

VALIDACIÓN DE PRECIPITACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL LAGO DE YOJOA EN HONDURAS: COMPARACIÓN DE DATOS SATELITALES CHIRPS Y CMORPH CON OBSERVACIONES TERRESTRES

Abstrac ID 815

VALIDATION OF PRECIPITATION IN THE YOJOA LAKE SUB-BASIN IN HONDURAS: COMPARISON OF CHIRPS AND CMORPH SATELLITE DATA WITH GROUND-BASED OBSERVATIONS

Dayan Pichardo^(1,2), Lenín Henríquez-Dole⁽³⁾

¹ Unidad de Hidrología - Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE)

² Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT), Tegucigalpa, Honduras

³ Red Interdisciplinaria para la Sostenibilidad de los Ecosistemas (EcoAgsus), Mendoza, Argentina

Email: mishellpichardo@gmail.com; l.henriquez@ecoagsus.com

RESUMEN

Los datos de precipitación son esenciales en la gestión de recursos naturales, estudios hidrológicos, y planificación de infraestructuras hidráulicas. No obstante, la medición de la precipitación es escasa, limitada o nula en muchas regiones del mundo, lo que ha impulsado el uso de productos satelitales para estimarla. Este estudio evalúa la precisión de los datos diarios (y su agregación mensual y anual) de precipitación satelitales CHIRPS y CMORPH mediante la comparación con observaciones terrestres en la subcuenca del Lago de Yojoa, Honduras. Se utilizaron datos de precipitación diaria de 10 estaciones hidroclimatológicas para un periodo comprendido entre 1981 y 2015. A nivel diario, los datos satelitales de CHIRPS mostraron un bajo ajuste con los datos observados, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0.02 y 0.07. La revisión de la distribución de los datos diarios indicó que los datos satelitales presentan pocos días con precipitación y tienden a acumular la lluvia durante esos días, a diferencia de las observaciones terrestres. A nivel mensual, los datos satelitales presentaron un mejor ajuste, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0.63 y 0.84. Estos resultados subrayan la importancia de la validación regional de datos satelitales para su aplicación en estudios hidrológicos, y sugieren que, aunque los datos satelitales son útiles a nivel mensual, su uso a nivel diario aún requiere mayor estudio y desarrollo de métodos de corrección del sesgo. Las implicaciones de estos hallazgos son significativas para la gestión de recursos hídricos en regiones con limitaciones en la infraestructura de monitoreo.

Palabras clave: Meteorología, Climatología, Pluviometría, Satélite, Hidroclimatología.

ABSTRACT

Precipitation data are essential in natural resource management, hydrological studies, and hydraulic infrastructure planning. However, precipitation measurement is sparse, limited, or nonexistent in many regions of the world, prompting the use of satellite products to estimate it. This study evaluates the accuracy of daily (and their monthly and annual aggregation) satellite precipitation data from CHIRPS and CMORPH by comparing them with ground observations in the Lake Yojoa sub-basin, Honduras. Daily precipitation data from 10 hydroclimatological stations were used for the period from 1981 to 2015. At the daily level, CHIRPS satellite data showed a poor fit with observed data, with coefficients of determination (R^2) between 0.02 and 0.07. A review of the daily data distribution indicated that the satellite data had few days with precipitation and tended to accumulate rain on those days, unlike terrestrial observations. At the monthly level, satellite data showed a better fit, with R^2 values between 0.63 and 0.84. These results highlight the importance of regional validation of satellite data for their application in hydrological studies and suggest that while satellite data are useful at the monthly level, their use at the daily level still requires further study and development of bias correction methods. The implications of these findings are significant for water resource management in regions with limited monitoring infrastructure.

Key words: Meteorology, Climatology, Pluviometry, Satellite, Hydroclimatology.

Introducción

La gestión y el monitoreo de los recursos hídricos constituyen un desafío global, especialmente en regiones vulnerables a los efectos del cambio climático y la intervención humana. Honduras enfrenta retos particulares en este ámbito debido a su dependencia de la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica, actividades altamente sensibles a las variaciones climáticas (Vega et al., 2015). El cambio climático ya está afectando los patrones globales de precipitación, con un incremento notable en la variabilidad de la misma (Dore, 2005). Estudios proyectan reducciones significativas en la precipitación y escurrimiento en el norte de Centroamérica, incluyendo Honduras, con aumentos en la frecuencia e intensidad de sequías y eventos de lluvia extrema (Hidalgo et al., 2013).

La precipitación es una variable clave en el ciclo hidrológico, esencial para la gestión de recursos hídricos y la planificación de infraestructuras hidráulicas. Tradicionalmente, la medición de la precipitación se ha realizado mediante estaciones meteorológicas terrestres, que, aunque precisas, presentan limitaciones en cuanto a cobertura espacial y continuidad de datos. Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de productos de precipitación a partir de plataformas satelitales, que ofrecen la posibilidad de monitorear esta variable a escala global con alta resolución temporal y espacial. Sin embargo, la validez de estos productos satelitales depende de su calibración y validación en contextos regionales específicos.

El estudio se centró en la subcuenca del Lago de Yojoa, una región caracterizada por su diversidad geográfica y climática, ubicada en Honduras, donde se realizó una comparación de datos de

precipitación satelitales provenientes de Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) y Climate Prediction Center Morphing Technique (CMORPH), con observaciones terrestres para evaluar su precisión y fiabilidad para ser usados en estudios hidrológicos en esta área.

Metodología

Se utilizaron datos de precipitación diaria de 10 estaciones hidroclimatológicas operadas por la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE), con registros disponibles para distintos períodos comprendidos entre 1960 y 2015. Las estaciones seleccionadas son: El Cielito, El Jaral, Horconchos, El Mochito, Pedernales, El Planón, El Sauce, La Jutosa, Pito Solo y Santa Elena (Figura 1).

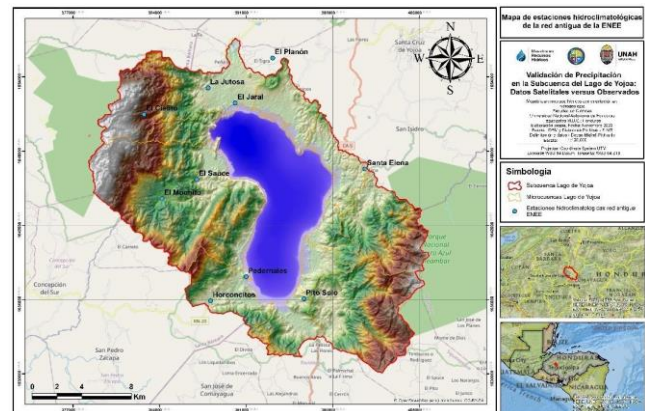


Figura 1. Mapa de ubicación de estaciones hidroclimatológicas. Fuente: Elaboración propia

Se emplearon datos de los productos satelitales CHIRPS V2.0 (escala temporal diaria, y espacial de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$) y CMORPH (escala temporal diaria, y espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$). CHIRPS combina datos de estaciones terrestres con datos estimados de precipitación a través de sensores infrarrojos para proporcionar estimaciones de precipitación a nivel global. CMORPH utiliza datos de varios sensores

satelitales para estimar la precipitación, integrando observaciones de microondas y sensores infrarrojos. Se restringió el periodo de análisis a la intersección entre los datos observados y los datos satelitales para cada estación, por lo que cada una contiene dos periodos de análisis: uno para CHIRPS (a partir de 1981) y otro para CMORPH (a partir de 1998) - ver Tabla 1.

