



Precipitación mensual en Nicaragua a partir de productos satelitales

Monthly precipitation in Nicaragua from satellite products

Miguel E. Blanco Chávez

Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente.
Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua.

miguel.blanco@piensa.uni.edu.ni

(recibido/received: 09-enero-2023; aceptado/accepted: 12-abril-2023)

RESUMEN

Las precipitaciones varían espacial y temporalmente, lo que hace que sea difícil obtener mediciones representativas en zonas remotas del país donde hay muy pocas estaciones meteorológicas instaladas. El desarrollo de la teledetección satelital ha permitido hacer estimaciones de la precipitación a diferentes escalas de tiempo y en cualquier punto geográfico, por lo que se pueden desarrollar sus estimaciones a escalas mensuales y anuales. El objetivo de este trabajo fue estimar los mapas de precipitaciones mensuales y anuales en la República de Nicaragua a partir de datos de precipitación mensual del producto MERRA-2 de la NASA. Se utilizaron 155 puntos distribuidos en el país con información de precipitación mensual obtenidos de la plataforma The POWER Project de la NASA. Se compararon los datos de precipitación máxima diaria anual de la estación Aeropuerto de Managua con los datos del producto MERRA-2, obteniéndose muy baja correlación, por lo que no es satisfactorio su uso para estimar precipitaciones máximas diarias. Se compararon los datos de precipitación mensual de los registros de 19 estaciones pluviométricas con los datos del producto MERRA-2, obteniéndose coeficientes de determinación R^2 en el rango de 0.56 a 0.79, por lo que se considera que la precipitación estimada por los productos MERRA-2 reproduce adecuadamente las precipitaciones mensuales registradas por los pluviómetros.

Palabras claves: Sensor remoto; MERRA-2; Productos de satelitales.

ABSTRACT

The precipitation varies spatial and temporally, this make difficult to obtain representatives measurements in remotes zones of the country where there are very few installed meteorological stations. The development of satellites remote sensing has allowed to make precipitation estimations for different time scales and at any geographic location, because of that it make possible to develop its estimation at monthlies and annuals scales. The objective of this study was to estimates the monthlies and annual precipitations maps for Nicaragua from MERRA-2 monthly precipitation (NASA). One hundred fifty five points were used distributes in the country, with monthly precipitation information got from the NASA platform The Power Project. The annual maximum daily precipitation records from the Managua Airport gauge were compared with the MERRA-2 products records, getting very low correlation, therefore we

consider that is not satisfactory its use to estimates maximum daily precipitations. The monthly precipitations records from 19 pluviometers gauges were compared with the MERRA-2 products records, getting determination coefficients R^2 in the interval of 0.56 to 0.79, therefore we consider that the precipitation estimated with MERRA-2 products make good simulation of the monthlies precipitation registered in the gauges.

Keywords: Remote sensor; MERRA-2; Satellite products.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios hidrológicos y ambientales precisan de información climática confiable y accesible en cualquier lugar del país que les permita hacer diagnósticos y plantear soluciones de mitigación y remediación para los diversos problemas ingenieriles y de uso sostenible del recurso agua. En Nicaragua hay una red de estaciones meteorológicas que registran las variables climáticas, sin embargo, dado las limitaciones técnicas y presupuestarias que el país ha enfrentado en las últimas cuatro décadas, no se dispone de una cobertura completa del territorio nacional, tampoco hay continuidad temporal en buena parte de las estaciones, lo cual representa serias limitaciones en el acceso a datos climáticos confiables, especialmente en zonas rurales del país, con escasa infraestructura vial que limitan el acceso a dichos sitios.

La Agencia Aeroespacial de EEUU (NASA por sus siglas en idioma inglés) en su página web ha puesto a disposición del público, con libre acceso, datos de las observaciones satelitales de la tierra. Entre los diferentes programas desarrollados Mehta y Markert (2018) mencionan el Modelo MERRA-2 (Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para la Investigación y Aplicación), la Misión IMERG (Recuperaciones Multi-satelitales Integradas para GPM) y GPM (Medidas Globales de Precipitación), los cuales entregan productos climáticos con diferentes escalas temporales y espaciales. Estos programas hacen uso del desarrollo de la teledetección satelital y les han permitido hacer estimaciones de la precipitación a diferentes escalas de tiempo y en cualquier punto geográfico a nivel global, por lo que se pueden utilizar sus productos para hacer estimaciones de la precipitación a diferentes escalas: diarias, mensuales y anuales.

En Argentina Obando et al. (2018) y Garay (2021) hacen una validación de la estimación de precipitación por satélite, comparándolas con las mediciones de superficie, concluyendo que se obtienen buenos resultados. En un estudio en Perú el autor Villavicencio Guillén (2019) concluye que se obtienen buenos coeficientes de determinación R^2 para las precipitaciones mensuales y las de productos satelitales, que varían entre 0.65 y 0.83, y considera que reproducen bien las precipitaciones mensuales registradas por la red de pluviómetros.

En este trabajo se estudia la precipitación mensual del producto de MERRA-2 en Nicaragua, con el fin de obtener mapas de precipitación mensual y anual, los cuales servirían de referencia en aquellos sitios del país en los que actualmente no se dispone de esta información. Los datos de MERRA-2 fueron descargados a través de la plataforma The Power Project de la NASA (NASA, 2022).

2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

2.1. Área de estudio e información pluviométrica

Nicaragua se localiza en Centroamérica, entre los 10.693 y 15.023 grados de latitud Norte, -83.143 y -87.691 longitud Oeste. Las precipitaciones medias anuales en la zona de estudio varían de 800 mm en los valles intramontanos en el norte del país hasta más de 5000 mm en el sureste, las temperaturas medias anuales varían de 20 a 26° C, la evapotranspiración potencial media anual varía de los 1,400 a 2,000 mm,

la humedad relativa media anual varía entre 65 a 90% (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales INETER, 2004).

