

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA



TESIS

**“VALIDACIÓN DE PRECIPITACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL LAGO DE YOJOA:
DATOS SATELITALES VERSUS OBSERVADOS”**

PRESENTA: DAYAN MISHHELL PICHARDO LOPEZ

**PREVIA OPCIÓN AL GRADO DE MÁSTER EN:
RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA**

ASESOR: PhD. LENÍN HENRÍQUEZ

TEGUCIGALPA, M.D.C.

HONDURAS, C.A.

MARZO, 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA
Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Honduras.



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

DOCTOR: ODIR AARÓN FERNÁNDEZ FLORES

RECTOR

ABOG. JOSÉ ALEXANDER AVILA VALLECILLO

SECRETARIO GENERAL

DOCTOR: ARMANDO EUCEDA

DIRECTOR DE POSTGRADOS

MÁSTER: TANIA PEÑA

COORDINADORA

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA

MARZO, 2024

RESUMEN

Los datos de precipitación son esenciales en cualquier estudio de la gestión de los recursos naturales, obras hidráulicas, piscicultura, etc. Sin embargo, no siempre son medidos o las series de datos presentan vacíos. Este problema se agrava en regiones con limitada infraestructura de monitoreo, afectando la capacidad de llevar a cabo análisis precisos y decisiones informadas.

Los objetivos generales y específicos se orientan hacia la validación, corrección y relleno de datos de precipitación, estableciendo así una base de datos completa y confiable que servirá como recurso valioso en proyectos futuros. Se compararon observaciones diarias satelitales (CHIRPS V2.0 y CMORPH) versus observaciones de 10 estaciones hidroclimatológicas de la ENEE, para determinar la idoneidad de los productos satelitales en la región.

Los datos satelitales de CHIRPS a nivel diario mostraron un bajo ajuste con los datos observados (R^2 entre 0.02 y 0.07). Al revisar la distribución de los datos satelitales diarios se verificó que presentan pocos días con precipitación y se tiende a acumular la lluvia durante esos días, contrario a lo que muestran las estaciones hidroclimatológicas. Por su parte los datos mensuales presentaron un buen ajuste (R^2 entre 0.6 y 0.85). Este análisis destaca estaciones climáticas clave, como El Mochito, Santa Elena, El Jaral, La Jutosa y Pedernales que demuestran una alta correlación ($\rho > 0.85$) y buena capacidad para representar variaciones observadas ($NSE > 0.70$) a nivel mensual. Se aplicaron diversos métodos para corrección del sesgo, como el Escalamiento Lineal (LS) y la Transformación con Potencias (PT) para ajustar los datos de CHIRPS con las observaciones de estaciones terrestres. La data de CMORPH se descartó debido a incongruencias con la data de las estaciones en tierra.

Finalmente, la serie de la estación El Mochito se rellenó entre el período 2015-2023 utilizando los datos de CHIRPS y ajustados por el método de Escalamiento Lineal (LS). El relleno de datos para la estación El Mochito mostró una alta correlación durante su calibración (1985-2006): $\rho > 0.93$, $R^2 > 0.86$ y $NSE > 0.86$ y durante su validación (2006-2015): $\rho > 0.90$, $R^2 > 0.81$ y $NSE > 0.79$. Se ha probado que, en la zona del Lago de Yojoa, la utilización

de CHIRPS para completar datos faltantes de precipitación a nivel mensual es válido; sin embargo, el uso de datos diarios aún debe ser estudiado en mayor profundidad.

ABSTRACT

Precipitation data are essential in any study of natural resources management, hydraulic works, fish farming, etc. However, they are not always measured or the data series present gaps. This study focuses on validating and completing precipitation series through the comparison between data from ground stations and satellite.

The general and specific objectives are oriented towards the validation, correction and filling of precipitation data, thus establishing a complete and reliable database that will serve as a valuable resource in future projects. Daily satellite observations (CHIRPS V2.0 and CMOPRH) were compared against observations from 10 ENEE hydroclimatological stations, to determine the suitability of satellite products in the region.

CHIRPS satellite data at the daily level showed a poor fit with the observed data (R^2 between 0.02 and 0.07). When reviewing the distribution of daily satellite data, it was verified that there are few days with precipitation and rain tends to accumulate during those days, contrary to what the hydroclimatological stations show. For its part, the monthly data presented a good fit (R^2 between 0.6 and 0.85). This analysis highlights key climate stations, such as El Mochito, Santa Elena, El Jaral, La Jutosa and Pedernales that demonstrate high correlation ($\rho > 0.85$) and good ability to represent observed variations ($NSE > 0.70$) at the monthly level. Various bias correction methods, such as Linear Scaling (LS) and Power Transformation (PT), were applied to fit the CHIRPS data with ground station observations. CMORPH data were discarded due to inconsistencies with data from ground stations.

Finally, the El Mochito station series was filled between the period 2015-2023 using CHIRPS data and adjusted by the Linear Scaling (LS) method. The data filling for the El Mochito station showed a high correlation during its calibration (1985-2006): $\rho > 0.93$, $R^2 > 0.86$ and $NSE > 0.86$ and during its validation (2006-2015): $\rho > 0.90$, $R^2 > 0.81$ and $NSE > 0.79$. It has been

proven that in the Yojoa Lake area the use of CHIRPS to complete missing precipitation data at a monthly level is valid; however, the use of daily data still needs to be studied in greater depth.

Contenido

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
Índice de gráficos	8
Índice de ilustraciones	9
Índice de mapas	9
Índice de Tablas	10
ABREVIATURAS	11
AGRADECIMIENTOS	15
1. INTRODUCCIÓN	16
2. CAPÍTULO I: DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	17
2.1 Descripción de la problemática:.....	17
2.2 Justificación de la investigación	18
2.3 Límites de la investigación	19
2.4 Definición del Problema:.....	21
2.5 Marco histórico y legal.....	22
3. CAPÍTULO II: OBJETIVOS	24
3.1 Hipótesis:	24
3.2 Objetivo general:	24
3.3 Objetivos específicos:	24
4. CAPÍTULO III: ESTADO DEL ARTE.....	25
5. CAPÍTULO IV: MARCO TEÓRICO.....	29
5.1 Definiciones	29
5.2 Métodos estadísticos para análisis de información climatológica	33
5.2.1 Medidas de tendencia central	34
5.2.2 Medidas de dispersión	35
5.2.3 Medidas de asimetría y peso de la cola	36
5.2.4 Métodos gráficos exploratorios.....	37
5.2.5 Pruebas de tendencia	37
5.2.6 Análisis de consistencia	39
5.2.7 Prueba de aleatoriedad e independencia.....	40
5.2.8 Prueba de Homogeneidad	41
5.2.9 Diferencia de medianas	42
5.2.10 Métricas estadísticas	42
5.3 Datos Satelitales	45

5.3.1	Satélites de órbita fija o geoestacionaria	46
5.3.2	Satélites de órbita polar	47
5.3.3	CMORPH.....	49
5.3.4	CHIRPS.....	50
5.4	Corrección del sesgo y relleno de datos.....	52
5.4.1	Métodos de corrección del sesgo	52
5.4.2	Relleno de datos.....	55
5.5	Software	56
5.5.1	Paquete Stats	57
5.5.2	Paquete HydroTSM	57
5.5.3	Paquete ggplot2	58
5.5.4	Paquete Plotly	58
5.5.5	Paquete Trend	58
5.5.6	Paquete Grid	58
5.5.7	Software CMhyd.....	59
6.	CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN DEL MEDIO.....	60
6.1	Situación geográfica.....	60
6.2	Ubicación de sitios y periodo de análisis de cada estación	64
7.	CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA	69
7.1	Tipo de investigación	69
7.2	Diseño de la investigación.....	69
7.3	Recolección de datos	70
7.3.1	Datos observados	70
7.3.2	Datos satelitales	71
7.3.3	Periodo de análisis	72
7.4	Análisis preliminar y de calidad de la data	73
7.4.1	Estadísticas básicas.....	75
7.4.2	Coherencia básica.....	75
7.4.3	Outliers (valores atípicos).....	76
7.4.4	Análisis gráfico de las series	76
7.4.5	Tendencia	76
7.4.6	Métricas estadísticas	76
7.4.7	Análisis de consistencia	76
7.5	Corrección del sesgo	77
7.6	Relleno de datos faltantes	79

8.	CAPÍTULO VII: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
8.1	Análisis preliminar y de calidad de la data	81
8.1.1	Precipitación diaria.....	81
8.1.2	Precipitación mensual	86
8.1.3	Precipitación anual.....	89
8.1.4	Análisis gráfico de las series	93
8.2	Corrección del sesgo	107
8.3	Relleno de datos faltantes	115
8.3.1	Características y Ubicación de las estaciones de El Mochito y Las Vegas.	115
8.3.2	Relleno de datos faltantes y resultados mensuales estación El Mochito versus estación Las Vegas.	116
9.	CONCLUSIONES	119
10.	LIMITANTES & OPORTUNIDADES DE FUTURAS INVESTIGACIONES	121
11.	CONTRIBUCIONES	122
12.	BIBLIOGRAFÍA	125
13.	ANEXOS.....	130

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Precipitación media mensual de la subcuenca Lago de Yojoa.....	68
Gráfico 2 - Temperatura media mensual de la subcuenca Lago de Yojoa	68
Gráfico 3 - Comparación de precipitaciones máximas diarias observadas vs satelitales (CHIRPS) con estación El Planón (izquierda) y excluyéndola (derecha)	83
Gráfico 4 - Precipitaciones diarias por estación.....	86
Gráfico 5 – Precipitaciones mensuales por estación y umbral máximo según IQR	89
Gráfico 6 - Precipitaciones anuales por estación y umbral máximo según IQR.....	92
Gráfico 7 - Curvas de doble masa para las estaciones observadas.....	93
Gráfico 8 - Gráfico lineal, diagrama de cajas e histograma para la precipitación diaria, mensual y anual observada en estación Santa Elena.....	94
Gráfico 9 - Dispersión data observada vs satelital diaria	95
Gráfico 10 - Dispersión data observada vs satelital mensual.....	96
Gráfico 11 - Dispersión data observada vs satelital anual	97
Gráfico 12 - Resultados ITA Observado vs CHIRPS - Estaciones con tendencia aparente negativa.....	99
Gráfico 13 – Resultados ITA observados vs CHIRPS – Estaciones con tendencia no concluyente	101
Gráfico 14 - Resultados ITA Observado vs CHIRPS - Estaciones sin tendencia aparente	101

<i>Gráfico 15 - Coeficientes de Determinación (R2) Durante el Periodo de Validación</i>	<i>112</i>
<i>Gráfico 16 – Coeficientes de NASH – SUTCLIFFE (NSE) durante el periodo de validación sin estaciones Pedernales, Horconcitos y El Sauce</i>	<i>113</i>
<i>Gráfico 17 - Medias mensuales de las estaciones conjuntas sin estaciones Pedernales, Horconcitos y El Sauce</i>	<i>114</i>
<i>Gráfico 18 - Serie completa El Mochito y Las Vegas</i>	<i>117</i>

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1 - Esquema metodológico</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 2 - Interfaz de descarga de datos satelitales de climateengine.org</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 3 - Interfaz en rstudio</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 4 - Formato de entrada de datos para el script en RStudio.....</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 5 - Formato de archivos de ubicación de estaciones y entrada de datos a CMhyd.....</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 6 - Interfaz de trabajo de CMhyd</i>	<i>79</i>

Índice de mapas

<i>Mapa 1 - Ubicación de la zona de estudio.....</i>	<i>60</i>
<i>Mapa 2 - Microcuencas de la zona de estudio.....</i>	<i>61</i>
<i>Mapa 3 - Mapa de cobertura forestal / uso de suelo de la zona de estudio.....</i>	<i>62</i>
<i>Mapa 4 - Estaciones antiguas con registro de precipitación dentro o cercanas a la subcuenca</i>	<i>64</i>
<i>Mapa 5 – Estaciones de la red nueva con registro de precipitación dentro o cercanas a la subcuenca</i>	<i>65</i>
<i>Mapa 6 - Precipitación media anual de la subcuenca.....</i>	<i>66</i>
<i>Mapa 7 - Temperatura media anual de la subcuenca</i>	<i>67</i>
<i>Mapa 8 - Precipitación máxima diaria</i>	<i>84</i>
<i>Mapa 9 - Precipitación máxima diaria observada versus CHIRPS.....</i>	<i>85</i>
<i>Mapa 10 - Ubicación de estaciones El Mochito y Las Vegas</i>	<i>116</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1 - Tipos de satélites según su finalidad.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 2 - Satélites de Órbita Fija o Geoestacionaria</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3 - Satélites de Órbita Polar.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 4 – Sensores que proporcionan los datos de entrada del algoritmo CMORPH</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5 - Datos de entrada del algoritmo CHIRPS.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 6 - Distribución de cobertura forestal / usos de suelo</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 7 – Registro de Precipitación en estaciones hidroclimatológicas red antigua Lago de Yojoa ENEE</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 8 - Registro de Precipitación en estaciones climatológicas Red nueva Lago de Yojoa ENEE</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 9 - Periodo de análisis para CHIRPS y CMORPH</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 10 - Periodo de calibración y validación para la corrección del sesgo.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 11 - Precipitación diaria (mm/d).....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 12 - Meses con data observada faltante no considerados</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 13 - Precipitación mensual (mm/mes)</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 14 - Años con data observada faltante no considerados.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 15 - Precipitación anual (mm/año).....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 16 - Resultados de prueba de tendencia Mann-Kendall</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 17 - Resultados prueba Wald Wolfowitz.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 18 - Resultados pruebas Pettitt</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 19 - Resultados de prueba de Wilcoxon</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 20 - Métricas estadísticas para datos de precipitación mensual observada vs satelital sin corrección del sesgo</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 21 - Días de Lluvia en Estaciones en Tierra y en CHIRPS Durante el Periodo de Calibración</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 22 - Promedios Mensuales y Factores usados en el Método LS con los Datos de CHIRPS para el periodo de calibración</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 23 - Valores de los exponentes (bm) utilizados en el método PT con los Datos de CHIRPS para el periodo de calibración</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 24 - Estadísticas Mensuales CHIRPS-LS Durante el Periodo de Calibración.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 25 - Estadísticas Mensuales CHIRPS-LS durante el periodo de Validación</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 26 - Estadísticas Mensuales CHIRPS-PT Durante el Periodo de Calibración</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 27 - Estadísticas Mensuales CHIRPS-PT durante el periodo de Validación</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 28 - Estaciones meteorológicas El Mochito y Las Vegas.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 29 - Promedios Mensuales y Factores de Corrección usados en el método LS</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 30 - Estadísticas Mensuales de la Estación El Mochito/Las Vegas.....</i>	<i>118</i>