No.	Estación	Fecha	CHIRPS	CMORPH
1	El Cielito	Inicio	1/5/2006	1/5/2006
		Final	30/4/2015	30/4/2015
2	El Jaral	Inicio	1/5/1981	1/5/1998
		Final	30/4/2015	30/4/2015
3	Horconcitos	Inicio	1/5/2006	1/5/2006
		Final	30/4/2014	30/4/2014
4	El Mochito	Inicio	1/5/1985	1/5/1998
		Final	30/4/2015	30/4/2015
5	Pedernales	Inicio	1/5/2006	1/5/2006
		Final	30/4/2015	30/4/2015
6	El Planón	Inicio	1/5/2006	1/5/2006
		Final	30/4/2012	30/4/2012
7	El Sauce	Inicio	1/5/2006	1/5/2006
		Final	30/4/2008	30/4/2008
8	La Jutosa	Inicio	1/5/1985	1/5/1998
		Final	30/4/2015	30/4/2015
9	Pito Solo	Inicio	1/5/1981	1/5/1998
		Final	30/4/2015	30/4/2015
10	Santa Elena	Inicio	1/5/1981	1/5/1998
		Final	30/4/2014	30/4/2014

Tabla 1. Periodo de análisis para CHIRPS y CMORPH

Para realizar los cálculos y análisis se utilizaron códigos de programación en el lenguaje R y el programa RStudio versión 2023.03.0+386 con los paquetes hydroTSM, ggplot2, plotly, stats, trend y grid. Adicionalmente, varios de los cálculos y gráficas se realizaron en MS Excel.

La limpieza de datos incluyó la conversión de formatos de fecha y la asignación de valores NA a datos faltantes. Se realizó un análisis estadístico inicial de las series de precipitación para cada estación: valores mínimos, máximos, medias, mediana, cuartiles, rango intercuartílico, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría y curtosis. Se verificó la coherencia de los datos, identificando posibles inconsistencias como valores negativos. Para detectar valores atípicos (outliers), se utilizó el método del Rango Intercuartílico (IQR), estableciendo un umbral máximo para evaluar dichos valores.

Se calcularon precipitaciones acumuladas mensuales y anuales a partir de las registradas de forma diaria y se crearon visualizaciones de gráficos lineales, histogramas y boxplots para analizar la precipitación diaria, mensual y anual. Para evaluar la consistencia de los datos, se aplicó la técnica de la curva de doble masa. Este método implicó comparar los registros de precipitación acumulada de una estación específica con el promedio acumulado de otras estaciones en la subcuenca que disponían de registros anuales para el mismo período. Si la curva resultante era lineal y estable, se concluyó que los datos de la estación eran consistentes y aptos para el posterior análisis.

Se realizaron pruebas estadísticas para analizar las características de las series temporales. La prueba de Mann-Kendall se utilizó para detectar tendencias en las series de tiempo mensuales. Esta prueba, implementada en RStudio utilizando la función `mk.test` del paquete `trend`, comparó cada valor de la serie con los valores posteriores para determinar la dirección de los cambios (aumento o disminución) y evaluar la significancia estadística de las tendencias observadas. Además, se utilizó el Análisis Innovador de Tendencias (ITA) a través de la función

sems.slope del paquete Trend para visualizar estas tendencias. El ITA se basa en la comparación de la primera mitad de la serie con la segunda mitad, permitiendo identificar si los valores aumentan o disminuyen con el tiempo.

Para evaluar la aleatoriedad e independencia de las series de datos, se empleó la prueba de Wald-Wolfowitz, también implementada en RStudio a través de la función `ww.test` del paquete Trend. Esta prueba consistió en contar el número de rachas (cambios entre días con y sin lluvia) para determinar si las observaciones eran independientes o si presentaban algún patrón. Se calcularon los valores de Z y p-value para evaluar la significancia estadística de la aleatoriedad o la presencia de patrones en las series de datos.

En cuanto a la homogeneidad, se aplicó la prueba de Pettit, utilizando la función `pettit.test` del paquete Trend en RStudio. Esta prueba fue utilizada para identificar posibles rupturas o cambios significativos en la serie temporal. Al dividir la serie en dos subconjuntos en el punto de mayor cambio, se compararon las medias de estos subconjuntos para determinar si existía una diferencia estadísticamente significativa, utilizando el p-value como indicador.

Se realizó la prueba de Wilcoxon para evaluar la diferencia de medianas entre las series observadas y las satelitales. Con esta prueba, se calculó el estadístico de prueba (W) y el p-value para determinar si había diferencias significativas entre las muestras.

Se calcularon varias métricas estadísticas para evaluar la precisión de las series de datos satelitales en comparación con las observadas. Estas métricas incluyeron el coeficiente de correlación de Pearson (ρ), el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2), el sesgo (bias) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). Estas métricas

proporcionaron una evaluación cuantitativa de la capacidad de los datos satelitales para representar con precisión los patrones de precipitación observados en las estaciones seleccionadas.

Resultados

Precipitación diaria

En la Tabla 2 - Precipitación diaria (mm/d) se presenta un resumen de estadísticas de precipitación diaria (mm/d) para los datos observados versus lo proveniente de CHIRPS y CMORPH.

Tabla 2. Precipitación diaria (mm/d)

		Min	1Q	Median	Mean	3Q	Max	IQR	LSI	sd	cv	skewness	kurtosis	NA's	n
El Cielito	Data Obs.	0	0	0.5	8.6	10.1	125.5	10.1	25	15.9	1.9	2.8	9.0	1	3287
	CHIRPS	0	0	0.0	6.6	9.8	126.5	9.8	25	12.3	1.9	3.0	13.3	0	3287
	CMORPH	0	0	0.0	36.8	33.0	1206.0	33.0	83	86.1	2.3	4.5	31.1	0	3287
El Jaral	Data Obs.	0	0	0.8	8.5	9.9	208.3	9.9	25	16.4	1.9	3.5	18.0	637	12418
	CHIRPS	0	0	0.0	7.5	10.6	177.5	10.6	27	14.5	1.9	3.2	15.8	0	12418
	CMORPH	0	0	1.0	35.2	30.0	1791.0	30.0	75	83.3	2.4	5.7	62.0	0	6209
Horconcitos	Data Obs.	0	0	0.0	6.7	8.2	165.0	8.2	21	14.4	2.1	4.2	25.2	60	2922
	CHIRPS	0	0	0.0	6.4	9.9	144.3	9.9	25	11.6	1.8	3.0	14.9	0	2922
	CMORPH	0	0	0.0	32.5	29.0	1441.0	29.0	73	76.0	2.3	5.5	60.3	0	2922
El Mochito	Data Obs.	0	0	0.2	6.4	6.8	186.7	6.8	17	13.0	2.0	3.7	20.1	105	10957
	CHIRPS	0	0	0.0	6.0	8.4	149.3	8.4	21	11.5	1.9	3.1	15.2	0	10957
	CMORPH	0	0	0.0	36.6	30.0	1396.0	30.0	75	88.1	2.4	4.9	36.7	0	6209
Pedernales	Data Obs.	0	0	0.5	7.0	7.1	136.3	7.1	18	13.8	2.0	2.9	9.8	140	3287
	CHIRPS	0	0	0.0	6.3	9.6	148.4	9.6	24	11.8	1.9	3.3	19.7	0	3287
	CMORPH	0	0	0.0	29.9	25.0	1483.0	25.0	63	73.0	2.4	6.1	71.9	0	3287
El Planón	Data Obs.	0	0	4.5	9.4	10.5	360.0	10.5	26	16.4	1.7	8.3	141.3	301	2192
	CHIRPS	0	0	0.0	7.4	11.0	160.2	11.0	27	13.9	1.9	3.6	21.6	0	2192
	CMORPH	0	0	2.0	35.9	31.0	1791.0	31.0	78	85.4	2.4	7.3	106.0	0	2192
El Sauce	Data Obs.	0	0	0.0	5.3	5.1	61.9	5.1	13	11.0	2.1	2.8	8.8	60	731
	CHIRPS	0	0	0.0	5.5	7.6	81.3	7.6	19	10.4	1.9	2.6	8.7	0	731
	CMORPH	0	0	0.0	31.2	27.5	602.0	27.5	69	67.1	2.1	3.4	14.5	0	731
La Jutosa	Data Obs.	0	0	0.7	8.5	10.0	192.3	10.0	25	16.5	1.9	3.4	15.9	648	10957
	CHIRPS	0	0	0.0	7.5	10.6	177.5	10.6	27	14.5	1.9	3.2	16.3	0	10957
	CMORPH	0	0	0.0	36.6	30.0	1396.0	30.0	75	88.1	2.4	4.9	38.7	0	6209
Pito Solo	Data Obs.	0	0	0.1	7.8	9.0	226.0	9.0	23	16.1	2.1	4.2	28.3	817	12418
	CHIRPS	0	0	0.0	7.2	10.5	242.8	10.5	26	13.7	1.9	3.7	25.4	0	12418
	CMORPH	0	0	0.0	30.7	25.0	1483.0	25.0	63	73.5	2.4	5.0	46.7	0	6209
Santa Elena	Data Obs.	0	0	1.1	8.0	9.3	198.4	9.3	23	15.4	1.9	3.7	20.4	123	12053
	CHIRPS	0	0	0.0	7.0	10.4	207.5	10.4	26	13.1	1.9	3.3	19.3	0	12053
	CMORPH	0	0	1.0	35.5	31.0	1791.0	31.0	78	83.2	2.3	5.4	57.3	0	5844