Fueron seleccionadas 19 estaciones meteorológicas localizadas en diferentes regiones del país (Tabla 1 y Figura 1a). Se utilizaron datos de precipitación mensual de las estaciones seleccionadas.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas seleccionadas

No.	Estación	Código	Coordenadas UTM		Período considerado	
			X	Y	Año inicial	Año final
1	San Sebastián de Yalí	45015	588457	1471010	2000	2015
2	Ocotal	45017	557654	1505432	2000	2015
3	Las Praderas	45018	614066	1475896	2000	2015
4	Sébaco	55005	598537	1421186	2000	2012
5	Darío	55009	594993	1406885	2000	2010
6	Jinotega	55020	608735	1446751	2000	2015
7	San Ramón	55025	616616	1428865	2000	2010
8	Laguneta	60029	543698	1426642	2001	2015
9	Bluefields	61006	850347	1330483	2000	2004
10	El Rama	61010	802560	1345572	2000	2007
11	Chinandega	64018	485556	1396555	2000	2015
12	León	64043	509456	1373773	2000	2015
13	Aeropuerto Managua	69027	590961	1342506	2000	2015
14	Juigalpa	69034	677723	1338142	2000	2005
15	Rivas	69070	627305	1264335	2000	2005
16	Boaco	69084	646169	1378897	2000	2004
17	Masaya Lagunas	69115	597440	1324500	2000	2015
18	Campos Azules	69129	592568	1315527	2000	2005
19	Las Canoas	69150	621852	1366584	2000	2005

Los datos de precipitación corresponden al año 2000 al 2015 en las estaciones Aeropuerto de Managua, León, Chinandega, Masaya Lagunas, Jinotega, San Sebastián de Yalí y Las Praderas, para las otras estaciones, la longitud del registro varía de 5 a 14 años. Estas estaciones cubren la Región del Pacífico (estaciones Chinandega, León, Aeropuerto de Managua y Rivas), la Región Central (estaciones Jinotega, Sébaco, San Ramón, Darío, Boaco Las Canoas y Juigalpa) y la Región Autónoma de la Costa Caribe Sur (estaciones El Rama y Bluefields).

2.2. Producto de MERRA-2: Precipitación mensual

Las precipitaciones se obtuvieron de los productos de MERRA-2, el cual une la gran cantidad de datos de observaciones con los datos de salida del modelo del Sistema de Observación Terrestre Goddard (Goddard Earth Observing System o GEOS), de 1979 al presente. Emplea la última tecnología para realizar análisis meteorológico y de escalas temporales climáticas a nivel mundial, enfocado en mejoramientos en el ciclo hidrológico (Mehta & Markert, 2018). Los datos de precipitación mensual de MERRA-2 se obtuvieron de la plataforma The Power Project de la NASA (NASA, 2022), en archivos de valores separados por coma (*.csv), para 155 puntos distribuidos en el país (ver Figura 1b), e incluye los sitios de las estaciones de la

Tabla 1. El período de los datos descargados es del 2000 al 2021. La información se almacenó y procesó en el software Microsoft Excel.

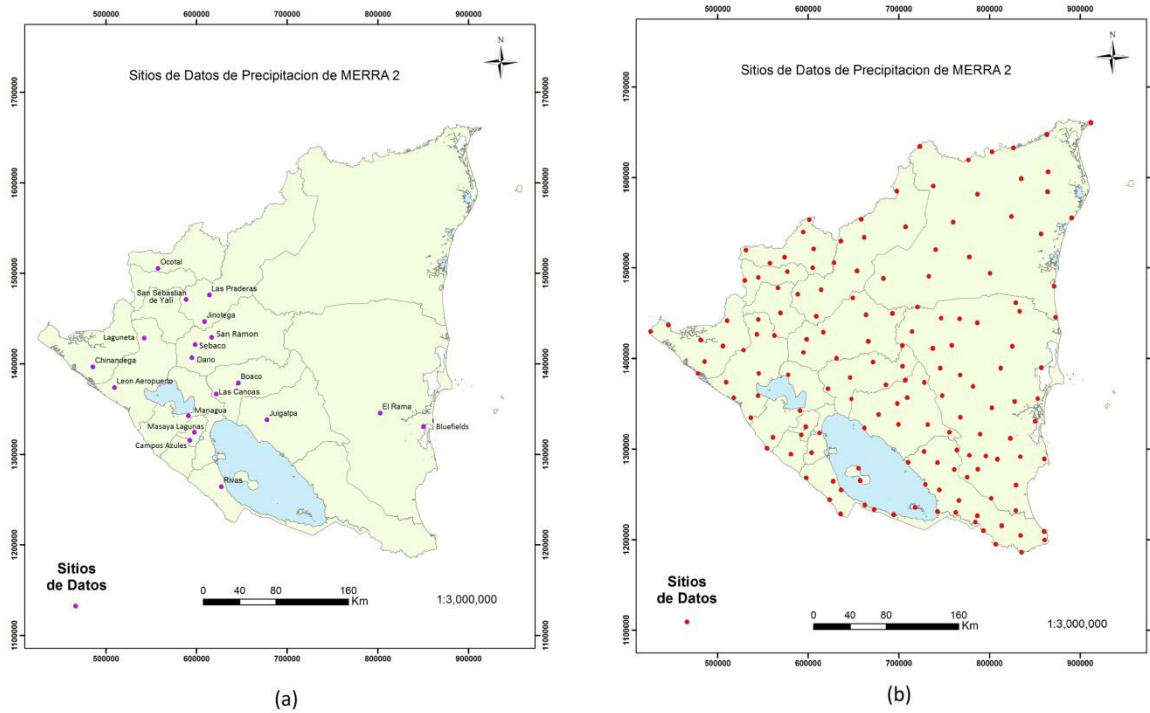


Figura 1. (a) Localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas. (b) Localización de los sitios de precipitación de MERRA-2.

2.3. Estadísticos de Validación

Para evaluar la adecuación de los datos de los productos de MERRA-2 se contrastaron las precipitaciones del mismo con los datos registrados por la red meteorológica en las estaciones de la [Tabla 1](#). Para ello se calcularon, considerando una resolución temporal mensual, los coeficientes de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) y el sesgo ($BIAS$).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(P_e - P_o)^2}{N}} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (P_e - P_{me})(P_o - P_{mo})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_e - P_{me})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_o - P_{mo})^2}} \quad (2)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (P_e - P_o)}{N} \quad (3)$$

Donde:

P_e = precipitación del producto MERRA-2 (mm)

Pme = promedio aritmético de la serie Pe (mm)
 Po = precipitación observada medida en tierra (mm)
 Pmo = promedio aritmético de la serie Po (mm)
 R^2 = coeficiente de determinación, adimensional.
 N = número de datos

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Se realizó un análisis con las precipitaciones máximas diarias anuales para la estación Aeropuerto de Managua (código 69027) y del producto MERRA-2 del pixel más cercano a dicha estación, para el período 2000-2019. La Figura 2 muestra las precipitaciones máximas de 24 h, en ella se puede observar que la precipitación máxima diaria del producto MERRA-2 subestima en la mayoría de los casos la precipitación máxima diaria medida en el pluviómetro de la estación Aeropuerto de Managua.

