

Metodología operativa para la obtención de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital *Tropical Rainfall Measuring Mission*. Validación de resultados con datos de pluviómetros

Gavilan, Sebastián^{1,4}; Juan Ignacio Pastore²; Javier Uranga³; Anabella Ferral³; Andrés Lighezzolo³ Pablo Aceñolaza¹

¹Centro De Investigaciones Científicas Y Transferencia De Tecnología A La Producción / Consejo Nacional De Investigaciones Científicas Y Técnicas. Dr. Materi y España, CP 3105, Diamante, Entre Ríos; ²Instituto De Investigaciones Científicas Y Tecnológicas En Electrónica / Consejo Nacional De Investigaciones Científicas Y Técnicas. Av. Juan B. Justo 4302, CP 7600, Mar del Plata; ³Instituto Mario Gullich / Comisión Nacional De Actividades Espaciales. Ruta C45, km 8, Falda de Cañete, CP 5187, Córdoba.

⁴gavilan@agro.uba.ar

Gavilan, Sebastián; Juan Ignacio Pastore; Javier Uranga; Anabella Ferral; Andrés Lighezzolo Pablo Aceñolaza (2019) Metodología operativa para la obtención de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital *Tropical Rainfall Measuring Mission*. Validación de resultados con datos de pluviómetros. Rev. Fac. Agron. Vol 118 (1): 105-115.

La información de precipitación es crítica para la comprensión del equilibrio hidrológico a escala global. La lluvia, junto con otras variables ambientales tales como evapotranspiración, temperatura, humedad relativa, entre otras, representa un factor de interés para la producción agrícola. Debido a esto, surge la necesidad de llevar adelante estudios que posibiliten comprender mejor la variabilidad espacial y temporal de las mismas. En este trabajo se presenta una metodología que permite automatizar la descarga de series temporales de datos de precipitación de la Misión de Medición de la Lluvia Tropical (*Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*) desde la plataforma *Google Earth Engine (GEE)* y validar los datos obtenidos con una serie de datos históricos de una estación meteorológica. Con este fin se desarrolló un sistema bajo la plataforma *GEE* para la generación y descarga de datos *TRMM*. Como caso de estudio se fijó la cuenca del Arroyo Las Conchas de la Provincia de Entre Ríos, Argentina. Para la validación de los resultados, se generó un set de datos con la información de precipitaciones desde el 1 de enero del 2000 al 31 de diciembre del 2015, medida por pluviómetros, para el área de influencia de la estación meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA de Oro Verde, departamento de Paraná, provincia de Entre Ríos, Argentina. Los resultados obtenidos mediante el proceso de evaluación muestran que existe una estrecha relación entre ambas fuentes de información. La metodología propuesta permitirá generar sets de datos históricos de precipitación para estudiar el régimen hídrico en regiones de difícil acceso o en cuencas extensas y poco pobladas.

Palabras clave: Precipitaciones, Meteorología, Hidrología, *TRMM*, *Google Earth Engine*.

Gavilan, Sebastián; Juan Ignacio Pastore; Javier Uranga; Anabella Ferral; Andrés Lighezzolo Pablo Aceñolaza (2019) Operational methodology to obtain historical rainfall data from the satellite Tropical Rainfall Measuring Mission. Validation of results with rain gauge data. Rev. Fac. Agron. Vol 118 (1): 105-115.

Precipitation information is critical for understanding the hydrological equilibrium on a global scale. Rain, with other conditions, represents a factor of interest for agricultural production. Therefore, the need of carrying out studies that make possible to understand spatial and temporal variability of rain becomes evident. This paper presents a methodology that allows the automatic downloading of time series of precipitation data from the Tropical Rainfall Measurement Mission (*TRMM*) from the *Google Earth Engine (GEE)* platform and validate it with a series of meteorological data. The system was developed under the *GEE* platform for downloading the *TRMM* data. As a case of study, the *Arroyo Las Conchas* basin in the Entre Ríos province, in Argentina was established. To validate the results, a set of data was generated with rainfall information in 16 year period, by measuring the rain gauges for the area of influence at the meteorological station in the *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)* Station at Oro Verde, Paraná, Entre Ríos, Argentina. The results through the evaluation process show a close relationship between both sources of information. The proposed methodology will allow generating sets of historical rainfall data to study the hydrological regime of the Las Conchas Stream basin.

Key words: Precipitation, Meteorology, Hydrology, *TRMM*, *Google Earth Engine*.

Recibido: 18/10/2018

Aceptado: 29/12/2018

Disponible on line: 01/07/2019

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCIÓN

La transformación territorial está vinculada a la expansión de la agricultura sobre ecosistemas naturales, principalmente boscosos. Al pasar de coberturas naturales a usos agrarios se disminuye la cobertura del suelo, incrementando la pérdida del suelo (Gomez & Gaspari 2018). En este contexto de vulnerabilidad, la información de precipitación es crítica para la comprensión del equilibrio hidrológico a diferentes escalas y para la comprensión de las interacciones complejas que existen entre los componentes del ciclo hidrológico. El impacto más importante de la lluvia y su variabilidad está en la biosfera, influyendo sobre las actividades antrópicas de múltiples maneras (Hou et al. 2014). La distribución de precipitación en el espacio y el tiempo afecta directamente la disponibilidad de agua dulce, vital para mantener la vida (Montaigne 2002, NSTC 2004). Precipitaciones extremas asociadas con huracanes, ventiscas, inundaciones, sequías y deslizamientos tienen impactos socioeconómicos significativos para la sociedad (Futrell et al. 2005, NRC 2010).

Es muy común observar en la literatura referencias a los efectos de los eventos meteorológicos extremos sobre los diferentes cultivos (Scarpati et al. 2008, Minetti et al. 2007, 2010, Penaiba et al. 2007). Este interés se debe a que la variabilidad temporal y espacial del agua precipitada condiciona la productividad potencial de granos y pasturas (Brizuela et al. 2015). Además, la magnitud de las pérdidas económicas, los inconvenientes en la planificación y en las oportunidades de comercialización de la producción agropecuaria se ven afectadas por esta variable (Scarpati et al. 2002). Las pérdidas productivas no son las únicas, también se observan numerosos daños en las propiedades de las personas que evidencian las condiciones de vulnerabilidad de la comunidad para enfrentar estos eventos (Cardoso, 2017). Es por esto que conocer la distribución de la precipitación es crucial para mejorar el diagnóstico climático a partir de modelos de pronóstico del tiempo y del clima (Adler et al. 2003). En nuestro país diversos autores han realizado investigaciones sobre las variaciones climáticas poniendo énfasis en la variabilidad interanual, la cantidad, la intensidad y el número de días con precipitación (Marino 2007, Pérez 2018, Hoffmann 1988). Sobre la base de estos antecedentes, y tomando en consideración el efecto de las anomalías en la producción de granos en la provincia de Entre Ríos, se hace evidente la necesidad de llevar adelante estudios que posibiliten comprender mejor la variabilidad espacial y temporal de las lluvias. Por eso, en la última década se incrementó notablemente, en el país y en particular en la provincia de Entre Ríos, la cantidad de estaciones meteorológicas que miden la precipitación.