Tabla 2. Precipitación diaria (mm/d)

La comparación de las estadísticas de precipitación diaria máxima entre los datos observados y los datos satelitales de CHIRPS reveló valores elevados y consistentes en varias estaciones, especialmente en los años 1993, 1998, 2003, 2007 y 2009, con picos de hasta 250 mm. Sin embargo, se identificó una discrepancia significativa en la estación El Planón, que registró un valor atípico de 360

mm. Tras excluir esta estación, se observó una mejora en la concordancia de los datos (Figura 2). Por otro lado, los datos de CMORPH mostraron una sobreestimación sistemática de la precipitación, lo cual, debido a la falta de validación de la misma, resultó en la decisión de excluir estos datos de forma posterior.

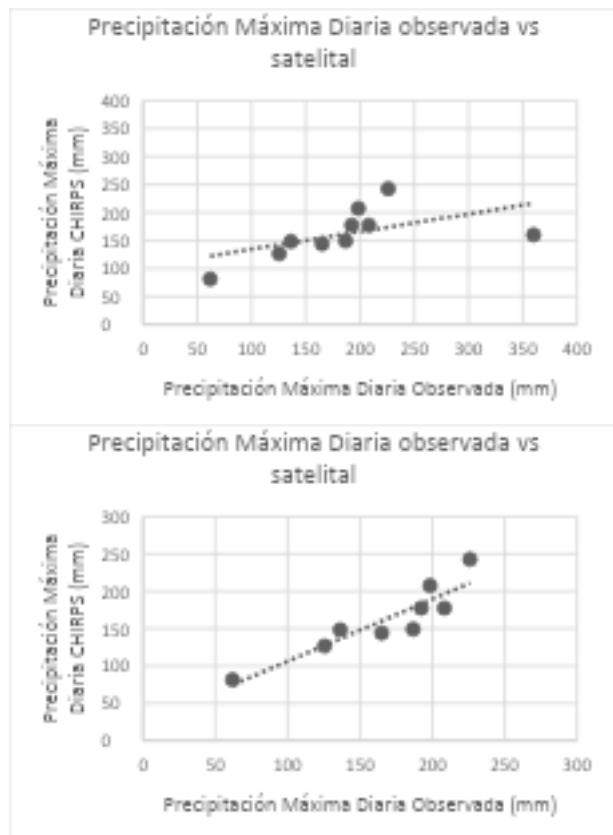


Figura 2. Comparación de precipitaciones máximas diarias observadas vs satelitales (CHIRPS) con estación El Planón (arriba) y excluyéndola (abajo).

Al centrarse en los datos observados y CHIRPS, se destacaron estaciones como Pito Solo y Santa Elena, que registraron los valores de precipitación diaria más altos, hasta 226 mm, reflejando patrones coherentes desde 1981. No se encontraron valores negativos en las series diarias, asegurando la coherencia en las sumas mensuales y anuales. Se identificaron valores atípicos (outliers) utilizando el método del IQR, estableciendo umbrales máximos de 25 mm para datos observados y 27 mm para CHIRPS. Dada la alta variabilidad natural en la precipitación diaria, se optó por un análisis mensual para suavizar estas fluctuaciones y detectar patrones más estables y significativos.

Precipitación mensual

La Tabla 3 resume las estadísticas de precipitación mensual para los datos observados y los datos satelitales de CHIRPS y CMORPH. En general, se

observó que los datos de CMORPH tienden a sobrestimar significativamente las precipitaciones en comparación con los datos observados y CHIRPS, como se refleja en sus altas medias, medianas y máximos. Por ejemplo, mientras que el valor máximo de precipitación mensual observado fue de 849 mm (en la estación Santa Elena en octubre de 1998 durante el huracán Mitch), los datos de CMORPH reportaron valores mucho más altos en varias estaciones.

Tabla 3. Precipitación mensual (mm/mes)

		Min	1Q	Median	Mean	3Q	Max	IQR	LSI	SD	CV	SKEWNESS	KURTOSIS	NA's	N
El Cielito	Data Observada	0	101	224	261	410	707	309	872	187	0.72	0.59	-0.75	0	108
	CHIRPS	19	73	178	202	286	676	212	604	157	0.78	0.91	0.10	0	108
	CMORPH	0	107	966	1120	1764	4757	1658	4251	1084	0.97	0.90	0.21	0	108
El Jaral	Data Observada	1	101	205	258	389	828	288	821	189	0.73	0.75	-0.30	31	408
	CHIRPS	9	81	178	229	365	747	284	791	174	0.76	0.76	-0.35	0	408
	CMORPH	0	116	863	1071	1719	4377	1603	4124	1035	0.97	0.87	0.04	0	204
Horconcitos	Data Observada	8	62	146	205	325	666	263	720	165	0.81	0.81	-0.26	2	96
	CHIRPS	21	63	174	195	285	710	223	619	158	0.81	0.99	0.39	0	96
	CMORPH	0	63	861	990	1638	4340	1576	4001	969	0.98	0.91	0.33	0	96
El Mochito	Data Observada	1	56	138	195	316	746	261	707	166	0.85	0.83	-0.18	4	360
	CHIRPS	9	52	147	182	294	660	242	657	147	0.81	0.77	-0.32	0	360
	CMORPH	0	79	816	1114	1815	6189	1736	4419	1138	1.02	1.12	1.30	0	204
Pedernales	Data Observada	2	62	141	214	359	600	296	803	171	0.80	0.55	-1.07	5	108
	CHIRPS	21	63	162	193	285	710	223	619	156	0.81	0.99	0.39	0	108
	CMORPH	0	61	670	909	1479	3965	1418	3606	904	1.00	0.82	-0.03	0	108
El Planón	Data Observada	26	160	275	288	373	993	214	694	175	0.61	1.70	4.70	10	72
	CHIRPS	31	106	202	225	293	605	187	574	154	0.68	0.91	0.13	0	72
	CMORPH	6	151	861	1093	1722	4241	1571	4078	1043	0.95	0.89	0.05	0	72
El Sauce	Data Observada	18	59	141	162	253	483	194	544	126	0.78	0.79	-0.24	2	24
	CHIRPS	22	40	131	167	254	503	214	574	139	0.83	0.72	-0.52	0	24
	CMORPH	1	242	701	951	1684	3145	1442	3847	923	0.97	0.78	-0.59	0	24
La Jutosa	Data Observada	0	93	200	260	400	820	308	862	196	0.75	0.72	-0.54	23	360
	CHIRPS	9	79	179	229	362	747	283	787	175	0.76	0.79	-0.26	0	360
	CMORPH	0	79	816	1114	1815	6189	1736	4419	1138	1.02	1.12	1.30	0	204
Pito Solo	Data Observada	0	100	206	238	351	834	251	728	166	0.70	0.84	0.27	27	408
	CHIRPS	10	86	180	218	317	702	231	663	154	0.70	0.74	-0.31	0	408
	CMORPH	0	64	688	933	1532	4167	1467	3733	960	1.03	0.99	0.36	0	204
Santa Elena	Data Observada	1	90	190	243	381	849	291	817	178	0.73	0.76	-0.29	6	396
	CHIRPS	11	87	179	212	316	663	229	659	147	0.69	0.69	-0.42	0	396
	CMORPH	0	124	863	1080	1737	4377	1613	4157	1046	0.97	0.88	0.02	0	192

Tabla 3. Precipitación mensual (mm/mes)

Utilizando el método del IQR, se estableció un umbral máximo (LSI) de 872 mm para los datos observados y 791 mm para los datos de CHIRPS. A excepción de dos registros de la estación El Planón (junio y agosto de 2006 con 924.9 mm y 993.4 mm respectivamente), todas las precipitaciones mensuales se mantuvieron por debajo de estos

umbrales máximos. Dado que la serie de El Planón contiene varios meses faltantes y registra valores atípicos, se decidió descartar esta estación de la mayoría de los análisis posteriores para evitar distorsiones en los resultados.