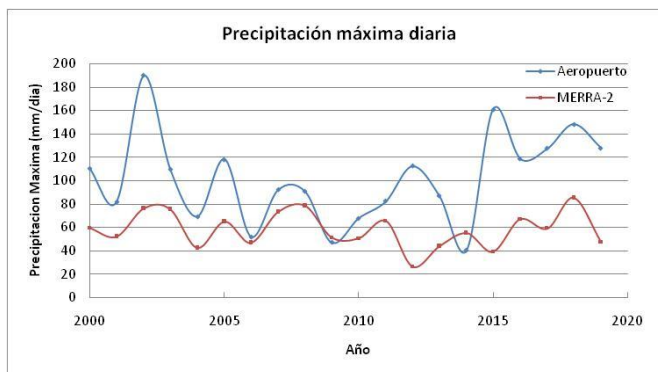


Figura 2. Precipitación máxima diaria en la estación Aeropuerto de Managua y de MERRA-2.

En el análisis estadístico se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) casi cero, por lo que se establece que no hay correlación entre las dos variables analizadas (ver Figura 3). Los autores Ovando et al. (2018), Gehne et al. (2016) y Salih et al. (2022) han reportado bajos coeficientes de determinación ($R^2 < 0.4$) para precipitaciones diarias, lo que confirma lo expuesto arriba. Debido este resultado, no se considera satisfactorio estimar precipitaciones máximas diarias anuales con los productos de MERRA-2.

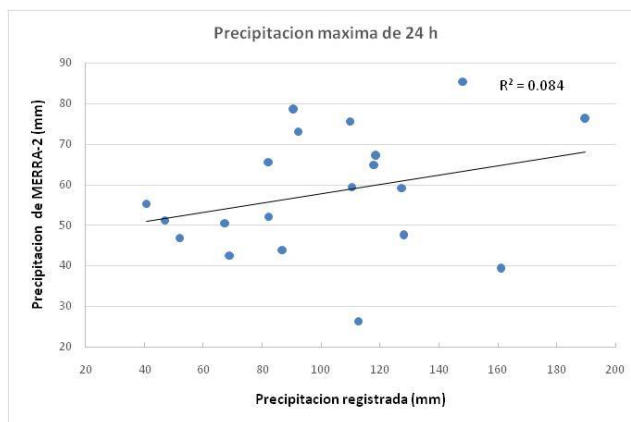


Figura 3. Correlación de precipitación máxima diaria en la estación Aeropuerto de Managua y precipitación de MERRA-2.

Se realizó un análisis con las precipitaciones mensuales para las estaciones de la Tabla 1 y del producto MERRA-2 del pixel más cercano a dicha estación. Las Figuras 4 a Figura 13 muestran las variaciones temporales de la precipitación mensual. Se puede observar que en las estaciones San Ramón, Boaco, Juigalpa, El Rama, Bluefields, Laguneta, Chinandega, León y Rivas la precipitación mensual del producto MERRA-2 es mucho menor que la precipitación observada en los pluviómetros de la red meteorológica. En todas las estaciones, si bien el patrón temporal de precipitación de los pluviómetros se reproduce bastante bien, siempre hay diferencias entre el dato observado y el simulado por el producto MERRA-2.

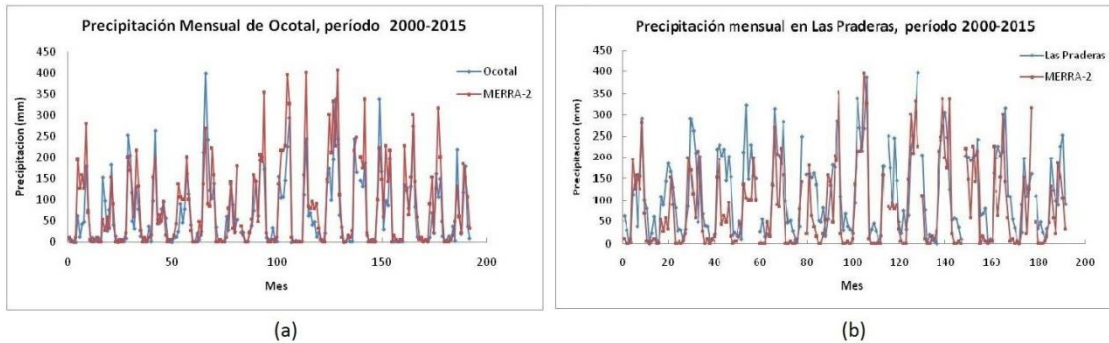


Figura 4. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación Ocotal (b) en la estación Las Praderas

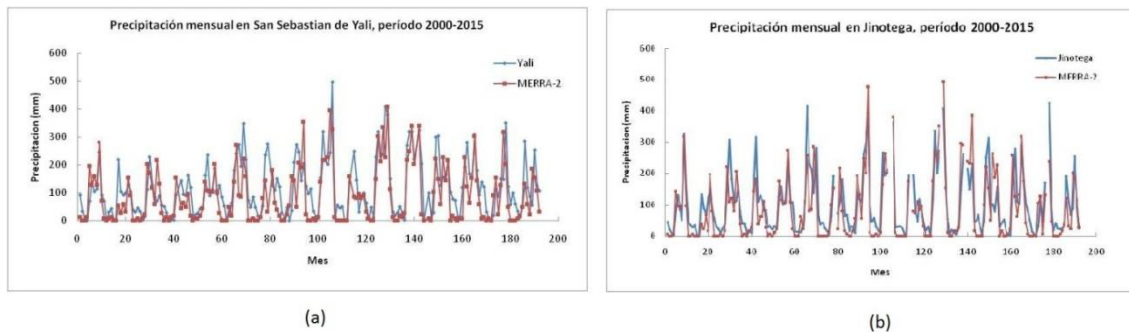


Figura 5. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación San Sebastián de Yalí (b) en la estación Jinotega.

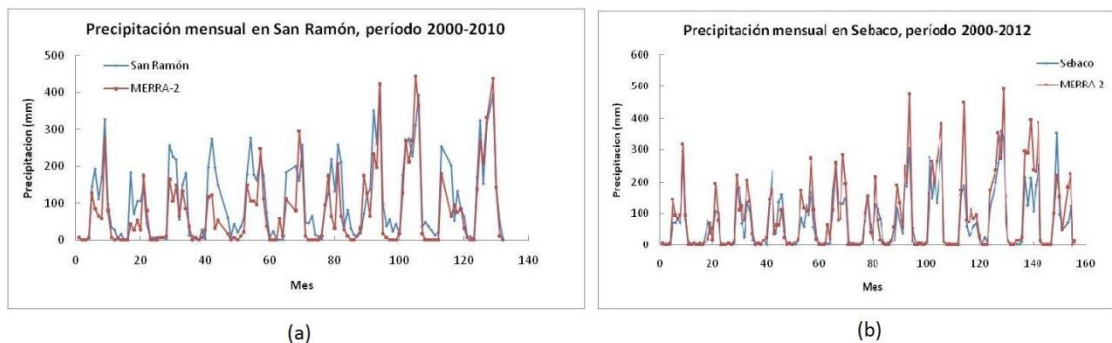


Figura 6. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación San Ramón (b) en la estación Sébaco.