ABREVIATURAS

- ABI:** Advanced Baseline Imager (Generador de Imágenes de Línea Base Avanzada)
- ACI:** Asociación de Consultores en Ingeniería
- A-DCS:** Advanced Data Collection System (Sistema Avanzado de Recopilación de Datos)
- AIRS:** Atmospheric Infra-Red Sounder (Sonda Infrarroja Atmosférica)
- AMSR-E:** Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (Radiómetro de Exploración de Microondas Avanzado para el Satélite Aqua)
- AMSU-A:** Advanced Microwave Sounding Unit – A (Unidad Avanzada de Sondeo de Microondas – A)
- Amuprolago:** Asociación de Municipios del Lago de Yojoa y su Área de Influencia
- ASCAT:** Advanced Scatterometer (Dispersómetro avanzado)
- ASP Consultores:** Asociación de Profesionales Consultores
- AVHRR:** Advanced Very High Resolution Radiometer (Radiómetro avanzado de muy alta resolución)
- BID:** Banco Interamericano de Desarrollo
- BM:** Banco Mundial
- CATIE:** Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
- CERES:** Clouds and the Earth’s Radiant Energy System (Nubes y el sistema de energía radiante de la Tierra)
- CFSR:** Climate Forecast System Reanalysis (Reanálisis del sistema de pronóstico climático)
- CHIRPS:** Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (Precipitación infrarroja del grupo de peligros climáticos con estaciones)
- CMA:** China Meteorological Administration (Administración Meteorológica de China)
- CMORPH:** NOAA CPC Morphing Technique
- COPECO:** Comisión Permanente de Contingencias
- DCIS:** Data Collection and Interrogation Service (Servicio de Recolección e Interrogación de Datos)
- DCS:** Data Collection Service (Servicio de Recopilación de Datos)
- DGRH:** Dirección General del Recurso Hídrico
- DIR:** Solar X-ray Radiation Flux Sensor (Sensor de Flujo de Radiación de Rayos X Solares)
- DPR:** Dual-frequency Precipitation Radar (Radar de precipitación de doble frecuencia)
- EHIS:** Energetic Heavy Ion Sensor (Sensor energético de iones pesados)
- ENEE:** Empresa Nacional de Energía Eléctrica
- ERM:** Earth Radiation Measurement (Medición de la Radiación Terrestre)
- ESA:** Agencia Espacial Europea
- EXIS:** Extreme Ultraviolet Sensor / X-Ray Sensor Irradiance Sensors (Sensor Ultravioleta Extremo / Sensor de Irradiación de Rayos X)
- FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación
- GALS:** Detector of Galactic Cosmic Rays (Detector de Rayos Cósmicos Galácticos)

GEOS&R: Geostationary Search and Rescue (Búsqueda y rescate geoestacionarios)

GERB: Geostationary Earth Radiation Budget (Balance de Radiación Geostacionario de la Tierra)

GGAK-E: Heliogeophysical Instrument Complex on Electro-L (Complejo de Instrumentos Heliogeofísicos en los satélites Electro-L)

GGAK-M/RIMS-M: Radio-Frequency Mass Spectrometer – M (Espectrómetro de Masas por Radiofrecuencia en Satélites Meteor M)

GIRH: Gestión Integrada del Recurso Hídrico

GLM: Geostationary Lightning Mapper (Mapeador de Rayos Geoestacionarios)

GMI: GPM Microwave Imager (Generador de imágenes de microondas GPM)

GOME: Global Ozone Monitoring Experiment (Experimento de Monitoreo Global de Ozono)

GPM: Global Precipitation Measurement (Medición de Precipitaciones Globales)

GRAS: GNSS Receiver for Atmospheric Sounding (Receptor GNSS para Sondeo Atmosférico)

HEPD: High Energy Particle Detector (Detector de Partículas de Alta Energía)

HIRS: High-resolution Infra Red Sounder (Sonda Infrarroja de Alta Resolución)

HSB: Humidity Sounder for Brazil (Sonda de Humedad para Brasil)

IASI: Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (Interferómetro de Sondeo Atmosférico Infrarrojo)

ICF: Instituto de Conservación Forestal

IDEAM: Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales de Colombia

IHCIT: Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra

IKFS: Infrared Fourier Spectrometer (Espectrómetro de Fourier Infrarrojo)

IKOR-M: Broadband SW Radiometer (Radiómetro de Banda Ancha de Onda Corta en Satélites Meteor M)

IMD: India Meteorological Department (Organización India de Investigación Espacial)

IMS: Ionosphere Measurement Sensor (Sensor de Medición de Ionosfera)

INE: Instituto Nacional de Estadística

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

IRAS: Infra Red Atmospheric Sounder (Sonda Atmosférica Infrarroja)

ISIMIP: Proyecto de Intercomparación de Modelos de Impacto Intersectorial

ISRO: Indian Space Research Organisation (Organización India de Investigación Espacial)

JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency (Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón)

KMSS: High-resolution VIS/IR Radiometer (Radiómetro VIS/IR de alta resolución)

LIS: Lightning Imaging Sensor (Sensor de Imágenes de Rayos)

MAG: Magnetómetro

MARENA: Manejo de Recursos Naturales en Cuencas Prioritarias

MEPED: Medium Energy Proton Detector (Detector de Protones de Energía Media)

MERSI: Medium Resolution Spectral Imager (Generador de Imágenes Espectrales de Resolución Media)

MHS: Microwave Humidity Sounding (Sondeo de Humedad de Microondas)

MiAmbiente: Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente

MODIS: Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer (Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada)

MPS: Magnetospheric Particle Sensor (Sensor de Partículas Magnetosféricas)

MSU-GS: Electro-L Imager (Generador de Imágenes en satélites Electro-L)

MSU-MR: VIS/IR Imaging Radiometer (Radiómetro de Imágenes VIS/IR)

MTVZA-GY: Imaging/Sounding Microwave Radiometer – Improved (Radiómetro de Microondas de Imagen/Sonido – Mejorado)

MWHS: Micro-Wave Humidity Sounder (Sonda de Humedad de Microondas)

MWRI: Micro-Wave Radiation Imager (Generador de Imágenes de Radiación de Microondas)

MWTS: Micro-Wave Temperature Sounder (Sonda de Temperatura de Microondas)

NOAA: Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos de América

NRSCC: National Remote Sensing Center of China (Centro Nacional de Teledetección de China)

OECD: Organización para el Desarrollo y Cooperación Económica

OLS: Operational Linescan System (Sistema de Exploración Lineal Operativo)

PMW: Passive Microwave (Microondas Pasivo)

PR: Precipitation Radar (Radar de Precipitación)

SAG: Secretaría de Agricultura y Ganadería

SAS&R: Advanced Aided Search & Rescue (Búsqueda y rescate asistidos avanzados)

SBUS: Solar Backscatter Ultraviolet Sounder (Sonda Ultravioleta de Retrodispersión Solar)

SBUV: Solar Backscatter Ultraviolet (Ultravioleta de Retrodispersión Solar)

SEISS: Space Environment In-Situ Suite (Suite in situ de Entorno Espacial)

SEM: Space Environment Monitor (Monitor de entorno espacial)

SESS: Space Environment Sensor Suite (Conjunto de sensores de entorno especial)

Severjanin-M: X-band Synthetic Aperture Radar (Radar de Apertura Sintética de Banda X en Satélites Meteor -M)

SEVIRI: Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager (Generador de imágenes infrarrojas visibles mejoradas giratorias)

SGPS: Solar and Galactic Proton Sensor (Sensor de Protones Solar y Galáctico)

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SIM: Solar Irradiance Monitor (Monitor de Radiación Solar)

SKIF-6: Corpuscular Radiation Spectrometer (Espectrómetro de Radiación Corpuscular)

S&RSAT: Search & Rescue Satellite-Aided Tracking System (Sistema de Rastreo Asistido por Satélite de Búsqueda y Rescate)

SSI: Special Sensor Ionospheric Plasma Drift (Sensor Especial Deriva de Plasma Ionosférico)

SSJ: Special Sensor Precipitating Electron and Ion Spectrometer (Espectrómetro de Iones y Electrones de Precipitación con Sensor Especial)

SSM: Special Sensor Magnetometer (Magnetómetro de Sensor Especial)

SSMIS: Special Sensor Microwave - Imager/Sounder (Sensor Especial de Microondas - Generador de imágenes / Sonda)

SSPD: Data Collection and Transmission System (Sistema de Recopilación y Transmisión de Datos)

SSULI: Special Sensor Ultraviolet Limb Imager (Generador de Imágenes de Extremidades Ultravioleta con Sensor Especial)

SSUSI: Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager (Generador de Imágenes Espectrográfico Ultravioleta con Sensor Especial)

SUVI: Solar Ultraviolet Imager (Generador de Imágenes Solares Ultravioleta)

S-VISSR: Stretched Visible and Infrared Spin Scan Radiometer (Radiómetro de Barrido Giratorio Visible e Infrarrojo Extendido)

SXM: Solar X-Ray Monitor (Monitor Solar de Rayos X)

TED: Total Energy Detector (Detector de Energía Total)

TMI: TRMM Microwave Imager (Generador de Imágenes de Microondas para el Satélite TRMM)

TOU: Total Ozone Unit (Unidad de Ozono Total)

TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission (Misión de Medición de Precipitaciones Tropicales)

UH: Unidad de Hidrología de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica

UNAH: Universidad Nacional Autónoma de Honduras

VIRR: Visible and Infra-Red Radiometer (Radiómetro Visible e Infrarrojo)

VIRS: Visible and Infra Red Scanner (Escáner Visible e Infrarrojo)

VISSR: Visible-Infrared Spin Scan Radiometer (Radiómetro de barrido giratorio de infrarrojos visibles)

VUSS: Solar UV Radiation Sensor (Sensor de Radiación Solar Ultravioleta)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por su gracia infinita, por permitirme alcanzar este hito en mi vida. Su divina guía ha sido una luz constante en mi camino, brindándome la sabiduría necesaria para superar desafíos y la fortaleza para perseverar en momentos de dificultad.

A mis padres, Yaneth López y Gustavo Pichardo, por su apoyo constante a lo largo de mi vida y, en particular, en el camino académico. Agradezco profundamente la seguridad y confianza que han depositado en mí, creyendo en mis capacidades y motivándome a alcanzar mis metas. Este logro no sería posible sin su amor, sacrificios y el sólido cimiento que han construido en mi formación. Les estoy eternamente agradecida por ser mis pilares en este viaje.

Agradezco de manera especial a todos mis maestros, compañeros de maestría y, en particular, al Dr. Lenín Henríquez, mi asesor, cuya guía experta y generosa dedicación han sido cruciales para el logro de esta tesis. Su tiempo y apoyo incondicional han dejado una marca indeleble en mi formación académica y personal.

Agradezco sinceramente al Ingeniero Manuel Conde por su inspiración y apoyo que han sido esenciales en mi decisión de especializarme en recursos hídricos. Su experiencia compartida y mentoría generosa han enriquecido mi formación académica, brindándome confianza y motivación para enfrentar desafíos y explorar nuevas oportunidades en mi carrera. Estoy profundamente agradecida por su impacto positivo en mi desarrollo profesional.

Este logro no habría sido posible sin la generosidad y el respaldo de cada uno de ustedes. A medida que cierro este capítulo, llevo conmigo la profunda gratitud por las lecciones aprendidas y los lazos construidos. ¡Gracias a todos por ser parte de este extraordinario viaje!

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se erige como una contribución sustancial a la evaluación de la representatividad de los datos satelitales provenientes de CHIRPS y CMORPH en Honduras. Se seleccionó un área piloto específica para este estudio, elegida por la disponibilidad de datos comparativos de precipitación de estaciones terrestres, lo que permite una comparación directa y detallada con estos productos satelitales. Al integrar y validar estas fuentes de datos con observaciones locales, el estudio no solo mejora la fiabilidad de la información de precipitación disponible, sino que también establece una metodología que puede ser aplicada en otras regiones con limitaciones similares en la recolección de datos.

El núcleo de esta investigación se centra en el empleo de técnicas estadísticas, análisis comparativos, y metodologías de corrección y correlación para completar y validar series de precipitación, mejorando así su utilidad en la gestión hídrica. El propósito es ofrecer un conjunto de datos de precipitación robusto y fiable que sirva como referencia para futuros estudios y apoye la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos.

En el trasfondo de esta investigación yace la aspiración de contribuir a un enfoque más holístico de la gestión integrada de los recursos hídricos, reconociendo la importancia de contar con registros de precipitación y que a falta de estaciones de medición terrestre, puedan ser sustituidas por datos satelitales de fuentes validadas.

2. CAPÍTULO I: DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Descripción de la problemática:

La precipitación es una variable clave en el ciclo hidrológico, y su correcta medición es esencial para la planificación y gestión de los recursos hídricos. Tradicionalmente, esta medición se ha llevado a cabo mediante estaciones meteorológicas terrestres, las cuales, a pesar de su precisión puntual, presentan limitaciones en términos de cobertura espacial y continuidad de los datos.

En este contexto, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de productos de precipitación satelital que ofrecen la posibilidad de monitorear esta variable a una escala global, con una resolución temporal y espacial sin precedentes. Sin embargo, la validez de estos productos satelitales depende de su calibración y validación en contextos regionales específicos, lo que subraya la necesidad de investigaciones que evalúen su precisión y fiabilidad en comparación con las mediciones terrestres.

Por otro lado, 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 y otros, 2015). El estudio de Dore (2005) evidencia cómo el cambio climático ya está afectando los patrones globales de precipitación, con un incremento notable en la varianza de precipitación a nivel mundial.