A nivel global, la atmósfera obtiene tres cuartas partes de su energía térmica de la liberación de calor latente por precipitación (Bianchi et al. 2005). Se estima que dos tercios de esta precipitación cae en la zona tropical. Diferencias en patrones de lluvia a gran escala y a su

vez, la liberación de energía asociada en los trópicos afecta a toda la circulación global, como se manifiesta en el evento denominado "El Niño" (Serrano Vincenti 2016). La precipitación promedio de una región, muchas veces no se observa en todos los sitios del área en cuestión ni en todos los momentos analizados. En la realidad, temporadas de sequía suelen ser seguidas por uno o dos años de lluvias torrenciales trayendo consecuencias no deseadas.

Lamentablemente, la precisión de los valores estimados por diferentes modelos satelitales, propuestos en la literatura, presentan una amplia variabilidad. Esta variabilidad se debe a la falta de medidas directas de la lluvia, así como a la naturaleza altamente variable de los parámetros, espacial y temporalmente (Hou et al. 2014). La escasez de información de precipitación cuantitativa ha sido una de las causas que ha ralentizado las ciencias atmosféricas con impactos negativos en casi todas las ciencias de la *Tierra* y sus aplicaciones, en especial para el estudio del ciclo hidrológico.

Debido a que, en las zonas tropicales un 75% de la tierra está cubierta por océanos, la precipitación global puede medirse satisfactoriamente sólo desde el espacio (Kidd & Levizzani 2011). La Misión de Medición de Lluvia Tropical (*TRMM*) es una misión conjunta entre la *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* de los Estados Unidos y la *National Space Development Agency (NASDA)* de Japón. Los objetivos de la *TRMM* son medir la lluvia y el intercambio de energía -calor latente de condensación- de las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Ashouri et al. 2015). El producto 3B42 de esta misión satelital contiene una estimación de la precipitación (*mm/hr*) de sensores infrarrojos fusionados con microondas con una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial de 0,25 grados. Las estimaciones de precipitaciones de este producto han sido usadas, en distintas partes del mundo, en estudios donde se comparan con valores de lluvia observados "*in situ*" (Su et al. 2008, Collischonn et al. 2008, Islam & Uyeda 2007, Dinku et al. 2007, Wilk et al. 2006, Chiu et al. 2006). Además, se ha documentado la asimilación de productos de la *TRMM* en modelos hidrológicos (Casimiro et al. 2009). Recientemente, Villanueva et al. (2017) realizaron una evaluación de diferentes productos de precipitación basados en información satelital en Latinoamérica destacándose los productos *TRMM 3B42v7*, *TRMM 3B42RT*, *CHIRPSv2*, *CMORPHv1*, *PERSIANNCDR*, *MSWEPv2* y llegaron a la conclusión que es necesaria la validación con datos pluviométricos de la zona de estudio. Teniendo en cuenta esto, en este trabajo se propone generar una metodología que permita automatizar la descarga de datos históricos de precipitación de la *TRMM* utilizando la plataforma *Google Earth Engine (GEE)*. Además, se propone analizar la correlación que existe entre estos datos y los valores históricos medidos en estación meteorológica. Como caso de estudio se fijó un área circundante a la Estación Experimental del INTA Paraná, ubicada en la localidad de Oro Verde, que se encuentra en el borde de la cuenca del Arroyo Las Conchas, en la Provincia de Entre Ríos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La cuenca del Arroyo Las Conchas, delimitada por el polígono gris en la Figura 1, comprende una superficie aproximada de 2.184 km² ubicada al sur del departamento Paraná, provincia de Entre Ríos. Dentro de esta superficie se extiende una importante red hidrográfica que converge en el arroyo de nombre homónimo, el cual tributa finalmente al Río Paraná. Sobre el límite de esta cuenca se encuentra ubicada la E.E.A. INTA Paraná situada en la localidad de Oro Verde. La validación estadística del producto 3B42 se realizó tomando datos de un buffer de 10 km circundante a la estación meteorológica identificada por un círculo rojo en la Figura 1.

Datos satelitales de precipitación

Los datos históricos de precipitación para el área de estudio -Cuenca del Arroyo Las Conchas- fueron obtenidos a partir del producto 3B42 provisto por la TRMM para la ventana de tiempo que va desde el 1 de enero del 2000 al 31 de diciembre del 2015. Este producto contiene una estimación de la precipitación (mm/hr) de sensores infrarrojos fusionados con microondas con una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial de 0,25 grados. Los instrumentos de precipitación primaria en TRMM son el TRMM Microwave Imager (TMI), el Radar de Precipitación (PR), y el Sistema de Radiómetro Visible e Infrarrojo (VIRS) (Barnes et al. 1997). El segmento espacial de TRMM es un satélite que vuela en una órbita circular de 350 km con un ángulo de inclinación de 358°. Las estimaciones del 3B42 se producen en cuatro etapas; en la primera se calibran y combinan las

estimaciones de precipitación de microondas, en la segunda se crean estimaciones de precipitación infrarroja utilizando el dato calibrado de microondas, mientras que en la tercera se combinan las estimaciones de microondas e IR y finalmente en la cuarta etapa se aplica el reajuste a datos mensuales (Huffman et al. 2007).

Para automatizar la descarga de series temporales de datos de precipitación de esta misión, para una ubicación específica, se generó un sistema experto utilizando la plataforma GEE (GEE, 2018). Esta plataforma permite disponer de datos, algoritmos y potencia de computo desde cualquier *browser* en forma *online*, reduciendo la complejidad y el costo de análisis de datos geoespaciales. Los algoritmos, que se pueden desarrollar empleando JavaScript, son altamente interactivos y georeferenciados. El sistema experto propuesto permite obtener y visualizar colecciones de datos para diferentes ventanas de tiempo seleccionadas, generar gráficos temporales de precipitación y exportar los datos en formato "csv".