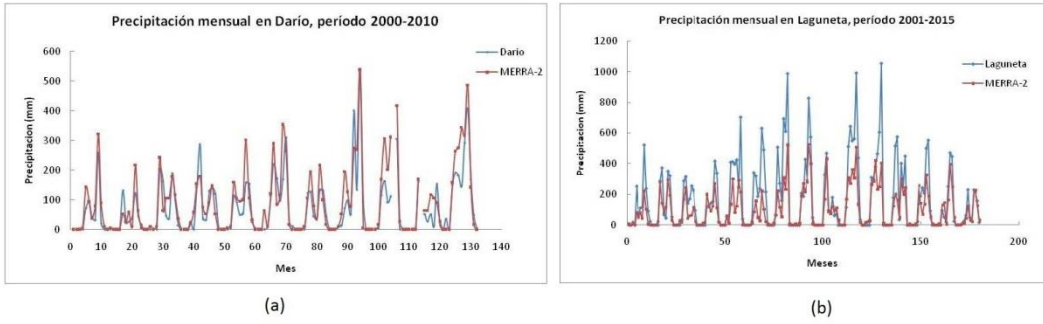


Figura 7. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación Darío (b) en la estación Laguneta.

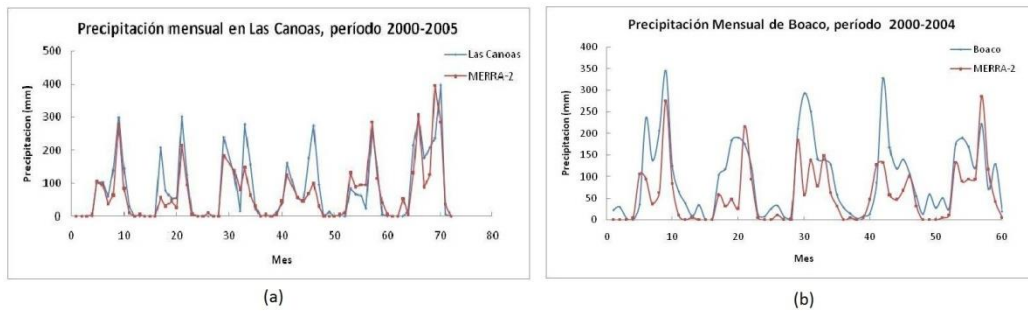


Figura 8. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación Las Canoas (b) en la estación Boaco.

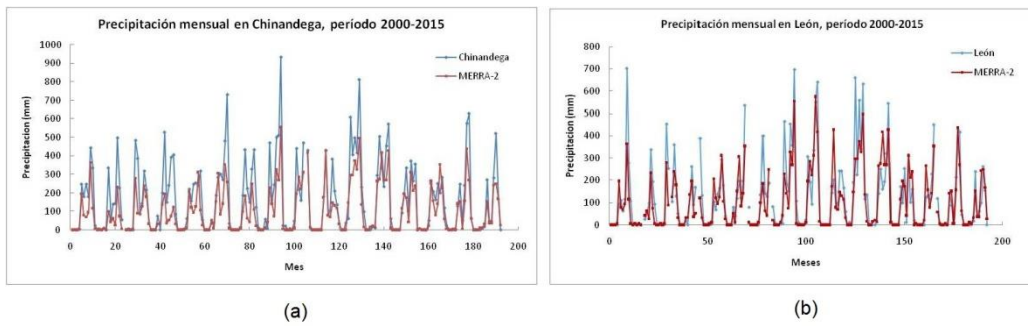


Figura 9. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación Chinandega (b) en la estación León.

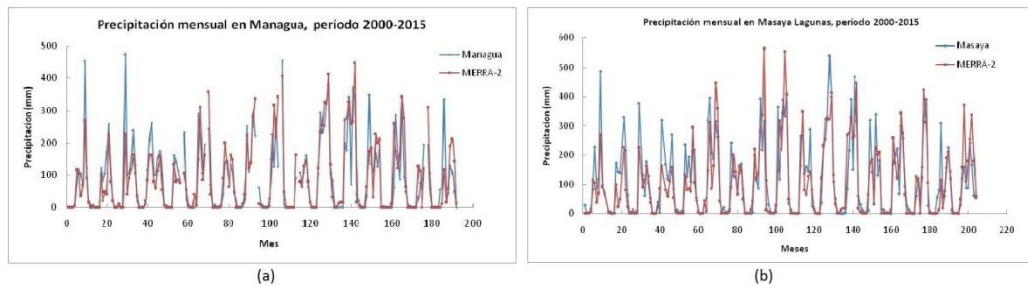


Figura 10. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación Aeropuerto de Managua (b) en la estación Masaya Lagunas.

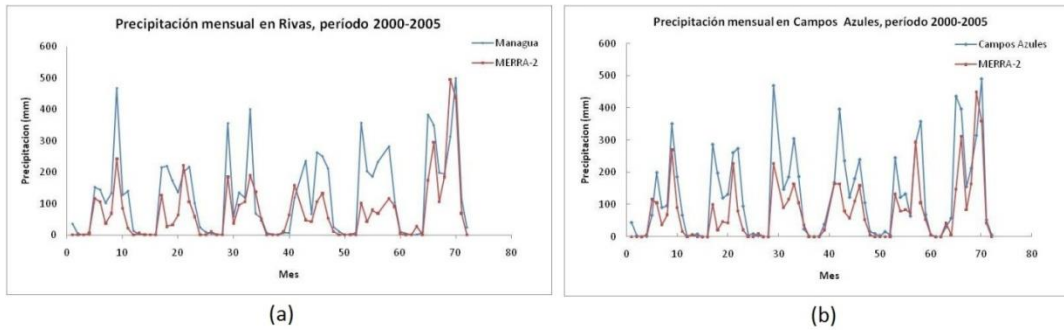


Figura 11. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación Rivas (b) en la estación Campos Azules.

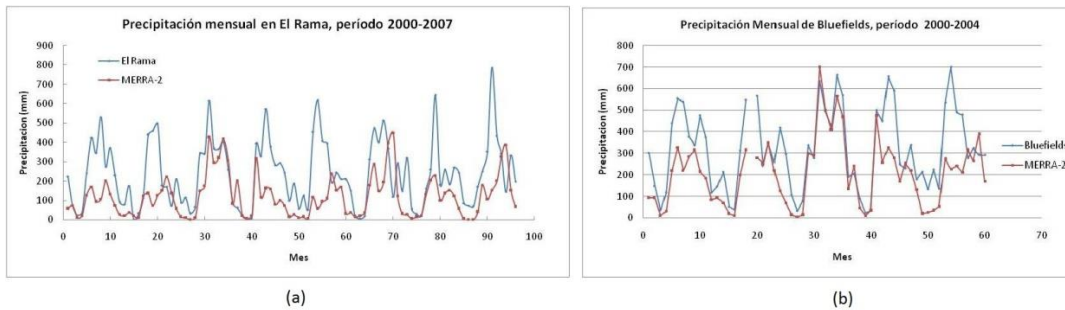


Figura 12. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación El Rama (b) en la estación Campos Azules.