En la subcuenca del Lago de Yojoa se desarrollan actividades de generación de energía hidroeléctrica, piscicultura, turismo, minería, agricultura y ganadería principalmente (Studer, 2007). Estas actividades se han desarrollado en parte debido al recurso hídrico que ostenta, lo que la ha convertido en una zona de gran importancia económica, social y ambiental. Además, posee una biodiversidad de gran valor ecológico dentro del territorio hondureño por lo que es un sistema complejo de analizar y en el que la intervención humana tiene un gran protagonismo que debe encontrar la manera de adaptarse a las

condiciones hidroclimatológicas que rigen a la subcuenca para lograr un aprovechamiento sostenible de dicho recurso.

La relevancia económica de la subcuenca es innegable, sin embargo, la situación se torna compleja al observar la falta de regulación efectiva en la explotación de los recursos hídricos. A pesar de ser declarada como área protegida en el decreto No. 71 de 1971, fue designada en 1975 como "área de uso múltiple" en el plan de uso múltiple del Ministerio de Recursos Naturales (House, 2002), lo que ha derivado en la explotación del recurso hídrico sin regulación por parte de los actores ubicados en los alrededores de la zona.

El sistema del Lago de Yojoa, influenciado por notables niveles de precipitación y evaporación, plantea dos desafíos particulares: 1) La falta de una zonificación clara, y 2) la aparente falta de regulaciones adecuadas. Lo anterior abre la puerta a la explotación desigual, con potenciales consecuencias negativas para la sostenibilidad a largo plazo.

Este estudio, centrado en la validación de datos de precipitación satelital frente a observaciones terrestres en la subcuenca del Lago de Yojoa, se presenta como una contribución esencial hacia la comprensión y gestión eficaz de los recursos hídricos en Honduras al abordar las limitaciones de las mediciones convencionales y explorar el potencial de las tecnologías satelitales.

2.2 Justificación de la investigación

Múltiples fenómenos naturales ocurren en todo el planeta por lo que, la necesidad de analizar el comportamiento del clima y la atmósfera para la prevención de riesgos, elaboración de pronósticos y gestión del recurso hídrico en general representan un gran reto debido a la falta de información hidroclimatológica confiable y continua en las diferentes zonas de estudio.

Para realizar un análisis detallado que determine la ubicación óptima de infraestructuras como embalses, canales, sistemas de acueductos y diversas derivaciones destinadas a transportar agua hacia distintos destinos o para estimar la disponibilidad de recursos hídricos en una región específica, es esencial disponer de datos precisos sobre el

comportamiento hidroclimatológico a lo largo del tiempo. Esta información crítica facilita la construcción adecuada de infraestructuras hídricas y la planificación eficiente del uso del agua asegurando que las estrategias de manejo estén alineadas con las variaciones temporales y la disponibilidad del recurso.

Obtener información precisa sobre la cantidad y distribución de la precipitación es esencial para realizar estudios que respalden la planificación y gestión del agua. A través del análisis de variables meteorológicas, en conjunto con el suelo, la vegetación, infraestructura, y las actividades humanas se pueden crear modelos hidrológicos que sirvan para estimar el recurso agua y ayudar a su gestión efectiva. Por tanto, la recopilación y análisis de datos incluyendo información satelital, se convierten en insumos críticos para futuros análisis y modelaciones.

Por tanto, se busca evaluar, corregir y validar información de precipitación diaria registrada de forma satelital, a través de comparaciones de datos de precipitación observados en estaciones meteorológicas en tierra con datos de precipitación diaria de satelitales. Esto servirá a validar los datos satelitales como fuente secundaria en futuros estudios donde no se cuente con mediciones directas.

2.3 Límites de la investigación

El área de estudio se circunscribe exclusivamente a la subcuenca del Lago de Yojoa debido a su importancia para el país y a su constante monitoreo por la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) que posee una red de estaciones hidroclimatológicas convencional administrada por la Unidad de Hidrología (UH) que son el insumo para esta investigación. Las series históricas de precipitación generadas por la red de estaciones se encuentran comprendida entre el año 1981 – 2015. Adicionalmente se usaron los datos de la nueva red de estaciones hidroclimatológicas para el año 2021-2023 a modo de una segunda validación y extensión de la serie.

Se analizaron 10 estaciones que contienen registros de precipitación diaria para la subcuenca hidrográfica del Lago de Yojoa en Honduras, donde la UH monitorea diversos parámetros hidroclimatológicos desde 1960.

Se tomaron en cuenta tres periodos temporales que dependen del registro disponible de información de cada producto satelital:

1. Desde 1981 hasta 2015, en donde se evalúan los datos observados con la precipitación satelital de CHIRPS V2.0.
2. Desde 1998 hasta 2015, en donde se evalúan los datos observados con la precipitación satelital de CMORPH.
3. Desde 2015 hasta 2023, en donde se realizó un relleno de datos con la data satelital modificada por un método de corrección del sesgo. Esto se realizó para una sola estación y se validó en el período 2021-2023 con otra totalmente independiente de los registros históricos.

En la comparación de los datos de precipitación históricos y los datos de precipitación satelitales (períodos temporales 1 y 2) no se realizaron ajustes de ningún tipo (ej. relleno de datos vacíos). En este sentido, se compararon sólo las fechas en que había dato observado en las diferentes estaciones hidroclimatológicas.

Es importante mencionar que los satélites que miden la precipitación enfrentan limitaciones significativas en su capacidad para detectar diferentes tipos de precipitación, especialmente en formas leves o como nieve. Además, estos satélites estiman la intensidad de la precipitación indirectamente, lo que puede llevar a imprecisiones. La representatividad temporal también es limitada, ya que la frecuencia de las mediciones satelitales puede no capturar adecuadamente eventos de precipitación de corta duración.

2.4 Definición del Problema:

La falta de datos sobre la precipitación puede dificultar la capacidad de anticipar y adaptarse a los patrones climáticos cambiantes, lo que, a su vez, compromete la planificación estratégica y el desarrollo sostenible de la región. Las actividades agrícolas, el turismo, la generación de energía y otros sectores se ven directamente afectados por esta limitación, ya que la ausencia de información confiable impide una gestión eficiente de los recursos y la implementación de prácticas sustentables. La desconfianza asociada a los datos satelitales agrega una capa adicional de complejidad, ya que socava la credibilidad de la información disponible. Esta falta de confianza puede tener repercusiones significativas en la toma de decisiones, ya que las partes interesadas pueden mostrar reticencia a basar sus acciones en datos que perciben como poco confiables.

Superar las barreras actuales no se limita únicamente a la adquisición de datos de precipitación, sino que también requiere garantizar la continuidad y la validación en terreno de estas series de datos para confirmar su calidad. Es fundamental mejorar la percepción de la confiabilidad de todas las fuentes de información, incluidos los datos satelitales. Enfocar los esfuerzos en este sentido es crucial para promover un desarrollo sostenible en la región, donde la toma de decisiones estratégicas se apoye en series de datos climáticos continuos y validados. Esto permitirá una gestión más eficaz y sustentable de los recursos hídricos, basada en información robusta y fiable que facilite el análisis detallado del recurso agua.

El desafío principal radica en la necesidad de contar con series de datos continuas y fiables, tanto de terreno como satelitales, que sean validadas mediante pruebas estadísticas rigurosas que aseguren su calidad. Esto es especialmente importante para los modelos hidrológicos y climáticos que fundamentan las decisiones relacionadas con la gestión del agua. Por tanto, es imperativo desarrollar una base de datos de precipitación que no solo sea completa y continua, sino también validada mediante pruebas rigurosas en terreno, que aseguren su calidad y precisión. Solo entonces se podrá contar con la herramienta necesaria para un análisis profundo y efectivo del recurso hídrico en las cuencas de forma general,

sustentando así la toma de decisiones para un futuro sostenible y resiliente frente a los desafíos climáticos.

2.5 Marco histórico y legal

Desde tiempos antiguos el entorno del Lago de Yojoa ha sido testigo de cambios naturales y de la influencia humana. Sin embargo, la intervención humana ha dejado una marca significativa en el paisaje circundante. La deforestación, la urbanización y otras actividades han alterado el equilibrio ecológico, afectando la biodiversidad y la sostenibilidad del área. A lo largo de los siglos, el lago ha sido un eje vital de la región, proporcionando recursos naturales y hábitats diversos para una amplia gama de especies. Sin embargo, los cambios en el entorno natural, impulsados por la creciente población y la demanda humana, han llevado a la degradación ambiental. La pérdida de hábitat, la fragmentación del bosque y la introducción de especies exóticas han sido preocupaciones persistentes a lo largo del tiempo (House, 2002).

Su formación es de origen volcánico y se encuentra rodeado por dos montañas (Santa Bárbara y Cerro Azul Meámbar), y siendo un lugar de gran atractivo visual se volvió popular para el turismo, lo que sumado a las diversas actividades de subsistencia de la zona han afectado la dinámica natural de la cuenca y es debido a eso que gran parte de los estudios realizados se han enfocado en brindar directrices que apoyen a la gestión integral del recurso hídrico y conservación de los ecosistemas, como ser diagnósticos ambientales, análisis de calidad del agua, estudios de biodiversidad, planes de manejo, batimetrías, balances hídricos y muchos más, la mayoría involucrando al menos a uno de los principales actores involucrados de la zona como ser la ENEE, Amuprolago, ICF, SERNA o SAG.

En el ámbito legal y político, Honduras ha promulgado leyes y políticas ambientales para proteger sus recursos naturales. Sin embargo, la efectividad de estas medidas puede haber sido cuestionada en el contexto del Lago de Yojoa. La aplicación y ejecución de las leyes ambientales pueden enfrentar desafíos significativos, dejando lagunas en la protección

legal del área. En el caso específico del Lago de Yojoa, la ley más importante que apunta directamente la problemática en esta área es la Ley de protección de la Cuenca del Lago de Yojoa, más conocida como Hondulago, aprobada por el Congreso Nacional de Honduras mediante el acuerdo ejecutivo 1422-2009 y publicado en el diario oficial La Gaceta, otorga a una entidad ejecutora la responsabilidad de hacer cumplir las leyes, acuerdos, contratos y regulaciones relacionadas con la gestión de la cuenca del lago de Yojoa.

Entre las acciones que le corresponden a Hondulago, se destaca la vigilancia del cumplimiento de todas las normas legales aplicables en la gestión de la cuenca del lago de Yojoa, tanto por parte de entidades públicas como privadas, así como por los ciudadanos y sus organizaciones. Además, la ley establece la creación y funcionamiento de un centro o unidad de facilitación administrativa para la tramitación de solicitudes y permisos relacionados con la gestión en la cuenca del lago (República de Honduras, 2009).

3. CAPÍTULO II: OBJETIVOS

3.1 Hipótesis:

Los productos satelitales CHIRPS v2.0 y CMORPH son efectivos para estimar la precipitación en la subcuenca del Lago de Yojoa desde 1981 hasta el 2015, con un nivel mínimo de resolución temporal por debajo de la escala anual, debido a su capacidad de integrar observaciones satelitales y mediciones in situ, lo que les permite capturar adecuadamente la variabilidad temporal y espacial de los eventos de precipitación en esta región

3.2 Objetivo general:

Conformar en la subcuenca del Lago de Yojoa una base de datos de precipitación completa y estadísticamente validada para el periodo comprendido entre los años 1981 – 2023, usando datos climatológicos medidos a nivel diario en conjunto con productos satelitales, que permita mantener la continuidad de las series de precipitación a una escala temporal propicia para los estudios futuros de gestión de los recursos hídricos.

3.3 Objetivos específicos:

- a. Validar la calidad de los datos satelitales para relleno en series de datos observados aplicando métricas estadísticas a las series climatológicas diarias, mensuales y anuales de precipitación.
- b. Identificar la o las fuentes de información climatológica que tienen mayor similitud con respecto a la climatología de la zona, realizando para ello comparaciones entre datos satelitales y datos observados.
- c. Rellenar los vacíos de datos usando la mejor fuente satelital disponible para la precipitación, y que asegure una continuidad en el registro desde 1981 hasta 2023.

4. CAPÍTULO III: ESTADO DEL ARTE

CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations) y CMORPH (CPC Morphing Technique de NOAA) son dos algoritmos destacados empleados para la estimación de precipitación a partir de datos satelitales. Diversas métricas estadísticas son utilizadas en evaluaciones para contrastar estas estimaciones con mediciones de precipitación pluviométrica directas.

El estudio realizado por Cordeiro y Blanco (2021) propone el uso de productos satelitales (TRMM, CHIRPS y CMORPH) para llenar los vacíos en las series históricas de precipitaciones en la región amazónica usando el método de regresión simple con estimaciones de precipitación satelital para completar los datos faltantes. Los autores encontraron que CHIRPS mostró el mejor desempeño en la representación de la variación estacional de la precipitación, a pesar de presentar casos de sobreestimación y subestimación de los datos. Este hallazgo resalta la importancia de validar los datos satelitales en contextos específicos para su uso en la modelización hidrológica y el análisis climático, un proceso que también se adopta en esta investigación.

Un estudio realizado sobre la Cuenca del Mujib (Suheir, y otros, 2023) en Jordania evaluó la precisión de los productos climáticos de código abierto CHIRPS y CFSR en la captura de la precipitación, comparándolos con datos observados en escalas temporales diarias, mensuales, estacionales y anuales. Aunque estos productos climáticos mostraron correlaciones buenas con los datos observados en el periodo mensual, en la escala diaria, su rendimiento fue deficiente, lo que refuerza el enfoque de usar estos datos principalmente para análisis mensuales y anuales. Los productos de clima abierto tuvieron mejores correlaciones en el período mensual, con valores de R^2 que oscilaron entre 0.65 (CFSR) y 0.76 (CHIRPS), destacando así la importancia de la validación y corrección de los datos de productos de precipitación satelital.

El estudio de Duarte, Formiga, & Costa (2022) evaluó y comparó métodos para rellenar datos faltantes de precipitación en estaciones pluviométricas en Brasil, usando regresiones lineales y datos satelitales de GPM. Aunque los métodos estadísticos tuvieron un rendimiento limitado a escala diaria, los datos satelitales resultaron ser más precisos, especialmente en representar la variabilidad temporal. A nivel mensual, los modelos de regresión no capturaron bien las características estacionales, mientras que los datos satelitales sí mostraron cierta capacidad para reflejar estas características, sugiriendo que los datos satelitales pueden ser una alternativa valiosa para rellenar vacíos en series de precipitación.