Precipitación anual

Se excluyeron los años con al menos un mes de datos incompleto para asegurar la precisión del

análisis anual. La estación El Planón fue eliminada del análisis ya que no tenía ningún año completo de datos, y la estación El Sauce fue excluida debido a que solo disponía de un año completo de registro, lo cual no es suficiente para un análisis representativo. En la Tabla 4 se puede observar el año de inicio (I) y fin (F) del registro de cada estación y en colores los años con meses faltantes no considerados para cada estación.

Tabla 4. Años con datos observados faltantes no considerados

Año Hidrológico / Estación	El Cielito	El Jaral	Horconcitos	El Mochito	Pedernales	El Planón	El Sauce	La Jutosa	Pito Solo	Santa Elena
1982		I							I	I
1983										
1984										
1985										
1986				I				I		
1987										
1988										
1989										
1990										
1991										
1992										
1993										
1994										
1995										
1996										
1997										
1998										
1999										
2000										
2001										
2002										
2003										
2004										
2005										
2006	I									
2007			I		I	I	I			
2008							F			
2009										
2010										
2011										
2012						F				
2013										
2014			F							F
2015	F	F		F	F			F	F	

Tabla 4. Años con datos observados faltantes no considerado

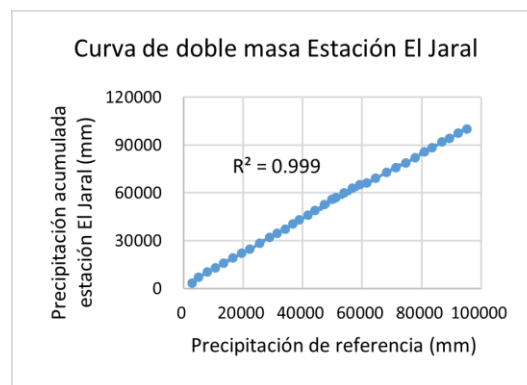
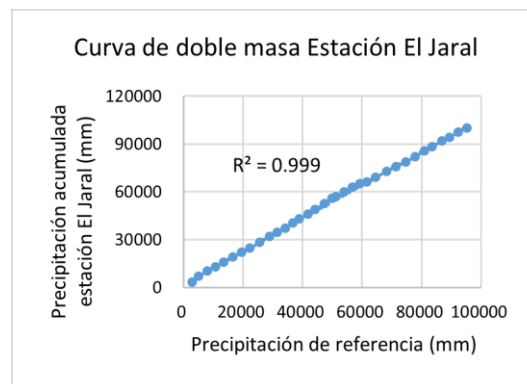
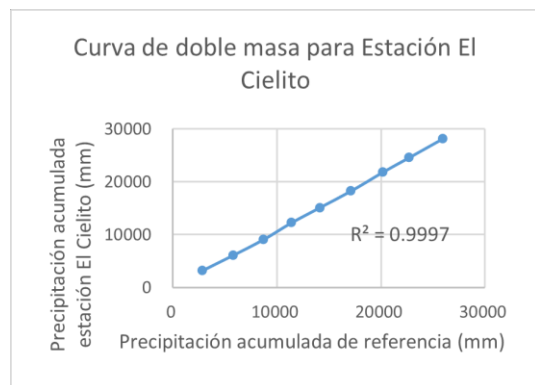
La Tabla 5 muestra un resumen de las estadísticas de precipitación anual para los datos observados y los obtenidos de CHIRPS (los datos de CMORPH ya no fueron considerados en los análisis posteriores debido a la gran diferencia mostrada). El valor mínimo anual registrado por las estaciones observadas fue de 1673 mm para el año hidrológico 2005 en la estación El Mochito, mientras que el máximo registrado fue de 4064 mm en el 2007 en la estación La Jutosa.

Tabla 5. Precipitación anual (mm/año)

		Min	1Q	Medi an	Mea n	3Q	Max	IQR	LSI	SD	CV	SKE WNE SS	KUR TOSI S	NA's	N
El Cielito	Data Obs.	2750	2888	3156	3126	3186	3595	298	3633	294	0.09	0.40	-1.39	0.00	9
	CHIRP S	2106	2241	2373	2420	2615	2774	374	3176	244	0.10	0.01	-1.70	0.00	9
El Jaral	Data Obs.	2453	2801	3040	3088	3444	3840	642	4407	414	0.13	0.37	-1.20	9.00	34
	CHIRP S	2036	2532	2726	2753	2985	3342	454	3665	315	0.11	-0.07	-0.56	0.00	34
Horconcos	Data Obs.	2014	2235	2492	2448	2537	2988	302	2990	340	0.14	0.22	-1.41	2.00	8
	CHIRP S	2032	2100	2362	2340	2515	2667	415	3138	253	0.11	0.04	-1.93	0.00	8
El Mochito	Data Obs.	1673	2174	2313	2350	2636	2816	461	3328	318	0.14	-0.32	-1.03	4.00	30
	CHIRP S	1579	2031	2129	2179	2384	2664	352	2912	260	0.12	-0.09	-0.49	0.00	30
Pedernales	Data Obs.	1891	2407	2513	2504	2770	2883	363	3314	361	0.14	-0.50	-1.27	3.00	9
	CHIRP S	2032	2104	2250	2317	2477	2667	373	3036	247	0.11	0.22	-1.85	0.00	9
La Jutosa	Data Obs.	2473	2883	3183	3199	3399	4064	516	4173	391	0.12	0.42	-0.58	6.00	30
	CHIRP S	2036	2556	2726	2751	2958	3342	402	3560	321	0.12	-0.07	-0.50	0.00	30
Pito Solo	Data Obs.	2003	2685	2834	2848	3174	3441	489	3908	404	0.14	-0.51	-0.62	9.00	34
	CHIRP S	1927	2378	2573	2619	2807	3211	429	3451	318	0.12	0.08	-0.74	0.00	34
Santa Elena	Data Obs.	2241	2801	2908	2937	3099	3578	299	3547	313	0.11	0.13	-0.16	6.00	33
	CHIRP S	1869	2327	2503	2546	2703	3165	375	3266	307	0.12	0.05	-0.52	0.00	33

Tabla 5. Precipitación anual (mm/año)

El análisis de consistencia anual, utilizando curvas de doble masa (Figura 3), consideró las estaciones de la subcuenca con registros de precipitación durante el mismo periodo. En general, todas las estaciones mostraron una buena homogeneidad en los datos anuales, indicando que estos son consistentes.