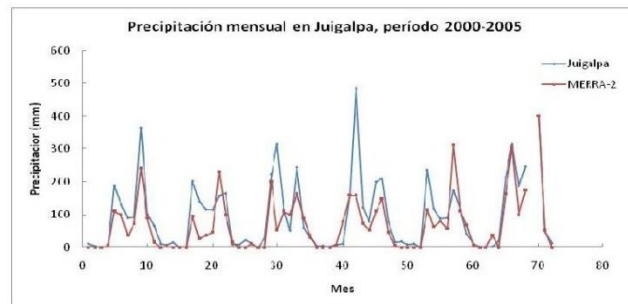


Figura 13. Precipitación mensual del producto MERRA-2 y (a) en la estación Juigalpa.

Se realizó el análisis estadístico con las precipitaciones mensuales para las estaciones seleccionadas y del producto MERRA-2. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de este análisis estadístico.

Los valores del coeficiente de determinación R^2 resultan buenos para las estaciones seleccionadas, obteniendo valores de 0.61 a 0.79, con excepción de las estaciones San Sebastián de Yalí, Las Praderas, El Rama y Chinandega que tienen un valor de R^2 entre 0.55 y 0.58. Los valores de la Raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) varían de 50 a 82 mm para casi todas las estaciones, excepto para las estaciones Laguneta, Rivas, Chinandega, El Rama y Bluefields cuyo valor de $RMSE > 90$ mm. El coeficiente de sesgo es negativo para la mayoría de las estaciones, lo que indica que el producto MERRA-2 subestima la precipitación, variando de -35 a -110 mm, con excepción de las estaciones Rivas, Chinandega, El Rama y Bluefields cuyo $BIAS$ varía de -49 a -110 mm, que se corresponde con los bajos valores de sus R^2 .

Solamente en los pixeles de las estaciones Ocotol, Darío y Sébaco se presentan coeficientes de sesgo positivo, indicando que se sobre estima la precipitación con respecto a la de los pluviómetros. La estación que presenta menor valor del sesgo (desviación media) es la del Aeropuerto de Managua.

Evaluando productos satelitales con mediciones terrestres de precipitación a escala mensual, Obando et al. (2017) en Argentina encontraron valores de R^2 entre 0.74 y 0.91; Chen y Li (2016) en la parte norte de China encontraron valores de R^2 mayores que 0.9 para datos a escala mensual; Xiao et al. (2020) en la parte sur de China encontraron valores de R^2 entre 0.6 y 0.85; y Salih et al. (2022) en Marruecos encontraron valores de R^2 entre 0.40 y 0.70. Esto se corresponde bien con los resultados obtenidos a escala mensual en este estudio.

Tabla 2. Estadísticos de ajuste para precipitaciones mensuales registradas en pluviómetros y del producto MERRA-2, en las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Estación	Año inicial	Año Final	Ecuación	R^2	RMES (mm)	BIAS (mm)
San Sebastián de Yalí	2000	2015	$y = 0.784x + 48.88$	0.586	74.0	-30.8
Ocotol	2000	2015	$y = 0.693x + 8.811$	0.688	57.2	17.0
Las Praderas	2000	2015	$y = 0.763x + 54.15$	0.561	76.1	-34.7
Sébaco	2000	2012	$y = 1.141x + 8.283$	0.781	57.3	18.6
Darío	2000	2010	$y = 1.034x + 14.45$	0.779	55.7	16.9
Jinotega	2000	2015	$y = 0.890x - 5.062$	0.690	60.5	-15.9
San Ramón	2000	2010	$y = 0.827x - 11.15$	0.755	60.9	-29.5
Laguneta	2001	2015	$y = 1.590x + 14.04$	0.762	151.7	-74.3
Bluefields	2000	2004	$y = 0.935x + 123.9$	0.611	160.4	-110.3
El Rama	2000	2007	$y = 0.534x - 3.757$	0.557	148.2	-107.7
Chinandega	2000	2015	$y = 1.342x + 26.48$	0.772	115.4	-60.0
León	2000	2015	$y = 1.085x + 12.45$	0.760	82.4	-21.1
Aeropuerto Managua	2000	2015	$y = 0.826x + 14.49$	0.700	61.3	-1.1
Juigalpa	2000	2005	$y = 0.668x + 9.159$	0.663	68.9	-27.5
Rivas	2000	2005	$y = 1.072x + 43.89$	0.633	92.9	-49.1
Boaco	2000	2004	$y = 0.658x - 4.353$	0.617	60.9	-35.1
Masaya Lagunas	2000	2015	$y = 0.838x + 26.49$	0.681	74.6	-9.7
Campos Azules	2000	2005	$y = 1.197x + 36.41$	0.713	90.4	-51.2
Las Canoas	2000	2005	$y = 0.677x + 7.946$	0.793	50.3	-17.3

Lo anterior nos indica que la precipitación mensual del producto MERRA-2 representa de forma aceptable la precipitación registrada en las estaciones seleccionadas.

Se realizó el análisis estadístico con las precipitaciones anuales para las estaciones seleccionadas y del producto MERRA-2. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de este análisis estadístico.

De forma general, los coeficientes R^2 obtenidos a escala anual disminuyeron de valor con respecto a los obtenidos a escala mensual, con valores considerados muy bajos en las estaciones Bluefields, El Rama y Las Praderas y Las Canoas ($R^2 < 0.45$). Para las otras estaciones el valor de $R^2 \geq 0.45$, lo que se considera bueno. Los valores de la Raíz del error cuadrático medio (RMSE) variaron de 300 a 650 mm, con

excepción de las estaciones Laguneta, Bluefields, El Rama y Chinandega (1063, 1351, 1486 y 1432 mm respectivamente) que se consideran muy altos. El coeficiente de sesgo *BIAS* resulto negativo para la mayoría de las estaciones, variando de -600 a 226 mm, con excepción de las estaciones Laguneta, Bluefields, El Rama y Chinandega que tienen coeficientes *BIAS* > 700 mm, lo cual se corresponde con sus bajos coeficientes R^2 y altos *RMSE*.

