



Simposio  
**Fertilidad**  
2019 Conocer más.  
Crecer mejor.



**8 y 9 de Mayo**

Rosario, Santa Fe. Argentina.

[www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)

  
**FERTILIZAR**  
ASOCIACION CIVIL

# Satélites y Agricultura

## Satélite Argentino de Observación con Microondas "SAOCOM"

Francisco Damiano  
fdamiano52@hotmail.com

### Misión Satelital Nacional

El SAOCOM 1A es el quinto satélite de observación construido en la Argentina bajo el liderazgo de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), y el primer satélite de radar dedicado a la producción agrícola y manejo de inundaciones en la Región Pampeana (Figura 1).

Desde el 7 de octubre de 2018 el SAOCOM 1A forma parte de la órbita del Sistema Ítalo Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias (SIASGE), una constelación de seis satélites que, por primera vez, ofrecerá productos y servicios de teledetección con Radar de Apertura Sintética (SAR) polarimétrico en bandas L (SAOCOM 1A y 1B) y X (4 satélites italianos COSMO-SkyMed), convirtiéndolo en un sistema único en el mundo (Figura 2).

Estos satélites poseen instrumentos que operan en el rango de las microondas del espectro electromagnético (REM), obteniendo información

en cualquier condición meteorológica y hora del día, debido a que no necesitan de la iluminación solar para operar y tampoco son afectados por la presencia de nubes, niebla o lluvia, a diferencia de las cámaras ópticas.

En particular, el SAOCOM 1A mapea la humedad del suelo ( $\theta$ ) con revisita de 16 días, basado en el principio de Reflectometría en el Dominio Frecuencia (FDR) 1.275 Gigahercio (GHz) y la permitividad dieléctrica del suelo ( $\epsilon_s$ ). La escala de resolución es de 1 km<sup>2</sup> (100 ha). Este dato toma mayor relevancia comparado con el radiómetro de las misiones Soil Moisture Active and Passive (SMAP, NASA) y Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS, ESA) con resoluciones espaciales de 26 y 52 km<sup>2</sup>, respectivamente.

Los mapas de humedad de suelo y el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), serán elaborados sobre un área de interés de 83 millones de hectáreas, comprendiendo las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba y La Pampa. La información brindada por el SAOCOM juntamente con el

uso de sistemas: i) Soporte a las Decisiones en Agricultura, y ii) Pronóstico de Fusariosis en trigo, ayudará a los productores a elegir cuál es el mejor momento para la siembra, fertilización, pulverización y riego en los principales cultivos.

Asimismo, aportará información estratégica al Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil (Plan Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastre Argentina 2018-2023, <http://www.senado.gov.ar/upload/26448.pdf>). Las cuencas hidrológicas de la región pampeana serán receptoras de la red de observación de humedad edáfica del perfil del suelo en tiempo real, y