El estudio de Quesada-Montano y otros (2019) enfatiza la utilidad de productos satelitales como CHIRPS para la caracterización de sequías en Centroamérica. Utilizando varios índices de sequía y mostrando que son herramientas clave para entender y gestionar mejor los recursos hídricos en una región susceptible a la sequía. Este estudio valida la aplicabilidad de CHIRPS en nuestra región de estudio, proporcionando un precedente sólido para su uso en condiciones similares.

El estudio de Paredes-Trejo, Barbosa, & Lakshmi, (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.

Los resultados de la validación de CHIRPS realizada por Funk, y otros (2015) resaltan su eficacia en la estimación de la precipitación durante los tres meses más húmedos del año a escala casi global, relevante para el monitoreo de sequías agrícolas. CHIRPS muestra un sesgo bajo en comparación con otros productos de estimación de precipitación, señalando su utilidad para el análisis de la precipitación a nivel regional, particularmente en la monitorización de sequías y evaluación de tendencias de precipitación.

En el análisis realizado por Méndez (2016), se examinan las estimaciones de precipitación generadas por CHIRPS y CMORPH, comparándolas con observaciones pluviométricas en el centro-sur de Chile mediante métricas estadísticas como el coeficiente de correlación de Pearson (ρ), el error cuadrático medio raíz (RMSE), el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación (R^2). Estas herramientas estadísticas facilitan la evaluación de la correspondencia lineal, la exactitud del modelo, la concordancia entre estimaciones y observaciones, y el porcentaje de variación explicado por las estimaciones, respectivamente. Además, el estudio subraya la relevancia de realizar pruebas estadísticas para examinar la precisión y coherencia de los datos de precipitación, tanto de fuentes satelitales como terrestres.

La evaluación de los productos satelitales de precipitación CHIRPS y CMORPH realizada por Gómez (2021) en la cuenca del río Guajoyo situado al oeste de la República de El Salvador, destaca por su enfoque en la modelización hidrológica y la calibración de modelos en cuencas con escasa o nula información directa. Este estudio profundiza en cómo estos productos pueden mejorar las estimaciones hidrológicas y responder a desafíos ambientales, como el cambio climático y la gestión de recursos hídricos. CHIRPS se destaca por su alta resolución espacial y temporal, además de integrar datos de estaciones terrestres y satelitales, proveyendo una herramienta esencial para capturar la variabilidad de la precipitación en áreas con monitoreo deficiente. CMORPH, por otro lado, se evalúa junto a CHIRPS y otros productos en el documento para determinar su eficacia en la simulación de caudales. Aunque el análisis se centra más en la evaluación de CHIRPS, la inclusión de CMORPH resalta la importancia de comparar diferentes productos de precipitación satelital para identificar el más adecuado para aplicaciones hidrológicas específicas.

Joyce, y otros, (2004) realizan una validación de CMORPH en EE. UU. y Australia, donde muestra un rendimiento superior en correlación y errores menores en comparación con otras metodologías que combinan datos de microondas e infrarrojos. En la investigación

realizada por Asencios (2016) en Perú, se evalúa CMORPH en conjunto a otros productos destacando la importancia de ajustar el sesgo en las estimaciones satelitales de precipitación para incrementar la precisión de las simulaciones de caudales, enfatizando la importancia de validar y corregir estos datos previo a su uso en aplicaciones hidrológicas.

Jimeno, y otros, (2021) llevaron a cabo una evaluación de varios productos satelitales frente a mediciones pluviométricas en la cuenca de San Miguel ubicada al sureste de El Salvador, sugiriendo que, aunque pueden existir diferencias en el rendimiento entre los productos de precipitación, herramientas como CHIRPS y CMORPH presentan opciones viables para la modelización hidrológica en lugares como El Salvador, donde la red de observación es insuficiente.

5. CAPÍTULO IV: MARCO TEÓRICO

5.1 Definiciones

La capacidad de contar con registros detallados y continuos de precipitación es fundamental para modelar procesos hidrológicos, prever eventos hidrológicos extremos y gestionar eficazmente los recursos hídricos. Estas series no son meramente conjuntos de datos; son la esencia que permite a los hidrólogos entender los patrones, la variabilidad y la intensidad de las precipitaciones y cómo estas influyen en los ciclos del agua superficial y subterránea. La **hidrología** es la ciencia que estudia las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, su aparición, circulación y distribución en el tiempo y el espacio, sus propiedades biológicas, químicas y físicas, sus reacciones con el entorno, y su relación con los seres vivos (IDEAM, 2019).

Dentro de la hidrología se estudia el **ciclo hidrológico** el cual es un proceso cíclico de evaporación de agua de océanos y superficie terrestre, la cual es transportada por la circulación atmosférica en forma de vapor de agua, luego condensada para formar nubes, se precipita en forma de lluvia o nieve sobre el océano y la tierra, donde los árboles y la vegetación pueden interceptarla, parte del agua que llega hasta el suelo se infiltra recargando los acuíferos y otra parte fluye superficialmente en forma de escorrentía llegando a los cursos de agua y finalmente desembocando en los océanos, en los que se evapora nuevamente y el ciclo continúa (IPCC, 2013).

En el análisis del recurso hídrico disponible usualmente las zonas de estudio se suelen regir por delimitaciones naturales denominadas **cuencas hidrográficas** las cuales se refieren a la inclusión de ecosistemas terrestres (selvas, bosques, matorrales, pastizales, manglares) y acuáticos (ríos, lagos, humedales, etc.), y sus límites se establecen por el parteaguas desde donde escurre el agua que se precipita en el territorio delimitado por éste, hasta un punto de salida (GWP, 2011). La precipitación, la temperatura, y otros elementos climáticos juegan un papel crucial en el ciclo del agua dentro de estas cuencas, influenciando directamente la cantidad y calidad del agua disponible. Por ende, al analizar las cuencas hidrográficas, es

imprescindible integrar un estudio detallado del clima de la región, ya que ofrece una visión estadística del comportamiento atmosférico a largo plazo, proporcionando así un marco esencial para comprender y predecir los patrones de distribución y disponibilidad del agua en un territorio específico.

El **clima** es una descripción estadística del tiempo atmosférico, abarcando valores medios y la variabilidad de magnitudes en periodos que pueden extenderse desde meses hasta escalas temporales de miles o millones de años, según el IPCC (2015). También, se define como una “síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar específico, caracterizada por estadísticas a largo plazo que incluyen valores medios, varianzas y probabilidades de valores extremos, proporcionando así una visión integral y detallada de los elementos meteorológicos en dicho lugar (IDEAM, 2019). El clima es el patrón promedio de condiciones meteorológicas, incluyendo temperaturas, precipitaciones y vientos, en una región durante largos períodos, típicamente más de treinta años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Esta caracterización permite entender el clima como un resumen estable del tiempo atmosférico en un área determinada, facilitando la distinción entre variaciones temporales cortas y tendencias climáticas a largo plazo.

La **meteorología**, que se centra en el estudio de la atmósfera y sus fenómenos, es fundamental para entender cómo se está alterando el clima de nuestro planeta. A través de la física, la química y la dinámica atmosférica, la meteorología analiza los patrones climáticos existentes e investiga sus efectos directos en la superficie terrestre, los océanos y la vida en la Tierra (IDEAM, 2019). Esta comprensión meteorológica es crucial para abordar la creciente variabilidad climática, acelerada por la acción antropogénica, que se manifiesta en fenómenos naturales más intensos y frecuentes. Esta variabilidad climática, caracterizada por cambios en la temperatura y la atmósfera, conduce a alteraciones en los patrones de precipitación, un componente clave del sistema climático con efectos directos en la hidrología terrestre que pueden afectar directamente la disponibilidad de los recursos hídricos, creando zonas de escasez y otras de exceso.

La **precipitación** (INE, 2011), abarca cualquier forma de hidrometeoro que desciende de la atmósfera hacia la superficie terrestre, incluyendo lluvia, llovizna, nieve, aguanieve y granizo. Este proceso es un componente esencial del ciclo hidrológico, ya que influye directamente en el balance hídrico de una región, afectando la recarga de acuíferos, los niveles de los ríos y la disponibilidad de agua en embalses. En el marco del cambio climático, la precipitación no solo refleja variaciones en el clima global, sino que también tiene implicaciones significativas en la gestión del agua, la agricultura, y la planificación urbana, ya que alteraciones incluso menores en sus patrones pueden provocar cambios sustanciales en la disponibilidad de recursos hídricos.

Rakhecha y Singh (2009) definen la precipitación como la cantidad de agua naturalmente disponible que se origina en sistemas atmosféricos y llega a la superficie terrestre. Esta definición pone énfasis en la variabilidad espacial y temporal de la precipitación debido a causas meteorológicas, lo que puede llevar a fluctuaciones significativas en la precipitación anual de un año a otro. Esta variabilidad es responsable de varios problemas hidrológicos como inundaciones, sequías, deslizamientos de tierra y erosión, y por lo tanto, el estudio de la precipitación es fundamental en la hidrometeorología aplicada.

La información base para estudios de planificación hídrica, presentada en series de tiempo de variables meteorológicas como la precipitación, es esencial para entender y modelar los recursos hídricos. Una **serie de tiempo** se refiere al conjunto de observaciones regulares ordenadas en el tiempo, acerca de una característica cuantitativa de un fenómeno individual o colectivo y tomadas en períodos/puntos de tiempo sucesivos, en la mayoría de los casos equidistantes (OECD, 2007) y muestra no solo la variabilidad inherente a la precipitación sino también patrones cíclicos y tendencias que pueden o no ser evidentes a simple vista. Una **serie climatológica** (DGAC, 2022) es “un juego de datos homogéneos compuesto de variables aleatorias discretas o continuas, seleccionado de una sola población, comúnmente infinita en su extensión”.

Estas series, al ser analizadas, revelan comportamientos como la estacionariedad, donde las propiedades estadísticas permanecen constantes en el tiempo, y la no estacionariedad, que indica cambios en estas propiedades a lo largo del tiempo. Además, aspectos como la ergodicidad, donde las propiedades de la serie pueden entenderse a través de un solo período de tiempo prolongado, y la aleatoriedad, que indica la imprevisibilidad de las observaciones, son fundamentales para interpretarlas.

En el contexto de la precipitación, el análisis de series de tiempo permite identificar patrones y tendencias que son cruciales para la gestión del agua. Por ejemplo, estudios como el de Machiwal y Jha (2012), así como, Yu y Chen (2011) enfatizan la importancia de caracterizar adecuadamente estas series para entender la variabilidad y la tendencia de la precipitación, lo que a su vez tiene implicaciones significativas para la planificación hídrica. Estas características de las series de tiempo son analizadas mediante métodos estadísticos que permiten extraer información valiosa sobre la precipitación, contribuyendo a una mejor comprensión y gestión de los recursos hídricos en un área determinada.

La recopilación de datos para construir las series climatológicas se lleva a cabo a través de **estaciones meteorológicas convencionales o telemétricas**. Las estaciones meteorológicas son sitios donde generalmente una persona realiza observaciones y mediciones puntuales de diversas variables meteorológicas utilizando instrumentos especializados. Este proceso tiene como objetivo comprender el comportamiento atmosférico en diferentes áreas de un territorio. Por otro lado, las estaciones telemétricas automatizan la obtención de datos mediante sensores diversos y tienen la capacidad de transmitirlos automáticamente al centro de recepción mediante diversos medios, como satélites, radiofrecuencia, GPRS, entre otros (IDEAM, 2019). Una sola estación no es suficiente para ser representativa de la climatología de la zona, por lo que se busca contar con una **red de estaciones** hidroclimatológicas que sean suficientes para definir los regímenes meteorológicos en una escala adecuada a los estudios del clima (IDEAM, 2019).

Los datos hidroclimatológicos son conjuntos de información que combinan variables hidrológicas y climáticas, como precipitación, temperatura, evaporación y caudal, para analizar y entender la interacción entre la atmósfera y los recursos hídricos. Según Mather (1991), la ciencia hidroclimatológica ha evolucionado significativamente, desde ideas especulativas hasta la cuantificación y el análisis detallado de datos hidroclimáticos, lo que permite estimaciones útiles de factores como el almacenamiento de humedad en el suelo y la recarga de aguas subterráneas.

5.2 Métodos estadísticos para análisis de información climatológica

A través de métodos estadísticos es posible comprender y evaluar las características de las series climatológicas. Asimismo, estos métodos permiten identificar posibles anomalías y tendencias, estableciendo así una base sólida para el procesamiento y la interpretación de datos hidroclimatológicos.

En el análisis estadístico de series temporales, se emplean tanto pruebas paramétricas como no paramétricas. Las pruebas paramétricas, basadas en la suposición de una distribución específica, como la distribución normal, son capaces de cuantificar cambios en los datos, proporcionando información sobre la magnitud del cambio en la media o la pendiente de la tendencia. Por otro lado, las pruebas no paramétricas son más flexibles al no requerir una distribución particular, aunque no cuantifican el tamaño de la tendencia o cambio, son valiosas para detectar tendencias y cambios en series temporales, que a menudo no siguen una distribución normal (ANA, 2015).

En el análisis de series temporales de precipitación, las pruebas no paramétricas, son especialmente valiosas debido a la naturaleza de los datos, ya que la precipitación a menudo no sigue una distribución normal y puede presentar características de no estacionariedad y tendencias no lineales. En el estudio realizado por Partal y Kahya (2006), se emplearon métodos no paramétricos para analizar las tendencias en series de precipitación en Turquía, destacando la eficacia de estas pruebas en la detección de tendencias sin asumir una

distribución específica. Estas pruebas son robustas frente a desviaciones de la normalidad y son adecuadas para identificar tendencias en datos que pueden estar influenciados por factores no lineales o por la presencia de outliers, comunes en los registros de precipitación. Por lo tanto, las pruebas no paramétricas se recomiendan en el análisis de la precipitación para obtener resultados confiables y representativos de las dinámicas naturales de esta variable crítica.

