

Evaluación de procesos hidro-biofísicos mediante datos satelitales e inteligencia artificial: desarrollos y desafíos

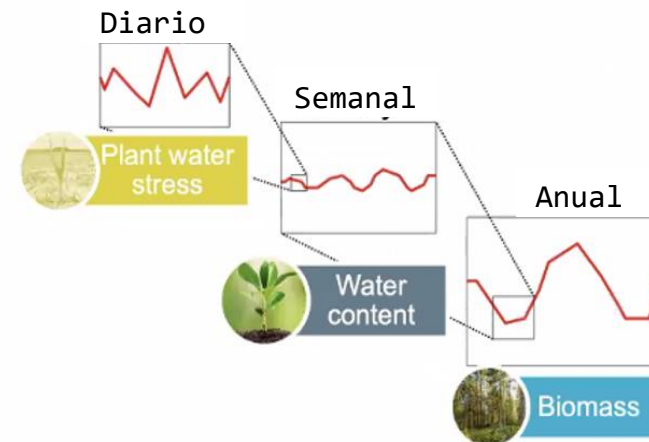
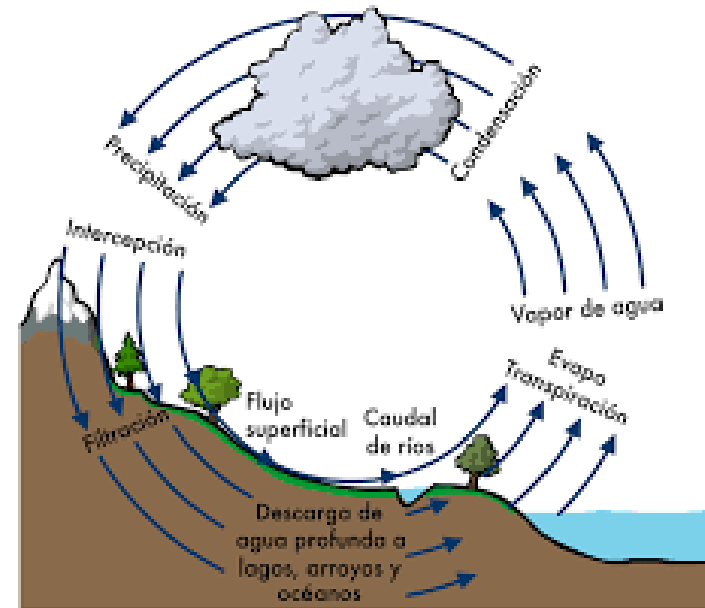


Organización de la presentación

1. Procesos HBFsup. Variables primarias de satélite (4)
2. Mediciones in situ para evaluar límites de aplicación (5)
3. La inteligencia artificial en la cuantificación de procesos (2)
4. Ejemplos de aplicación (14)
5. Discusión de modelos locales y globales (7)

1.-Procesos HBFsup

- Infiltración
- Escurrimiento superficial
- Evapotranspiración ✓
- Intercepción
- Transporte de sedimentos
- Intercambio de energía ✓
- Recarga y descarga de acuíferos ✓
- Erosión deposición



2.-Variables primarias

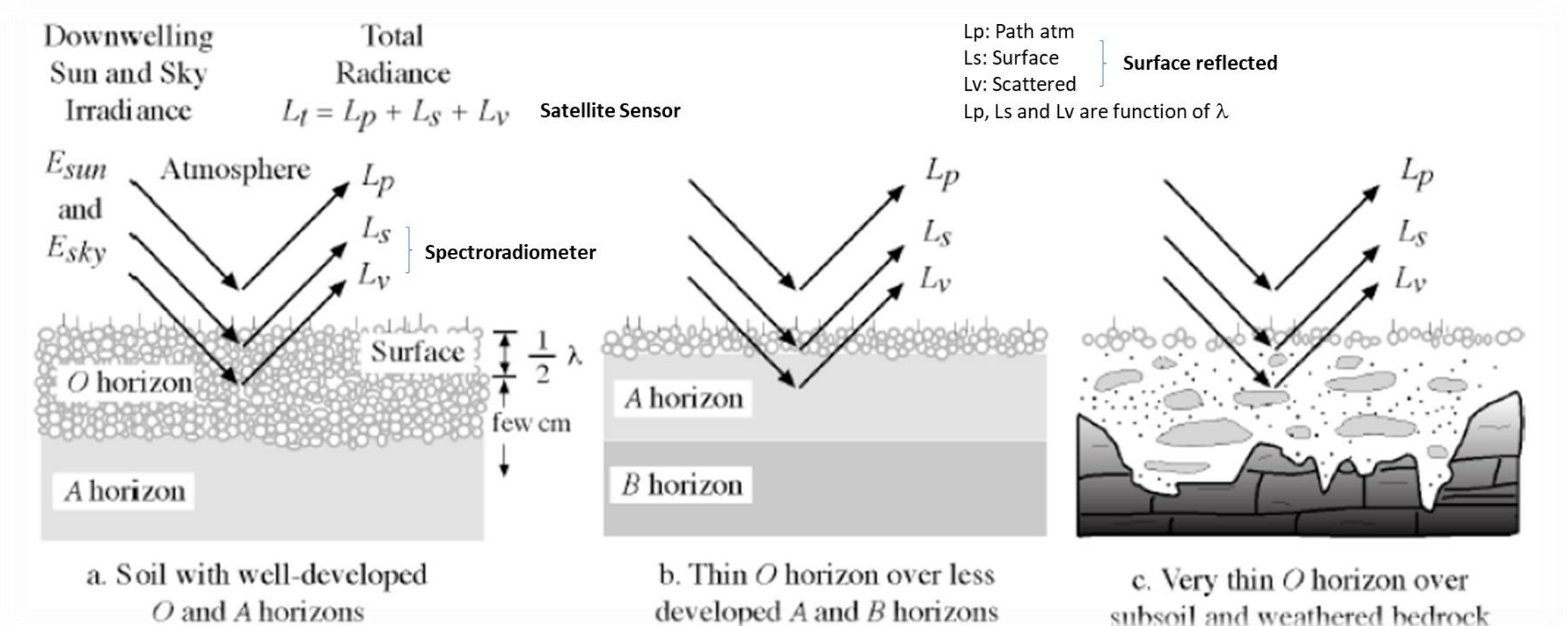
Los sensores a bordo registran

- Los sensores registran valores de radiancia que transformamos en reflectancia (o temperatura de superficie LST).
- El registro del sensor a bordo de una plataforma resulta de la radiación del objeto y de las interacciones con la atmósfera.

Al dato registrado se le debe quitar el efecto atmosférico

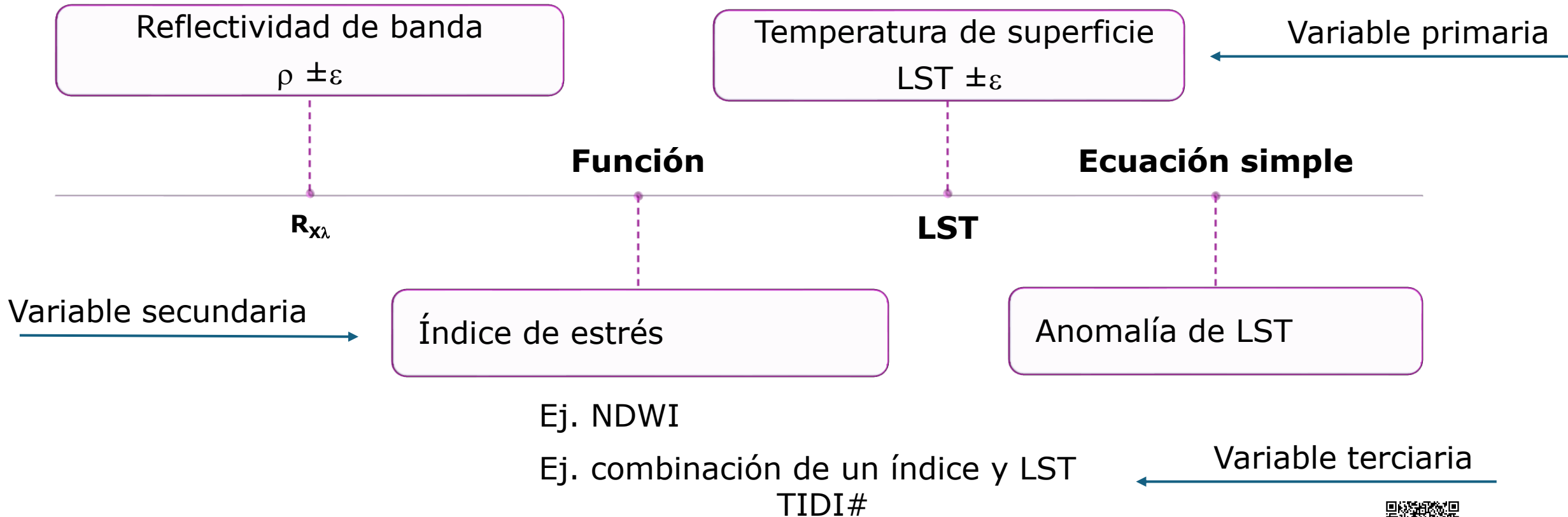
- Conociendo la composición de la atmósfera es posible quitarle el efecto de ésta.
- Quitado el efecto podemos conocer la respuesta real de la superficie
- El efecto de la atmósfera es diferente en cada λ .
- Por ej. cada reflectividad de banda ahora corregida representa la variable primaria.

Registro de un sensor



Tomado de Rivas in Asia Pacific Economic Cooperation, Ago/24: Remote sensing data: application in assessment of soil characteristics

Variables primarias y secundarias



TIDI# <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/17/3371>

24/9/2024

Evaluación de Procesos Hidro-Biofísicos mediante Datos
Satelitales, Raúl Rivas, 24 de septiembre de 2024, UNLP



2.-Mediciones in situ para evaluar procesos estimados desde satélite

- Ej. de instrumentación

Vamos a centrar el análisis en el proceso de flujo de calor latente #LE# (evapotranspiración, 75-85 % de la salida de agua del sistema de llanura)

- LE es un proceso con alta variabilidad espacio tiempo.
- Para una adecuada cuantificación “in situ” es necesario medir del orden de 40 variables (atmósfera a diferentes alturas, superficie y subsuperficial).