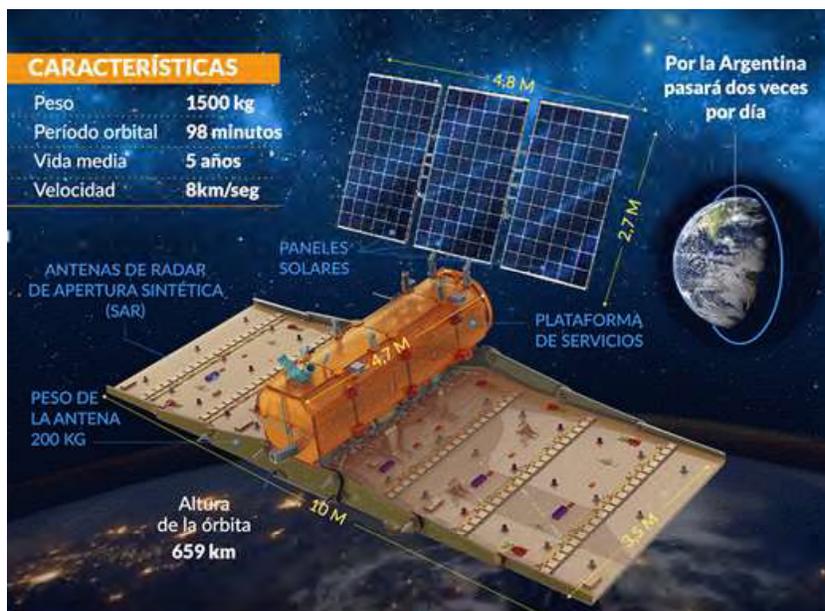


Figura 1. Características y componentes físicos del satélite SAOCOM. Fuente CONAE.

futuros usuarios del Modelo Digital de Elevación (MDE) y del mapa de anegamiento/inundación. Esta información es de vital importancia en la modelación hidrológica para uso en: i) Planificación del territorio y sistemas de producción, ii) Diseño de estructura de control, iii) Alerta hídrica rural/urbana, y iv) monitoreo de los recursos naturales, cambio en el uso de la tierra y variabilidad y/o

cambio climático.

La misión SAOCOM es comandada desde el Centro Espacial Teófilo Tabanera (CETT) en Córdoba. Actualmente se encuentra en período de puesta en servicio (Fase de "Commissioning"), para ofrecer, en pocos meses, imágenes y productos en los múltiples modos de captación y polarización. La constelación SIASGE se completará con la puesta en órbita del SAOCOM 1B, con probable fecha de lanzamiento en el 2019.

A modo de ejemplo, se presenta una mirada sobre San Nicolás de los Arroyos (provincia de Buenos Aires), captada por el satélite el 8 de marzo de 2019 (Figura 3). En las zonas centro y sur de la imagen se observan numerosas parcelas en distintas tonalidades, que se distinguen claramente debido a la forma geométrica típica de los trazados agrícolas y círculos de riego. Las distintas tonalidades se corresponden con distintos tipos y estadios de cultivos. Las parcelas que se ven muy oscuras indican terrenos sin presencia de cultivos, en los que es presumible que la cosecha ya se haya levantado o que no se haya sembrado cultivos en la temporada de verano. Los tonos más claros indican cultivos ya desarrollados, esperando el momento indicado para su cosecha.

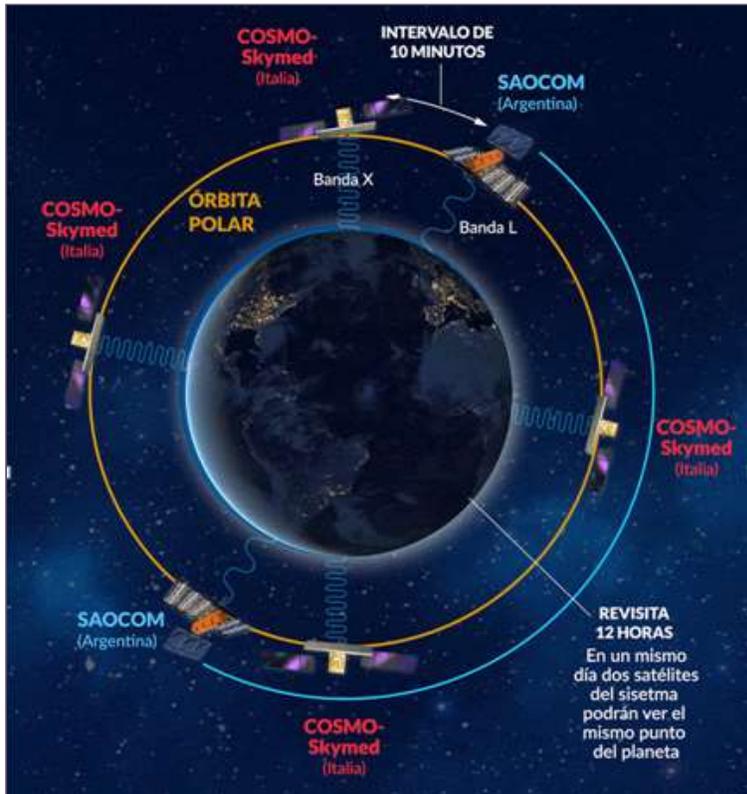


Figura 2. Constelación de satélites Ítalo Argentino de la Agencia Espacial Italiana y CONAE. Fuente CONAE.