A continuación, se presentan las estadísticas y elementos desarrollados en el estudio enfocados en la descripción y el estudio de la precipitación, como se describe en Fundamentos de Hidrología Estadística (Naghattini, 2017).

5.2.1 Medidas de tendencia central

Las medidas de tendencia central ayudan a comprender cómo se distribuyen los datos en torno a un valor central. Esto sirve para identificar patrones de lluvia y entender su comportamiento.

5.2.1.1 Media

En una muestra de datos, la media aritmética es la medida más común de tendencia central y se calcula como el promedio de los valores en la muestra. Para una muestra de tamaño N que consta de los puntos de datos $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, la media aritmética se estima como:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

5.2.1.2 Mediana

Siendo otra medida de tendencia central, es menos susceptible a valores extremos por lo que se le considera más robusta que la media. Se define como el valor que separa la muestra en dos conjuntos o submuestras, cada una con una frecuencia acumulada de 0.5, es decir, el segundo cuartil (Q2) y está dada por:

$$x_{md} = x\left(\frac{N+1}{2}\right) \text{ si } N \text{ es un número impar o } x_{md} = \frac{x_{\left(\frac{N}{2}\right)} + x_{\left(\frac{N}{2}+1\right)}}{2} \text{ si } N \text{ es par} \quad (2)$$

5.2.2 Medidas de dispersión

El grado de variabilidad de los puntos muestrales, alrededor de su valor central, viene dado por las medidas de dispersión. Una medida que es más resistente (o robusta) a la presencia de valores atípicos está dada por el rango intercuartil (IQR)

5.2.2.1 Rango Intercuartil

El IQR (Rango Intercuartil) se calcula como la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) y el primer cuartil (Q1), y se utiliza comúnmente para identificar valores atípicos. Los valores atípicos son aquellos que se desvían significativamente del comportamiento general de la muestra. Según este criterio, un valor se considera un valor atípico alto si es mayor que (Q3 + 1.5 IQR) y un valor atípico bajo si es menor que (Q1 - 1.5 IQR). Los valores atípicos pueden ser el resultado de errores de medición o eventos excepcionales. Si, después de una revisión exhaustiva de los datos, se confirma que se trata de un error, es apropiado eliminar el valor atípico de la muestra. Sin embargo, en el caso de eventos excepcionales, eliminar el valor atípico sería una decisión equivocada, ya que afectaría la representatividad de la muestra en relación con la variación aleatoria de la variable en cuestión. El IQR se define como:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (3)$$

5.2.2.2 Desviación Estándar

La desviación estándar destaca desviaciones (positivas y negativas) de la media de la muestra y es la medida de dispersión más utilizada, está definida por:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

5.2.3 Medidas de asimetría y peso de la cola

En el análisis estadístico de datos, es esencial no solo comprender la tendencia central y la dispersión de una distribución, sino también la forma de la misma. Para lograr una descripción completa de cómo se distribuyen los datos, se utilizan medidas de asimetría y peso de la cola. Estas medidas proporcionan información valiosa sobre la simetría y la concentración de los datos en los extremos de la distribución. Entre las medidas más fundamentales se encuentran los coeficientes de asimetría y curtosis

5.2.3.1 Coeficiente de asimetría (skewness)

El coeficiente de asimetría, representado como g , es una medida adimensional que describe la asimetría en la distribución de una muestra de datos. En términos simples, indica si la distribución de los datos está sesgada hacia la derecha o hacia la izquierda en relación con la media. Si g es positivo, la distribución tiene un sesgo hacia la derecha, lo que significa que hay valores extremadamente altos que tiran de la media en esa dirección. Por otro lado, si g es negativo, la distribución tiene un sesgo hacia la izquierda, lo que indica la presencia de valores extremadamente bajos que afectan la media en esa dirección. Cuando g es cercano a cero, la distribución es relativamente simétrica, y la media, la mediana y la moda tienden a estar cerca una de la otra. Está dado por:

$$g = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{s^3} \quad (5)$$

5.2.3.2 Coeficiente de Kurtosis

El coeficiente de kurtosis es una medida estadística que evalúa la "pesadez de las colas" de una distribución de datos. Indica cuán extremas o inusuales son las observaciones en los extremos de la distribución. Puede clasificar las distribuciones en tres tipos: mesocúrticas (colas normales, $k=0$), platicúrticas (colas ligeras, $k<0$) y leptocúrticas (colas pesadas, $k>0$). Cuanto mayor sea el valor de kurtosis, más pesadas son las colas de la distribución, lo que sugiere la presencia de valores atípicos. Está dado por:

$$k = \frac{N(N+1)}{(N-1)(N-2)(N-3)} \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{s^4} - 3 \left[\frac{(N-1)^2}{(N-2)(N-3)} - 1 \right] \quad (6)$$

5.2.4 Métodos gráficos exploratorios

Los métodos gráficos proporcionan una visión clara y efectiva de la distribución y la estructura de los datos ya que ayudan a revelar patrones ocultos y detectar valores atípicos.

5.2.4.1 Diagrama de cajas y bigotes (Box Plot)

El diagrama de caja, o box plot, es una herramienta gráfica que muestra de manera concisa y completa un conjunto de datos. Consiste en un rectángulo que abarca el primer y tercer cuartil, con la mediana en su interior. Desde el rectángulo se extienden líneas llamadas "bigotes" que indican el rango de valores típicos. Cualquier valor fuera de estos bigotes se considera un valor atípico y se destaca en el gráfico. El diagrama de caja proporciona información sobre la tendencia central, la dispersión de los datos, la identificación de valores atípicos y la asimetría de la distribución.

5.2.4.2 Gráfico de dispersión

Es un gráfico que muestra la relación entre dos variables (X e Y) al representar pares de datos concurrentes. Puede indicar si existe una asociación positiva o negativa entre las variables. El grado de asociación lineal se mide mediante el coeficiente de correlación, r , que varía entre -1 y 1. Un valor de 1 indica una asociación lineal positiva perfecta, -1 indica una asociación lineal negativa perfecta y 0 indica la ausencia de una asociación lineal. Sin embargo, una alta correlación no implica necesariamente una relación causal entre las variables.

5.2.5 Pruebas de tendencia

La existencia de una tendencia general, ya sea de aumento o disminución, puede enmascarar las propiedades de algunas series de tiempo. Al definir esta tendencia, es posible sustraer su efecto de cada valor observado en el momento correspondiente, simplificando así el análisis de las características específicas de la serie (Custodio & Llamas, 1983).

5.2.5.1 Prueba de Mann-Kendall

Es una prueba no paramétrica para explorar la tendencia en una serie de tiempo sin especificar el tipo de tendencia (Machiwal & Kumar, 2012). Teniendo valores $n(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ que representan una serie de tiempo, serán reemplazados por rangos relativos $(R_1, R_2, R_3, \dots, R_n)$ (Chiew & Siriwardena, 2005), la ecuación resultante es:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_i - R_{i+1}) \quad (7)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x) &= 1 \text{ para } x > 0 \\ \text{sgn}(x) &= 0 \text{ para } x = 0 \\ \text{sgn}(x) &= -1 \text{ para } x < 0 \end{aligned}$$

Si la hipótesis nula (H_0) en esta prueba de tendencia es asumir que no existe una tendencia en los datos y es verdadera, entonces S es una aproximación a la distribución normal con:

$$\mu = 0 \quad \gamma \quad \sigma = n(n-1)(2n+5)/18$$

La ecuación resultante del estadístico nombrado como Z sería:

$$Z = \frac{|S|}{\sigma^{0.5}} \quad (8)$$

Una tendencia creciente estará indicada por un valor S positivo mientras que un valor S negativo indicará una tendencia decreciente.

Definición de hipótesis:

H_0 = La muestra es estacionaria (no tiene tendencia)

H_1 = La muestra tiene tendencia

Reglas de aceptación:

Se rechaza H_0 si:

$$z < -1.96 \quad \text{o} \quad z > 1.96 \quad \text{Condición de significancia } \alpha = 0.05 \text{ de aceptación:}$$

5.2.5.2 Innovative Trend Analysis (ITA)

El Innovative Trend Analysis (ITA) es una metodología avanzada para la identificación de tendencias en series temporales hidroclimatológicas que se basa en el análisis de gráficos de dispersión en un sistema de coordenadas cartesianas. Esta metodología se desarrolló con el propósito de superar las limitaciones de los métodos tradicionales de detección de tendencias, como el Mann-Kendall test y el Spearman's rho test, al no requerir suposiciones restrictivas sobre la independencia serial, la distribución de probabilidad o la longitud de las series de tiempo (Şen, 2012).

El ITA se fundamenta en el principio de que las series temporales hidroclimatológicas, independientemente de su tamaño de muestra, estructura de correlación serial o distribución de probabilidad, pueden revelar tendencias mediante la observación de sus gráficos de dispersión.

Cuando dos series temporales son idénticas, los puntos en un gráfico de dispersión entre ellas se distribuyen a lo largo de una línea recta con una pendiente de 1:1 (45°) en un sistema de coordenadas cartesianas. Cualquier desviación de esta línea recta indica la presencia de una tendencia en una de las series con respecto a la otra.

5.2.6 Análisis de consistencia

La teoría de la curva de doble masa, fundamentada en trabajos de Kholer, Heras y la Organización Meteorológica Mundial, se utiliza como método gráfico para evaluar la homogeneidad en series hidrológicas (Méndez, 2016). Este enfoque consiste en representar en ejes de coordenadas las parejas de puntos definidos por los valores acumulados sucesivos en un periodo de observaciones. La linealidad de la curva resultante indica proporcionalidad entre las series, detectando así cambios en los procesos de adquisición de datos.

5.2.7 Prueba de aleatoriedad e independencia

Wald and Wolfowitz (1940) introdujeron una aplicación interesante del concepto de número total de rachas (RN) en el contexto de pruebas de hipótesis para comparar dos muestras de tamaños m y n . Su objetivo era probar la hipótesis de que estas muestras provienen de la misma distribución, en contraposición a la alternativa de que provienen de distribuciones diferentes (Wald & Wolfowitz, 1943).

Para llevar a cabo esta prueba, los autores combinaron las observaciones de ambas muestras y representaron una de ellas como unos (éxitos) y la otra como ceros (fracasos). En su investigación, lograron encontrar la distribución exacta de RN, así como la media ($E[RN]$) y la varianza ($V[RN]$) exactas, además de las expresiones asintóticas para estas medidas. Demostraron que RN sigue una distribución asintóticamente normal.

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_n$$

Donde:

x_1, x_2, \dots, x_n denota la data

R = Test de Wald-Wolfowitz

El valor esperado de R es:

$$E(R) = \frac{s_1^2 - s_2}{n - 1}$$

La varianza esperada es:

$$V(R) = \frac{s_2^2 - s_4}{n - 1} - E(R)^2 + \frac{s_1^4 - 4s_1^2 s_2 + 4s_1 s_3 + s_2^2 - 2s_4}{n - 1}$$

Con:

$$s_t = \sum_{i=1}^n x_i^t, \quad t = 1, 2, 3, 4$$

Para $n > 10$ el test se encuentra normalmente distribuido, con:

$$z = \frac{R - E(R)}{\sqrt{V(R)}}$$

Definición de hipótesis:

H_0 = Las muestras proceden de un proceso aleatorio (observac. independientes)

H_1 = Las muestras no proceden de un proceso aleatorio (observ. dependientes)

Reglas de aceptación:

Se rechaza H_0 si:

$$z < -1.96 \quad \text{o} \quad z > 1.96 \quad \text{Condición de significancia } \alpha = 0.05$$

5.2.8 Prueba de Homogeneidad

La prueba de Pettitt se utiliza para detectar cambios en la ley de probabilidad ($f(x)$) de una serie cronológica en un instante dado, normalmente desconocido. Esta prueba divide la serie en dos submuestras de tamaño m y n , respectivamente, y ordena los valores de ambas en orden ascendente. Luego, se calcula la suma de los rangos de los elementos de cada submuestra con respecto a la muestra completa. A partir de estas sumas, se define un estadístico y se verifica una hipótesis nula que representa la ausencia de rupturas en la serie (Pettitt, 1979).

$$U_K = 2 \sum_{i=1}^k r_i - k(n+1) \quad k = 1, \dots, n$$

El estadístico de prueba es el máximo del valor absoluto del vector:

$$\hat{U} = \max |U_k|$$

El probable punto de cambio K se encuentra donde \hat{U} tiene su máximo. La probabilidad aproximada para una prueba bilateral se calcula de acuerdo con:

$$p = 2 \exp -6k^2 / (T^3 + T^2)$$

5.2.9 Diferencia de medianas

La prueba de Wilcoxon, también llamada la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, es una técnica no paramétrica que se emplea para contrastar las medianas de dos conjuntos de datos relacionados o emparejados. A diferencia de los métodos paramétricos, este test no supone una distribución específica para los datos, lo que lo convierte en una elección apropiada cuando los datos no cumplen con los supuestos de normalidad requeridos por otros enfoques estadísticos, como el test t de Student (Noether, 1992).

El test de Wilcoxon resulta especialmente útil cuando se trabaja con datos de escala ordinal o cuando los datos muestran asimetría o valores atípicos. Asimismo, se aplica en situaciones donde las muestras a comparar están emparejadas, es decir, provienen de los mismos individuos, elementos o unidades en diferentes condiciones o momentos temporales.

Definición de hipótesis:

H_0 = Las muestras provienen de la misma población

H_1 = Las muestras no provienen de la misma población

Reglas de aceptación:

Se rechaza H_0 si $p < 0.05$

5.2.10 Métricas estadísticas

Las métricas estadísticas son fundamentales en la evaluación de modelos predictivos y en la comprensión de la relación entre variables. Algunas métricas clave incluyen el Coeficiente de Correlación de Pearson (ρ) para medir la relación entre valores predichos y observados, el Coeficiente de Determinación (R^2) para cuantificar cuánta varianza explica una línea de regresión, el Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) para evaluar la concordancia entre datos observados y simulados, y el Error Cuadrático Medio (RMSE) para medir la

precisión del modelo. Estas métricas son esenciales para evaluar la calidad de las predicciones y comprender la relación entre variables.

