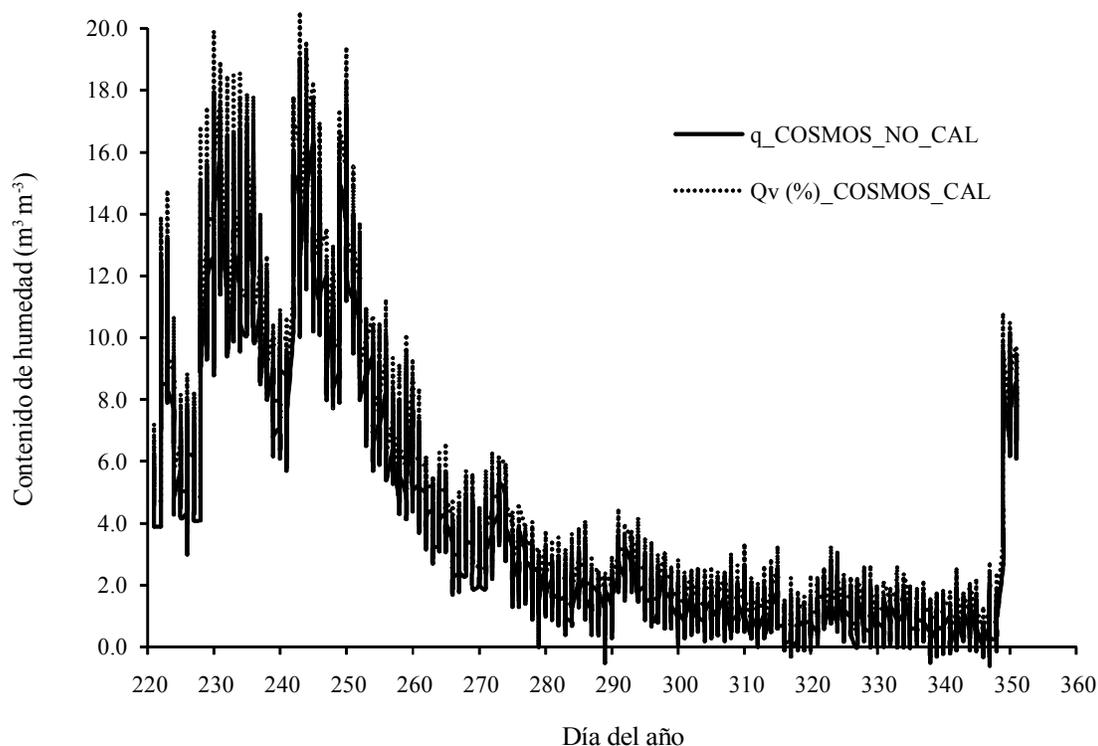
de 0 a 40 cm de profundidad, fue de  $0.0526 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  con una desviación máxima de  $0.0172 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Cuadro 2). Es decir, que hay una variación del orden de 33% en el contenido de humedad del suelo entre los puntos muestreados con respecto a la media general.

Con el valor de 4121 para  $N_0$  (Cuadro 2) se hizo la corrección a los datos de contenido de humedad estimados por el COSMOS CRS-1000 aun sin calibrar (valor inicial propuesto de 4000 conteos por hora). Esta corrección se aprecia en la Figura 3, donde la línea continua representa los valores obtenidos con el COSMOS CRS-1000 sin calibrar y la línea punteada son los valores del sensor corregidos. Con esta corrección, se observa un incremento en el contenido de humedad de 1 a 2 %, con respecto a los valores estimados con el COSMOS CRS-1000 en todo el tiempo de análisis. Si bien este incremento es pequeño, obedece mucho a la variación del contenido de humedad del primer estrato del suelo. Pues la dinámica de la humedad es mayor y más acelerada, comparada con los otros estratos de mayor profundidad como se muestra en el Cuadro 3 y que está acorde con lo señalado por

Meadow *et al.* (2011) y Franz *et al.* (2012a). Esta variación en el comportamiento de la humedad se observa en la Figura 4, donde los valores corregidos del COSMOS CRS-1000 fluctúan entre el contenido medio de humedad del primer estrato y el valor promedio del perfil de 0 a 40 cm del área muestreada.