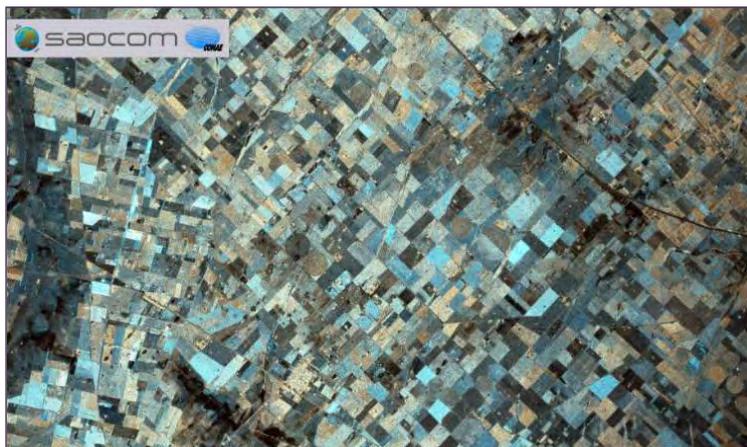


Figura 3. Imagen satelital SAOCOM con detalle de parcelas con distintos tipos y estadios de cultivos y uso del suelo. Fuente: <https://www.argentina.gov.ar/ciencia/conae>

### Teoría sobre la permitividad dieléctrica del suelo

La permitividad ( $\epsilon$ ) es una medida del grado en que la carga eléctrica distribuida en un material puede ser polarizada por la aplicación de un campo eléctrico externo variable. La permitividad del agua libre ( $\epsilon_w$ ) es aproximadamente igual a 80, la de las partículas minerales constituyentes del suelo ( $\epsilon_s$ ) oscila entre 3 y 5, y la del aire ( $\epsilon_a$ ) es igual a 1. Por tanto, dado el elevado contraste entre  $\epsilon_w$  y los demás componentes del suelo, el contenido en agua es el factor dominante del valor de esta propiedad en los suelos. De ahí que la  $\epsilon_w$  puede aplicarse como medida indirecta

del contenido de humedad del suelo, utilizando ondas electromagnéticas. Existe una ventana de medición entre 10 MHz y 2 GHz libre de pérdidas dieléctricas, en la cual la parte real de la permitividad ( $\epsilon'$ ) es prácticamente constante, mientras que la parte imaginaria ( $\epsilon''$ ) tiende a cero (Figura 4).

Los suelos tienen una estructura compleja con múltiples tiempos de relajación y permitividades, los cuales siguen una distribución estadística. Esta distribución estadística está relacionada con:

- La fracción volumétrica de los componentes: sólido, agua y aire.
- Características de cada componente e interacción entre los mismos.
- Microestructura de la matriz de suelo: capas, orientación, arreglos de partículas y poros.

Existen modelos empíricos (Topp et al., 1980) y semiempíricos (Perplinsky et al., 1995) que describen la permitividad del suelo ( $\epsilon_s$ ):

$$\epsilon_s = f(T, \Theta, S, MO, \rho_p, \epsilon_w)$$

Donde:

T: Temperatura, °C;  $\Theta$ : Humedad del suelo,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; S: Salinidad,  $\text{dS m}^{-1}$ ; MO: Materia orgánica,  $\text{g kg}^{-1}$ ;  $\rho_p$ : Densidad de partícula,  $\text{Mg m}^{-3}$ ;  $\epsilon_w$ : Permitividad del agua.