Mediciones in situ, cada 10-15 minutos, en una estación de balance de energía (EBE). Detalle de los sensores en <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/10710>

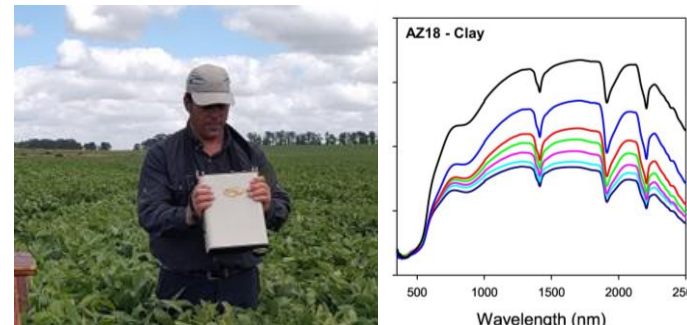


Mediciones in situ puntuales al momento de paso del satélite

- Ej. de campaña

Además de los registros de alta densidad temporal se incorporan medidas para evaluar la precisión de las variables primarias de satélite ($R\lambda$ y LST). Espectro radiómetro de terreno.

- Minutos antes y posterior a la medida instantánea que realiza el sensor a bordo del satélite se hacen transectos en el área de referencia (parcela).
- Las medidas instantáneas combinadas con las de la estación facilita el seguimiento de procesos (ej. Pv, contenido de agua en hoja, humedad de suelo...)

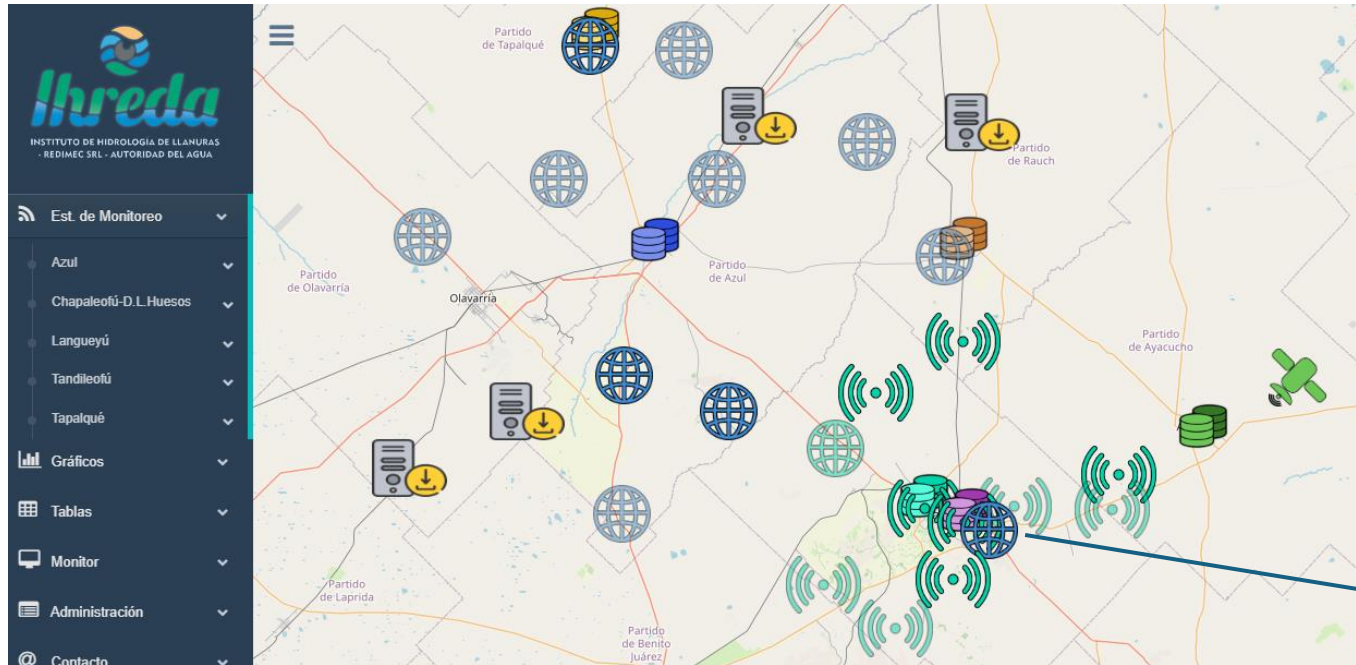


Mediciones in situ con espectro-radiómetro sobre un área homogénea que facilite las comparaciones con medidas de satélite.

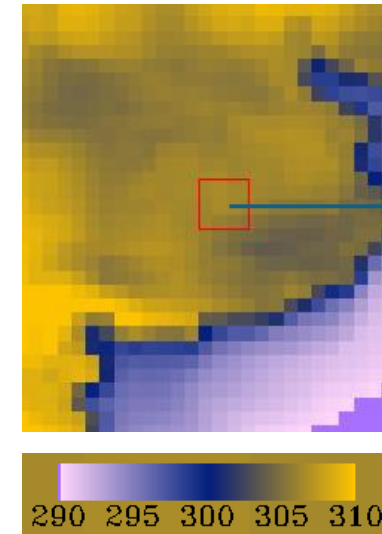


Sensor NAOMI, PeruSat, 1 m.

Usar datos de redes operativas



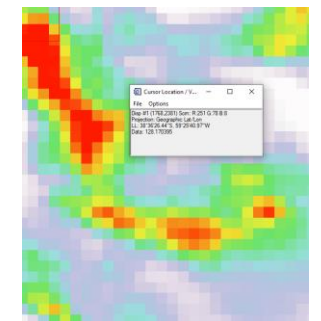
<http://ftp.redimec.com.ar:5080/ihreda/ihreda/webAdmin/home.php>



294,2 K $\pm$ 0,8
(21,05 °C)
La Lucila (EM45)

293,8 K $\pm$ 0,2
(20,8 °C)

Evapotranspiración real
Enero 2020: 128,2 mm $\pm$ 20
Sumatorio día 1 a 31



3.-Cuantificación de procesos con un GLM

Volviendo al flujo de calor latente (ETa)

- En la estación de monitoreo de la parcela con cebada vamos aplicamos un modelo lineal generalizado (GLM).
- En este caso se utilizan los siguientes datos:

Tabla 1
Number, sensor name, variable and brand of sensors installed in the energy balance station.

number of sensor	Sensor	Variable	Brand
1	CNR4	Terms of net radiation	Campbell Scientific Inc
2	CS215	Air temperature (T) and relative humidity (RH)	Campbell Scientific Inc
1	Wind Sonic 2D	Wind speed and direction	Gill Instruments
1	014A	Wind speed	Campbell Scientific Inc
1	HFP01	Soil heat flux	Hukseflux
2	SI-111	Land surface temperature (Tr)	Apogee
3	CS655	Soil moisture and temperature (SM) at 10, 30 and 60 cm depth	Campbell Scientific Inc
1	SoilVUE10	Soil moisture and temperature at 5, 10, 20, 30, 40 and 50 cm depth	Campbell Scientific Inc
2	NR / NI	Surface reflectance in Red and NIR to calculate the NDVI	Decagon
1	TE252MM	Rainfall	Global Water

En el modelo se consideraron las variables de mayor peso*

- La expresión matemática es:

$$Y_i = link\left(\beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_{ij}\right)$$

- El valor de ETa (mm día⁻¹) se calcula como termino residual de un balance de agua (BA) y de las características fenológicas de la cebada.

* Estimation of actual evapotranspiration in barley crop through a generalized linear model, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101665>



Ajuste de los parámetros del GML

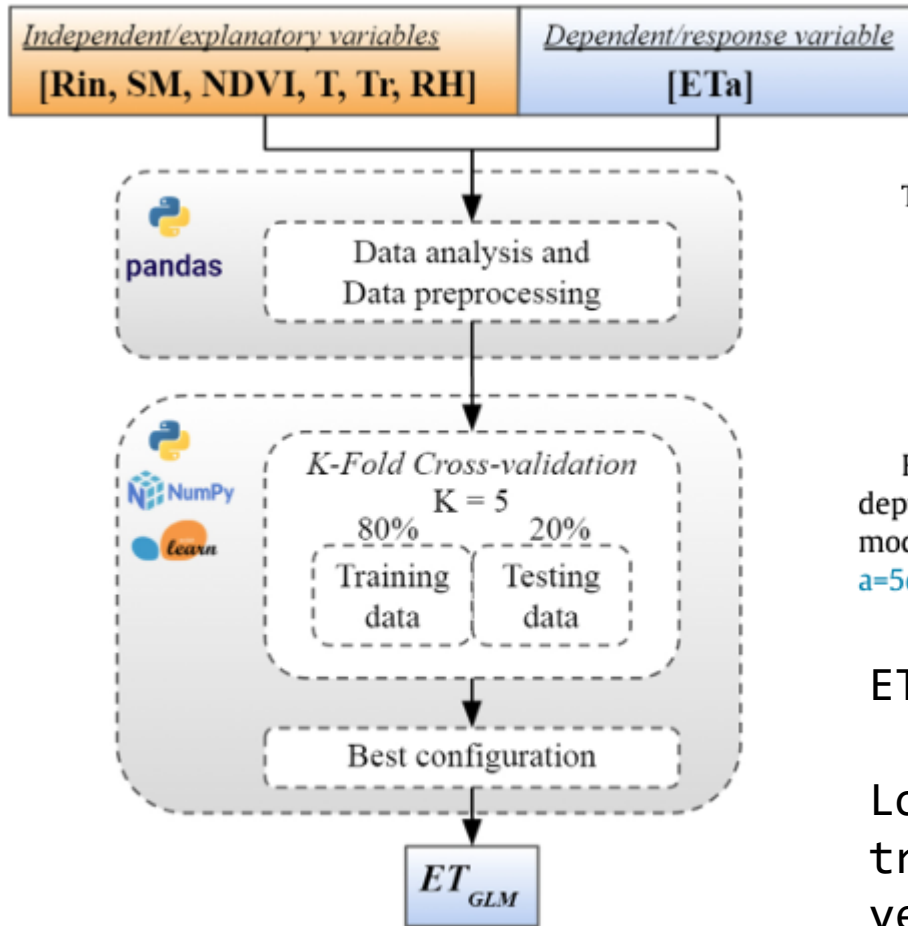


Fig. 1. Flowchart of ET_{GLM} model.

Parámetros de la función ajustada

Thus, with a total of 189 measurements, the model (mod) was obtained:

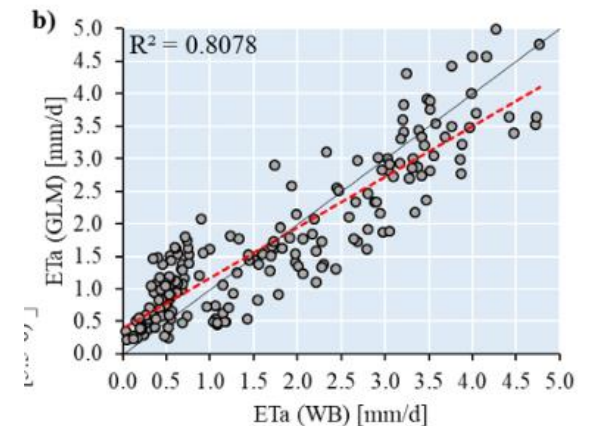
$$\text{mod} = (-4.004) + (8.4359 \times \text{SM}) + (2.2935 \times \text{NDVI}) + (0.6172 \times T) + (0.0926 \times \text{Rin}) + (-0.5486 \times \text{Tr}) + (-0.0227 \times \text{RH}) \quad (3)$$

$$ETa = e^{(\text{mod})} \quad (4)$$

Rin, NDVI, T, RH and Tr were measured at 2 m height while SM was measured at 20 cm depth. It should be noted that the algorithm randomly uses the data to adjust and validate the model. The used data are included in the link https://data.mendeley.com/datasets/77r6w44xbp/draft?_a=5d9be36a-ae9a-4c9f-b526-121d1d37b6ebXX

$$ETa = \text{error} \pm 0,557 \text{ mm día}^{-1}$$

Los datos para reproducir el trabajo son de libre acceso, ver el link de arriba.