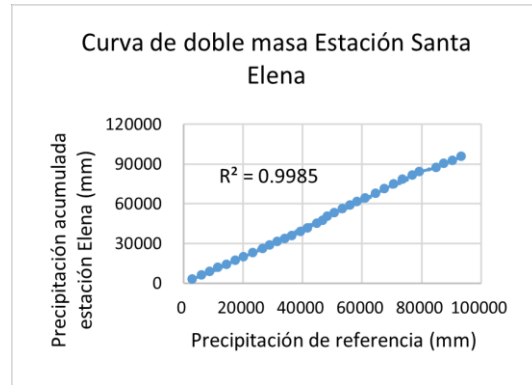
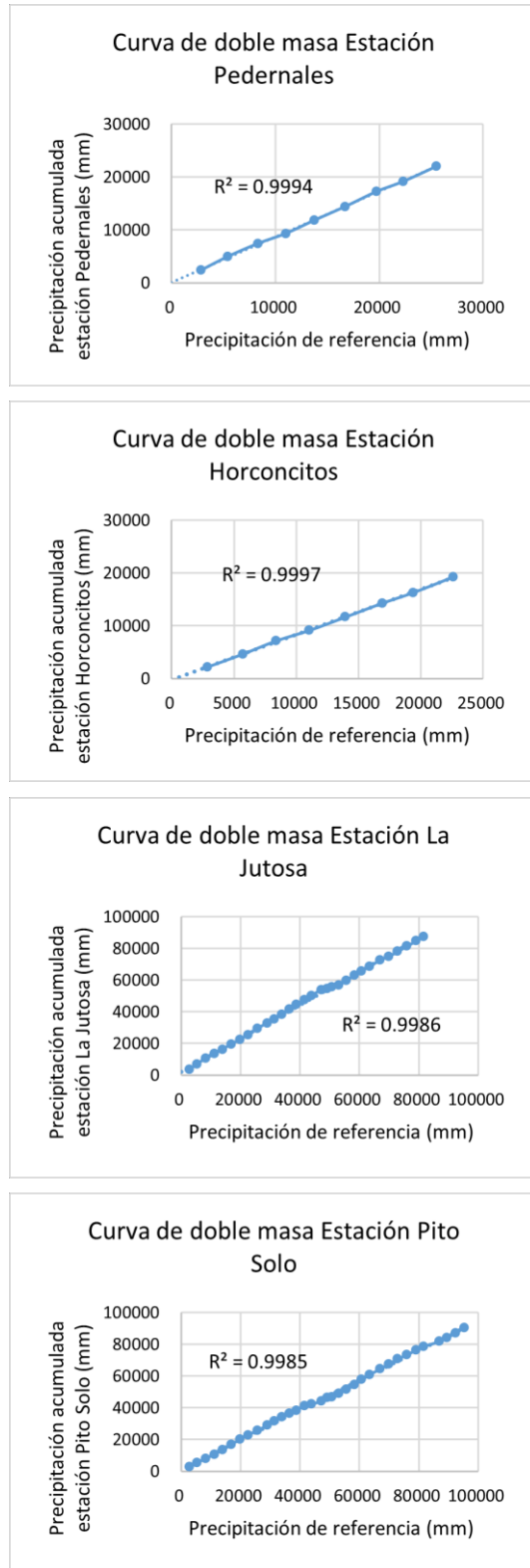


Figura 3. Curvas de doble masa para las estaciones observadas. Fuente: Elaboración propia

Los gráficos lineales muestran la tendencia de la precipitación a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en la estación Santa Elena, se observa una disminución en la precipitación entre 1985 y 2015. El diagrama de cajas o bigotes indica un régimen de precipitaciones en aumento de mayo a septiembre-octubre, con una disminución de noviembre a abril, consistente con el ciclo hidrológico típico de Honduras.

El histograma revela que la mayoría de los registros de precipitación diaria están cerca de cero, concentrándose en el extremo izquierdo del gráfico. Para la precipitación mensual, la mayoría de los valores se sitúan entre 0 y 100 mm/mes, seguidos por el rango de 100 a 200 mm/mes. En cuanto a la precipitación anual, los valores se agrupan principalmente entre 2500 y 3000 mm/año, seguidos de 3000 a 3500 mm/año.

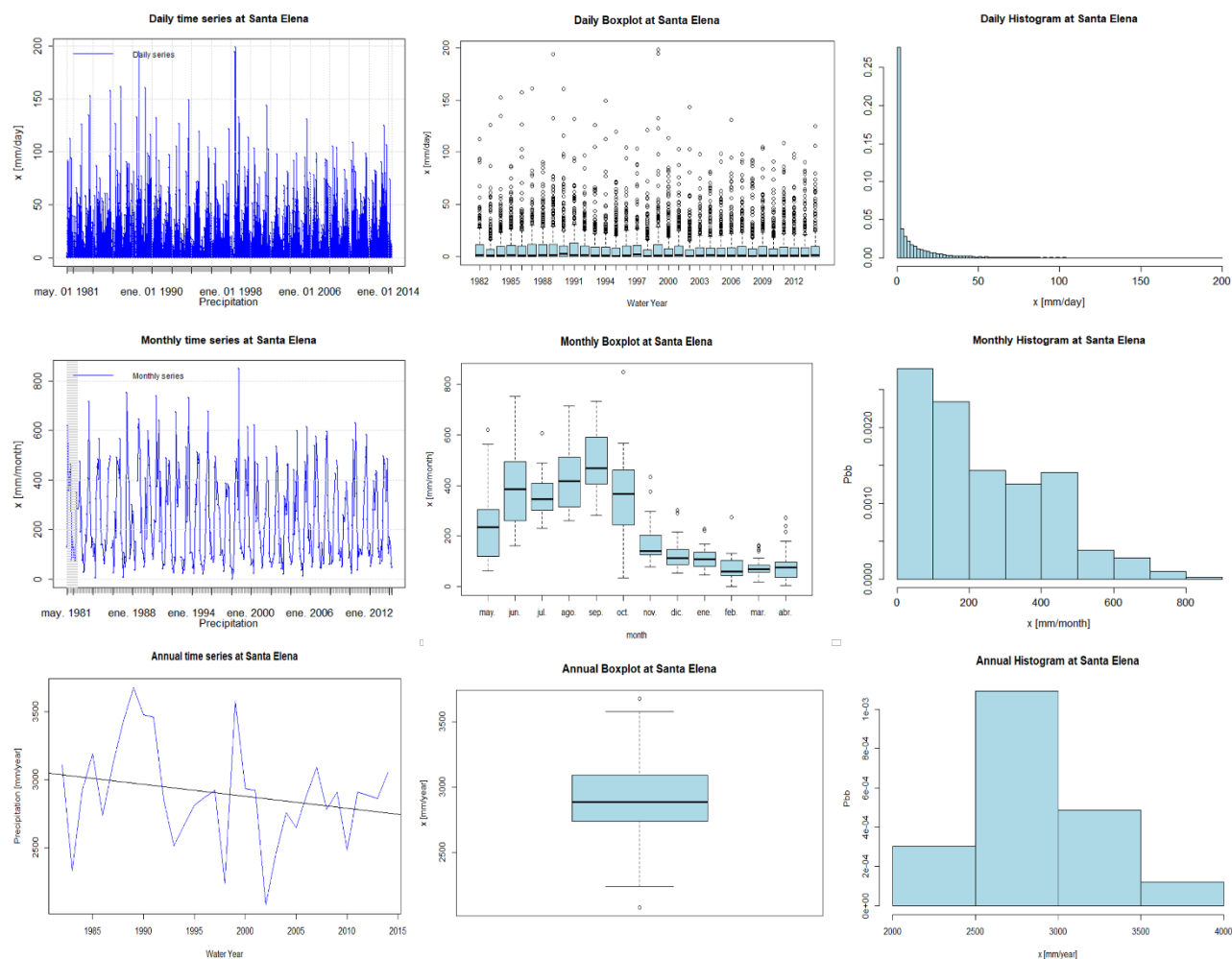


Figura 4. Gráfico lineal, boxplot e histograma para la precipitación diaria, mensual y anual observada en estación Santa Elena. Fuente: Elaboración propia

Las pruebas estadísticas se realizaron a nivel mensual para apreciar tendencias o cambios significativos en los patrones de precipitación entre otros. La prueba de Mann-Kendall (Tabla 6) e ITA fueron aplicados para identificar tendencias en las series de tiempo de precipitación, tanto observadas como satelitales (CHIRPS).