Si bien los modelos de permitividad de Topp y Perplinsky, entre los más difundidos, fueron establecidos para algunos tipos de suelos taxonómicamente similares a los de la Región Pampeana Argentina, su aplicación directa a nuestros suelos genera cierta incertidumbre, ya que, es ampliamente aceptado por la comunidad científica que

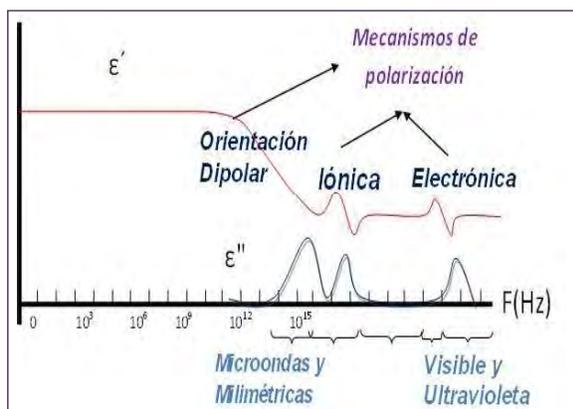


Figura 4. Mecanismo de polarización de la permitividad real ( $\epsilon'$ ) e imaginaria ( $\epsilon''$ ) del agua libre ( $\epsilon_w$ ) en función de la frecuencia del espectro electromagnético.

los modelos son sitio específico. Por ello, el segmento Terrestre EMIS (Equipo de Medición *In Situ*) de la Misión SAOCOM y el INTA desarrollaron protocolos de campo y laboratorio de medición de la curva de desecación  $\Theta$ - $\epsilon$ , con el fin de ajustar y validar algoritmos experimentales para los principales suelos pampeanos y los coeficientes de regresión de pedotransferencia usando las variables del suelo.

### Red de estación telemétrica y tipos de suelos

De las 67 estaciones telemétricas instaladas por CONAE en cinco provincias de Argentina, equipadas con sonda *FDR Hydra Probe* (4 varillas de metal de 5 cm) [Figura 5], se seleccionaron 15 series de suelo modales representativas de las unidades taxonómicas: Ustipsamientos ( $n = 1$ ), Haplustoles ( $n = 1$ ), Hapludoles ( $n = 6$ ) y Argiudoles ( $n = 7$ ), con un rango textural arenoso franco a franco arcillo limoso y diferentes usos.

La Tabla 1 muestra un resumen de los resultados analíticos de los suelos bajo estudio. La densidad aparente ( $\rho_a$ ) varió de 1.14 a 1.38  $\text{Mg m}^{-3}$  ( $1.27 \pm 0.08$ ). La base de datos seleccionada responde a la variabilidad en textura, MO y cationes de los principales suelos pampeanos.

### Modelación de la permitividad dieléctrica del suelo

La sonda *Hydra Probe* fue probada con diferentes materiales, respondiendo al rango de permitividad que caracteriza los componentes naturales del suelo (Bellingham, 2007). Se obtuvieron en laboratorio 22 a 29 pares de valores por suelo con un rango de  $\Theta$  0.064 a 0.646  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  y  $\epsilon$  4.47 a 51.92 ( $n = 360$ ). En cada suelo se ajustó la función matemática que mejor representa el conjunto de pares de valores independientes  $\Theta = f(\epsilon)$ , usando el programa Curve Expert v.1.3. La ecuación resultante que mejor representa al conjunto de suelos ( $n = 15$ ), fue un polinomio de 3° con un  $r$  de 0.982 a 0.999 y un error estándar de 0.002 a 0.029 (Tabla 2). En línea general, el rango de  $\theta$  y  $\epsilon$  respondió por clase textural, i.e., suelos de textura arenosa poseen menor contenido de poros de mayor tamaño y en sentido diametralmente opuesto se hallan los suelos de textura fina. El Ustipsament típico (Ut: arenoso franco) registró una amplitud de 0.064 - 0.393  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  y 5.16 - 27.26, el Argiudol petrocálcico (Apk: franco) 0.191 - 0.509  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  y 8.34 - 36.76 y

**Tabla 1.** Valores y estadísticos de variables físicas y químicas del suelo medidas en el horizonte superficial de 15 suelos de la región pampeana.