4.-NIR-SWIR y LST: desarrollo de TIDI*

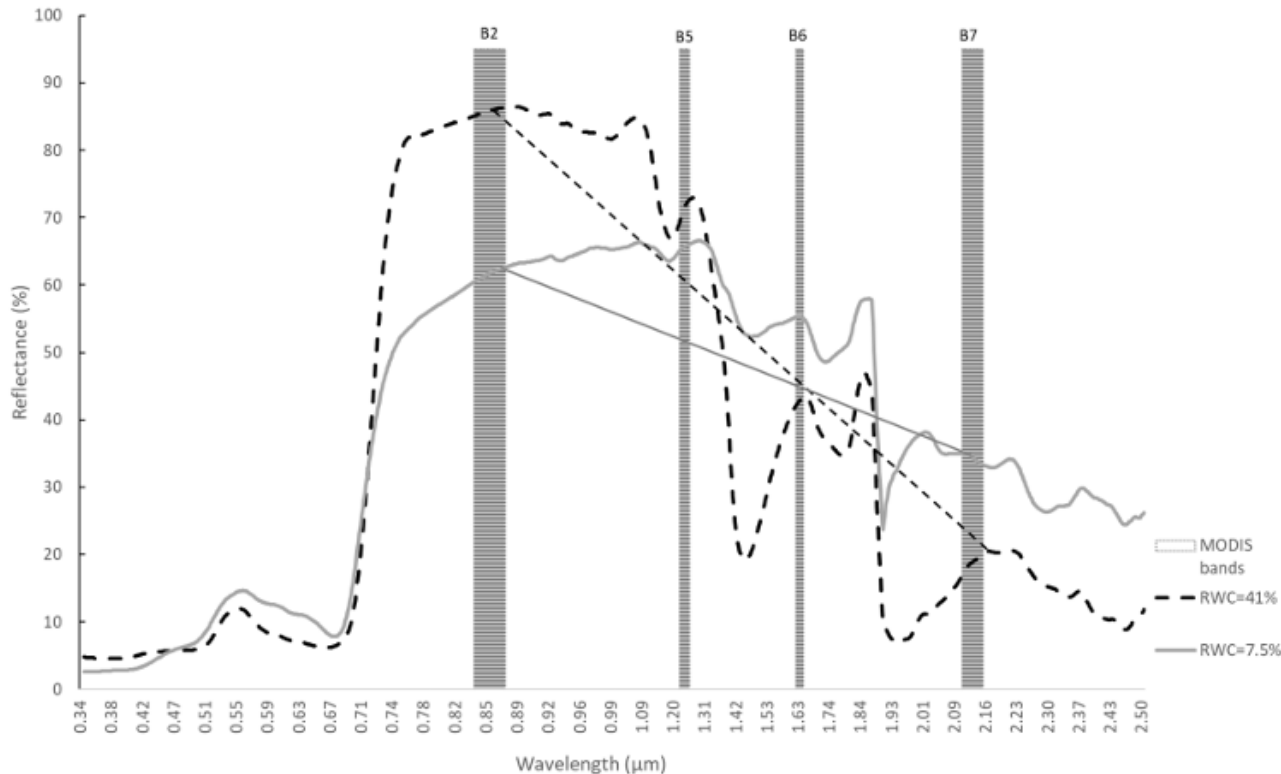


Figure 1. Spectral reflectance measured in the laboratory using spectrometer SVC HR-1024i from soybean leaves with two different values of relative water content. Straight lines show the difference between NIR and SWIR reflectances (in this case, bands centered at 0.86 and 2.13 μm , respectively), which rise with increasing leaf water content. As an example, bands of MODIS sensor in NIR and SWIR (bands 2, 5, 6, and 7) are included.

Partiendo de la idea que la LST informa datos volumétricos del sistema suelo-agua-planta (en un instante dado) es que se desarrolla el TIDI.

Podemos ver que en el sector del espectroelectromagnético NIR – SWIR presenta un comportamiento diferencial en el contenido relativo de agua.

El desarrollo lo hicimos con datos de dos zonas de la región pampeana (estaciones La Ydalina $35^{\circ}09\text{S}, 61^{\circ}07\text{W}$ y La Campana $37^{\circ}17\text{S}, 58^{\circ}56\text{W}$).

* <https://doi.org/10.3390/rs13173371>



Modelo conceptual*

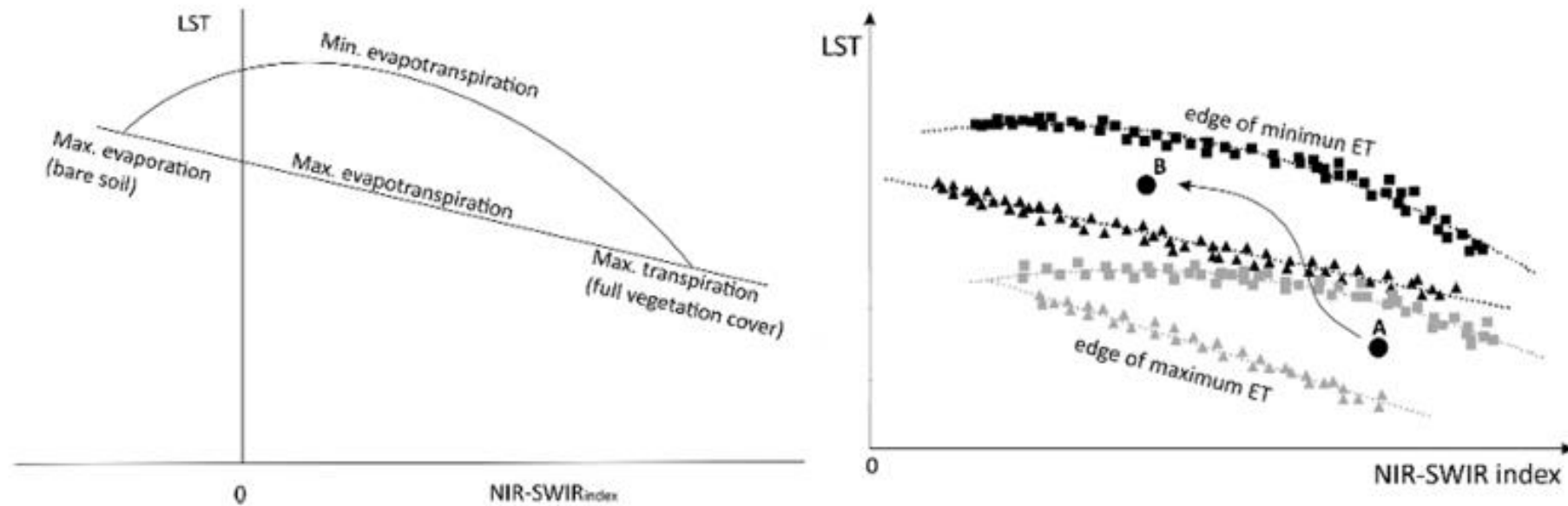


Figure 3. (left) general conceptual model of the NIR-SWIR/LST relationship (see $\text{NIR} - \text{SWIR}_{\text{index}}$ in Equation (3)). (right) Interpretation of remotely sensed LST/NIR-SWIR scatterplot using two examples of daily MODIS/Aqua data for the study area ($\text{EVI} > 0.3$). Triangles (rectangles) indicate edges of maximum (minimum) evapotranspiration (ET), and hence, water availability in the soil-plant system. The TIDI for a given pixel (e.g., A or B) is based on the distance to the edges. A path from A to B is suggested as a drying process for a given pixel. Grey: edges for a widespread wet condition, black: edges for a dry condition.

* [https://doi.org/ 10.3390/rs13173371](https://doi.org/10.3390/rs13173371)

Ecuación operativa* y metodología

$$TIDI = \frac{LST - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} = \frac{LST - a_1(NIR - SWIR_{\text{index}}) + b_1}{\left[a_2(NIR - SWIR_{\text{index}})^2 + b_2(NIR - SWIR_{\text{index}}) + c_2 \right] - (a_1(NIR - SWIR_{\text{index}}) + b_1)} \quad (4)$$

TIDI (Temperature-Infrared Dryness Index)

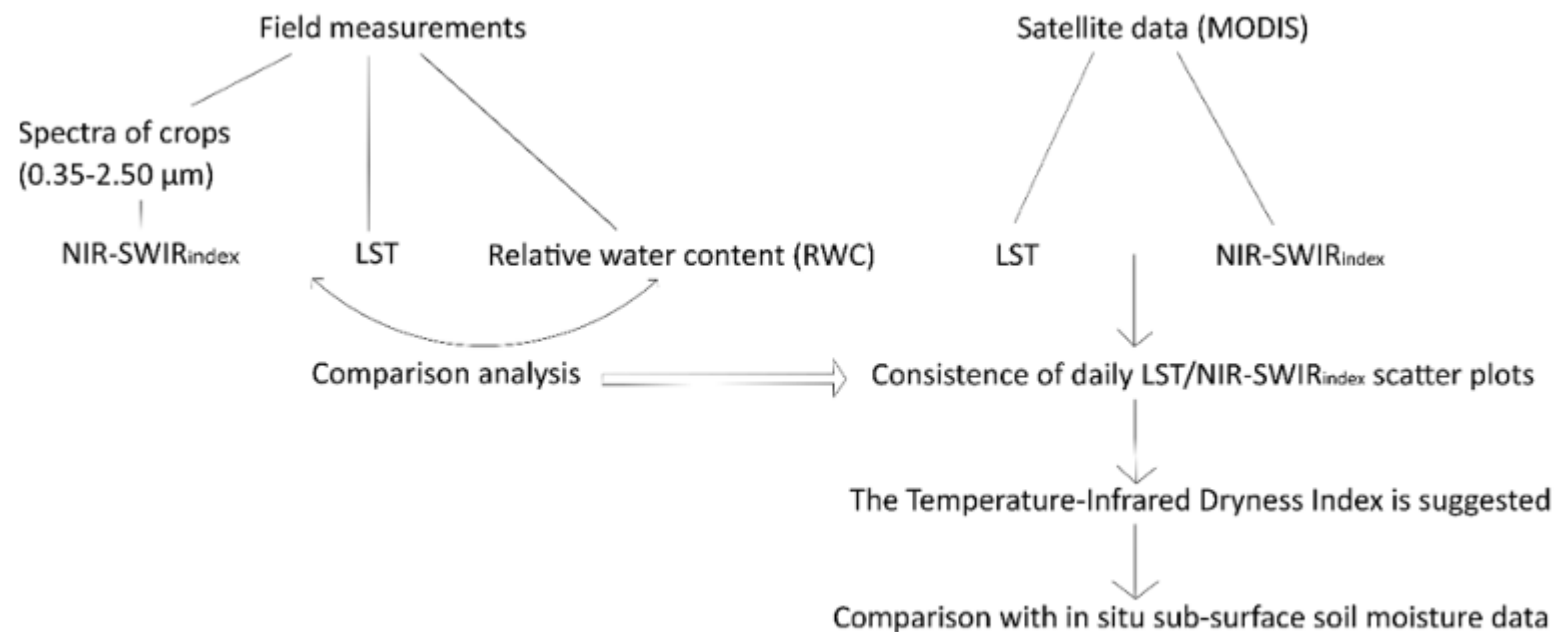


Figure 4. Flowchart of the applied method using in situ and satellite data.