Datos de campo

El set de datos de precipitación medida "in situ" contiene datos de lluvia acumulada diaria para un período de tiempo que va desde el 01/01/2000 hasta el 31/12/2015. Estos datos fueron medidos en la Estación Experimental Agropecuaria (E.E.A.) del INTA Paraná, ubicado en la localidad de Oro Verde. Los mismos fueron descargados de la base de datos agrometeorológicos de dicha estación (INTA, 2018). El instrumental con que cuenta dicha estación es el adoptado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la red de Observatorios del INTA.

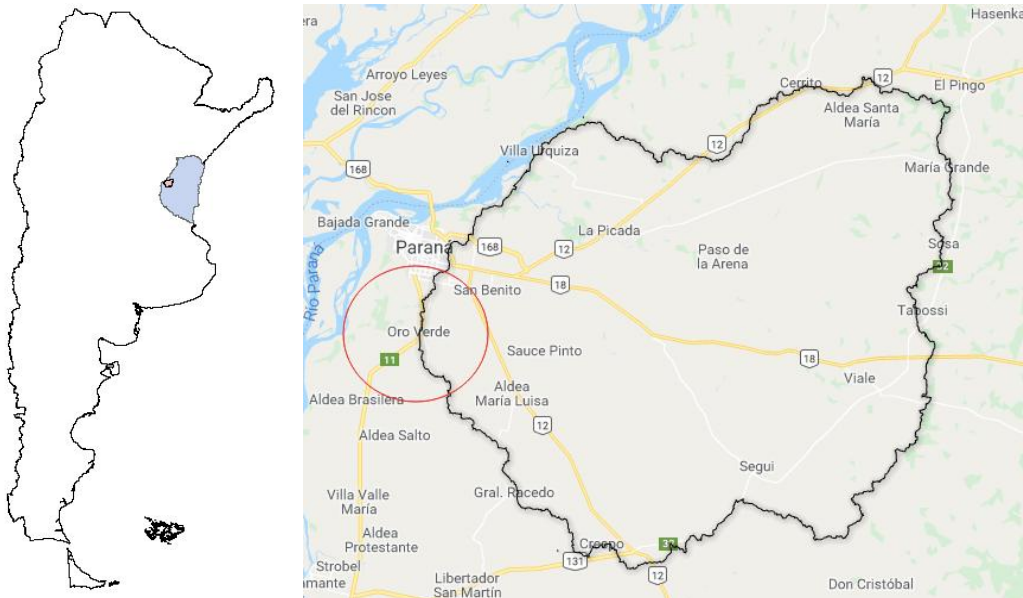


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Arroyo Las Conchas dentro del límite Nacional y Provincial y del buffer de la E.E.A. INTA Paraná utilizado para validar los datos.

Sistema experto para la plataforma Google Earth Engine

En la Figura 2, se presenta un gráfico conceptual en *Unified Modelling Language (UML)*, que muestra el procesamiento distribuido para la ejecución de esta propuesta para la plataforma GEE. Se destaca un bloque de procesamiento por parte del usuario, otro del lado del servidor y la presencia de un objeto Proxy que tiene como función, vincular los requerimientos de proceso en el servidor ocultando los detalles de la comunicación. El primer paso consiste en definir una geometría, en nuestro caso particular, un área circular de 10 km con centro prefijado por coordenadas de latitud y longitud en el sistema de referencia geodésico global WGS 84 (EPSG: 4326). Luego se crea una colección de imágenes utilizando el catálogo de la TRMM, filtrada por fecha y delimitada espacialmente por la geometría circular definida previamente. Por último, se crea un gráfico lineal (*chart*) que trabaja con la banda “precipitation” del producto 3B42 de la TRMM y con un objeto “Reduce” en el lado del servidor, el cual genera un dato resumen (promedio) para cada imagen. En la Figura 3 se presenta el *Script*.

mediciones por día, componiendo un set de datos anual de 2.904 valores, sumando un total de 46.464 datos para el período seleccionado. En la Figura 4 se presentan gráficamente la distribución anual de las precipitaciones horarias obtenidos a partir de la TRMM para el período 2000-2015. Para poder comparar los valores horarios de las estimaciones de la TRMM con los valores diarios registrados en la estación meteorológica se debió, en primer lugar, multiplicar el dato del producto 3B42 por un escalar igual a 3. Esta corrección se realiza debido a que ésta es la separación temporal, en horas, que hay entre registros sucesivos. Luego se suman los registros del mismo día para normalizar los datos.

Análisis estadístico

Comparando los valores anuales de precipitación se observa un patrón similar en la evolución de ambas fuentes, sin embargo, pueden verse años donde las diferencias son mayores. La diferencia absoluta promedio es de 8,47 mm anuales siendo el año 2014 el de mayores diferencias con 32 mm (Figura 5)

A pesar de las diferencias observables, el diagrama de dispersión muestra un ajuste entre las dos variables con un valor de $R^2 = 0,77$ (ver Tabla 1). La Figura 6 muestra el diagrama de dispersión de la precipitación anual estimada por el catálogo TRMM versus la medida en la E.E.A. INTA Paraná.

La precipitación mensual promedio muestra una relación estrecha entre las estimaciones a partir de los datos de la TRMM y los datos medidos por el INTA en la estación meteorológica (Figura 7).

RESULTADOS

Datos Obtenidos

Utilizando el sistema experto se analizó un set de datos con la información de precipitaciones para un periodo de tiempo de 16 años comprendido entre el 2000 y el 2015. Se extrajeron registros cada 3 horas, es decir 8