	pH	MO	CE	CIC	C	L	A
Md	6,4	34	0,9	15,7	207	399	394
Mn	5,7	9	0,2	8,5	20	140	330
Mx	8,4	67	3,5	29,1	294	700	840
DS	0,6	13	1,0	4,9	79	170	236

Md: medio; Mn: mínimo; Mx: máximo; DS: desvío estándar; MO: materia orgánica, g kg<sup>-1</sup>; CE: conductividad eléctrica, dS m<sup>-1</sup>; CIC: capacidad intercambio catiónico, cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>; C: arcilla < 2 μm, g kg<sup>-1</sup>; L: limo 2-50 μm, g kg<sup>-1</sup>; A: arena 50-2000 μm, g kg<sup>-1</sup>.

**Tabla 2.** Coeficientes experimentales del modelo polinomio de tercer grado ajustado por tipo de suelo:  $\Theta$  (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) = - a + b \* ε - c \* ε<sup>2</sup> + d \* ε<sup>3</sup>.

Suelo	Coeficiente			
	a	b	c	d
U t	0,063144	0,028117	0,000676	0,0000088
H t e	0,072725	0,0289501	0,000668	0,0000077
H e 1	0,067000	0,0443681	0,001745	0,0000313
H a	0,058708	0,0366533	0,001295	0,0000215
A p k	0,104119	0,041992	0,001366	0,0000183
A b 1	0,070409	0,0392357	0,001429	0,0000227
A b 2	0,083521	0,0443365	0,001597	0,0000234
A b 3	0,082690	0,0439800	0,001690	0,0000287
H e 2	0,061611	0,0375214	0,001151	0,0000176
H t n	0,055767	0,0289649	0,000845	0,0000132
H t a 1	0,065255	0,0427813	0,001440	0,0000227
H t a 2	0,061641	0,0418284	0,001267	0,0000185
A t 1	0,055590	0,0348011	0,000973	0,0000128
A a	0,043364	0,0307189	0,000963	0,0000130
A t 2	0,028832	0,0236216	0,000500	0,0000046

Ut: Ustipsament típico, Hte: Haplustol éntico, He1, Hapludol éntico, Ha: Hapludo ácuico, Apk: Argiudol petrocálico, Ab 1: Argiudol abruptico, Ab 2: Argiudol abruptico, Ab 3: Argiudol abruptico, He 2: Hapludol éntico, Htn: Hapludol thapto nátrico, Hta 1: Hapludol thapto árgico, Hta 2: Hapludol thapto árgico, At 1: Argiudol típico, Aa: Argiudol ácuico, At2: Argiudol típico.



**Figura 5.** Ubicación geográfica de la red de monitoreo de la permitividad del suelo y características de la sonda Hydra Probe.

el Argjudol abruptico (Ab 2: franco arcillo limoso)  $0.191 - 0.571 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y  $9.15 - 36.34$ . Robinson et al. (2008) reportaron que la textura tiene un pronunciado efecto sobre la permitividad, especialmente por debajo de 5 GHz de frecuencia.

Los coeficientes experimentales (Tabla 2) fueron correlacionados con variables del suelo medidas y transformadas (Tabla 1), seleccionándose por step-wise ( $p < 0.05$ ) las variables regresoras de pedotransferencia (FPT) [Tabla 3]. Las ecuaciones de regresión explicaron el 75% y 86% ( $R^2$ ) de los valores experimentales con un  $DS < 0.011$  y  $p < 0.015$ . Las variables del suelo requeridas por las FPT están disponibles en los mapas de suelos INTA escala Semidetalle y Reconocimiento. Por otra parte, son simples de determinar por análisis en laboratorios de suelos.

Las FPT sobreestiman el valor de  $\Theta$  observado ( $n = 360$ ) con un Error Medio de  $0.002 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y un RMSE de  $0.039 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Figura 6). Estos errores son comúnmente aceptados en estudios de modelación hídrica.