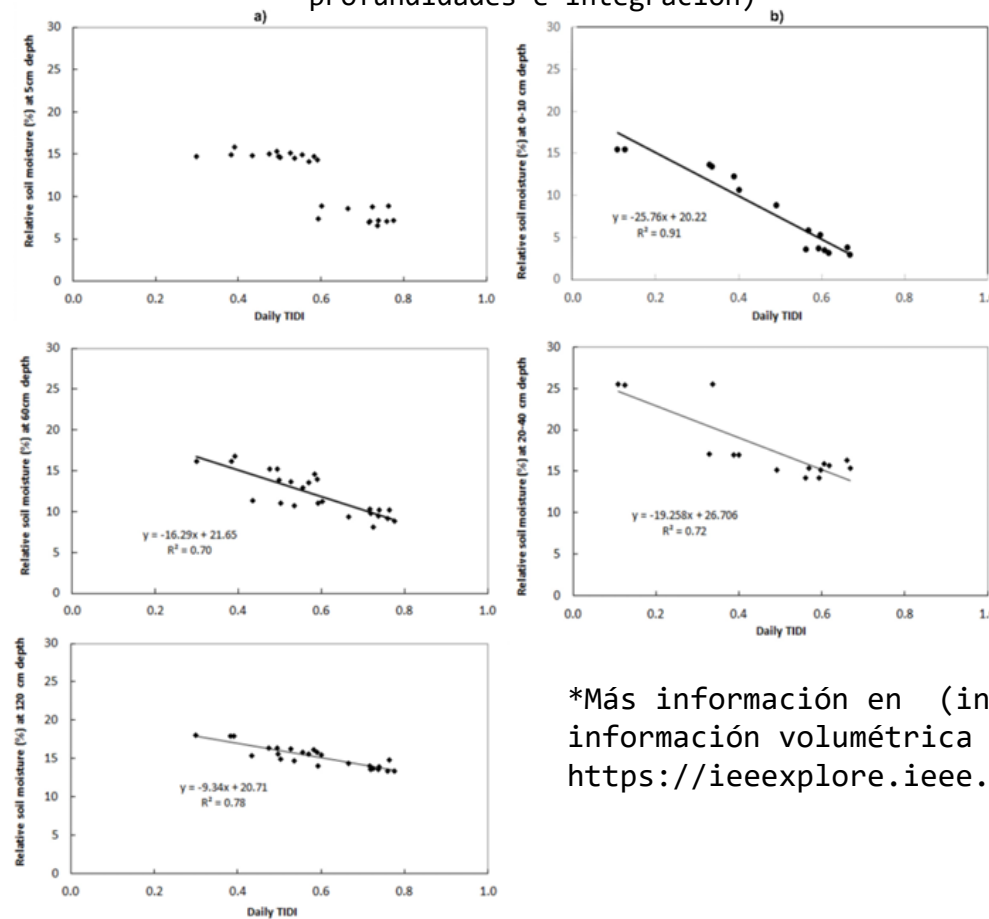
* [https://doi.org/ 10.3390/rs13173371](https://doi.org/10.3390/rs13173371)

TIDI* - SM

Ojo al mirar la Figura a y b (humedades a diferentes profundidades e integración)

En suelo arenoso

En suelo arcilloso*



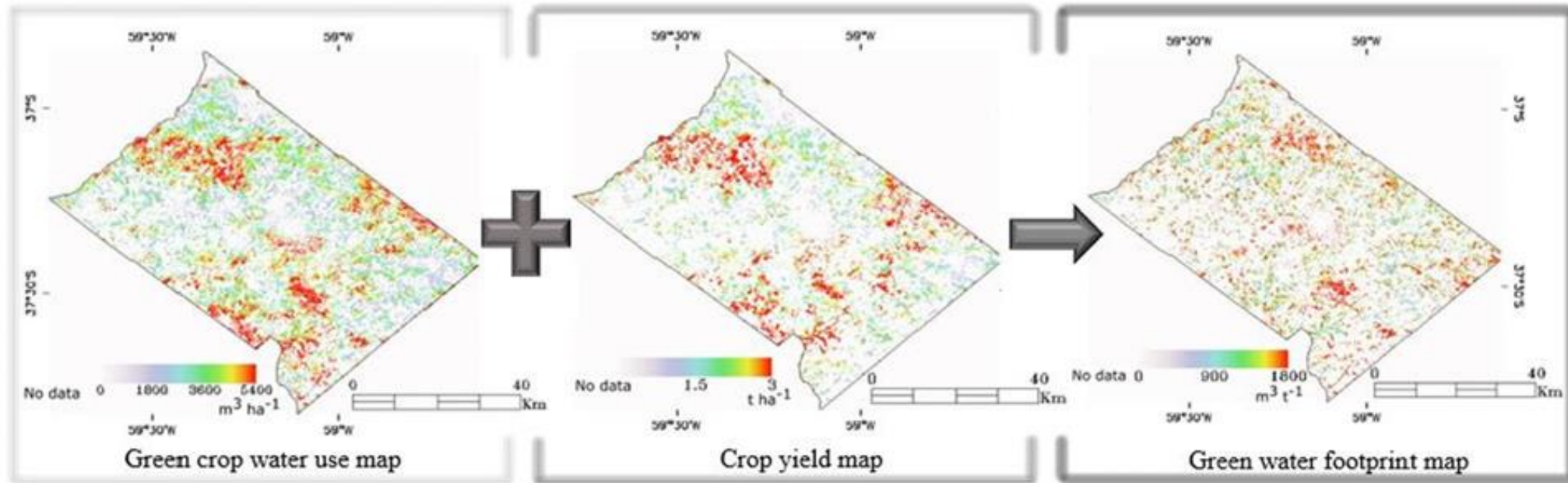
*Más información en (incluye descripción de información volumétrica de la LST)
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6803861>

* <https://doi.org/10.3390/rs13173371>



24/9/2024

Evaluación de Procesos Hidro-Biofísicos mediante Datos
 Satelitales, Raúl Rivas, 24 de septiembre de 2024, UNLP



4.-Estimación de HH_v con SR

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142963>



HHv método sustentado en SR

- Nueva propuesta con SR
- Usa datos de SR de resolución media
- Utiliza un modelo de rendimiento desarrollado en Arg.

$$EF = 1 - TVDI$$

$$TVDI = (Ts - Ts_{min}) / (a + b \cdot NDVI - Ts_{min})$$

Aquí es Tsmin, ojo

Indicador de humedad del suelo

$$Y = C_1(TVDI)^2 + C_2 TVDI + C_3$$

Rendimiento (Y) es función de la humedad del suelo dependiente de parámetros (Ci) propios del cultivo

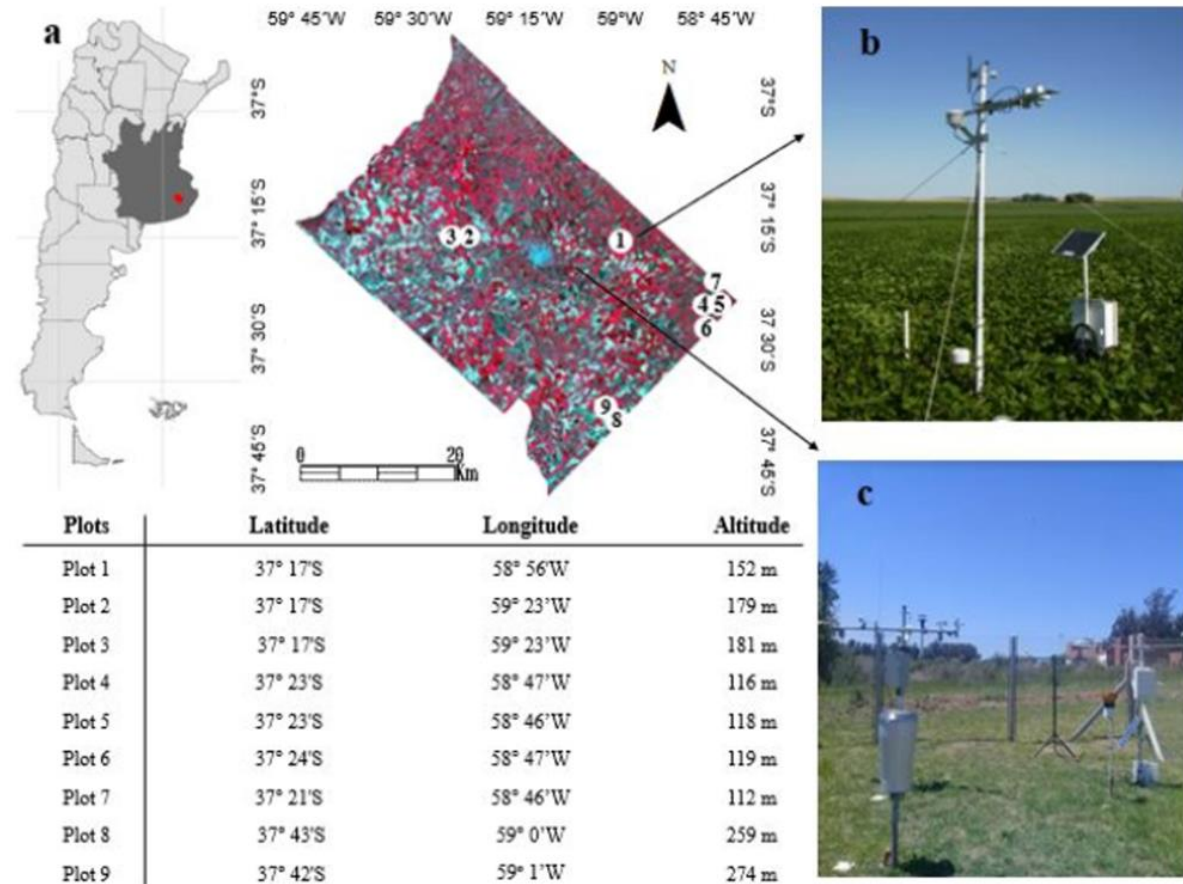


Fig. 1. a. Location of Tandil county in Southeast of Argentine Pampas, (Landsat 8-Operational Land Imager, 04/01/2015, RGB 543); b. Soybean plot located in "La Campana", where the energy balance station (EBS₁) was installed for field measurements; c. Energy balance station located on reference cover (EBS₂).