De manera análoga, en la Figura 5 se muestra el modelado del contenido de la humedad del suelo entre los valores del sensor COSMOS CRS-1000 corregidos con el valor de  $N_0$  y los valores que se obtienen con el modelo de calibración propuesta por Desilets *et al.* (2010). La variación absoluta entre ambos valores es del orden de 0.05%, por lo cual no se aprecia diferencia significativa en la tendencia de ambas líneas en esta figura. Sin embargo, es más preciso y recomendable usar el contenido de humedad de muestras de suelo para estimar el valor de conteo (intensidad) del neutrón sobre suelo seco  $N_0$  como se aprecia en el Cuadro 2, y como lo señala Franz *et al.*, (2012a).

La tasa de conteo de neutrón sobre suelo seco que se ha encontrado en este trabajo para calibrar el COSMOS CRS-1000, que corresponde a 4121 conteos



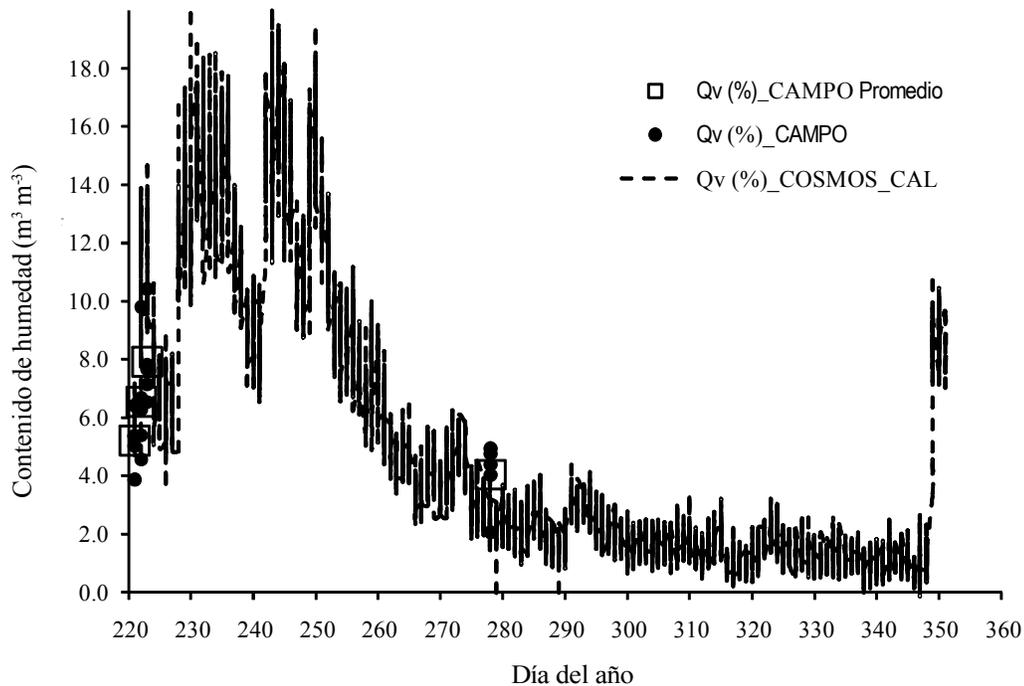
**Figura 3.** Dinámica del contenido de la humedad del suelo en una pradera de buffel en la localidad de Rayón, Sonora, México. La línea continua representa los valores obtenidos con el sensor COSMOS aun sin calibrar ( $N_0 = 4000$ ) y la línea punteada son los valores del sensor corregidos con el valor de conteo (intensidad) del neutrón sobre suelo seco ( $N_0 = 4121$ ).