En Argentina, Garay (2021) utilizando datos de precipitación a escala anual encontró valores de R^2 entre 0.6 y 0.8; Méndez Rivas (2016) en Chile encontró valores de R^2 entre 0.4 y 0.87; Salih et al. (2022) en Marruecos encontraron valores de R^2 entre 0.60 y 0.75; y Xiao et al. (2020) en la parte sur de China encontraron valores de R^2 entre 0.6 y 0.85. Esto se corresponde bien con los resultados obtenidos a escala anual en este estudio.

Tabla 3. Estadísticos de ajuste para precipitaciones anuales registradas en pluviómetros y del producto MERRA-2, en las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Estación	Año inicial	Año Final	Ecuación	R^2	<i>RMES</i> (mm)	<i>BIAS</i> (mm)
San Sebastián de Yalí	2000	2015	$y = 0.943x + 440.7$	0.580	474.9	-382.0
Ocotal	2000	2015	$y = 0.509x + 293.8$	0.478	330	211
Las Praderas	2000	2015	$y = 0.378x + 1049$	0.379	493.5	-408.7
Sébaco	2000	2012	$y = 0.587x + 246.8$	0.695	351	226
Darío	2000	2010	$y = 0.634x + 163.1$	0.722	365	253
Jinotega	2000	2015	$y = 0.566x + 605.9$	0.592	305	-123
San Ramón	2000	2010	$y = 0.831x + 635.4$	0.729	525	-470
Laguneta	2001	2015	$y = 1.431x + 363.6$	0.574	1063	-892
Bluefields	2000	2004	$y = 0.342x + 2897$	0.235	1351	-1268
El Rama	2000	2007	$y = 0.238x + 2523$	0.138	1486	-1433
Chinandega	2000	2015	$y = 0.796x + 985.9$	0.511	817	-730
León	2000	2015	$y = 0.837x + 517.5$	0.495	502	-313
Aeropuerto Managua	2000	2015	$y = 0.532x + 485.0$	0.636	300	76
Juigalpa	2000	2005	$y = 0.589x + 643.8$	0.737	344	-278
Rivas	2000	2005	$y = 0.648x + 925.9$	0.744	641	-607
Boaco	2000	2004	$y = 0.876x + 575.6$	0.644	500	-493
Masaya Lagunas	2000	2015	$y = 0.534x + 767.0$	0.633	357	-207
Campos Azules	2000	2005	$y = 0.841x + 778.5$	0.731	661	-636
Las Canoas	2000	2005	$y = 0.626x + 538.1$	0.418	347	-239

Lo anterior nos indica que la precipitación anual del producto MERRA-2 representa de forma aceptable la precipitación registrada en las estaciones seleccionadas, con excepción de la estaciones, El Rama y Bluefields por tener valores de R^2 muy bajos y *RMES* y *BIAS* muy altos.

La utilidad de las ecuaciones de correlación lineal de las Tablas 2 y 3, es que nos permiten estimar la precipitación mensual y anual, a partir de los datos de precipitación obtenido de los productos satelitales.

Tomando como base este resultado, se procedió a calcular en la hoja de Microsoft Excel las precipitaciones mensuales promedias (interanuales) de MERRA-2 para los 155 puntos distribuidos en el

país (ver Figura 1b) en el período 2000-2021, con los cuales por interpolación con el método Kriging normal, en un sistema SIG se obtuvieron mapas raster de precipitación mensual. También se obtuvo en esos puntos geográficos las precipitaciones medias anuales y el correspondiente mapa de precipitación media anual. La Figura 14 a la Figura 18 muestran los mapas de precipitación obtenidos.

Para validar los mapas obtenidos por el método de interpolación Kriging normal, se compararon las precipitaciones media mensual y anual de los 155 puntos de MERRA-2 y las generadas por el método de Kriging en dichos puntos. En la Tabla 4 se muestran los parámetros estadísticos obtenidos, donde se observa que el coeficiente de determinación R^2 varía de 0.98 a 0.99, los $RMSE$ varían de 0.23 a 12 mm, que es bastante bajo (por lo tanto bueno), y el sesgo $BIAS$ varía de -0.73 a 0.039 mm, que también es bastante bajo. Estos resultados validan los valores de los mapas raster obtenidos por el método de interpolación Kriging normal con respecto a los valores de la precipitación del producto MERRA-2.

En los mapas generados se observan las variaciones temporales de las precipitaciones en los diferentes meses del año y las variaciones espaciales en las regiones del Pacífico, Central y Caribeña, y en las zonas Norte, Central y Sur de cada región del país.

Tabla 4. Estadísticos de evaluación para precipitaciones del producto MERRA-2 y las generadas en el mapa ráster por el método Kriging normal.

Mes	Coeficiente		
	R^2	$RMSE$ (mm)	$BIAS$ (mm)
Enero	0.9998	0.486	0.001
Febrero	0.9998	0.286	0.000
Marzo	0.9997	0.231	0.001
Abril	0.9997	0.278	0.002
Mayo	0.9998	0.636	-0.005
Junio	0.9760	12.088	-0.739
Julio	0.9997	1.278	-0.020
Agosto	0.9946	4.034	0.039
Septiembre	0.9999	0.717	-0.026
Octubre	0.9998	0.910	-0.020
Noviembre	0.9998	1.218	-0.038
Diciembre	0.9998	0.797	-0.012
Anual	0.9997	8.002	-0.166

En el mapa de la precipitación media anual (Figura 18) se destaca la región Norte central con las precipitaciones más bajas, entre 900 y 1200 mm al año, la región del Caribe se destaca con las precipitaciones anuales más altas, entre 1400 y 3100 mm al año. La región del Pacífico las precipitaciones anuales varían de 1200 a 1800 mm. Los mapas generados podrían ser de gran utilidad en las estimaciones de erosión del suelo, producción agrícola, balance hidrológico y generación hidroeléctrica en aquellos sitios que no disponen de registros históricos de precipitaciones.