Diagrama metodológico

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142963>

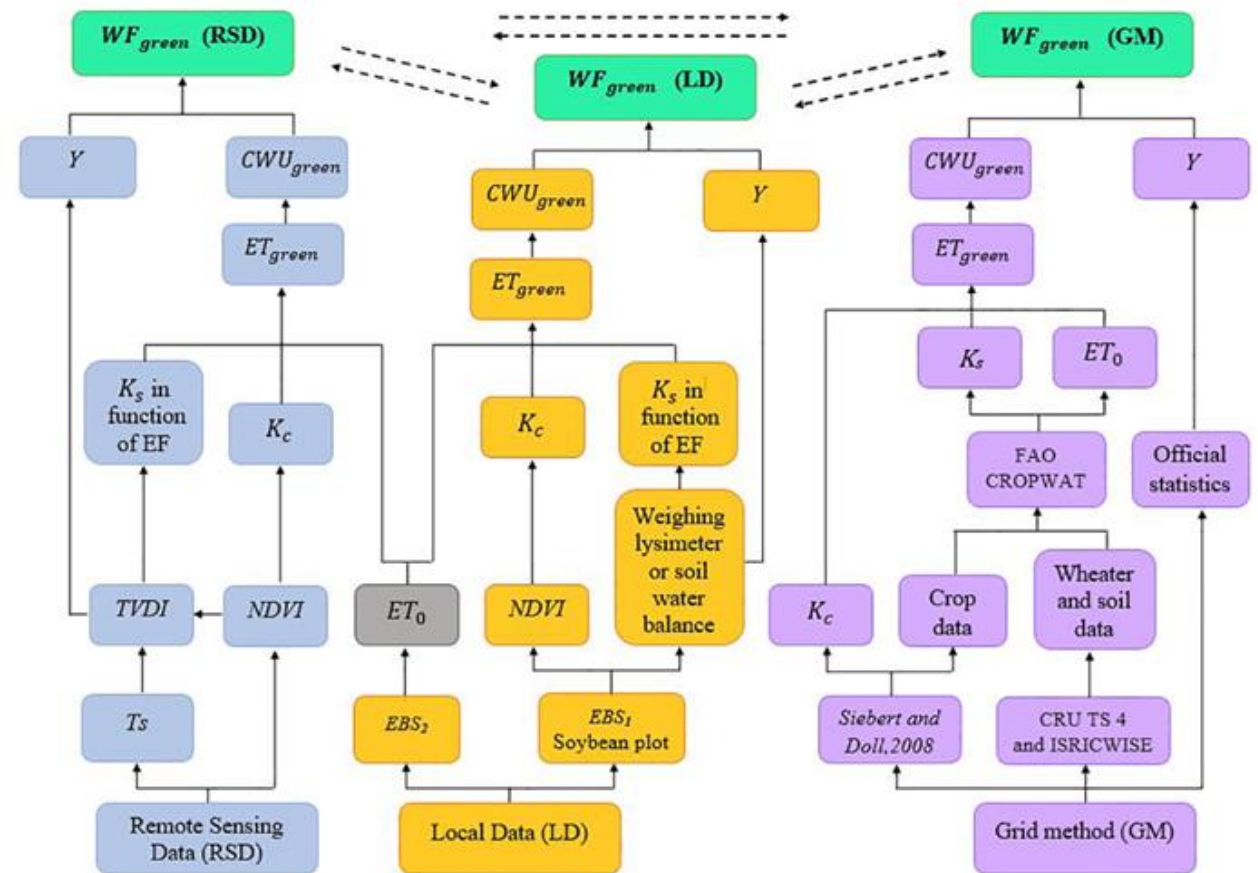


Fig. 2. Methodological diagram, which includes the three WF_{green} estimates: local data (orange), the proposed approach based on remote sensing data (blue), and grid method (purple). ET_0 (grey) was obtained from local measurements recorded in ESB_2 and was used as input data for WF_{green} estimates in the soybean plot and at county scale. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Medidos versus satélite

Table 2
Comparison between the traditional grid method, field measurements and the proposed approach based on satellite data.

Plots	Method						Analysis period
	Field measurements		Grid method		Satellite data method		
	WF _{green} ^a	Spatial Resolution	WF _{green} ^b	Spatial Resolution	WF _{green}	Spatial resolution	
	(m ³ t ⁻¹)		(m ³ t ⁻¹)		(m)		
Plot 1 ("La Campana")	1645	Soybean plot ^d	2376	10,000	1762	250	138 (Soybean growth period)
Plot 2	1855		2230		1081		
Plot 3	1877		2230		1124		
Plot 4	1893		2250		1297		
Plot 5	1562		2250		1069		
Plot 6	1541		2250		1055		
Plot 7	1500		2250		1219		
Plot 8	1523		2171		1315		
Plot 9	1653		2200		1420		
Average	1670		2245		1260		
RMSE (m ³ t ⁻¹)			597		494		
Bias (m ³ t ⁻¹)			575		−410		

CWU was estimated by applying the following ET_{green} calculation equations:

^a $ET_{green} = EF_{(wt \text{ or } wsb)}(1.46 NDVI - 0.17)ET_0$. In plot 1, EF is calculated with a weighing lysimeter. In the other plots, a soil water balance was conducted using the CROPWAT model.

^b $ET_{green} = K_s K_c ET_0$

^c $ET_{green} = (1 - TDVI)(1.46 NDVI - 0.17)ET_0$

^d Average plot area 80 ha



Recomiendo ver HHg <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/24/3558>

4.-Modelo predictivo de NF

- Los datos SPEI modelados se correlacionaron con la profundidad del nivel freático (WT) utilizando el método de Pearson.
- Laboulaye (LAB), Arias, General Pico (GP), Azul, Dolores (DOL), Junín y Barrow
- Desarrollo de un modelo.
- Validado con datos de SR.

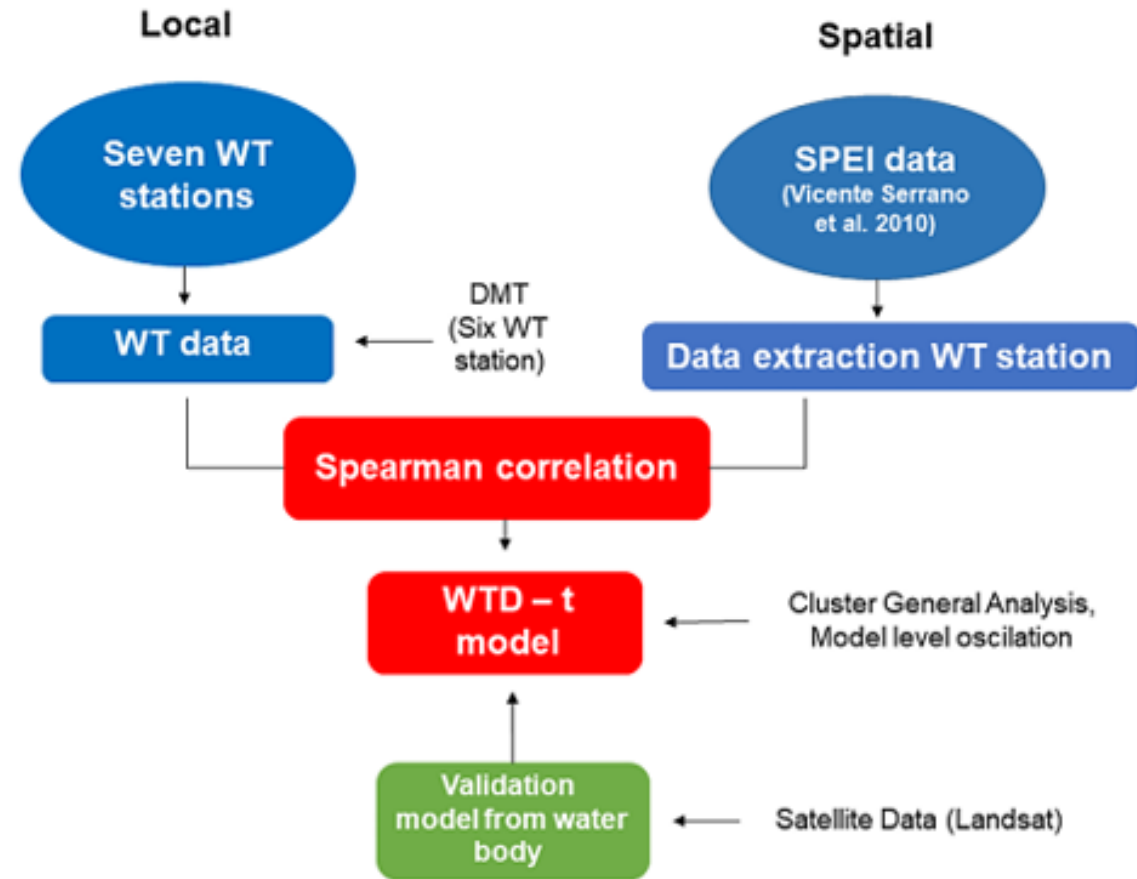


Fig. 3 Flow chart which synthetizes the methodological steps. *DMT* double mass technique, *WT* water table, *SPEI* Standard Precipitation Evapotranspiration Index, *WTD* water table depth, *t* time

Modelo planteado

- El tiempo (meses) y su respuesta en función del nivel freático (Figura de la derecha)
- Las estaciones el punto de inflexión (mínimo de la función cóncava para arriba) define el comportamiento del sistema.
- El SPEI tiene buena respuesta porque a la resolución temporal usada dominan los procesos verticales por encima de los horizontales.
- La validación con área cubierta de agua en superficie es un adecuado indicador de los períodos secos y húmedos (número de cuerpos de agua).