**Cuadro 3. Resumen de los valores de contenido de humedad del suelo obtenidos en dos muestreos, para la calibración del sensor COSMOS, donde n es el número de sitios muestreados.**

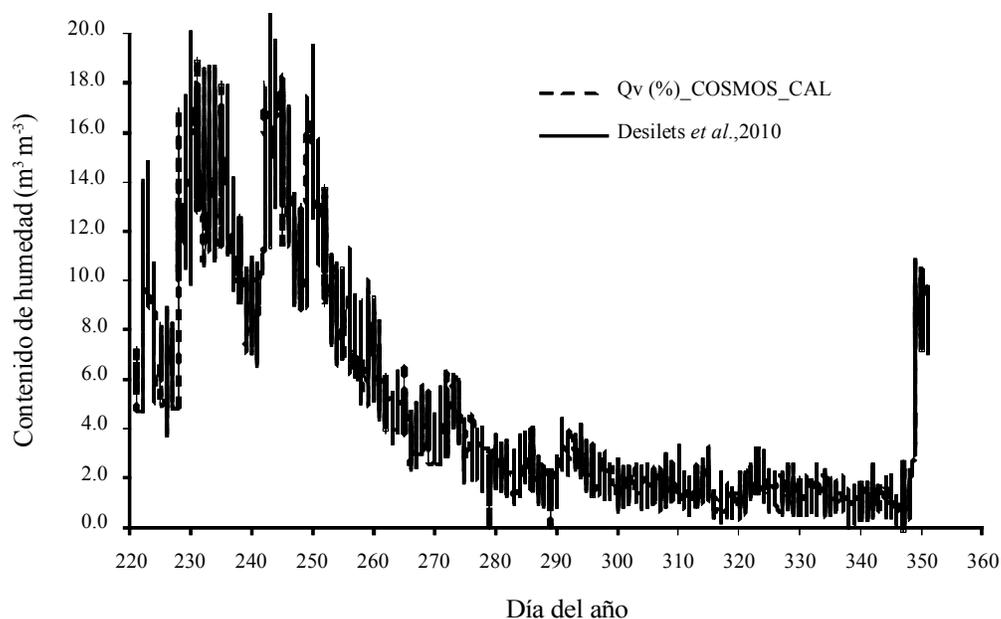
Variables	Humedad volumétrica (%) de muestras de suelo obtenidos en campo							
	Muestreo 1 (n = 14)				Muestreo 2 (n = 24)			
Estrato	0 -10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	0 -10	10 - 20	20 - 30	30 - 40
	----- cm -----							
Valor máx	14.15	9.85	7.64	8.21	4.75	9.00	8.68	8.73
Valor mín	1.33	2.21	3.60	3.22	1.06	2.03	2.75	3.15
Rango	12.82	7.64	4.04	4.99	3.69	6.97	5.93	5.57
Promedio	8.09	6.16	5.91	6.01	2.01	4.64	4.88	5.06
Desviación estándar	4.15	2.33	1.36	1.75	0.89	2.20	1.67	1.57

por hora, es superior al reportado por Zreda *et al.* (2008) para las estaciones de monitoreo de Santa Rita, San Pedro 2 y Lucky Hills en Arizona EUA, con valores  $2676 \pm 57$ ,  $1968 \pm 44$  y  $2475 \pm 49$  de  $N_0$  respectivamente. Estas estaciones están ubicadas en la región del monzón americano y presentan condiciones climáticas similares a las del sitio de estudio de este trabajo. Sin embargo la densidad aparente de los suelos es de 1.46, 1.42 y 1.44  $gr\ cm^{-3}$ , con elevaciones de 989,

1233 y 1367 MNSM respectivamente para estos sitios de monitoreo. Por lo cual hay una variación considerable en la tasa de conteo de neutrón sobre suelo seco ( $N_0$ ) que se ha encontrado para calibrar el COSMOS CRS-1000 en este estudio. Debido que la termalización y emisividad de los neutrones están inversamente correlacionadas con el contenido de humedad del suelo y que este contenido de humedad está potencialmente influenciado por la topografía, cobertura vegetal, grado



**Figura 4. Relación entre los valores de contenido de humedad obtenidos en campo y los valores obtenidos con el parámetro de calibración.** Los puntos muestran el contenido de humedad promedio por estratos de toda el área y los cuadrados representan el valor promedio de la humedad del perfil de 0 a 40 cm del área muestreada, durante los días que se tomaron las muestras en campo. La línea punteada representa los valores del sensor corregidos con el valor de conteo (intensidad) del neutrón sobre suelo seco ( $N_0 = 4121$ ).