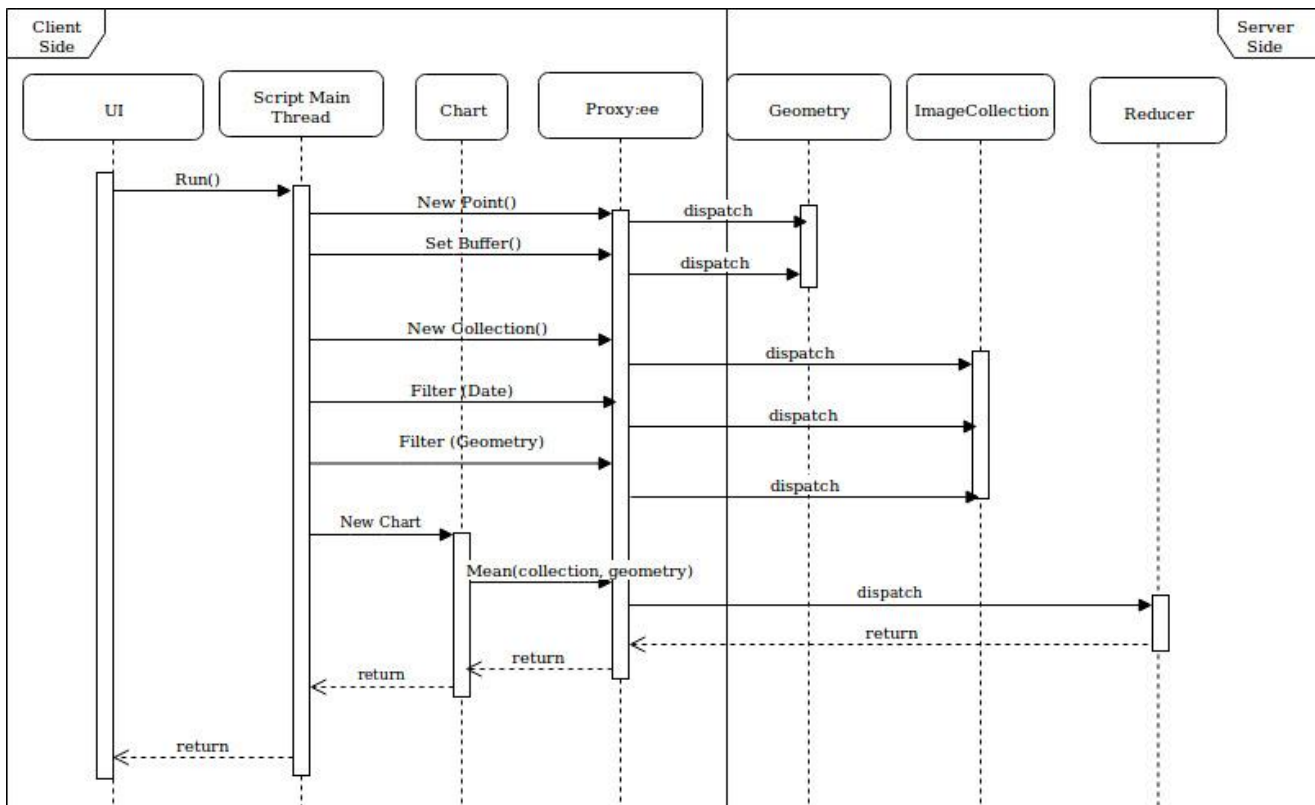


Figura 2. Gráfico conceptual en Unified Modelling Language (UML).

```
//=====
//=====SCRIPT GENERACION DATOS PRECIPITACION=====
//=====

/*/ Visualización de la Colección en la Consola /*/
/*/Generación de una capa ("fc") circular de radio igual a 10.000 mts cuyo centro se ubica en la
localización de la estación meteorológica del INTA de Oro Verde (Lat:-60.499, Long: -31.8263)*/
var fc=ee.Geometry.Point(-60.499,-31.8263).buffer(10000);
Map.centerObject(fc,10);

/*/Genera una colección de imágenes del producto 3B42 para una ventana de tiempo (desde el 2000-01-
01 al 2000-04-01) filtradas por el área definida anteriormente*/
var collection = ee.ImageCollection('TRMM/3B42')
.filterDate('2000-01-01','2000-04-01')
.filterBounds(fc);
print(collection);

/*/Generar una variable "median" que es la media de la precipitación para la ventana de tiempo de la
colección obtenida anteriormente. Luego, la función "clip" recorta la variable anterior al área definida para
su visualización /*/
var media = collection.mean();
var imagen = media.clip(fc);
Map.addLayer(imagen);

/*/Generar un grafico de evolucion temporal para la colleccion generada /*/
var TRMMchart = ui.Chart.image.series({
imageCollection: collection.select('precipitation'),
region: fc,
reducer: ee.Reducer.mean(),
scale: 30
})
.setOptions({
title:"",vAxis:{title:'precipitacion (mm/hr)'}
});

/*/ Mostrar el grafico en la consola /*/
print(TRMMchart);
```

Figura 3. Script para la plataforma Google Earth Engine.

Según las dos fuentes de información, el mes que registra mayores precipitaciones promedio es marzo con 182,84 mm y 172,24 mm (*TRMM* e INTA, respectivamente). El mes con menores registros es julio y también coincide para ambas fuentes con valores de 28,64 mm y 24,36 mm (*TRMM* e INTA, respectivamente). Independientemente de la fuente, la etapa del año correspondiente a las estaciones de primavera/verano son las que acumulan la mayor parte de las precipitaciones, en aproximadamente el 80 %. Posteriormente se analizó la precipitación mensual estimada y medida. En la Figura 8 se muestra la evolución en el tiempo de las dos variables para cada año por separado. Se puede observar que las curvas de evolución de la precipitación medida "*in situ*" y estimada por la *TRMM* muestran coincidencias, a excepción de los años 2002, 2008 y 2014. Estas mismas diferencias se evidencian en los menores valores de R^2 que surge del análisis de regresión lineal entre las dos variables (Tabla 2). En la Tabla 2 pueden verse las medidas de ajuste estadístico entre las variables para cada año estudiado.

En la misma, se observa altas correlaciones para todos los años, excepto para el 2002, 2008 y 2014 ($R^2=0,66$, $R^2=0,42$ y $R^2=0,78$, respectivamente). Coincidiendo con lo observado en las curvas de evolución. Por último, se analizaron los valores diarios obtenidos mediante sensoramiento remoto en comparación con los datos pluviométricos de la estación terrestre obteniéndose un ajuste (R^2 Ajustado) de 0,879 (ver Tabla 3; Figura 9).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La metodología propuesta permite automatizar la descarga de datos de precipitación a escala global para cualquier sitio de interés a partir del uso de información satelital y herramientas geoespaciales de acceso libre. Para esto se desarrolló un sistema experto bajo la plataforma *GEE* que minimiza los tiempos de análisis por parte del usuario y permite el análisis histórico de patrones de comportamiento de la precipitación en zonas de interés.