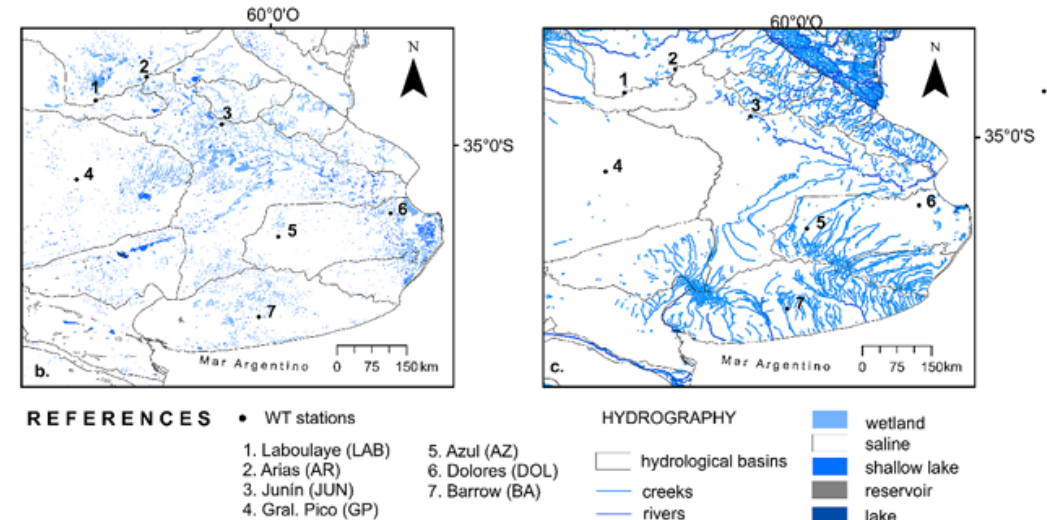
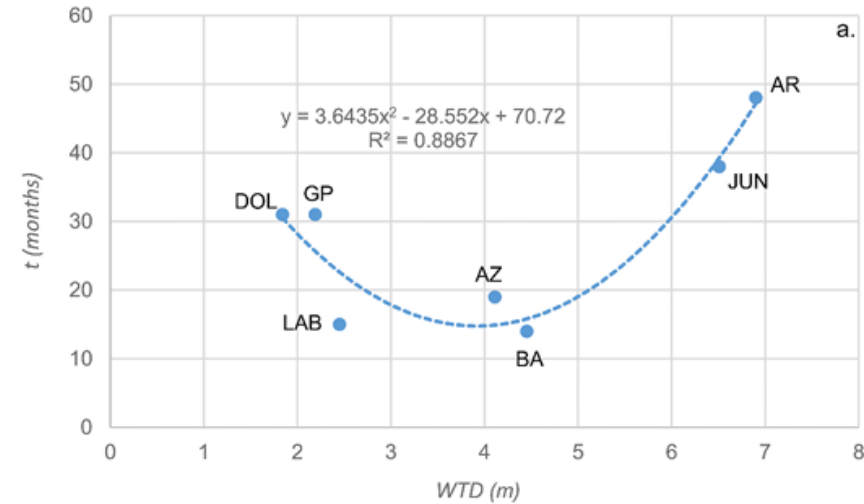


Fig. 7 a Statistically significant connection between WTD response times (t) and SPEI in stations located in APR (Argentina): DOL (Dolores), GP (Gral. Pico), LAB (Laboulaye), AZ (Azul), BA (Barrow), JUN (Junín) and AR (Arias). Stations are located in relation to: b ephemeral and permanent water bodies (IGN database) and c ephemeral and permanent rivers (IGN database)

<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-020-09210-0>

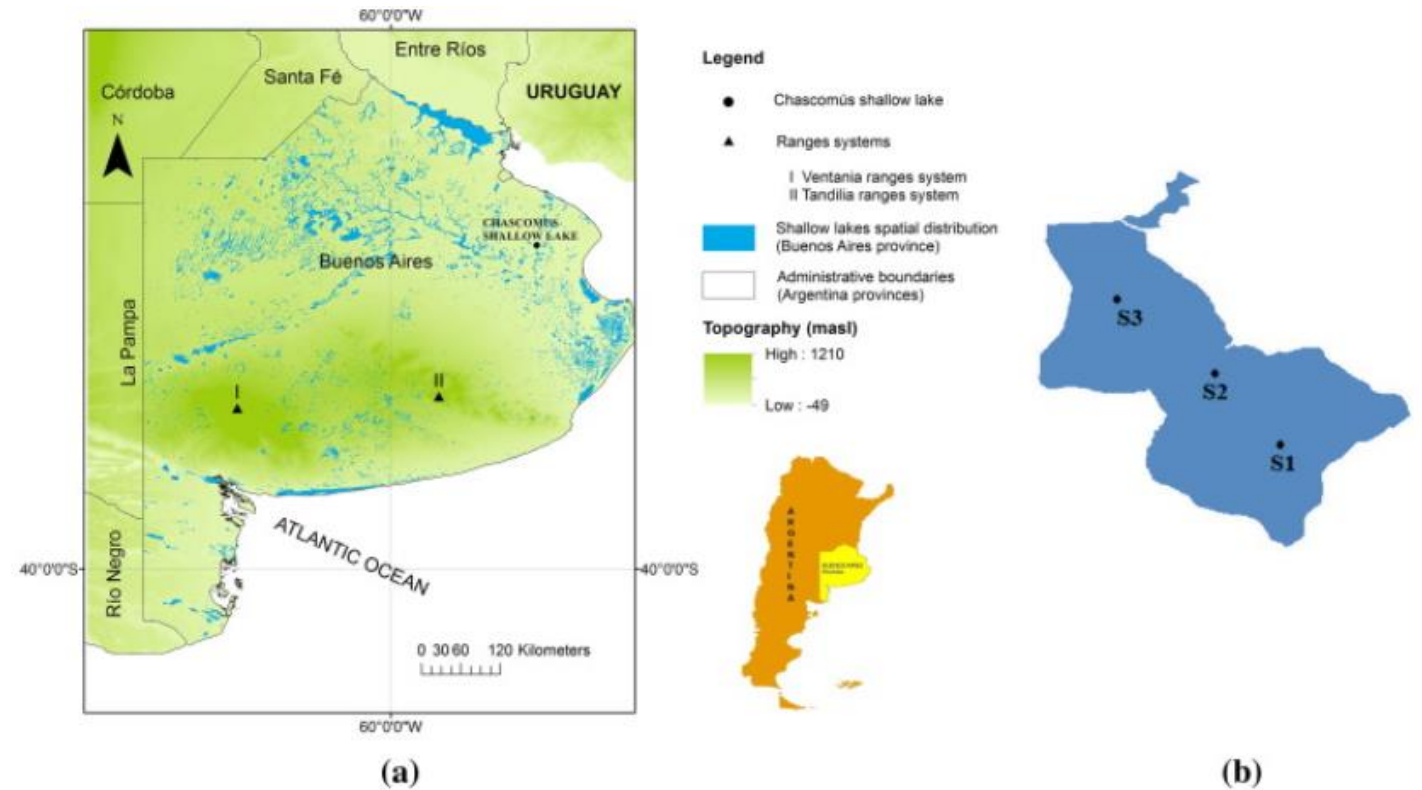
4.-Estimación de Cha y profundidad en lagunas*

Desarrollo de una función lineal basado en imágenes de satélite y mediciones de terreno (2001-2011). Usando la b4 se lograron las mejores correlaciones.