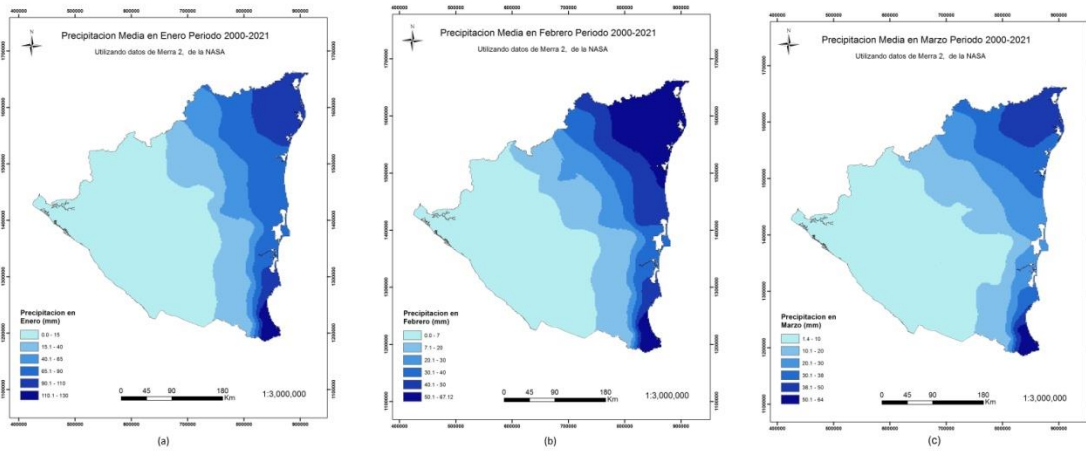


Figura 14. Precipitación media mensual obtenida del producto MERRA-2. (a) Enero, (b) en Febrero, (c) en Marzo.

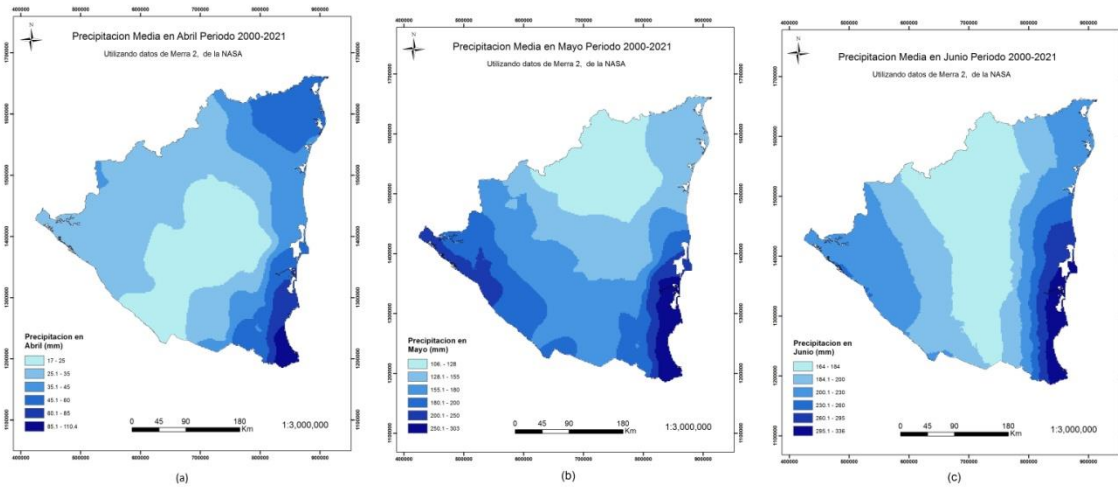


Figura 15. Precipitación media mensual obtenida del producto MERRA-2. (a) en Abril, (b) en Mayo, (c) en Junio.

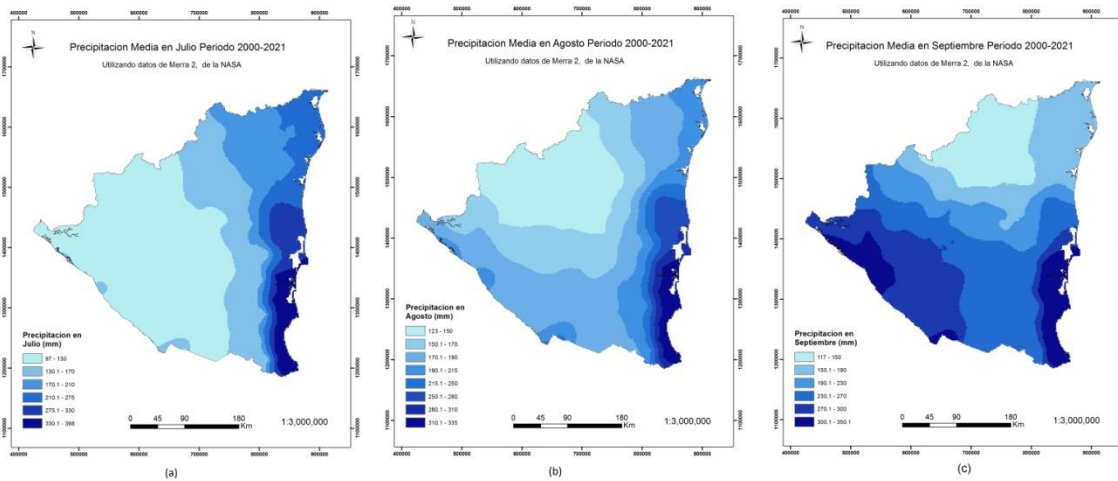


Figura 16. Precipitación media mensual obtenida del producto MERRA-2. (a) Julio, (b) en Agosto, (c) Septiembre.

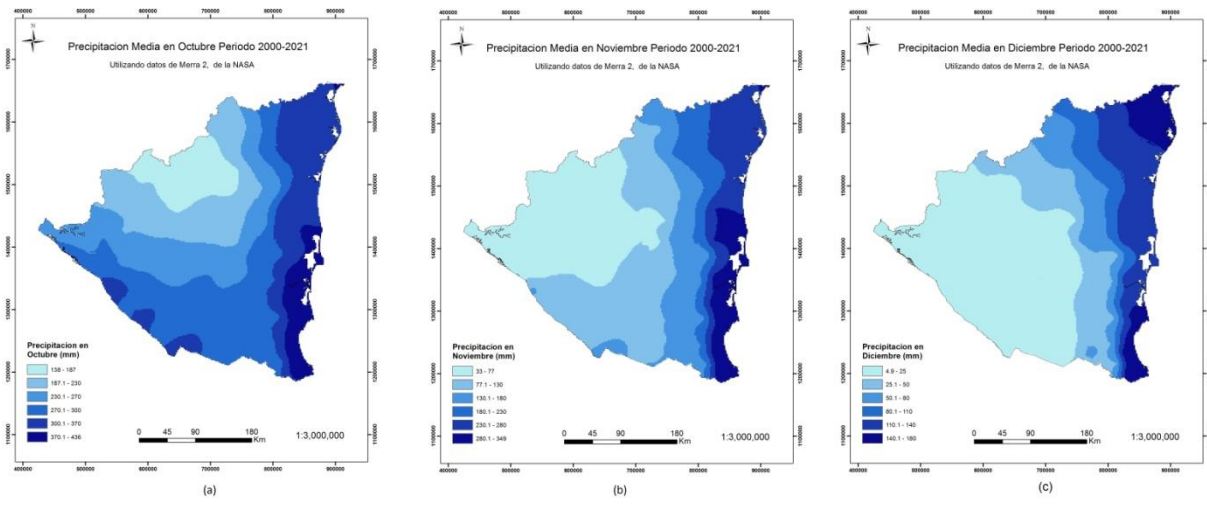


Figura 17. Precipitación media mensual obtenida del producto MERRA-2. (a) en Octubre, (b) en Noviembre, (c) en Diciembre.