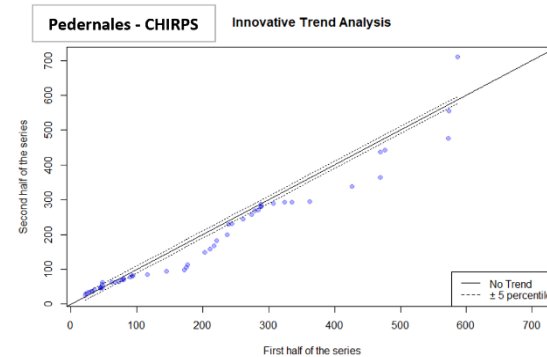
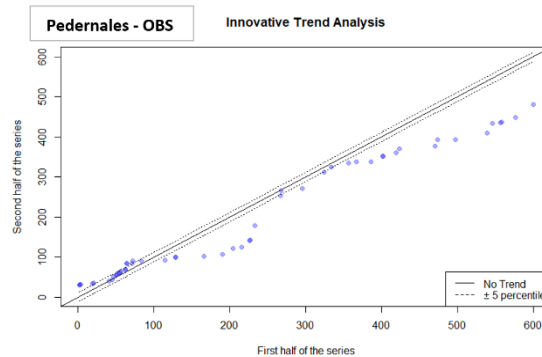
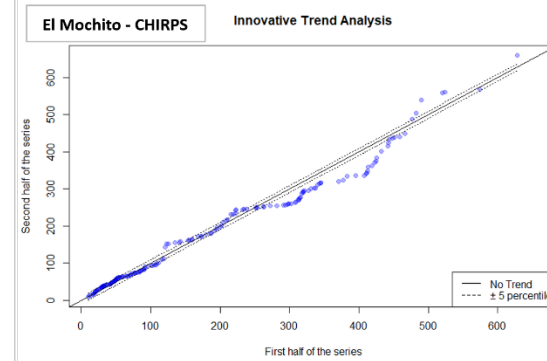
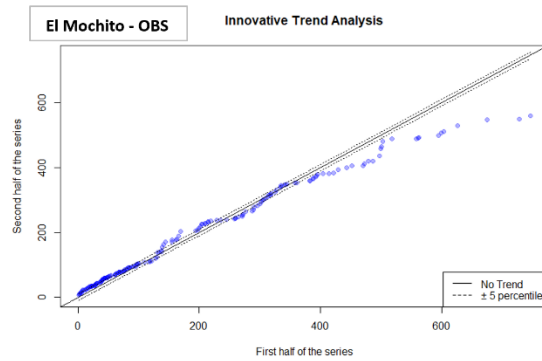
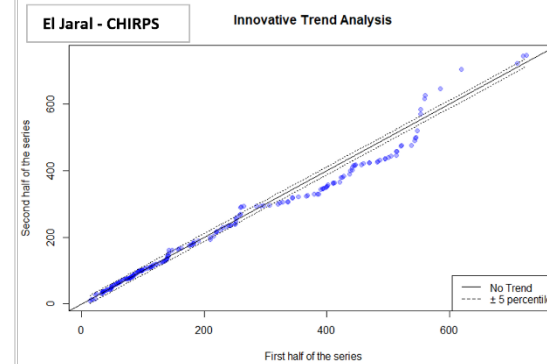
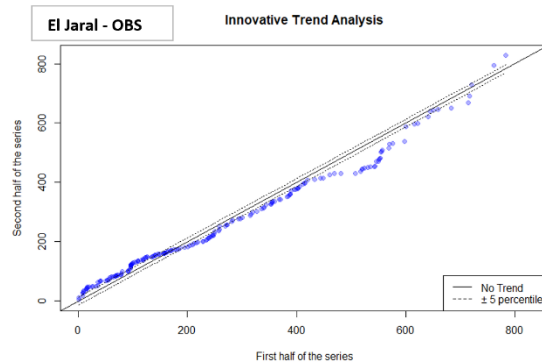
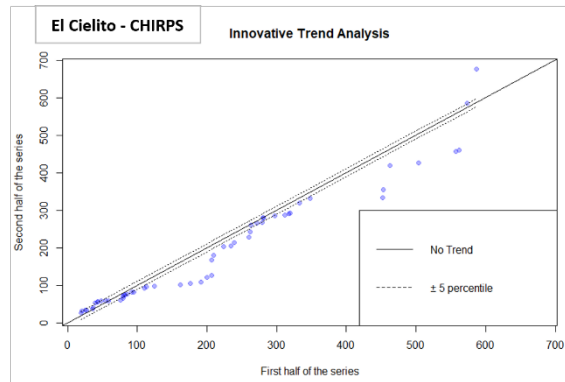
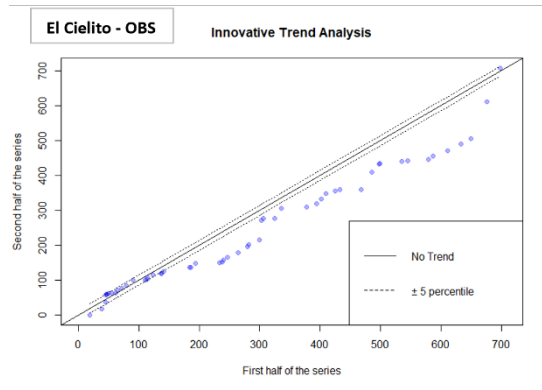
Tabla 6 - Resultados prueba Mann-Kendall

Estación	Data	Z	n	p-value	Tau
El Cielito	Data Obs.	-1.01	108	0.31	-0.07
	CHIRPS	-0.38	108	0.70	-0.02
El Jaral	Data Obs.	0.03	387	0.98	0.00
	CHIRPS	-0.47	387	0.64	-0.02
Horconcitos	Data Obs.	-0.80	94	0.43	-0.06
	CHIRPS	-0.54	94	0.59	-0.04
El Mochito	Data Obs.	0.46	357	0.65	0.02
	CHIRPS	-0.60	357	0.55	-0.02
Pedernales	Data Obs.	-0.46	103	0.64	-0.03
	CHIRPS	-0.58	103	0.56	-0.04
La Jutosa	Data Obs.	0.78	338	0.44	0.03
	CHIRPS	-0.07	338	0.95	-0.03
Pito Solo	Data Obs.	-0.73	381	0.47	-0.03
	CHIRPS	-1.33	381	0.18	-0.05
Santa Elena	Data Obs.	-1.16	392	0.25	-0.04
	CHIRPS	-1.12	392	0.26	-0.04

Tabla 6. Resultados prueba Mann-Kendall

Los resultados del ITA (Figura 5) indicaron que la mayoría de las estaciones no presentan tendencias significativas, aunque en algunas, como El Cielito, El Jaral, El Mochito, Pedernales, Pito Solo y Santa Elena, se observó una ligera tendencia negativa. En la estación Horconcitos, se notaron discrepancias, con datos observados mostrando una tendencia negativa y los datos satelitales sugiriendo una tendencia positiva. En La Jutosa, no se observó una tendencia clara. En general, aunque se observaron algunas tendencias decrecientes en 13 de las 16 series analizadas (una observada y una satelital por

ubicación), no fueron estadísticamente significativas según el test de Mann-Kendall.