*<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.04.005>



Sistema hidrológico y localización de los puntos de control

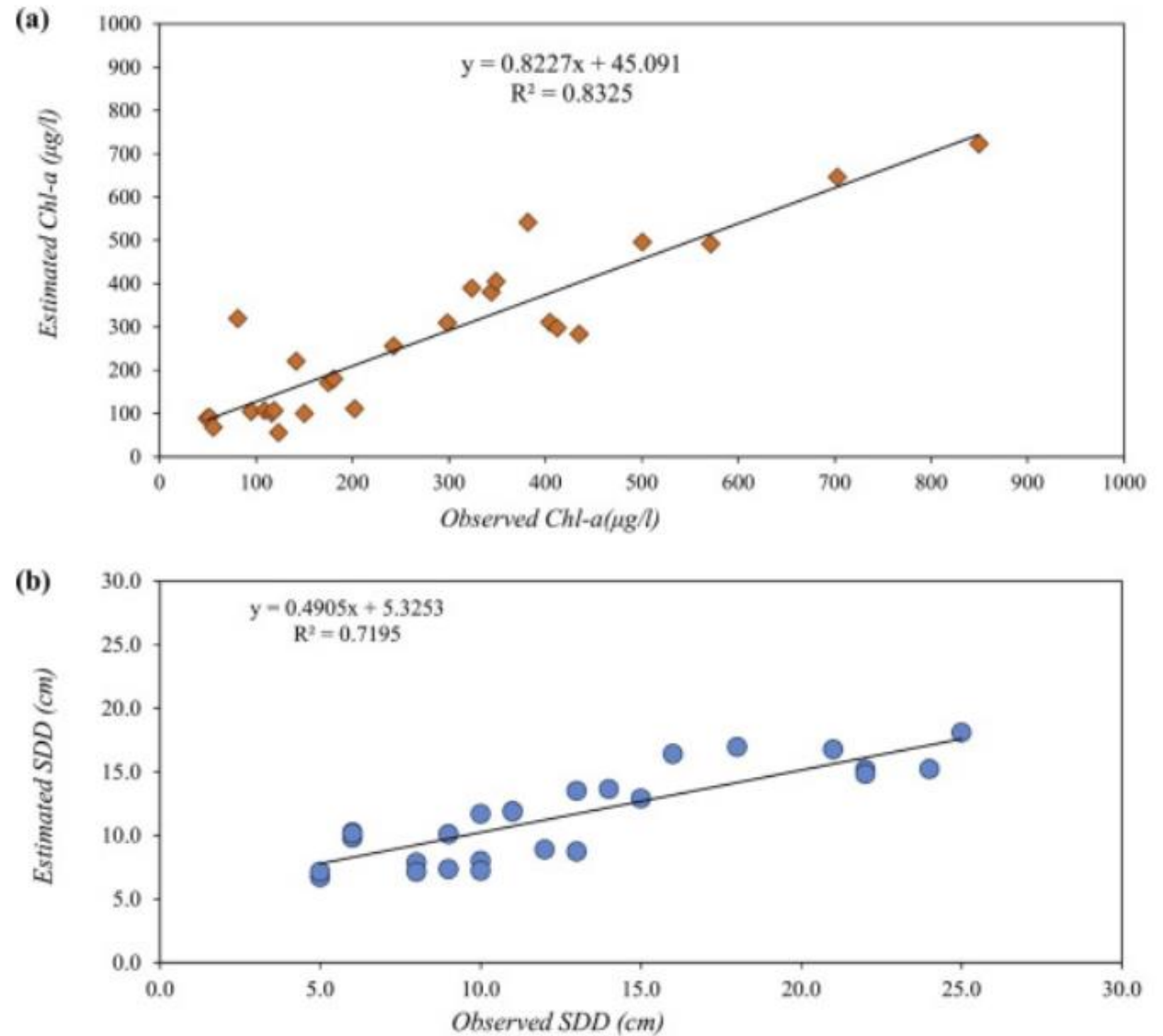


Ajustes logrados y error

$$\ln(Chl - a) = 6.317NDVI + 5.022 \quad \pm 83 \text{ } \mu\text{g/l}$$

$$\ln(SDD) = -15.204\rho_4 + 3.333 \quad \pm 3.70 \text{ cm}$$

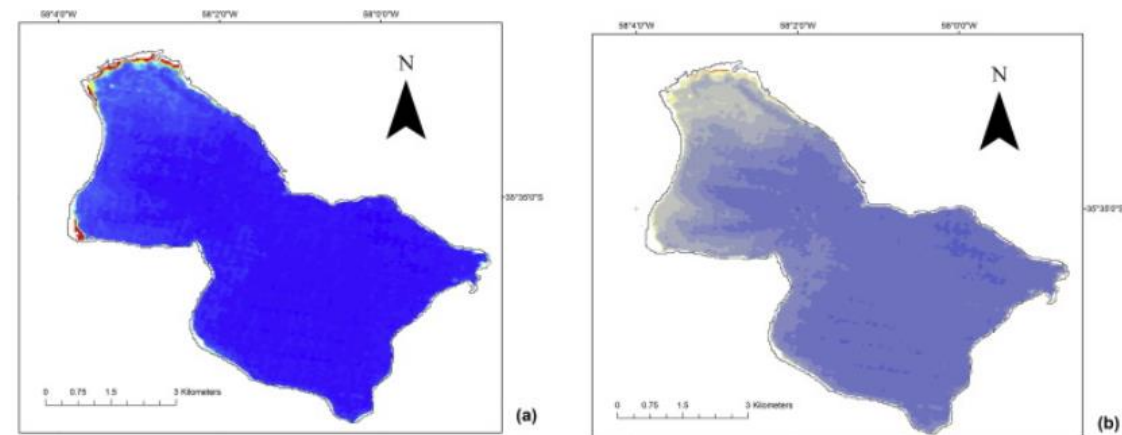
Valoración de resultados



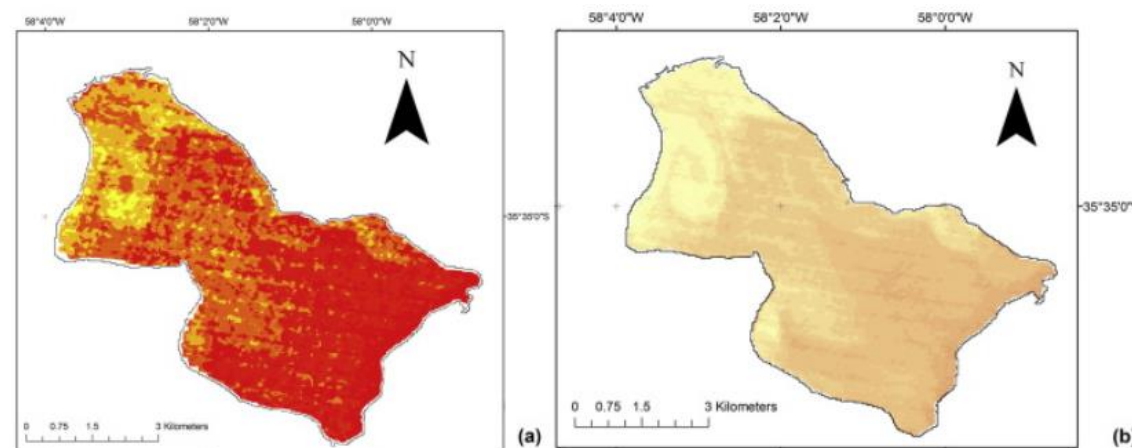
Mapas logrados usando las funciones ajustadas



<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.04.005>



Baja turbiedad



Alta turbiedad

Tabla 3: Estadísticos asociados a los productos de ET real.

Producto	Número de datos	RMSE [mm d ⁻¹]	MAE [mm d ⁻¹]	R ²	Me [mm d ⁻¹]	RSD [mm d ⁻¹]	NSE
TerraClimate	399	1.2	0.9	0.6	0.8	0.5	-1.7
MOD16A2	1722	0.8	0.6	0.6	0.6	0.3	0.4
SVR	97161	0.6	0.4	0.67	0.9	0.5	0.66

En la región pampeana argentina (RPA), <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revista-asagai/article/view/46156>



Modelos globales y regionales de ET

- Los modelos de aplicación global de ET (G) tienden a dar errores significativos mientras que, los ajustados (usando IA) locales responden mejor (ej. en ET(pot-real) $G > 0,8 - 1,2 \text{ mm día}^{-1}$ y $L < 0,4 - 0,6 \text{ mm día}^{-1}$). La Tabla 3 muestra resultados usando datos de la plataforma climate engine y un ajuste Support Vector Machine Regression (SVR) algorithm .

5.-Discusión final

Los modelos globales tienen errores que en ocasiones pueden ser corregidos haciendo valoraciones locales. También es importante considerar las condiciones del sistema (suelo planta atmósfera) en el que se desarrolló el modelo. Siempre es importante tener presente la resolución temporal de los procesos y de los productos de satélite.

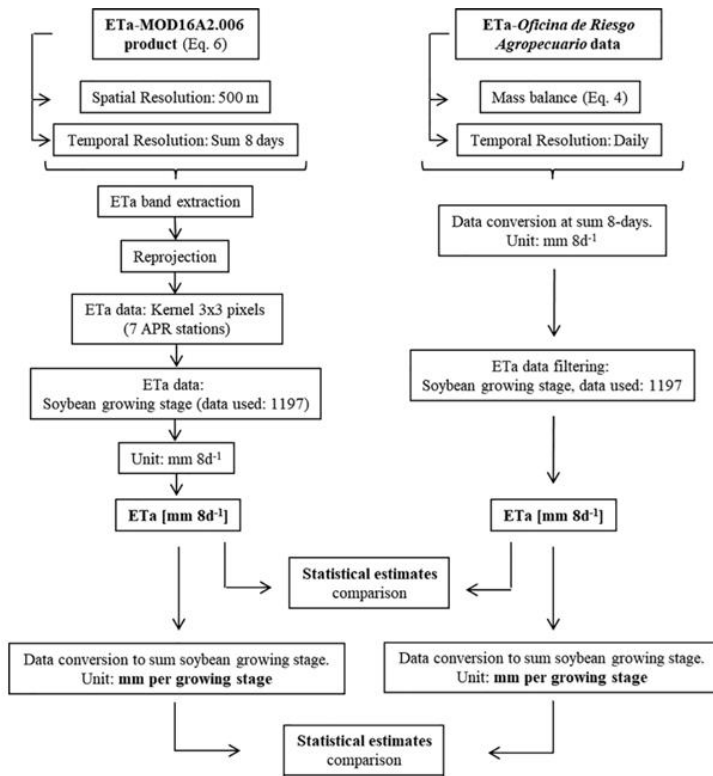


Fig. 5. Applied methodology flowchart for ETa.

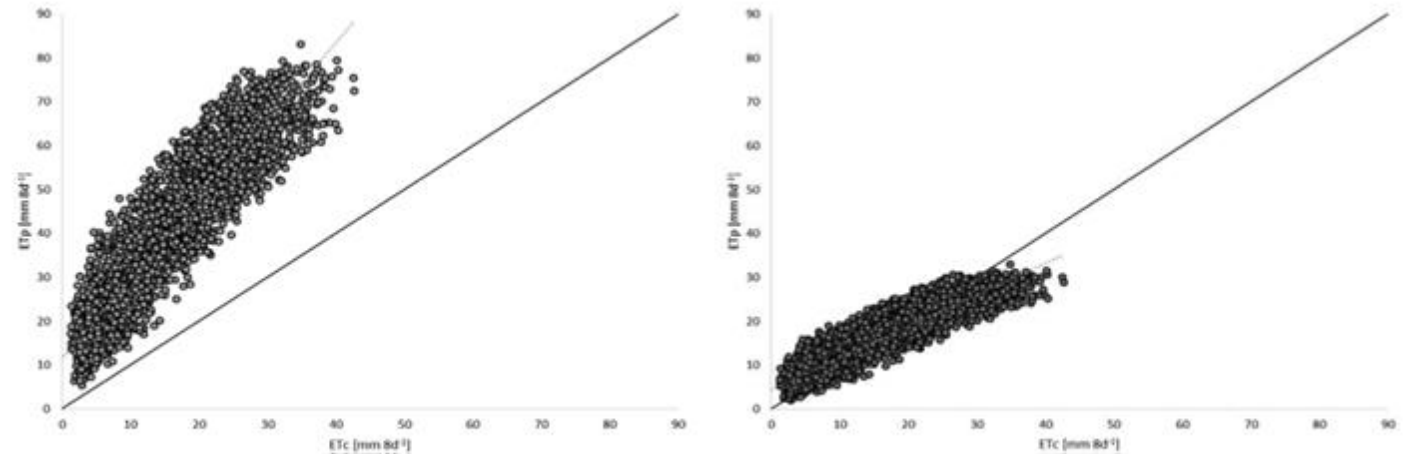


Fig. 6. Original $ETc_{(ORA)}$ vs $ETp_{(MOD16A2.006)}$ (left) Corrected $ETc_{(ORA)}$ vs $ETp_{(MOD16A2.006)}$ (right). Black line: 1:1 line.