**Figura 5. Modelado del contenido de la humedad del suelo en una pradera buffel en la localidad de Rayón, Sonora, México.** La línea punteada representa los valores del sensor COSMOS corregidos con el valor de conteo (intensidad) del neutrón sobre suelo seco ( $No = 4121$ ). La línea continua son los valores que se obtienen con el modelo de calibración propuesta por Desilets *et al.*, (2010).

de compactación y la proporción de arena, limo y arcilla en el suelo para cada sitio de muestreo. Por lo cual la tasa de conteo de neutrón sobre suelo seco ( $No$ ) varía significativamente de un sitio a otro y en el tiempo, aun en el mismo sitio, debido a la presencia de otras fuentes de hidrógeno, como lo señalan Franz *et al.*, (2012b) y Hornbuckle *et al.*, (2012).

Respecto al contenido de humedad del suelo de toda el área de influencia del sensor COSMOS CRS-1000, a un perfil de 0 a 40 cm de profundidad, presenta una variación del orden de 33% en el contenido de humedad del suelo entre los puntos muestreados con respecto a la media general. El primer estrato, con una profundidad de 0 a 10 cm, es el que presenta mayor variabilidad en el contenido de humedad en las dos fechas de muestreo, como se aprecia en el Cuadro 3. En el primer muestreo la variación en el contenido de humedad, para el primer estrato, fue de alrededor de 51% y para el segundo muestreo fue de 44%. Lo que contrasta con los estratos de 20 a 30 y 30 a 40 cm que presentan una variación del orden de 29 y 34%. Esta distribución de la humedad también se puede apreciar en la Figura 4, donde los valores más altos corresponden a la media del primer estrato y los valores más bajos son para el tercer y cuarto estrato, en el caso del primer muestreo. Para el segundo muestreo los valores más bajos corresponden al primer

estrato y los más altos al tercer y cuarto estrato. Esta variabilidad de la humedad está potencialmente influenciada por la topografía, cobertura vegetal, grado de compactación y la proporción de arena, limo y arcilla en el suelo para cada sitio de muestreo, como lo señalan García *et al.* (2005).

## CONCLUSIONES

- En este trabajo se determinó la tasa de conteo (intensidad) del neutrón sobre suelo seco  $No$  que correspondió a 4121 conteos por hora, para el sensor COSMOS CRS-1000 instalado en una sabana de zacate buffel (*Pennisetum ciliare*) en la localidad de Rayón Sonora, México. Con este parámetro se hizo la corrección a los valores de contenido de humedad estimados por el COSMOS CRS-1000 sin calibrar. Al realizar esta corrección, se observó un incremento en el contenido de humedad de 1 a 2% con respecto a los valores estimados con el COSMOS CRS-1000 en todo el periodo de análisis.
- Lo anterior, permite señalar que el sensor COSMOS CRS-1000 ya calibrado, tiene la capacidad de captar el comportamiento promedio de la humedad del suelo, de manera simultánea y bastante aceptable, a una profundidad de 0 a 40 cm, en una superficie de alrededor de 30 ha.

- Por lo cual, mediciones *in situ* de humedad de suelo a escalas intermedias (~1km) son valiosas para la validación de modelos hidrometeorológicos que integran la dinámica de flujos de agua en el continuo suelo-planta-atmósfera en cuencas y ecosistemas.