5.2.10.1 Coeficiente de Correlación Pearson

Este coeficiente mide la relación entre los valores predichos (satelitales) y los observados. Es un indicador de correlación que cuantifica la relación entre dos variables que se miden en una escala de intervalo o razón (Kay, Theerapol, Watin, & Piyamarn, 2020). Este coeficiente mide la fuerza de la conexión entre dos variables continuas. Su rango va desde -1 hasta 1, indicando 1 un ajuste perfecto y se calcula mediante la ecuación:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (P_o - \bar{P}_o) (P_s - \bar{P}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_o - \bar{P}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_s - \bar{P}_s)^2}} \quad (9)$$

Donde:

P_s : Precipitación satelital

P_o : Precipitación observada

\bar{P}_o : Promedio de la precipitación observada

\bar{P}_s : Promedio de la precipitación satelital

N: Número de meses

5.2.10.2 Coeficiente de Determinación (R^2)

Representa la proporción de la varianza total que puede explicar la línea de regresión. Su cálculo implica elevar al cuadrado el coeficiente de correlación ' ρ ' (Kay, Theerapol, Watin, & Piyamarn, 2020). La escala varía de 0 a 1, donde 1 indica un ajuste perfecto; los rangos intermedios se clasifican como muy buenos (>0.95), buenos (0.85 a 0.95), satisfactorios (0.65 a 0.85) e insatisfactorios (<0.65) (Delgadillo, 2020) para una escala mensual.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(P_o - \bar{P}_o) (P_s - \bar{P}_s)]^2}{\sum_{i=1}^N (P_o - \bar{P}_o)^2 \sum_{i=1}^N (P_s - \bar{P}_s)^2} \quad (10)$$

5.2.10.3 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Esta estadística normalizada evalúa cómo se compara la variación residual (ruido) con la varianza de los datos observados, es decir que la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Un valor NSCE cercano a la unidad indica un ajuste perfecto, ya que el gráfico de datos observados frente a simulados se alinea con la línea 1:1 (Gopi, y otros, 2023) y varía en el rango de $-\infty$ a 1.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_o - P_s)^2}{\sum_{i=1}^N (P_s - \bar{P}_s)^2} \quad (11)$$

Un valor menor a 0.2 se considera “Insuficiente”, entre 0.2 y 0.4 “Satisfactorio”, de 0.4 a 0.6 “Bueno”, de 0.6 a 0.8 “Muy bueno” y mayor a 0.8 se considera “Excelente” (Molnar, 2011) para una escala mensual.

5.2.10.4 Error Cuadrático Medio (RMSE)

El error cuadrático medio se puede utilizar para comparar diferentes estimadores sesgados y por medio del RMSE que es la raíz cuadrada del MSE podemos cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados con respecto a los observados (Cabrera, 2017). Se calcula a partir de la suma del cuadrado medio de los valores observados y satelitales. Su rango va de 0 a infinito (∞), siendo 0 un ajuste perfecto. La ecuación usada es:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_s - P_o)^2} \quad (12)$$

5.2.10.5 Sesgo (Bias)

El sesgo evalúa la correspondencia de los datos simulados o pronosticados en comparación con los datos observados (Kay, Theerapol, Watin, & Piyamarn, 2020). Cuando se obtienen valores positivos, esto señala que hay una tendencia a sobreestimar las observaciones, mientras que los valores negativos indican una tendencia a subestimarlas. El sesgo ideal es igual a 0.0, lo que refleja simulaciones precisas del modelo, y valores con desviaciones mínimas demuestran que el modelo es preciso en sus estimaciones.

$$BIAS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_s)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_o)} \quad (13)$$

5.3 Datos Satelitales

Los datos satelitales se obtienen a través de sensores en los satélites que se encuentran en el espacio exterior, orbitando el planeta tierra y que poseen instrumentos de exploración que detectan la radiación electromagnética de la tierra emitida en diferentes líneas espectrales, estas mediciones se digitalizan y transmiten en forma de imágenes y luego transformadas en datos. Actualmente existen más de 3,000 satélites en órbita y responden a múltiples propósitos; los hay de diferentes tipos según su finalidad como se resume en la Tabla 1:

TABLA 1 - TIPOS DE SATÉLITES SEGÚN SU FINALIDAD

Tipo de satélite	Función
Comunicación	Transmisión de señales para telecomunicaciones de radio y televisión
Meteorológicos	Observar y registrar las condiciones de la atmósfera y fenómenos naturales
Navegación	Transmitir rangos de señales para posicionar o localizar objetos y personas de forma precisa y exacta como ser los usados por el sistema GPS.
Reconocimiento	Conocido también como satélite espía; de uso militar o para inteligencia con aplicaciones de monitoreo de misiles y vigilancia a través de imágenes de radar entre otros
Astronómicos	Observación del espacio exterior incluyendo planetas, galaxias, etc.
Energía solar	Recibir energía del sol y redireccionarla hacia la tierra. Este tipo de satélites es el más nuevo y aún se encuentra en fase de prueba para la generación de energía limpia.

Fuente: Elaboración propia

De los satélites anteriores son los de carácter meteorológico los que se enfocan en observar y registrar las condiciones de la atmósfera y por ende en el registro de precipitación que será el analizado en este estudio. Los satélites meteorológicos se pueden encontrar en una órbita fija o geoestacionaria o en una órbita polar.

5.3.1 Satélites de órbita fija o geoestacionaria

Se encuentran orbitando alrededor del Ecuador en altitudes altas (aproximadamente 36,000 km) en conjunto con la rotación de la tierra por lo que capta la misma área geográfica, los satélites GOES-East y GOES-West de la NASA y NOAA se encuentran posicionados sobre el hemisferio occidental (Bozkurt & Randanelli, 2020).

Entre los más importantes tenemos (Tabla 2):

TABLA 2 - SATÉLITES DE ÓRBITA FIJA O GEOESTACIONARIA

Satélite	Agencia / País	Distancia a la tierra (km)	Instrumentos
<i>Meteosat</i>	ESA	35,786	DCS, GEOS&R, GERB, SEVIRI
<i>GOES</i>	NOAA -USA	35,786	ABI, EXIS, GEOS&R, GLM, SEM/MAG, SUVI, DCIS, SEISS (MPS, EHS y SGPS)
<i>GMS - Himawari</i>	Japón	35,786	DCS, VISSR
<i>Electro</i>	RosHydroMet, Roscosmos - Rusia	35,786	DCS, GEOS&R, MSU-GS, GGAK-E (SKIF-6, GALS-E, VUSS-E)
<i>INSAT</i>	ISRO, IMD -India	35,786	DCS, SAS&R, Generador de Imágenes, Sonda.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de <https://space.oscar.wmo.int/satellites>

5.3.2 Satélites de órbita polar

Orbitan a altitudes bajas, oscilando entre 500 y 900 km, siguiendo una trayectoria sincronizada con el sol, moviéndose de polo a polo en una órbita circular. Esta configuración les permite realizar mediciones de cualquier ubicación dos veces al día (Bozkurt & Randanelli, 2020). Información relevante de algunos satélites de órbita polar pueden encontrarse en la Tabla 3.

TABLA 3 - SATÉLITES DE ÓRBITA POLAR

Satélite	Agencia / País	Distancia a la tierra (km)	Instrumentos
<i>NOAA</i>	NOAA - USA	870	A-DCS, AMSU-A, AVHRR, HIRS, MHS, S&RSAT, SBUV, SEM(MEPED, TED)
<i>GPM-Core</i>	NASA - USA	407	DPR, GMI
<i>Meteor-M</i>	RosHydroMet, Roscosmos - Rusia	821	IKFS-2, KMSS, MSU-MR, MTVZA-GY, SSPD, GGAK-M/RIMS-M, IKOR-M, GGAK-E (SKIF-6, GALS-E), Severjanin-M
<i>TRMM</i>	NASA, JAXA – USA, JAPÓN	402	CERES, LIS, PR, TMI, VIRS
<i>AQUA</i>	NASA - USA	705	AIRS, AMSR-E, AMSU-A, CERES, HSB, MODIS
<i>DMSP</i>	Departamento de Defensa, NOAA - USA	850	OLS, SSMIS, SESS (SSUSI, SSULI, SSI, SSM-Boom, SSJ5)
<i>Metop</i>	EUMETSAT, ESA – Países europeos	827	A-DCS, AMSU-A, ASCAT, AVHRR/3, GOME-2, GRAS, HIRS/4, IASI, MHS, S&RSAT, SEM/MEPED, SEM/TED
<i>FENG-YUN</i>	CMA, NRSCC - China	836	ERM-1, IRAS, MERSI-1, MWHS-1, MWRI, MWTS-1, SBUS, SEM/HEPD, SIM-1, TOU, VIRR, SEM/IMS

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de <https://space.oscar.wmo.int/satellites>

La resolución temporal y espacial de los satélites pueden variar de una fuente a otra. Las escalas espaciales pueden clasificarse en locales (menor a 100,000 km²), regionales (100,000 km² a 10 millones de km²) o continentales (10 a 100 millones de km²). Las escalas temporales abarcan desde períodos estacionales hasta geológicos (hasta centenares de millones de años) (IPCC, 2013).

Los datos recopilados por los sensores en los satélites se encuentran en forma de productos satelitales, y se clasifican en tres categorías:

- a) Sensores Visible/Infrarrojo (VIS/IR) en satélites geoestacionarios (GEO) y en satélites de órbita baja (LEO, por sus siglas en inglés)
- b) Microondas Pasivo (PMW, por sus siglas en inglés) en satélites LEO y
- c) Microondas activo en satélites LEO.

Los sensores VIS/IR se basan en el principio de que la convección está relacionada con nubes frías y brillantes, así que bajas temperaturas en la parte alta de las nubes sugieren mayor desarrollo de precipitación. Una relación entre la temperatura de la parte superior de las nubes y la probabilidad e intensidad de lluvia en tierra puede ser usada para estimar la precipitación a partir de lecturas IR (BID, 2022). Sin embargo, se debe recalcar que la relación entre la temperatura de la parte alta de la nube es indirecta y que no todas las nubes acaban produciendo precipitación. CHIRPS es un ejemplo del uso de sensores infrarrojos, pero este producto también incluye información de una gran cantidad de estaciones en tierra para estimar precipitación.

Los radiómetros PWM ofrecen un método más directo de medición de precipitación al ser sensibles al tamaño de las partículas, además los sensores PWM pueden detectar partículas a través de las nubes. Aunque estos sensores en satélites LEO permiten estimaciones instantáneas y realistas, su resolución temporal es menor en comparación con los sensores IR en satélites GEO. Actualmente, los sensores PMW en satélites LEO permiten una

cobertura global cada 3 horas o menos. Los datos recolectados por sensores VIS/IR y PWM a menudo son combinados para mejorar la precisión, cobertura y resolución de los productos satelitales, este es el caso de IMERG, GsMAP y CMORPH.

La traducción de las mediciones satelitales a datos de precipitación implica un proceso donde las señales recogidas por los sensores se convierten en estimaciones cuantitativas de lluvia. Por ejemplo, en el caso de los sensores infrarrojos (IR), se aprovecha la relación entre la temperatura de la cima de las nubes y la precipitación. La baja temperatura en la cima de una nube se asocia generalmente con nubes de gran altura, que a menudo están ligadas a fenómenos de precipitación. Mediante algoritmos, se establece una correlación entre la temperatura observada y la cantidad estimada de precipitación. Para los sensores de microondas pasivas (PMW), la metodología es diferente; estos detectan la cantidad de radiación emitida por gotas de lluvia y partículas de hielo, permitiendo una estimación más directa de la precipitación, incluso a través de las nubes.

La calibración de CHIRPS y CMORPH para Honduras o Centroamérica implica ajustar los datos satelitales utilizando registros de estaciones meteorológicas en la región para mejorar la precisión de las estimaciones de precipitación. Esta calibración es esencial para garantizar que los datos reflejen con precisión las condiciones locales de precipitación, lo cual es crucial para aplicaciones que van desde la gestión de recursos hídricos hasta la planificación de la respuesta a desastres naturales.

5.3.3 CMORPH

Es un método que produce estimaciones globales de precipitación a partir de datos recolectados por medio de microondas e infrarrojos a alta resolución espacial y temporal. Producido por el Centro de Predicción Climática (CPC) de la NOAA, esta técnica usa la precipitación estimada de observaciones de microondas de satélites de baja órbita y cuyas características se transportan a través de información de propagación espacial que se obtiene de datos infrarrojos de satélites geoestacionarios (NOAA, 2022).

Los datos tienen una resolución espacial de 25 km (0.25°x0.25°) a una escala temporal diaria, cubriendo el periodo desde el 01 de enero de 1998 hasta la actualidad. El proceso de construcción del producto satelital se lleva a cabo en dos etapas distintas. En la primera fase, se crea una estimación integrada de alta resolución de la precipitación global satelital (CMORPH crudo). Este proceso implica el uso de datos que representan la tasa de precipitación obtenida de varios sensores de microondas pasivos (PMW) ubicados en satélites de órbita baja (LEO). Estos datos se propagan en el tiempo desde sus momentos de observación hasta el tiempo de análisis deseado, utilizando vectores de movimiento de nubes calculados a partir de imágenes infrarrojas (IR) consecutivas obtenidas de satélites geoestacionarios. En la segunda fase, se procede a eliminar el sesgo presente en el CMORPH crudo mediante el proceso de coincidencia de la Función de Densidad de Probabilidad (PDF) en contraste con análisis de estaciones en tierra (NOAA, 2018). En la Tabla 4 se mencionan los sensores que aportan la información para el algoritmo interno que utiliza CMORPH para estimar la precipitación.

TABLA 4 – SENSORES QUE PROPORCIONAN LOS DATOS DE ENTRADA DEL ALGORITMO CMORPH

Acrónimo	Satélite
PMW	Plataformas de órbita terrestre baja (LEO) que transportan el sensor
TMI	TRMM
AMSR	AQUA
SSMIS	DMSP F-16, F-17, F-18
SSM/I	DMSP F-13, F-14, F-15
MHS	NOAA-18, NOAA-19, MetOp-A, MetOp-B
AMSU	NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17
MWRI	FUNYUN(FY) – 3B

Fuente: (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), 2018)

5.3.4 CHIRPS

Desarrollado por el USGS y la Universidad de California, combina datos observados reales de estaciones meteorológicas con datos estimados de precipitación a través de sensores

infrarrojos y posee registros desde 1981. Incorpora una resolución de 0.05° de imágenes satelitales. CHIRPS contiene dos conjuntos de datos, el primero desde 50°N a 50°S siendo casi global mientras que el segundo cubre desde 40°N a 40°S y de 20°W a 55°E abarcando África y partes del Medio Oriente (UC Santa Barbara, 2022).