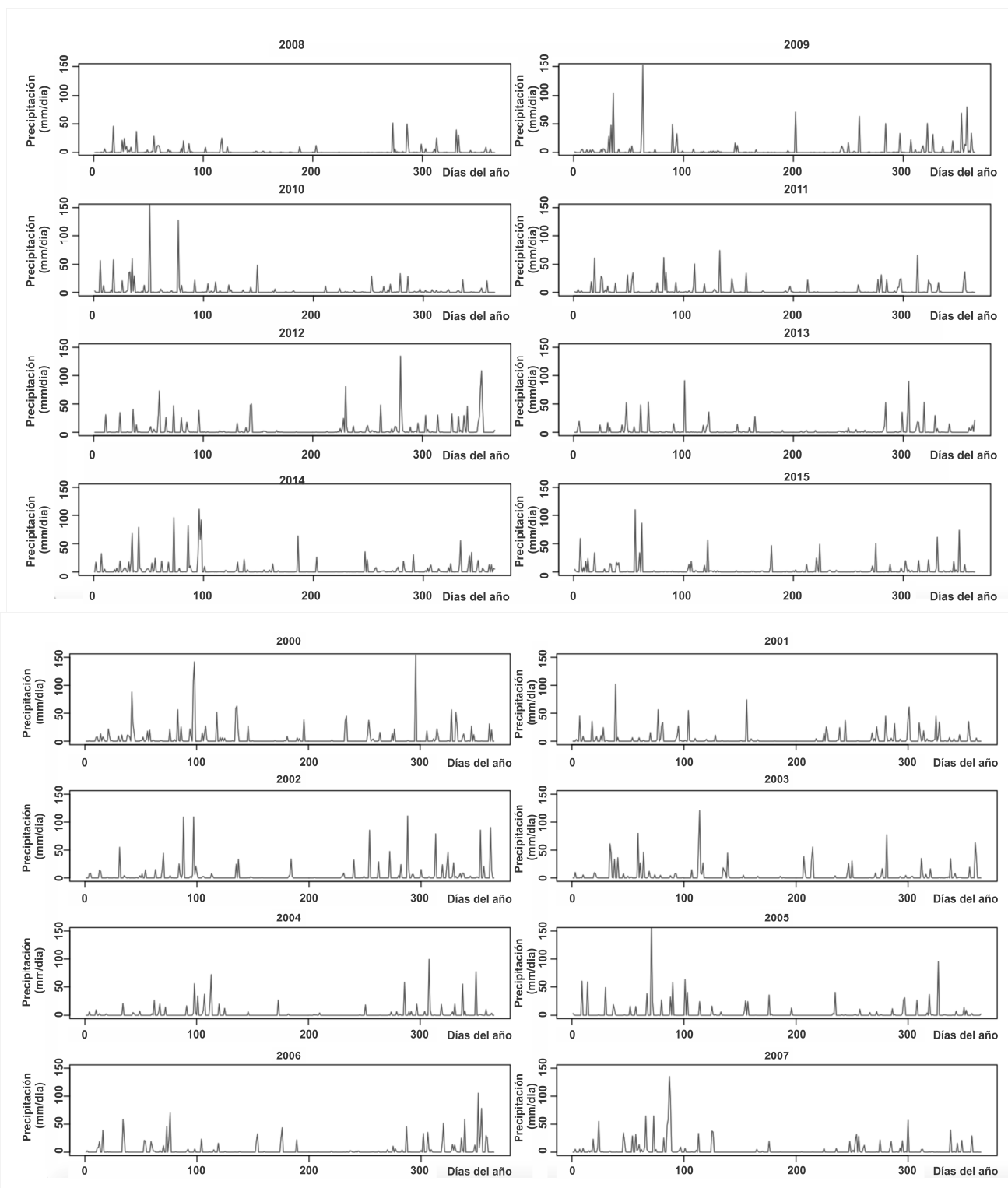


Figura 4. Gráficos de distribución anual de las precipitaciones horarias obtenidos a partir de la TRMM para el período 2000-2015.

Los resultados obtenidos en las pruebas estadísticas, donde se compararon las series temporales de precipitación con datos medidos “in situ” en estaciones pluviométricas, garantizan una correcta utilización de la información satelital como variable de entrada de

modelos hidrológicos cuantitativos. Los resultados experimentales evidencian que existe una estrecha correlación entre las variables medidas y estimadas, estas correspondencias pueden verse en los valores diarios, mensuales y anuales.

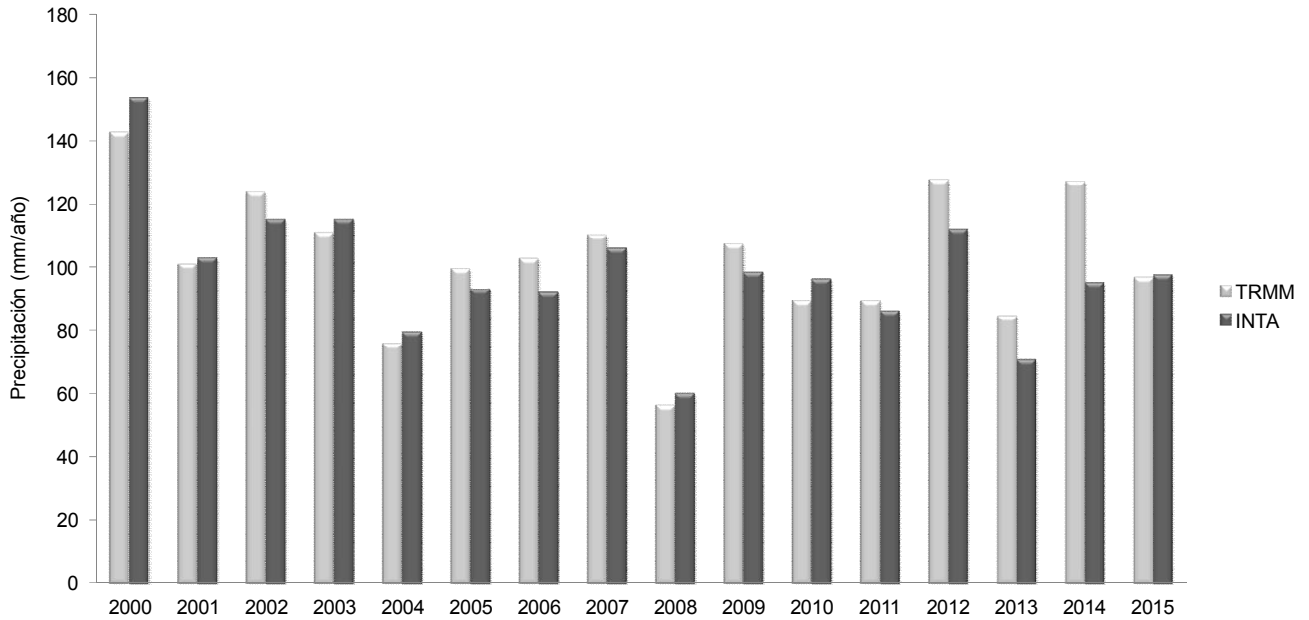


Figura 5. Precipitación acumulada anual obtenida de la estación meteorológica y de datos TRMM

Tabla 1. Medidas de ajuste de la regresión lineal entre TRMM e INTA para valores anuales. F: Prueba F de Fisher. G.L.: Grados de Libertad.