- Por lo tanto, la caracterización amplia de la disponibilidad de agua del suelo en zonas áridas y semiáridas es útil para avanzar en el conocimiento sobre el control que el suelo ejerce en la vegetación bajo regímenes de lluvia intermitente, y este avance en la medición de la humedad del suelo mediante este sensor contribuye al desarrollo de la teoría en la ecohidrología.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al CONACYT dentro del programa Apoyos Complementarios para la Consolidación Institucional de Grupos de Investigación (Repatriación, Retención y Estancias de Consolidación) Convocatoria 2011 - Segundo Periodo y a la Universidad de Sonora por los apoyos otorgados para la realización de este trabajo. Así como, a la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF) de Estados Unidos de América por el financiamiento bajo el contrato 1130254 para el experimento US-MEXICO Border Water & Environmental Sustainability Training (UMB-WEST) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su financiamiento al proyecto “Estimación de ET y sus componentes evaporación y transpiración en la región del Monzón Mexicano”, con convenio 132188.

### LITERATURA CITADA

- Bosch, D. D., V. Lakshmi, T. J. Jackson, M. Choi, and J. M. Jacobs. 2006. Large scale measurements of soil moisture for validation of remotely sensed data: Georgia soil moisture experiment of 2003. *J. Hydrol.* 323: 120-137.
- Desilets, D., M. Zreda, and T. P. A. Ferré. 2010. Nature's neutron probe: land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resour. Res.*, 46, W11505, doi: 10.1029/2009wr008726.
- Dorigo, W. A., W. Wagner, R. Hohensinn, S. Hahn, C. Paulik, A. Xaver, A. Gruber, M. Drusch, S. Mecklenburg, P. van Oevelen, A. Robock, and T. Jackson. 2011. The international soil moisture network: A data hosting facility for global *in situ* soil moisture measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 1675-1698.
- Entekhabi, D., E. Njoku, P. Houser, M. Spencer, T. Doiron, J. Smith, R. Girard, S. Belair, W. Crow, T. Jackson, Y. Kerr, J. Kimball, R. Koster, K. McDonald, P. O'Neill, T. Pultz, S. Running, J. C. Shi, E. Wood, and J. van Zyl. 2004. The hydrosphere state (HYDROS) mission concept: An earth system pathfinder for global mapping of soil moisture and land freeze/thaw. *Trans. Geosci. Remote Sens.* 42: 2184-2195.
- Franz, T. E., M. Zreda, T. P. A. Ferré, R. Rosolem, C. Zweck, S. Stillman, X. Zeng, and W. J. Shuttleworth. 2012a. Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources, *Water Resour. Res.*, 48, W08515, doi: 10.1029/2012WR011871.
- Franz, T. E., M. Zreda, R. Rosolem, and T. P. A. Ferré. 2012b. Field validation of cosmic-ray soil moisture probe using a distributed sensor network. *Vadose Zone J.* doi:10.2136/vzj2012.0046.
- García, I., J.A. Jiménez, J. L. Muriel, F. Perea y K. Vanderlinden. 2005. Evaluación de sondas de capacitancia para el seguimiento de la humedad de un suelo arcilloso bajo distintas condiciones y tipos de manejo. *Estudios Zona No Saturada Suelo* 7: 101-107.
- Hornbuckle, B., S. Irvin, T. Franz, R. Rosolem, and C. Zweck. 2012. The potential of the COSMOS network to be a source of new soil moisture information for SMOS and SMAP. *Geosci. Remote Sens. Symposium (IGARSS)*, IEEE International. DOI: 0.1109/IGARSS.2012.6351317.
- Juglea, S., Y. Kerr, A. Mialon, E. Lopez-Baeza, D. Braithwaite, and K. Hsu. 2010. Soil moisture modelling of a SMOS pixel: Interest of using the PERSIANN database over the Valencia Anchor Station. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14: 1509-1525.
- Kerr, Y. H., P. Waldteufel, J. Wignero, S. Delwart, F. Cabot, J. Boutin, M. J. Escorihuela, J. Font, N. Reul, and C. Gruhier. 2010. The SMOS Mission: New tools for monitoring key elements of the global water cycle. *Proc. IEEE* 98: 666-687.
- Meadows, M. W., P. C. Hartsough, B. Kerkez, R. C. Bales, A. E. Kelly, J. W. Hopmans, C. Hedge, M. Gouldend, and S. D. Glaser. 2011. Comparing methods for quantifying soil moisture in the southern Sierra Nevada, California. *Am. Geophys. Union, Fall Meeting.* Abstract #H41D1054M.
- Rebel, K. T., R. A. M. de Jeu, P. Ciais, N. Viovy, S. L. Piao, G. Kiely, and A. J. Dolman. 2012. A global analysis of soil moisture derived from satellite observations and a land surface model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 833-847.
- Sentek Sensor Technologies. 1999. Access tube installation guide. Diviner 2000. Version 1.0. Sentek Pty Ltd. Stepney, Australia.
- Sentek Sensor Technologies. 2001. Calibration of Sentek Pty Ltd soil moisture sensors. Sentek Pty Ltd. Stepney, Australia.
- Seneviratne, S. I., T. Corti, E. L. Davin, M. Hirschi, E. B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky, and A. J. Teuling. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Sci. Rev.* 99: 125-161.
- Shuttleworth, W. J., M. Zreda, X. Zeng, C. Zweck, and T. P. A. Ferré. 2010. The COSmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS): a non-invasive, intermediate scale soil moisture measurement network. Third International Symposium, Role of hydrology managing consequences of a changing global environment. Br. Hydrol. Soc. Newcastle, England.