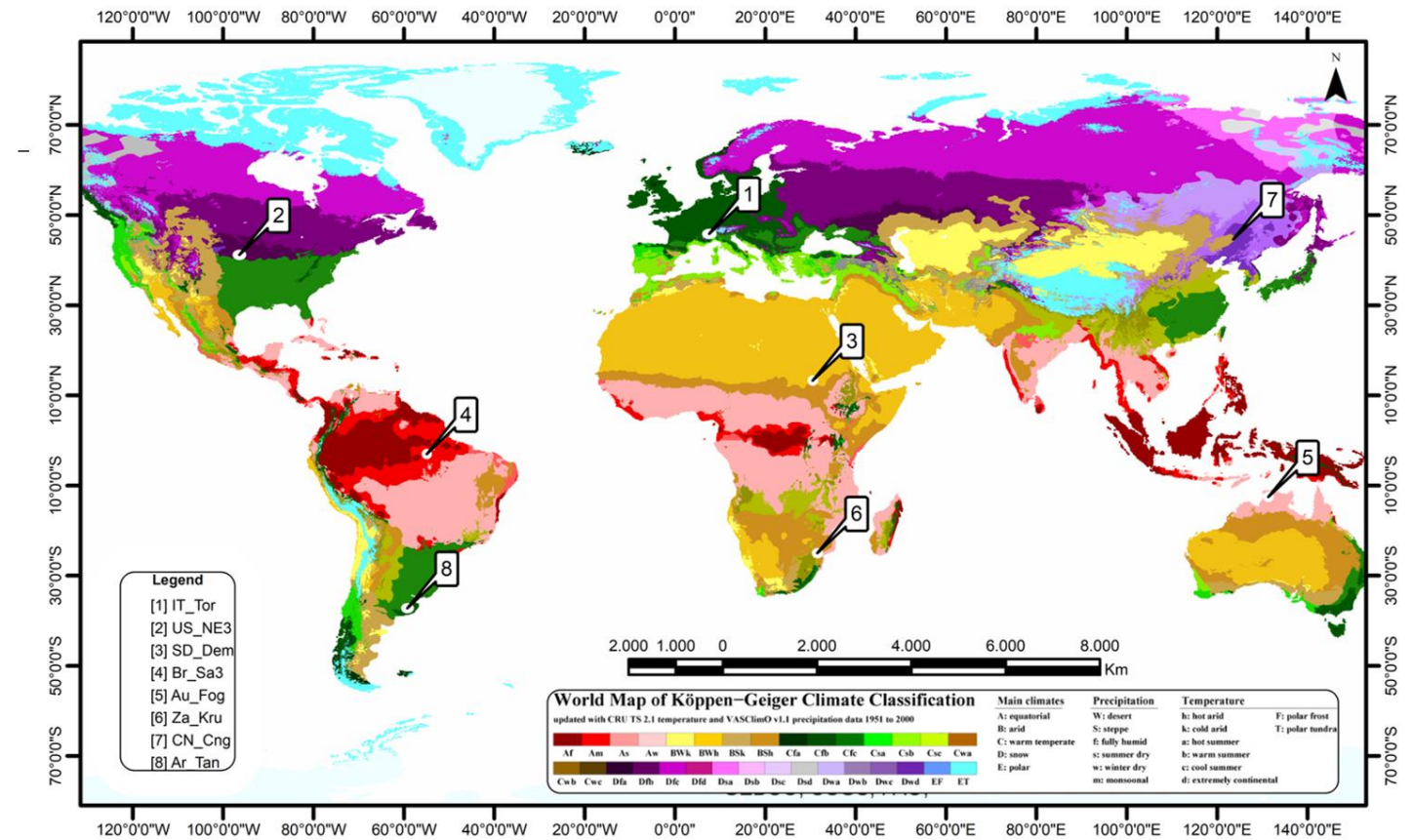
Producto MOD16A.2

- Datos de ETa (real) del product versus medidas in situ en nuestra region y corregidos para su uso.

<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.08.004>



Comparación MOD16 en 8 regiones



Comparación entre medidas

Crédito Degano 2020. Tesis doctoral.

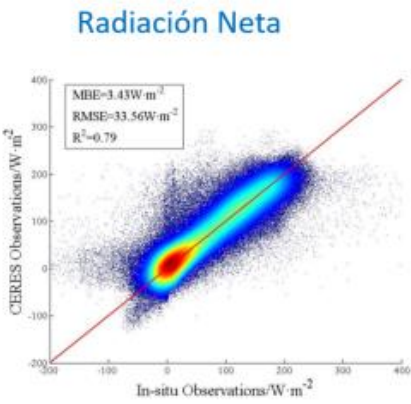
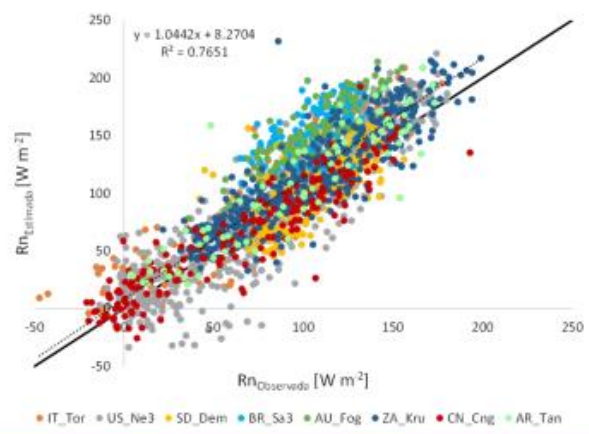
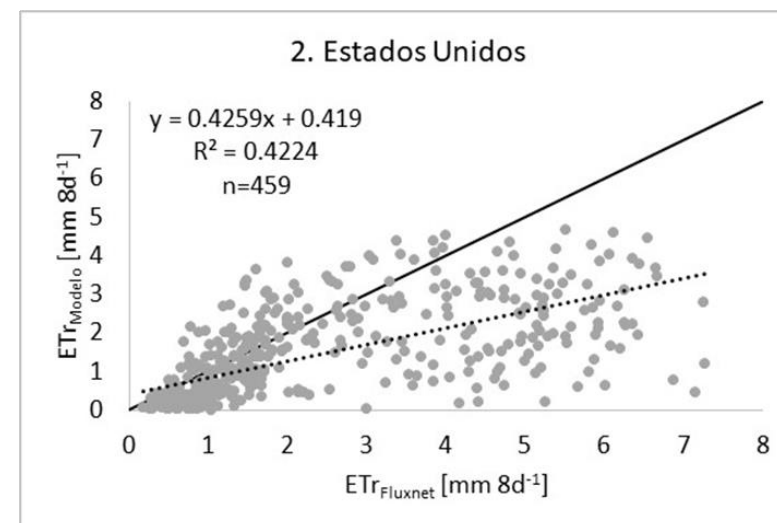
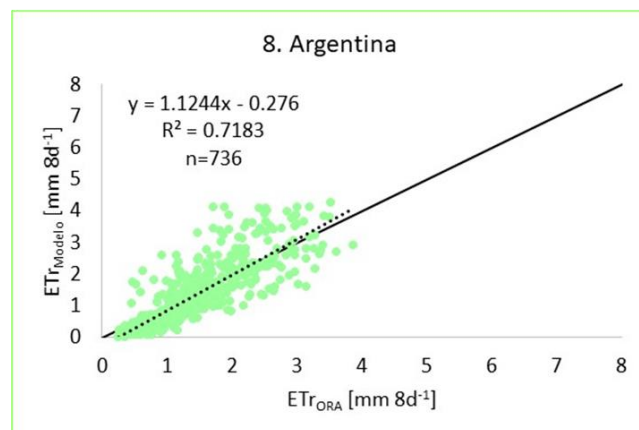
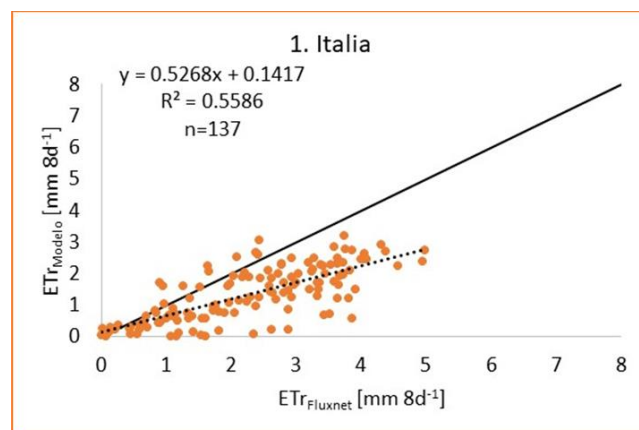


Figure 3. Density of scatter plot of the CERES and *in situ* daily samples.
Observaciones tomadas en 340 sitios (Jia, *et al.*, 2016)



RMSE [W m ⁻²]	MBE [W m ⁻²]	MAE [W m ⁻²]	Me [W m ⁻²]	RSD [W m ⁻²]	R ²	a	b [W m ⁻²]
23	12	17	12	16	0,8	1,0	8,2

ETa in situ y con MOD16.A2



Estadísticos	01. It_Tor	08. AR_Tan
Periodo	2008-2013	2001-2013
RMSE [mm d ⁻¹]	1,2	1,1
MBE [mm d ⁻¹]	-0,9	0,3
MAE [mm d ⁻¹]	1,0	0,7
Me [mm d ⁻¹]	-1,0	-0,1
RSD [mm d ⁻¹]	0,5	0,6
R-RMSE [mm d ⁻¹]	1,1	0,6
R ²	0,56	0,72
a	0,5	1,1
b [mm d ⁻¹]	0,1	-0,3

Estadísticos	02. US_NE3
Periodo	2001-2013
RMSE [mm d ⁻¹]	1,7
MBE [mm d ⁻¹]	-0,9
MAE [mm d ⁻¹]	1,1
Me [mm d ⁻¹]	-0,5
RSD [mm d ⁻¹]	0,4
R-RMSE [mm d ⁻¹]	0,6
R ²	0,81
a	0,4
b [mm d ⁻¹]	0,4

Créditos Degano 2020. Tesis doctoral.

Evaluación de Procesos Hidro-Biofísicos mediante Datos Satelitales, Raúl Rivas, 24 de septiembre de 2024, UNLP



Comparación modelos con datos locales

Crédito Degano 2020. Tesis doctoral.

Relación MOD16A2-Datos locales

Estación	Periodo	RMSE [mm d ⁻¹]	Me [mm d ⁻¹]	RSD [mm d ⁻¹]
01. It_Tor	2008-2013	1,9	1,9	0,9
02. US_NE3	2001-2013	1,5	1,4	0,7
03. SD_Dem	2005-2009	1,5	1,2	0,6
04. Br_Sa3	2001-2004	1,4	1,2	0,6
05. Au_Fog	2006-2008	2,6	2,6	1,3
06. Za_Kru	2001-2003	1,7	1,3	0,7
	2009-2010			
07. CN_Cng	2007-2010	1,5	1,3	0,6
08. Ar_Tan	2001-2013	3,5	2,3	1,1
Promedio		2,0		

Relación Modelo PT-Datos locales

Estación	Periodo	RMSE [mm d ⁻¹]	Me [mm d ⁻¹]	RSD [mm d ⁻¹]
01. It_Tor	2008-2013	0,4	-0,02	0,3
02. US_NE3	2001-2013	1,1	-0,7	0,4
03. SD_Dem	2005-2009	3,9	-3,7	1,8
04. Br_Sa3	2001-2004	0,6	0,5	0,3
05. Au_Fog	2006-2008	0,8	0,5	0,3
06. Za_Kru	2001-2003	1,7	-1,4	0,7
	2009-2010			
07. CN_Cng	2007-2010	1,8	-1,3	0,7
08. Ar_Tan	2001-2013	0,5	-0,3	0,2
Promedio		0,4		

Desafíos futuros

Los desafíos fueron discutidos entre los asistentes.

Muchas gracias

Raúl Rivas, 2024, autorizada la reproducción parcial o total citando la Fuente.