R	R ²	R ² Ajustado	Error Estándar	F	G.L.
0,876	0,767	0,751	129,568	46,133	14

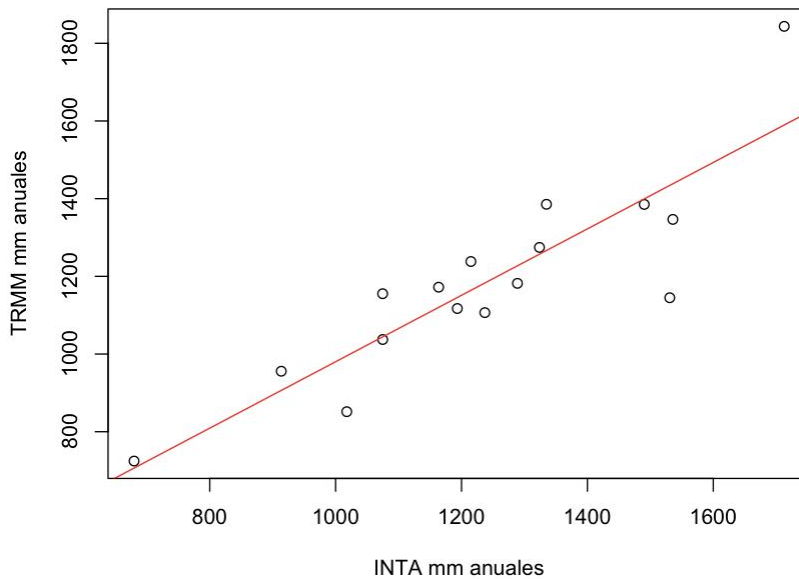


Figura 6. Diagrama de dispersión de la precipitación anual estimada por TRMM versus la medida en la E.E.A. INTA Paraná ($R^2=0,767$) y medidas de ajuste de la regresión lineal entre TRMM e INTA para valores anuales.

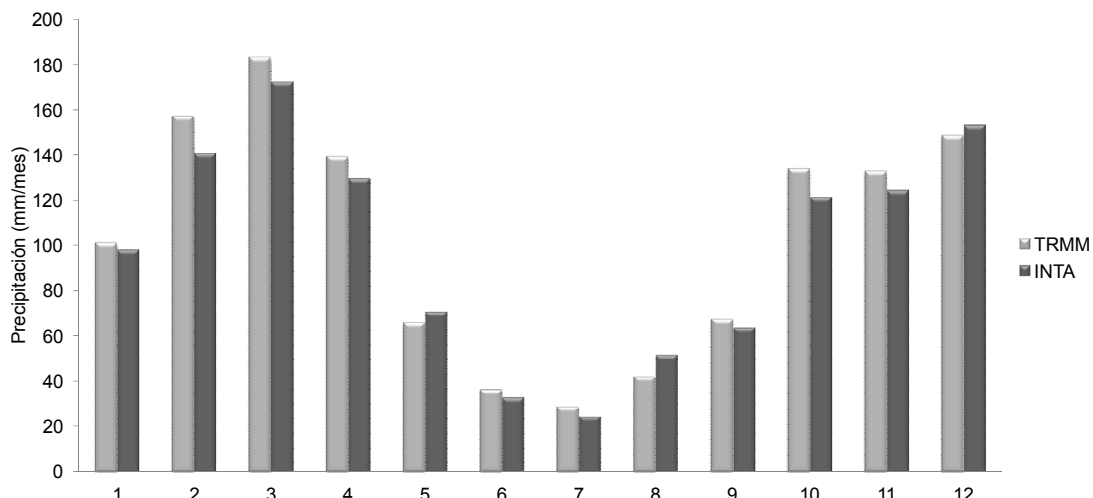


Figura 7. Precipitación mensual promedio para datos TRMM e INTA.