- Teuling, A. J., R. Uijlenhoet, F. Hupet, E. E. van Loon, and P. A. Troch. 2006. Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10: 755-767.
- User's Guide CRS-1000 Rev 003, © Hydroinnova LLC 2010. Cosmic-Ray Soil Moisture/Snow Sensing System 1316 Wellesley Drive NE. Albuquerque, NM, USA.
- Vargas, R., H. W. Loescher, T. Arredondo, E. Huber-Sannwald, R. Lara-Lara, and E. A. Yépez. 2012. Opportunities for advancing carbon cycle science in Mexico: Towards a continental scale understanding. *Environ. Sci. Policy* 21: 84-93.
- Vargas, R., E. A. Yépez, J. L. Andrade, G. Ángeles, T. Arredondo, A. E. Castellanos, J. Garatuza-Payan, E. González del Castillo, W. Oechel, J. C. Rodríguez, A. Sánchez-Azofeifa, E. Velazco, E. R. Vivoni, and C. J. Watts. 2013. Progress and opportunities for monitoring water and greenhouse gases fluxes in Mexican ecosystems: The MexFlux network. *Atmosfera* 26: 325-336.
- Williams, C. J., J. P. McNamara, and D. G. Chandler. 2009. Controls on the temporal and spatial variability of soil moisture in a mountainous landscape: the signature of snow and complex terrain. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13: 1325-1336.
- Yépez, E. A. and D. G. Williams. 2009. Precipitation pulses and ecosystem carbon and water exchange in arid and semiarid environments. pp. 337-361. *In*: E. De la Barrera and W. K. Smith (eds.). *Perspectives in biophysical plant ecophysiology: A tribute to Park S. Nobel*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Zakharova, E., J. C. Calvet, S. Lafont, C. Albergel, J. P. Wigneron, M. Pardé, Y. Kerr, and M. Zribi. 2012. Spatial and temporal variability of biophysical variables in southwestern France from airborne L-band radiometry. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 1725-1743.
- Zreda, M., D. Desilets, T. P. A. Ferré, and R. L. Scott. 2008. Measuring soil moisture content noninvasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophys. Res. Lett.* 23: 949-952.
- Zreda, M., W. J. Shuttleworth, X. Zeng, C. Zweck, D. Desilets, T. Franz, R. Rosolem, and T. P. A. Ferré. 2012. COSMOS: The COsmic-ray soil moisture observing system, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 9: 4505-4551.