### Aplicación de los modelos de permitividad del suelo

- La red telemétrica equipada con sonda Hydra Probe resultó apta para el estudio de la permitividad dieléctrica de los suelos pampeanos. Posee la propiedad de medir la humedad disponible para las plantas en el rango de onda electromagnético banda L (0.3 a 1.4 GHz), al igual que lo hace el satélite SAOCOM.
- Los algoritmos experimentales del modelo polinomio sitio específico, resultan promisorios para la misión SAOCOM, cuya finalidad es desarrollar un modelo inverso de estimación de la humedad superficial del suelo usando técnicas de reflectometría y teledetección radar.
- Los modelos de pedotransferencia podrán ser usados en el seguimiento puntual de la dinámica

de la humedad edáfica en tiempo real, disponiendo de los datos de permitividad de la red telemétrica CONAE y accediendo a la cartografía de suelos en el portal GeolINTA.

### Bibliografía

Bellingham K. 2007. The Stevens Hydra Probe Inorganic Soil Calibrations. Stevens Water Monitoring Systems Inc. Portland, Oregon. Pp 5.  
 Perplinsky N.R., F.T. Ulaby, & M.C. Dobson. 1995. "Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3-GHz Range". IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing; Vol. 33; N° 3; May.  
 Robinson D.A., C.S. Campbell, J.W. Hopmans, B.K. Hornbuckle, S.K. Jones, R. Knight, F. Ogden, J. Selker, & O. Wendroth. 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A Review. Vadose Zone J. 7: 358-389.  
 Topp G.C., J.L. Davis, & A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. Water Resour. Res.; 16: 574-582. ◀

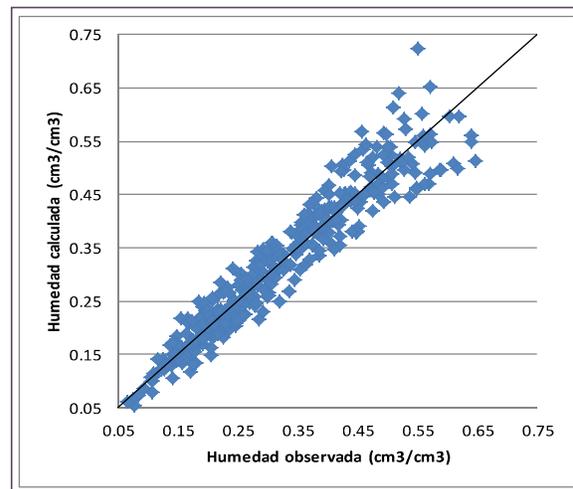


Figura 6. Comparación entre valores de humedad observada experimentalmente y la humedad calculada con la ecuación polinomio y los coeficientes del modelo de regresión múltiple de pedotransferencia.

Tabla 3. Regresiones múltiples de pedotransferencia ( $y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n$ ) ajustadas a los coeficientes experimentales por variables medidas en el suelo (Tabla 1: ver unidades).

Coeficiente	Variables regresoras					
		C	MO	C*L	C <sup>2</sup>	MO <sup>2</sup>
a	$-4.053 \cdot 10^{-2}$	$9.1 \cdot 10^{-3}$	$-5.368 \cdot 10^{-2}$	$5.239 \cdot 10^{-5}$	$3.472 \cdot 10^{-4}$	$6.91 \cdot 10^{-3}$
		C	A	CIC		
b	$-6.07 \cdot 10^{-3}$	$1.87 \cdot 10^{-3}$	$4.413 \cdot 10^{-4}$	$-8.633 \cdot 10^{-4}$		
c	$9.785 \cdot 10^{-4}$	$-1.068 \cdot 10^{-4}$	$-2.276 \cdot 10^{-5}$	$6.114 \cdot 10^{-5}$		
d	$-2.388 \cdot 10^{-5}$	$2.084 \cdot 10^{-6}$	$4.639 \cdot 10^{-7}$	$-1.272 \cdot 10^{-6}$		