Utiliza un procedimiento de mezcla novedoso que incorpora la estructura de correlación espacial de las estimaciones basadas en observaciones infrarrojas de Duración de Nubes Frías (CCD). CHIRPS se diseñó para monitorear sequías agrícolas y cambios ambientales globales sobre la tierra, llenando un vacío en los conjuntos de datos de precipitación con alta resolución y largo período de registro (Funk, y otros, 2015). En la Tabla 5 se mencionan los datos de entrada que conforman la información para el algoritmo interno que utiliza CHIRPS para estimar la precipitación.

TABLA 5 - DATOS DE ENTRADA DEL ALGORITMO CHIRPS

Acrónimo	Descripción	Tipo	Agencia
GEO-IR	Imágenes Infrarrojos proporcionados por los satélites Geoestacionarios	Sensor satelital	NASA
TRMM 3B42	Misión para medir precipitación tropical en forma de lluvia producto de precipitación 3B42	Algoritmo de recuperación satelital	NASA y JAXA
CHPClim	Climate Hazards Group's Precipitation Climatology	Climatologías de precipitación	USGS
CFSv2	Sistema de pronósticos climáticos, versión 2	Estimaciones de modelos atmosféricos	NOAA
	Datos observados in situ provenientes de varias fuentes	Datos de pluviómetros	Diversas

Fuente: (Méndez, 2016), (Funk, y otros, 2015)

5.4 Corrección del sesgo y relleno de datos

Las estimaciones derivadas de datos satelitales sufren sesgo debido a que son promedios de áreas y éstas poseen irregularidades en el terreno; mientras que las cuadrículas de precipitación basadas en data de estaciones climatológicas son menos certeras en las zonas alejadas de las estaciones.

Hay múltiples estudios que abordan el tema del sesgo en las estimaciones de precipitación basadas en datos satelitales y las mediciones en estaciones climatológicas. Smith, y otros (2006) destacan que los sesgos en las estimaciones de precipitación satelitales pueden ser una gran fuente de incertidumbre y que estos sesgos pueden estar directamente relacionados con características geográficas y de terreno, así como con la metodología utilizada para la estimación satelital.

La precisión de las estaciones climatológicas disminuye a medida que se incrementa la distancia desde la fuente de medición, lo que plantea desafíos significativos para la interpretación de datos en áreas extensas. Krajewski y Smith (2002) profundizan en esta problemática al investigar la variabilidad espacial de la precipitación y destacan que las estaciones climatológicas tienen una precisión óptima cuando se encuentran en las proximidades inmediatas de la zona de interés, esto debido a la variabilidad espacial de los eventos meteorológicos.

5.4.1 Métodos de corrección del sesgo

El sesgo en las mediciones satelitales de precipitación se manifiesta a través de sesgos directos, vinculados a diferencias sistemáticas entre las mediciones satelitales y los datos de referencia terrestres, y sesgos orbitales, derivados de características orbitales que afectan la precisión de las mediciones. Además, los sesgos indirectos pueden surgir al comparar los datos satelitales con estimaciones de referencia, debido a diferencias en metodología y resolución. Abordar estos sesgos es crucial para mejorar la precisión y confiabilidad de las estimaciones de precipitación satelital, requiriendo métodos de

calibración y validación robustos e integración de múltiples fuentes de datos (Smith, Arkin, Bates, & Huffman, 2006).

Los métodos de corrección del sesgo desempeñan un papel fundamental en el campo de la climatología y la modelización climática al abordar los desafíos asociados con las discrepancias entre los datos simulados por modelos climáticos y las observaciones reales. Estos desajustes, conocidos como sesgos, pueden surgir debido a diversas razones, como las limitaciones en la resolución de los modelos, la calidad de los datos de entrada y la precisión de las parametrizaciones de procesos físicos. El propósito principal de los métodos de corrección del sesgo es mitigar o eliminar estos sesgos, lo que, a su vez, mejora la confiabilidad y utilidad de los datos climáticos generados por los modelos. Existen diversos métodos para la corrección del sesgo de datos satelitales, en esta investigación se seleccionaron los métodos de Escalamiento Lineal (LS), Escalamiento de Intensidad Local (LOCI) y Transformación con Potencias (PT) (Fang, Yang, Chen, & Zammit, 2015). A continuación, se describen estos tres métodos:

5.4.1.1 Escalamiento Lineal (LS)

El método de escalamiento lineal (LS) se enfoca en ajustar la media mensual de los valores corregidos de manera que concuerden con la media de los valores observados. Funciona al calcular correcciones mensuales basadas en las discrepancias entre los datos observados y los datos sin procesar (simulados por el modelo climático, en este caso, satelitales) mediante un factor multiplicativo para la precipitación. Este enfoque garantiza una corrección más precisa en un contexto mensual.

$$P_{cor,m,d} = P_{raw,m,d} \times \frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{raw,m})} \quad (14)$$

Donde:

$P_{cor,m,d}$: Precipitación corregida en el día d del mes m

$P_{raw,m,d}$: Precipitación satelital en el día d del mes m

$\mu(P_{obs,m})$: Valor medio de la precipitación observada en un mes m

$\mu(P_{raw,m})$: Valor medio de la precipitación satelital en un mes m

5.4.1.2 Escalamiento de Intensidad Local (LOCI)

El método LOCI tiene como objetivo corregir tanto las frecuencias como las intensidades de los días de lluvia y puede mejorar significativamente los datos sin procesar que presentan un exceso de días con lluvia ligera. Este método se desarrolla en dos pasos. Primero, se determina un umbral de días de lluvia para el mes ($P_{thres,m}$) a partir de la serie de precipitación satelital, de modo que se iguale con la frecuencia de días lluviosos observados. Luego, se calcula un factor de escala (S_m) que garantiza que la media de la precipitación corregida coincida con la media de la precipitación observada. Esto asegura que la corrección sea precisa tanto en términos de frecuencia como de cantidad de lluvia.

$$P_{cor,m,d} = \begin{cases} 0, & \text{if } P_{raw,m,d} < P_{thres,m} \\ P_{raw,m,d} \times S_m & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

Donde:

$P_{thres,m}$: Umbral de días de lluvia para el mes m

$$S_m = \frac{\mu(P_{obs,m,d} | P_{obs,m,d} > 0)}{\mu(P_{raw,m,d} | P_{raw,m,d} > P_{thres,m})} \quad (16)$$

5.4.1.3 Transformación con Potencias (PT)

A pesar de que los métodos LS y LOCI corrigen las discrepancias en la media de la precipitación, no abordan las desviaciones en la varianza. El método PT utiliza una función exponencial para ajustar la desviación estándar de la serie de precipitación, con el objetivo de corregir la variabilidad de la precipitación. Para aplicar este método, primero se estima un exponente (bm) que minimiza la discrepancia entre la desviación estándar de la precipitación corregida por LOCI y el exponente de potencia. Luego, se calcula un parámetro

(sm) que hace que la media de los valores corregidos coincida con la media observada. Esto asegura que tanto la variabilidad como la media de la precipitación sean precisas después de la corrección.

$$f(b_m) = \frac{\sigma(P_{obs,m})}{\mu(P_{obs,m})} - \frac{\sigma(P_{LOCI,m}^{b_m})}{\mu(P_{LOCI,m}^{b_m})}, \quad (17)$$

Donde:

b_m : Exponente para el mes m

σ : Desviación estándar de la precipitación

$P_{LOCI,m}$: Precipitación corregida por el método LOCI en el mes m

Luego, se calcula un parámetro (S_m) que hace que la media de los valores corregidos coincida con la media observada. Esto asegura que tanto la variabilidad como la media de la precipitación sean precisas después de la corrección.

$$S_m = \frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{LOCI,m}^{b_m})} \quad (18)$$

Las series de precipitación corregida se obtienen con la fórmula:

$$P_{cor,m,d} = S_m \times P_{LOCI,m,d}^{b_m} \quad (19)$$

5.4.2 Relleno de datos

En el contexto de la corrección de sesgo y relleno de datos para series satelitales, consideremos x como la variable independiente, que podría representar el tiempo o cualquier otra variable predictiva, y y como la variable dependiente, en este caso, la cantidad de precipitación estimada por el satélite. Cuando existe una relación lineal entre x y y , podemos aplicar un modelo de regresión lineal, donde los cambios en y

dependen directamente de los valores de x , ajustados por un término de error que captura la aleatoriedad o las desviaciones de la perfecta linealidad (Walpole, y otros, 2012).

El método de corrección de sesgo más adecuado se determina evaluando cuál mejora más la precisión de las estimaciones de precipitación. Por ejemplo, se podría emplear una corrección lineal simple (LS) si la relación es lineal, o métodos más complejos como la transformación de potencia (PT) si la relación es no lineal. Chaudhary y Dhanya (2019) evaluaron la eficacia de algoritmos de corrección de sesgo, incluyendo el LS, en estimaciones de precipitación basadas en satélites sobre la India, destacando la utilidad del LS para representar el sesgo promedio en la región. En otro estudio, Soo y otros (2020) investigaron tres métodos de corrección de sesgo, incluido el PT, en productos avanzados de precipitación satelital en la cuenca del río Langat, Malasia, encontrando que el PT mejoraba significativamente la representación estadística y la distribución de las lluvias extremas.

El método de corrección de sesgo más efectivo, en términos de mejorar la precisión de los datos rellenados, se selecciona según el desempeño de estos en conjunto aplicados a las series satelitales y este puede ir desde una relación lineal con el método LS hasta la aplicación de una potencia con el método PT para el relleno de datos faltantes.

5.5 Software

Rstudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) de código abierto para el lenguaje de programación R, diseñado para facilitar el trabajo con R al combinar varios componentes en una única y productiva estación de trabajo, es compatible con plataformas principales como Windows, Mac OS X y Linux (Allaire, 2011). Rstudio acoge múltiples librerías y paquetes enfocadas al análisis estadístico de series de tiempo incluyendo librerías dedicadas al análisis hidroclimatológico de la data. Los paquetes y software utilizado se describen a continuación.

5.5.1 Paquete Stats

Stats es un paquete fundamental en R que ofrece una amplia gama de funciones estadísticas esenciales (Anexo 5.1). Mantenido por el equipo central de R y contribuidores globales, proporciona herramientas para análisis de datos, modelado estadístico y pruebas de hipótesis. Al ser parte de la distribución base de R, no necesita instalación adicional y se carga automáticamente. Es esencial para análisis de datos en R (R Core Team and contributors worldwide, 2023).

5.5.2 Paquete HydroTSM

El paquete hydroTSM en R es una herramienta esencial diseñada para el manejo, análisis y la interpolación de series de tiempo relacionadas con datos hidrológicos (Anexo 5.2). Este paquete es especialmente valioso para hidrólogos y científicos ambientales que trabajan con datos de precipitación y necesitan realizar análisis, visualización y manipulación de datos para comprender los patrones climáticos y las tendencias hidrológicas. Su enfoque principal es proporcionar una serie de funciones específicas para las tareas cotidianas en hidrología, lo que lo hace altamente funcional en la gestión de datos y el análisis de series temporales (Zambrano, 2020).

El paquete hydroTSM simplifica una amplia gama de tareas hidrológicas al ofrecer las siguientes funcionalidades clave:

- **Gestión de Datos:** Facilita la carga y manipulación de datos de series de tiempo, agilizando la preparación de datos hidrológicos para el análisis.
- **Análisis Exploratorio de Datos (EDA):** Ofrece un conjunto de funciones para realizar análisis estadísticos descriptivos y representar datos hidrológicos de manera gráfica, incluyendo resúmenes estadísticos, gráficos de cajas y bigotes, histogramas y series temporales.

- **Análisis Anual y Mensual:** Permite calcular estadísticas anuales y mensuales, incluyendo la suma anual de precipitación y promedios, lo que es esencial para identificar patrones a lo largo del año.

5.5.3 Paquete ggplot2

Es una potente biblioteca de visualización de datos en R (Anexo 5.3) con la capacidad para gestionar variables y mapearlas a propiedades estéticas, lo que permite representar datos de manera más significativa y dinámica. Esto, junto con la posibilidad de crear facetas para desglosar los datos en múltiples gráficos, hace que ggplot2 sea una herramienta valiosa para la exploración y comunicación de datos (Wickham, 2016).

5.5.4 Paquete Plotly

Puede utilizarse para crear una amplia variedad de gráficos en R (Anexo 5.4), desde simples gráficos de dispersión y líneas hasta gráficos más complejos como mapas de calor, gráficos de contorno y diagramas de barras apiladas. Una de las características más destacadas de Plotly es su capacidad para tomar gráficos creados en 'ggplot2', una popular biblioteca de gráficos en R, y convertirlos en gráficos interactivos (Sievert, y otros, 2022).

5.5.5 Paquete Trend

Se enfoca en la identificación de tendencias y puntos de cambio en series temporales en R (Anexo 5.5). Ofrece una amplia gama de pruebas estadísticas no paramétricas, desde el Cox-Stuart Trend Test hasta el Mann-Kendall Trend Test, el Hirsch-Slack Test, y más, permitiendo así identificar tendencias relevantes (Pohlert, 2023).

5.5.6 Paquete Grid

El paquete grid representa una mejora significativa en las capacidades gráficas de R, priorizando la flexibilidad y la interacción (Anexo 5.6). Su objetivo principal es brindar una base más sólida y coherente para la creación y modificación de gráficos en R. En comparación con el sistema de gráficos base de R, grid proporciona un enfoque más potente y consistente para organizar y representar datos gráficos. Esto se traduce en un mayor

grado de personalización y control en la creación de visualizaciones, lo que resulta en gráficos de alta calidad (Murrell, 2020).