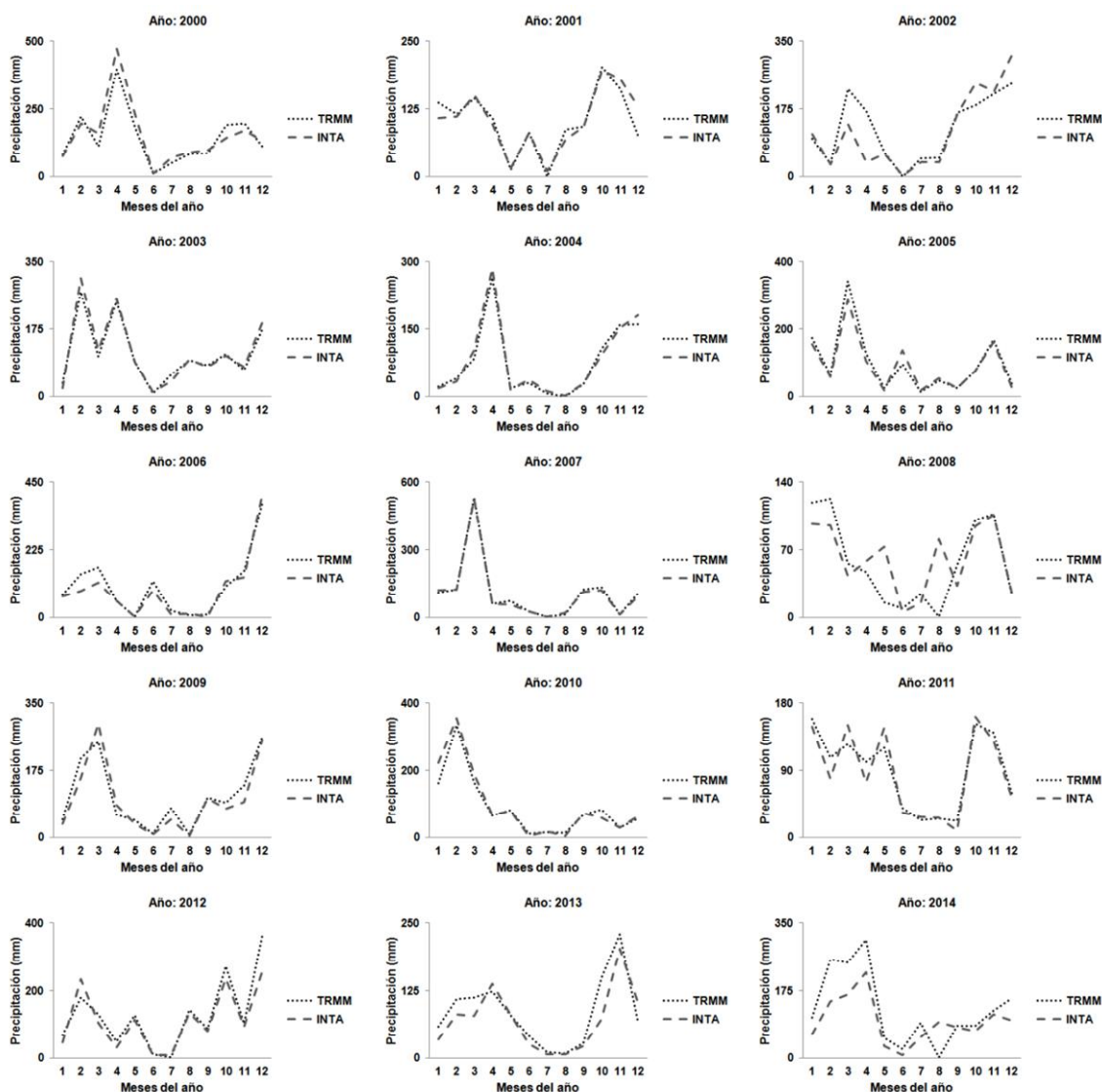


Figura 8. Diagramas de evolución anual de la precipitación mensual estimada (TRMM) y medida (INTA) para cada año desde el 2000 hasta el 2015.

Tabla 2. Medidas de ajuste de la regresión lineal entre TRMM e INTA para valores mensuales. E.E.: Error Estándar. F: Prueba F de Fisher. G.L.: Grados de Libertad.

Año	R	R ²	R ² Ajustado	E.E.	F	G.L.
2000	0,958	0,917	0,909	31,090	110,413	11
2001	0,934	0,873	0,860	21,681	68,4320	11
2002	0,831	0,691	0,660	49,595	22,3310	11
2003	0,994	0,988	0,987	9,2990	809,976	11
2004	0,993	0,986	0,985	9,9570	727,801	11
2005	0,978	0,957	0,953	20,323	223,747	11
2006	0,976	0,952	0,948	24,110	199,710	11
2007	0,998	0,997	0,996	8,7090	2916,173	11
2008	0,689	0,475	0,422	33,890	9,04600	11
2009	0,957	0,916	0,908	26,825	109,216	11
2010	0,986	0,972	0,969	16,323	345,781	11
2011	0,953	0,909	0,900	16,702	99,6460	11
2012	0,945	0,892	0,881	35,780	82,7760	11
2013	0,902	0,814	0,795	28,985	43,7460	11
2014	0,883	0,780	0,757	47,197	35,3540	11
2015	0,895	0,801	0,781	24,957	40,3100	11

Tabla 3. Medidas de ajuste de la regresión lineal entre TRMM e INTA para valores diarios. F: Prueba F de Fisher. G.L.: Grados de Libertad.

R	R ²	R ² Ajustado	Error Estándar	F	G.L.
0,938	0,88	0,879	30,107	1388	190

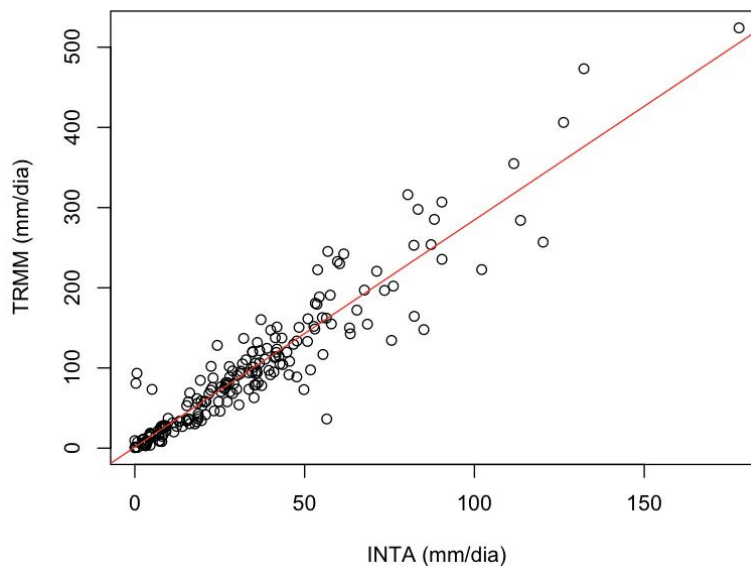


Figura 9. Diagrama de dispersión de la precipitación diaria estimada por TRMM versus la medida en la E.E.A. INTA Paraná.

Para el set de datos de precipitación diaria analizado en este trabajo, el análisis de correlación lineal permite inferir que el grado de asociación entre las variables es fuerte, debido a que se obtuvo un R próximo a 1. Además, el error promedio diario para los 5844 días analizados fue de 2,44 mm con una dispersión de 7,54

mm. En el análisis mensual se observa un grado de asociación fuerte entre las variables ($R > 0,9$) a excepción de los años 2002, 2008 y 2014. Si bien el valor de R disminuye en estos años, se mantiene dentro de los límites aceptables para poder inferir una relación media-alta. Finalmente, el análisis estadístico

de datos acumulados anuales evidencia una alta correspondencia entre las mediciones pluviométricas y las estimadas por el modelo satelital. A partir de este análisis podemos concluir que es posible utilizar el producto 3B42 de la Misión de Medición de Lluvia Tropical para tener datos pluviométricos en lugares donde no se encuentran estaciones meteorológicas disponibles. En base a este conocimiento, es posible redefinir las zonificaciones que se utilizan para establecer fechas de siembra, tipos de cultivos, variedades y grupos de madurez, entre otras variables agronómicas.

Como trabajo futuro se propone realizar predicciones de series de tiempo con redes neuronales recurrentes como son las *Long Short-Term Memory network (LSTM)*, con el objetivo de dar respuesta a casos como los que se observan en los años 2002, 2008, 2014. Dichas predicciones ayudarán a dar una respuesta precisa sobre la información obtenida en los casos de menor correlación en los datos. A diferencia del modelo predictivo de regresión, las series temporales también agregan una dependencia de secuencia entre las variables de entrada.