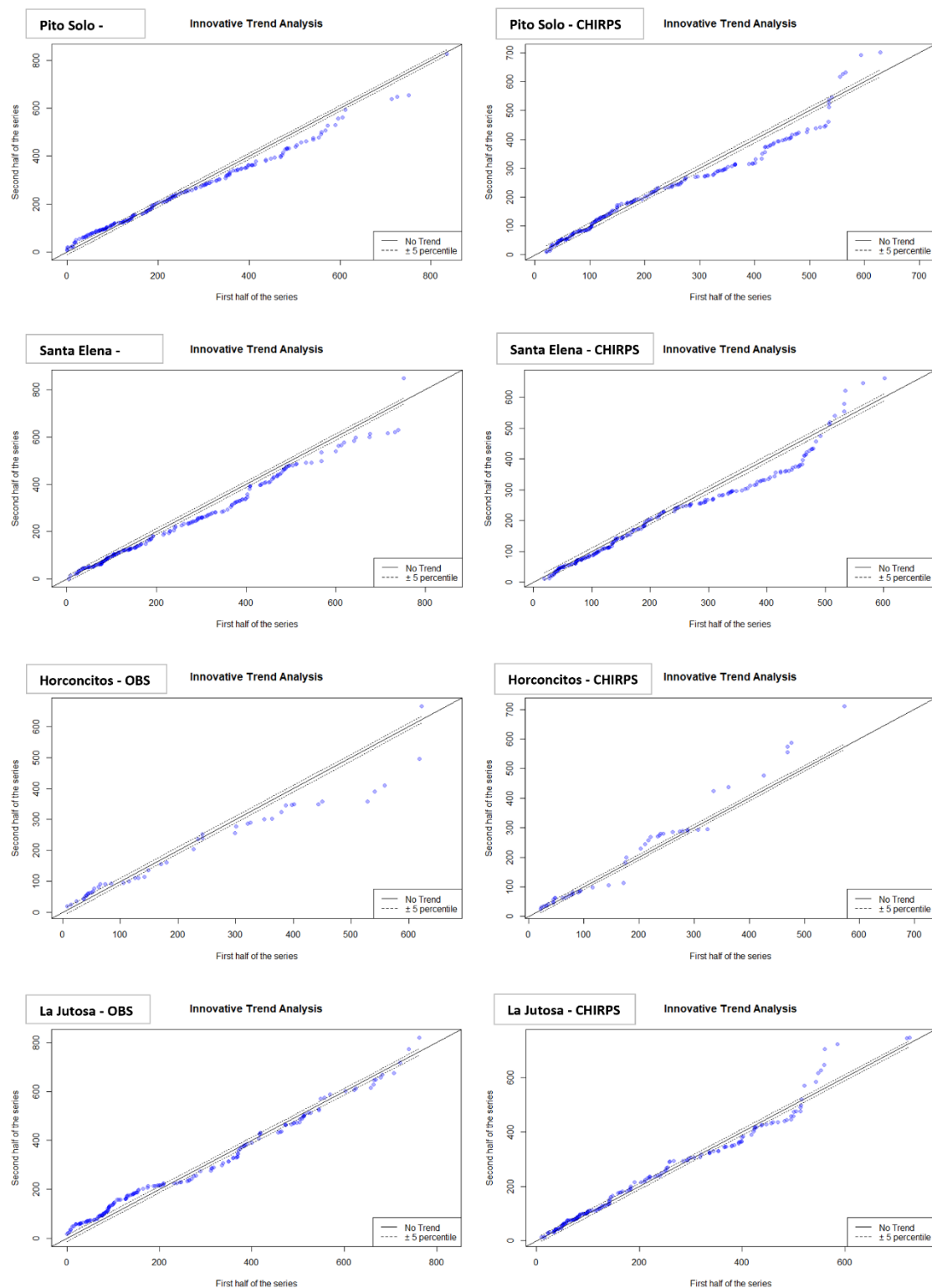


Figura 5. Resultados ITA observado vs CHIRPS. Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba de Wald Wolfowitz (Tabla 7) sugieren que las series de precipitación no son aleatorias y presentan estructuras o patrones significativos de estacionariedad y que hay una probabilidad muy baja de que los patrones observados en los datos se deban al azar.

Tabla 7. Resultados prueba Wald – Wolfowitz

Estación	Data	Z	n	p-value
El Cielito	Data Observada	6.4751	108	0
	CHIRPS	6.8995	108	0
El Jaral	Data Observada	12.0461	387	0
	CHIRPS	13.6811	387	0
Horconcitos	Data Observada	4.9573	94	0
	CHIRPS	6.2858	94	0
El Mochito	Data Observada	12.2923	357	0
	CHIRPS	12.8725	357	0
Pedernales	Data Observada	6.4296	103	0
	CHIRPS	6.6305	103	0
La Jutosa	Data Observada	11.0407	338	0
	CHIRPS	12.5655	338	0
Pito Solo	Data Observada	9.9998	381	0
	CHIRPS	13.3746	381	0
Santa Elena	Data Observada	10.4259	392	0
	CHIRPS	13.1698	392	0

Tabla 7. Resultados prueba Wald - Wolfowitz

Los resultados de la prueba de Pettitt (Tabla 8), indican que, aunque se identificaron posibles años de cambio en los patrones de precipitación para varias estaciones, estos cambios no fueron estadísticamente significativos. Esto sugiere que, a pesar de las fluctuaciones observadas, no se encontraron rupturas estructurales importantes en las series de tiempo de precipitación mensual. Por lo tanto, las series pueden considerarse homogéneas en el sentido de que no presentan cambios significativos a lo largo del período analizado.

Tabla 8. Resultados prueba Pettit

Estación	Data	U	n	p-value	K	Año prob. cambio
El Cielito	Data Observada	438	108	0.81	42	2010
	CHIRPS	282	108	1	6	2007
El Jaral	Data Observada	1802	387	1	268	2006
	CHIRPS	2396	387	1	159	1996
Horconcitos	Data Observada	392	94	0.67	6	2007
	CHIRPS	286	94	1	76	2013
El Mochito	Data Observada	3037	357	0.59	237	2005
	CHIRPS	2344	357	0.97	87	1993
Pedernales	Data Observada	384	103	0.90	6	2007
	CHIRPS	284	103	1	73	2013
La Jutosa	Data Observada	2724	338	0.63	219	2006
	CHIRPS	2022	338	1	66	1991
Pito Solo	Data Observada	3935	381	0.37	135	1993
	CHIRPS	3568	381	0.50	112	1991
Santa Elena	Data Observada	4801	392	0.20	125	1992
	CHIRPS	3468	392	0.61	136	1993

Tabla 8. Resultados prueba Pettit

Los resultados de la prueba de Wilcoxon (Tabla 9) muestran que en las estaciones El Cielito, El Jaral y La Jutosa, los valores de p-value son menores a 0.05, indicando diferencias significativas entre los datos observados y los de CHIRPS. Esto sugiere que las precipitaciones estimadas por CHIRPS difieren de las observadas en estas estaciones. En cambio, en las estaciones Horconcitos, El Mochito, Pedernales, Pito Solo y Santa Elena, los p-values son altos, lo que indica que no hay diferencias significativas entre las series observadas y las satelitales, sugiriendo que los datos de CHIRPS son similares a los datos observados en estas ubicaciones.

Tabla 9. Resultados prueba Wilcoxon

Estación	Data	W	p-value
El Cielito	Data Observada	6956	0.01
	CHIRPS		
El Jaral	Data Observada	81454	0.03
	CHIRPS		
Horconcitos	Data Observada	4574	0.68
	CHIRPS		
El Mochito	Data Observada	65414	0.54
	CHIRPS		
Pedernales	Data Observada	5694	0.36
	CHIRPS		
La Jutosa	Data Observada	62660	0.03
	CHIRPS		
Pito Solo	Data Observada	76238	0.23
	CHIRPS		
Santa Elena	Data Observada	82980	0.05
	CHIRPS		

Tabla 9. Resultados prueba Wilcoxon

Las métricas estadísticas resumidas en la Tabla 10, muestran que las estaciones El Mochito, Santa Elena, El Jaral, La Jutosa y Pedernales tienen un buen desempeño en términos de correlación (ρ), ajuste (R^2), magnitud de diferencia entre los valores pronosticados y observados (RMSE), magnitud del sesgo (Bias) y capacidad para representar las variaciones observadas (NSE). Estas estaciones presentan una correlación fuerte ($\rho > 0.8$) y un NSE alto (0.70 - 0.84), indicando un buen ajuste entre los datos observados y satelitales de CHIRPS. El RMSE más bajo en El Mochito (66.64 mm) sugiere estimaciones satelitales cercanas a las observaciones. En contraste, las estaciones El Cielito, Pito Solo y Horconcitos muestran un desempeño más bajo, pero aún aceptable, con

valores de ρ y NSE que indican una correlación positiva moderada y una capacidad aceptable para representar las variaciones observadas. En general, las estaciones evaluadas sugieren que los datos de CHIRPS tienden a sobreestimar ligeramente la precipitación, con un sesgo que varía entre 7.4 y 58.7 mm mensuales.