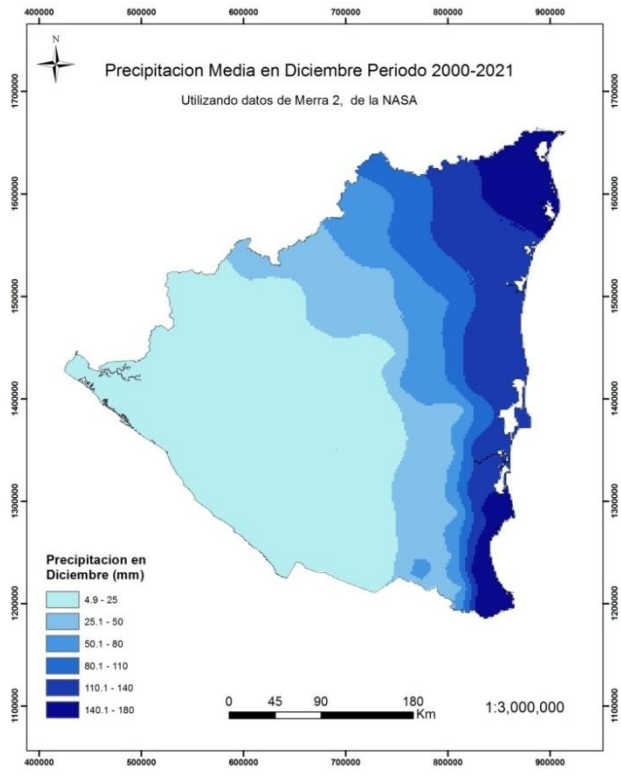


Figura 18. Precipitación media anual obtenida del producto MERRA-2.

4. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados en este estudio indican que la precipitación mensual y anual estimada a partir de los productos MERRA-2 reproducen adecuadamente el patrón temporal de la precipitación registrada con los pluviómetros de la red meteorológica del país.

Los valores estimados del coeficiente de determinación R^2 , para la precipitación mensual medida con los pluviómetros y la precipitación mensual de MERRA-2 en los sitios de las estaciones meteorológicas seleccionadas, resultaron en el rango de 0.56 a 0.79, con coeficientes de $RMSE$ en promedio 60 mm y $BIAS$ en promedio 70 mm, por lo que se considera que las ecuaciones de correlación lineal obtenidas son buenas para estimar las precipitaciones medias mensuales en el país a partir de los mapas de precipitación media mensual generados en este estudio.

Las ecuaciones de correlación determinadas para la precipitación anual medida con los pluviómetros y la precipitación anual de MERRA-2 en los sitios de las estaciones meteorológicas seleccionadas, se pueden utilizar para estimar las precipitaciones medias anuales en el país a partir de los mapas de precipitación media anual generados en este estudio.

La serie de precipitación máxima diaria de los productos MERRA-2 no puede ser utilizada para análisis de frecuencia de máximos diarios ya que el coeficiente de correlación R^2 con la serie máxima diaria observada en pluviómetro es casi cero.

REFERENCIAS

Chen, F. y Li, X. (2016). Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China. *Remote Sensing*, 8(6), 1-18. <https://doi.org/10.3390/rs8060472>

Garay, D. D. (2021). *Análisis Comparativo entre datos anuales de precipitación estimada por satélite y observaciones pluviométricas de los Llanos de La Rioja*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_infomre_precipitacion_estimada_por_satelite_y_observaciones_pluviometricas.pdf

Gehne, M., Hamil, T. M., Kiladis, G. N., y Temberth, K. E. (2016). Comparison of Global Precipitation Estimates across a Range of Temporal and Spatial Scales. *Journal of Climate*, Vol 29 (pg. 773-7795). DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0618.1

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, INETER. (2004). *Atlas Climático de Nicaragua*. El mismo.

Mehta, A., y Markert, K. (2018). *Introducción al Uso del Modelo VIC con Observaciones de la Tierra de la NASA*. NASA.

Méndez Rivas, R. A. (2016). *Productos de Precipitación Satelital de Alta Resolución Espacial y Temporal en Zonas de Topografía Compleja*. [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/11534/21480/RUTH%20ARACELLY%20M%C3%89NDZ%20RIVAS%20.pdf?sequence=1>

NASA (2022). *The Power Project*. <https://power.larc.nasa.gov/>

Ovando, G. Sayago, S., Bellini, Y., y Boco, M. (2018). *Evaluación del desempeño de productos satelitales para estimar precipitación en Córdoba (Argentina)*. Congreso Argentino de AgroInformática. 47JAIIO - CAI (p. 203-214).

Reichle, R. H., Draper, C. S., Liu, Q., Girotto, M., Mahanama, S. P., Koster, R. D., y De Lannoy, G. J.J. (2017). Assessment of MERRA-2 Land Surface Hydrology Estimates. *Journal of Climate*, Vol. 30 (8). <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/30/8/jcli-d-16-0720.1.xml>

Salih, W., Chehbouni, A., y Epule, T.E. (2022). Evaluation of the Performance of Multi-Source Satellite Products in Simulating Observed Precipitation over the Tensift Basin in Morocco. *Remote Sens*. Vol. 14, 1171. <https://doi.org/10.3390/rs14051171>

Villavicencio Guillén, E. M. (2019). *Datos de Precipitación y Temperatura en zonas de escasa información de la Región Ancash, Periodo 2012-2017, 2019*. [Monografía, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/4356/T003_45710128_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Xiao, S. , Xia, J. and Zou, L. (2020). Evaluation of Multi-Satellite Precipitation Products and Their Ability in Capturing the Characteristics of Extreme Climate Events over the Yangtze River Basin, China. *Water*, 12, 1179. doi:10.3390/w12041179

SEMBLANZA DEL AUTOR

Miguel E. Blanco Chávez: Obtuvo el grado de Ingeniero Civil en la Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua. Desarrolló sus estudios de Maestría en Ingeniería Ambiental en el Programa de Investigación y Docencia en Medio Ambiente (PIDMA) de la UNI, Nicaragua. Ha participado como consultor en proyectos hidroeléctricos, de amenazas por inundación, de drenaje pluvial y manejo de cuencas hidrográficas. Ha sido profesor de hidráulica e hidrología en la carrera de ingeniería civil en la FTC de la UNI. Actualmente imparte los cursos Hidrología Aplicada y Redes de Alcantarillado en el Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA) de la UNI, Nicaragua.