REFERENCIAS

- Adler, R. F., G. J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P.-P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *Journal of hydrometeorology*, 4(6):1147–1167.
- Ashouri, H., K. L. Hsu, S. Sorooshian, D. K. Braithwaite, K. R. Knapp, L. D. Cecil & O. P. Prat. 2015. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1), 69–83.
- Barnes, W. L., R. A. Barnes & A. W. Holmes. 1997. Characterization and calibration results from the visible and infrared scanner (virs) for the tropical rainfall measuring mission (TRMM). In *Advanced and Next-Generation Satellites II*, volume 2957, pages 266–277. International Society for Optics and Photonics.
- Bianchi, A., C. Yañez & L. Acuña 2005. Base de datos mensuales de precipitaciones del noroeste argentino. Ed. INTA. EEA. Salta-Jujuy, 41.
- Brizuela, A. B., M. D. Noretto, C. A. Aguirre & M. P. Bressán. 2015. Comparación de datos de precipitación estimada por trmm con mediciones en estaciones meteorológicas de Entre Ríos, argentina. *UD y la geomática*, (10):18–26.
- Cardoso, M. M. 2017. Estudio de la vulnerabilidad socio-ambiental a través de un índice sintético/Caso de distritos bajo riesgo de inundación: Santa Fe, Recreo y Monte Vera, Provincia de Santa Fe, Argentina. Study on socio-environmental vulnerability by applying (...). *Cuaderno de Geografía*, 27(48), 156–183.
- Casimiro, W. S. L., D. Labat & J. L. Guyot. 2009. Validación de lluvia utilizando trmm en dos cuencas amazónicas peruanas y su aplicación en modelos mensuales de balance hídrico. *Revista Peruana Geo-Atmosférica Rpga* (1), pages 11–19.
- Chiu, L. S., Z. Liu, J. Vongsaard, S. Morain A. Budge, P. Neville & C. Bales, 2006. Comparison of trmm and water district rain rates over new mexico. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23(1):1–13.
- Collischonn, B., W. Collischonn & C. E. M. Tucci. 2008. Daily hydrological modeling in the amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360(1-4):207–216.
- Dinku, T., P. Ceccato, E. Grover-Kopec, M. Lemma, S. Connor & C. Ropelewski. 2007. Validation of satellite rainfall products over east africa's complex topography. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7):1503–1526.
- Futrell, J. H., R. E. Gephart, E. Kabat-Lensch, D. M. McKnight, A. Pyrtle, J. P. Schimel & J. M. Gephart. 2005. *Water: Challenges at the intersection of human and natural systems* (No. PNWD-3597). PNNL (Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (United States)).
- GEE. 2018. Editor de código de la plataforma *Google Earth Engine*. <https://code.earthengine.google.com>. Ultimo acceso: agosto 2018.
- Gomez, A. R. D. & F. J. Gaspari. 2018. Transformación territorial: Intensificación agraria y pérdida del suelo en la cuenca del río Marapa, Tucumán, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 116(2), 161–170.
- Hoffmann, J. (1988). Las variaciones climáticas ocurridas en argentina desde fines del siglo pasado hasta el presente, el deterioro del ambiente en la argentina. *Fundacion para la Educacion, la Ciencia y la Cultura*, pages 275–290.
- Hou, A. Y., R. K. Kakar, S. Neeck, A. A. Azarbarzin, C. D. Kummerow, M. Kojima & T. Iguchi, 2014. The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722.
- Huffman, G. J., D. T. Bolvin, E. J. Nelkin, D. B. Wolff, R. F. Adler, G. Gu, Y. Hong, K. P. Bowman & E. F. Stocker. 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of hydrometeorology*, 8(1):38–55.
- INTA, 2018. Repositorio de datos agrometeorológicos de la E.E.A INTA Paraná. <https://inta.gob.ar/documentos/indice-de-datos-meteorologicos-mensuales>. Ultimo acceso: agosto 2018.
- Islam, M. N. & H.Uyeda. 2007. Use of trmm in determining the climatic characteristics of rainfall over bangladesh. *Remote Sensing of Environment*, 108(3):264–276.
- Kidd, C. & V. Levizzani. 2011. Status of satellite precipitation retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4), 1109–1116.
- Marino, M. B. 2007. Variabilidad de la precipitación en Argentina en diferentes escalas temporales, relacionada con actividad convectiva observada: Documentación de la metodología para el tratamiento de la información. Verificación del desempeño de un modelo regional de pronóstico de precipitación. PhD thesis, Universidad de Buenos Aires.
- Minetti, J., W. Vargas, A. Poblete, L. De la Zerda & L. Acuña. 2010. Regional droughts in southern south america. *Theoretical and applied climatology*, 102(3-4):403–415.
- Minetti, J., W. Vargas, B. Vega, & M. Costa. 2007. Las

sequías en la pampa húmeda: Impacto en la productividad del maíz. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22(2):218–232.

Montaigne, F. & P. Essick. 2002. Water pressure. *National Geographic*, 202(3), 2-33.

NRC (National Research Council). 2010. *When Weather Matters: Science and Service to Meet Critical Societal Needs*. National Academies Press, 198 pp.

NSTC (National Science & Technology Council). 2004. Science and technology to support fresh water availability in the United States. National Science and Technology Council, 19 pp.

Penalba, O. C., M. L. Bettolli & W. M. Vargas. 2007. The impact of climate variability on soybean yields in argentina. multivariate regression. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 14(1): 3–14.

Pérez, M. E. 2018. El comportamiento temporo espacial de los montos anuales de precipitación en el Nordeste argentino–1931/2005. *Geográfica digital*, 6(11), 1-16.

Scarpati, O. E., J. A. Forte Lay & A. D. Capriolo. 2008. La inundación del año 2001 en la provincia de buenos aires, argentina. *Mundo agrario*, 9(17):00–00.

Scarpati, O. E., L. Spescha & A. Capriolo. 2002.

Occurrence of severe floods in the salado river basin, Buenos Aires province, argentina. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(3):285–301.

Serrano Vincenti, M. S. F. 2016. Fenómenos críticos en datos de precipitación lluviosa intensa detectados con radar y microondas, en la zona de influencia del fenómeno del niño sobre el ecuador, en el período 2009-2012. Master's thesis, Escuela Politécnica Nacional de Quito.

Su, F., Y. Hong, & D. P. Lettenmaier. 2008. Evaluation of trmm multisatellite precipitation analysis (tampa) and its utility in hydrologic prediction in the la plata basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4):622–640.

Villanueva, O. M. B., M. Zambrano-Bigiarini, L. Ribbe, A. Nauditt, M. A. Rebolledo Coy, N. Xuan Thinh & T. Bartz-Beielstein. 2017. Temporal and spatial evaluation of satellite rainfall estimates over different regions in Latin-America. In *American Geophysical Union Fall Meeting Abstracts*.

Wilk, J., D. Kniveton, L. Andersson, R. Layberry, M. C. Todd, D. Hughes, S. Ringrose & C. Vanderpost. 2006. Estimating rainfall and wáter balance over the okavango river basin for hydrological applications. *Journal of Hydrology*, 331(1-2):18–29.