Tabla 10 - Métricas estadísticas para datos de precipitación mensual observada vs satelital

Estación	ρ	RMSE (mm)	R^2	Bias (mm)	NSE
El Mochito	0.9185	66.6	0.8437	12.5	0.8372
Santa Elena	0.8716	93.2	0.7597	31.4	0.7263
El Jaral	0.8655	98.7	0.7490	26.7	0.7245
La Jutosa	0.8655	103.5	0.7491	33.5	0.7192
Pedernales	0.8494	92.9	0.7215	21.6	0.7005
El Cielito	0.8902	103.6	0.7924	58.7	0.6902
Pito Solo	0.7959	104.1	0.6335	15.0	0.6055
Horconcitos	0.7921	104.4	0.6274	7.4	0.5968

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una comprensión detallada de la precisión y confiabilidad de los datos de precipitación satelitales (CHIRPS y CMORPH) en comparación con las observaciones terrestres en la subcuenca del lago Yojoa. La comparación de los datos de precipitación diaria mostró que los datos de CMORPH estaban significativamente sobreestimados, lo que llevó a su exclusión de análisis adicionales. A su vez, CHIRPS reporta valores que concuerdan mejor con los datos observados, aunque ligeramente sobreestimados. El estudio de Cordeiro y Blanco (2021) sugiere utilizar productos satelitales como CHIRPS y CMORPH

para completar series históricas de precipitaciones en la región amazónica. Encontraron que CHIRPS tuvo el mejor rendimiento para representar la variación estacional de la precipitación, aunque con algunas sobreestimaciones y subestimaciones.

La validación de datos satelitales en contextos regionales específicos es crucial para asegurar su precisión y utilidad en estudios hidrológicos. Un estudio sobre la Cuenca del Mujib en Jordania (Suheir et al., 2023) encontró que productos climáticos como CHIRPS mostraron buen rendimiento en escalas mensuales y anuales, pero tuvieron un rendimiento deficiente a nivel diario. Esto refuerza la observación en este estudio de que, aunque los datos satelitales de CHIRPS tienen una baja capacidad para representar variaciones diarias, son considerablemente más precisos a nivel mensual. Este fenómeno se observa especialmente en estaciones como El Mochito, Santa Elena y El Jaral, que mostraron altos coeficientes de correlación (ρ) y un buen índice de Nash-Sutcliffe (NSE), indicando una buena capacidad de los datos satelitales para capturar la variación observada. No obstante, estaciones como El Cielito y Pito Solo presentaron desviaciones mayores, sugiriendo una sobreestimación de la precipitación por parte de CHIRPS.

El estudio de Paredes-Trejo et al. (2017) valida el producto de precipitación CHIRPS en el noreste de Brasil, comparándolo con observaciones terrestres. Aunque CHIRPS sobreestima las precipitaciones bajas y subestima las altas, se considera útil como sustituto de los datos de pluviómetros en regiones con escasa observación terrestre, resaltando la importancia de los datos satelitales en la caracterización climática. Por su parte, el estudio de Quesada-Montano et al. (2019) destaca la utilidad de productos satelitales como CHIRPS para

caracterizar sequías en Centroamérica. Al emplear varios índices de sequía, demostraron que estos productos son fundamentales para la gestión de recursos hídricos en áreas vulnerables. Este trabajo valida la aplicabilidad de CHIRPS en la región de estudio, ofreciendo un sólido precedente para su uso en condiciones similares.

El estudio de Gómez (2021) en la cuenca del río Guajoyo en El Salvador se centra en la evaluación de los productos satelitales de precipitación CHIRPS y CMORPH para la modelización hidrológica y la calibración de modelos en áreas con escasa o nula información directa. El trabajo destaca cómo CHIRPS, con su alta resolución espacial y temporal, es útil para capturar la variabilidad de la precipitación, especialmente al integrar datos de estaciones terrestres y satelitales. Además, la comparación con CMORPH subraya la importancia de evaluar diferentes productos para determinar el más adecuado para aplicaciones hidrológicas específicas.

Los análisis de tendencias que utilizan las pruebas de Mann-Kendall e ITA no muestran tendencias significativas en la mayor parte de las series temporales analizadas, lo que concuerda con la falta de grandes cambios estructurales observados en la prueba de Pettitt. Esta uniformidad sugiere que, a pesar de la variabilidad anual, la precipitación no varió significativamente a lo largo del período analizado. Las pruebas de aleatoriedad e independencia confirmaron la presencia de patrones significativos en la serie de datos, rechazando la hipótesis de aleatoriedad. Esto significa que, aunque los datos de CHIRPS pueden sobreestimar ligeramente las precipitaciones, son eficaces para determinar el patrón general de precipitaciones en la región.

Por lo tanto, aunque los productos satelitales CHIRPS tienden a sobreestimar los valores, han demostrado ser una herramienta valiosa para monitorear las precipitaciones en áreas con cobertura terrestre limitada. Sin embargo, se deben tener en cuenta las especificidades de la estación y ajustar los datos según sea necesario para mejorar la precisión del análisis hidrológico lo cual se puede optimizar a través de la corrección del sesgo. Este hallazgo resalta la necesidad de realizar estudios de calibración y validación antes de aplicar estos datos en análisis y modelaciones hidrológicas.

Conclusiones

Se realizó una comparación entre los productos satelitales CHIRPS y CMORPH, con los datos de 10 estaciones localizadas en la subcuenca del Lago de Yojoa en Honduras. El uso de datos satelitales de CHIRPS resultó válido para completar datos faltantes de precipitación a nivel mensual en la subcuenca a pesar de que este producto tiende a sobreestimar dicha precipitación. Por otro lado, los datos CMORPH muestran una sobreestimación significativa, lo que limita su idoneidad para un análisis detallado. La falta de coherencia con los datos de observación resalta la necesidad de una calibración y validación más rigurosas de estos productos satelitales para garantizar su precisión en contextos regionales específicos. Es necesario seguir investigando y desarrollando técnicas para mejorar la precisión de los datos satelitales, particularmente a nivel diario, para garantizar su utilidad en la gestión de recursos hídricos.

Por último, se deberían seguir utilizando productos satelitales como CHIRPS para realizar ajustes específicos de las estaciones para mejorar la precisión de los estudios hidrológicos. Es importante seguir investigando las técnicas de calibración y

corrección de sesgos para adaptar mejor los datos satelitales a las condiciones locales, maximizando así su utilidad en la gestión de recursos hídricos en áreas con poca cobertura de estaciones terrestres.

Referencias

- Cordeiro, A., & Blanco, C. (2021). Assessment of satellite products for filling rainfall data gaps in the Amazon region. *Natural Resource Modeling*, 34.
- Dore, M. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know? *Environment international*, 1167-1181.
- Gómez, P. (2021). Evaluación de la utilidad de datos de satélite para modelización hidrológica de cuencas no aforadas en América Central. Murcia, España: Escuela Internacional de Doctorado, Universidad Católica de Murcia.
- Hidalgo, H., Amador, J., Alfaro, E., & Quesada, B. (2013). Hydrological climate change projections for Central America. *Journal of Hydrology*, 495, 94-112.
- Paredes-Trejo, F., Barbosa, H., & Lakshmi, T. (2017). Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of Arid Environments*, 26-40.
- Quesada-Montano, B., Wetterhall, F., & Westerberg, I. (2019). Characterising droughts in Central America with uncertain hydro-meteorological data. *Theoretical and Applied Climatology*, 2123-2138.
- Suheir, A., Mou, L., Narimah, S., Jawad, T., & Longhui, L. (2023). Evaluation of CHIRPS and CFSR precipitation products over the Mujib Basin, Jordan. *Geografia-Malaysian Journal of Society and Space*, 19(2), 1-20.
- Vega, A., Jiménez, R., Miralles-Wilhelm, F., & Castillo, R. (2015). *Climate Change Adaptation and Integrated Water Resource Management in La Ceiba, Honduras*. La Ceiba, Honduras: Inter-American Development Bank (IDB) .