5.5.7 Software CMhyd

Su principal función es la corrección de sesgos en los datos climáticos simulados, permitiendo su aplicación efectiva en modelos hidrológicos. Esta herramienta desempeña un papel crítico en la simulación de las condiciones climáticas futuras en procesos hidrológicos, al abordar los desafíos comunes relacionados con las discrepancias significativas entre las simulaciones y los datos observados debido a errores sistémicos de los modelos o a la discretización y el promedio espacial en celdas de grilla.

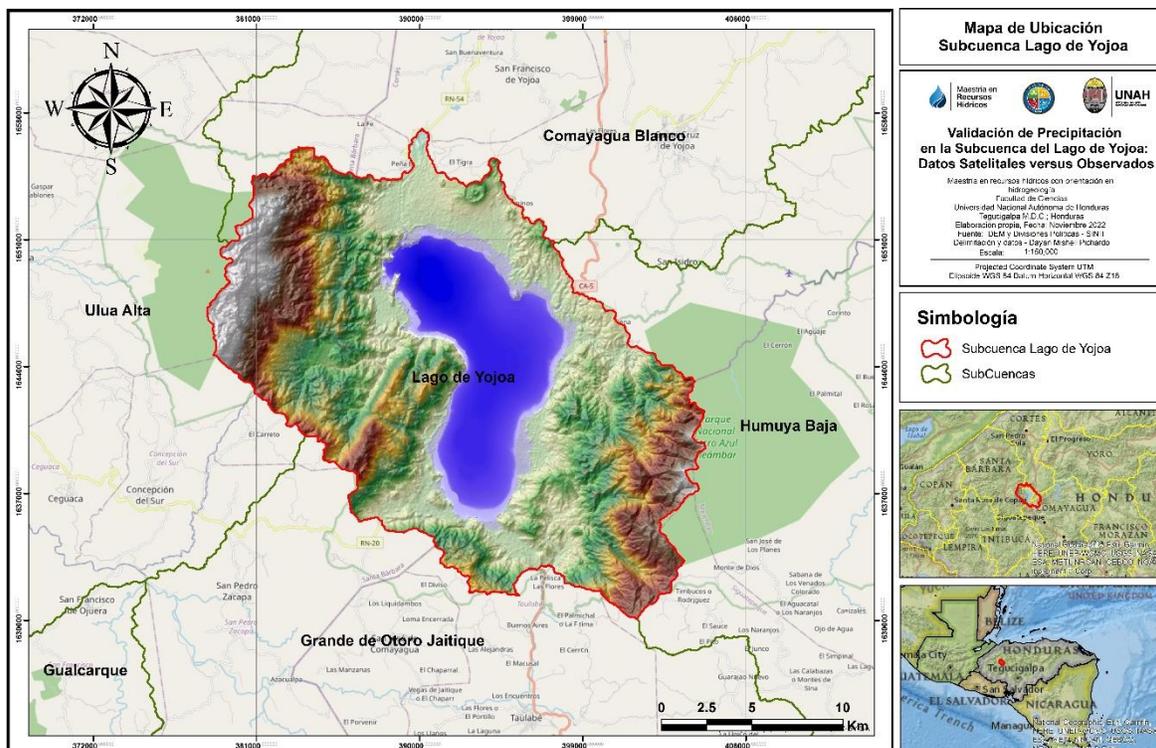
CMhyd destaca por su capacidad para extraer datos de modelos climáticos globales y regionales, y posteriormente corregir estos datos, lo que garantiza que sean aptos para su aplicación efectiva en la modelización hidrológica. Se adapta de manera precisa a las ubicaciones de las estaciones de monitoreo en un modelo de cuenca, estableciéndose como una solución completa para la obtención de datos climáticos confiables y corregidos en el contexto de estudios de impacto hidrológico basados en cuencas (Rathjens, Bieger, Srinivasan, Chaubey, & Arnold, 2016).

6. CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN DEL MEDIO

6.1 Situación geográfica

El Lago de Yojoa está ubicado en la región Centro-Occidental de Honduras dentro de la subcuenca que lleva este mismo nombre (Mapa 1) y entre los departamentos de Comayagua, Santa Bárbara y Cortés; entre los 14°45'00" y 14°57'00" Latitud Norte y entre los 87°53'00" y 88°07'00" Longitud Oeste; para fines de manejo se ha subdividido en 12 microcuencas que incluyen las zonas de drenaje de la parte alta de los ríos Yure y Varsovia debido a que incorporan agua al Lago a través de canales artificiales construidos por la ENEE con la finalidad de mantener el nivel del Lago y garantizar la generación de energía eléctrica. La subcuenca del Lago de Yojoa abarca una extensión estimada de 441.38 km², de los cuales aproximadamente 83.48 km² corresponden al espejo de agua del lago. Las restantes 357.91 km² se distribuyen parcialmente en el territorio de nueve municipios: Las Vegas, Santa Cruz de Yojoa, Taulabé, San Pedro Zacapa, Santa Bárbara, Siguatepeque, Concepción del Sur, San José de Comayagua y Meámbar (CATIE, 2003).

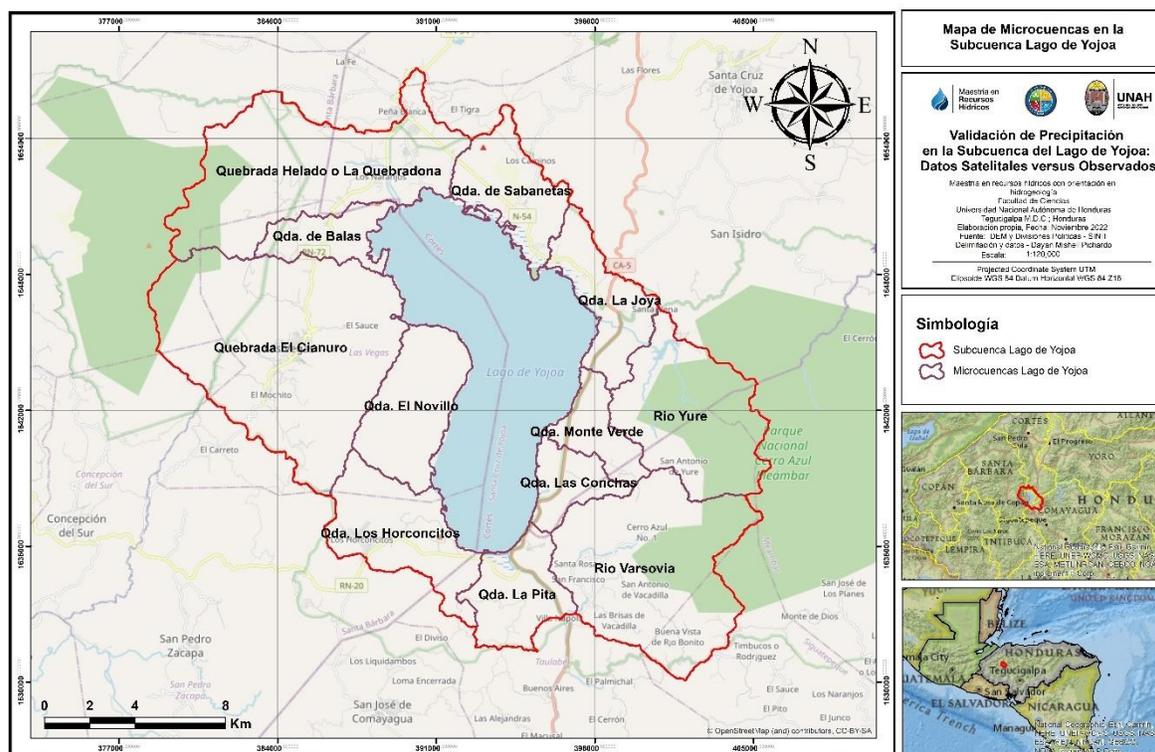
MAPA 1 - UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia

La elección del Lago de Yojoa como foco de este estudio se basa en su importancia ecológica y socioeconómica, así como en la necesidad de una gestión sostenible de sus recursos. La subdivisión del área en 12 microcuencas, como lo ha delineado el CATIE, subraya la complejidad de su sistema hídrico y la necesidad de una comprensión detallada de cada zona para una gestión efectiva y la conservación de su biodiversidad única. Estas 12 microcuencas oficiales que fueron delimitadas por el CATIE para el Programa Multifase MARENA de la SAG son: 1) El Novillo, 2) Horconcitos, 3) Cianuro, 4) Las Balas, 5) La Joya, 6) Varsovia, 7) Yure, 8) Las Conchas, 9) Sabanetas, 10) Monteverde, 11) La Pita y 12) Quebradona (Mapa 2).

MAPA 2 - MICROCUENCAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

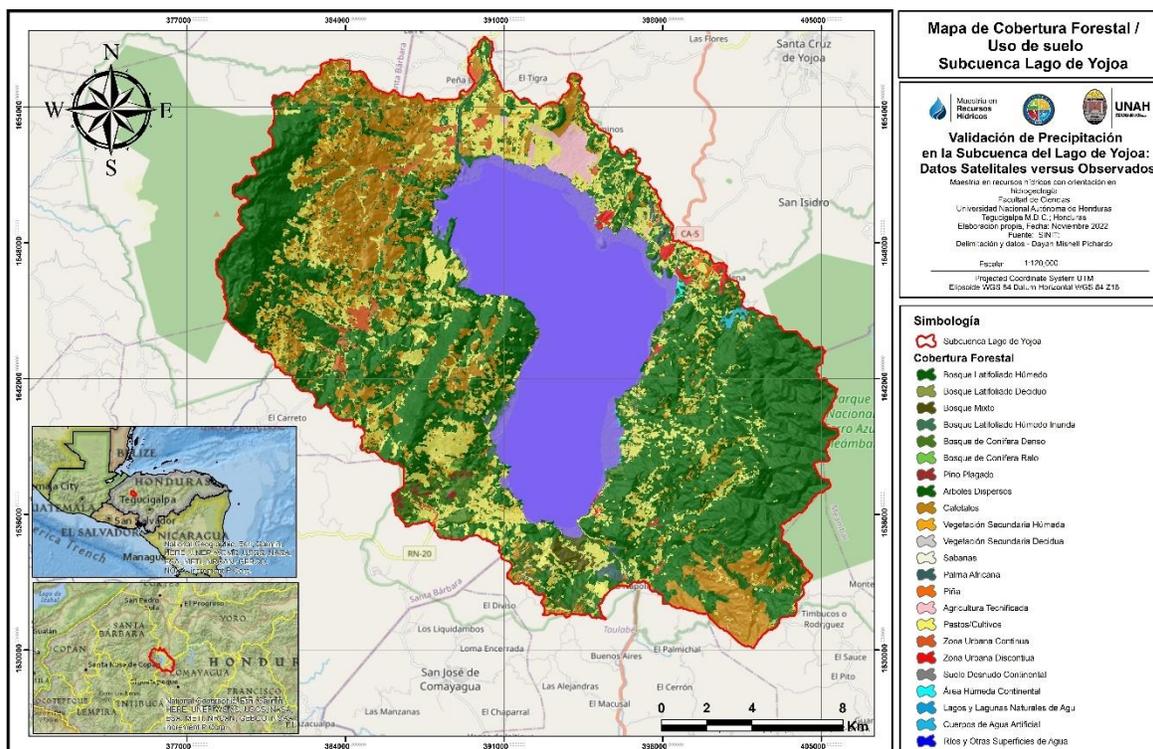


Fuente: Elaboración propia

Históricamente, el lago ha sido un eje central para las comunidades circundantes, proporcionando medios de vida y recursos esenciales. Sin embargo, el aumento de actividades humanas ha ejercido presión sobre sus recursos naturales, lo que resalta la urgencia de contar con una base de datos completa y actualizada que permita un monitoreo

efectivo y la implementación de estrategias de conservación y desarrollo sostenible. En el Mapa 3 se puede observar el uso de suelo según la última actualización (2018) realizada por el ICF.

MAPA 3 - MAPA DE COBERTURA FORESTAL / USO DE SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6 se puede observar el porcentaje de distribución de cada una de las áreas mapeadas. Los diferentes tipos de bosque y vegetación cubren el 51.92% del área, lo que indica que más de la mitad del territorio mantiene una cobertura natural lo que sugiere que la región posee una significativa biodiversidad y recursos naturales que son cruciales para la conservación ambiental y la provisión de servicios ecosistémicos. El 26.38% del área dedicada a cultivos, incluyendo cafetales y agricultura tecnificada, refleja la relevancia de la actividad agrícola en la región subrayando la importancia económica de la agricultura, pero también plantea interrogantes sobre la sostenibilidad de las prácticas agrícolas y su impacto en los ecosistemas locales. El 20.23% del área representada por el lago, ríos y cuerpos de

agua afines destaca la abundancia de recursos hídricos en la región. Estos cuerpos de agua son vitales para el suministro de agua para diversos usos, la biodiversidad acuática y para actividades como la pesca y el turismo mientras que la zona urbana mapeada y suelo desnudo representan el 1.47%.

TABLA 6 - DISTRIBUCIÓN DE COBERTURA FORESTAL / USOS DE SUELO

Nombre	Km²	%
Bosque Latifoliado Húmedo	197.28	44.70
Bosque Latifoliado Deciduo	1.40	0.32
Bosque Mixto	3.61	0.82
Bosque Latifoliado Húmedo Inundado	0.17	0.04
Bosque de Conífera Denso	4.92	1.11
Bosque de Conífera Ralo	0.19	0.04
Pino Plagado	0.63	0.14
Arboles Dispersos	2.49	0.56
Cafetales	47.90	10.85
Vegetación Secundaria Húmeda	17.39	3.94
Vegetación Secundaria Decidua	0.18	0.04
Sabanas	0.91	0.21
Palma Africana	1.60	0.36
Piña	1.21	0.28
Agricultura Tecnificada	3.87	0.88
Pastos/Cultivos	61.84	14.01
Zona Urbana Continua	4.25	0.96
Zona Urbana Discontinúa	1.71	0.39
Suelo Desnudo Continental	0.53	0.12
Área Húmeda Continental	3.93	0.89
Lagos y Lagunas Naturales de Agua	84.84	19.22
Cuerpos de Agua Artificial	0.39	0.09
Ríos y Otras Superficies de Agua	0.12	0.03
Total	441.38	100.00

Fuente: Elaboración propia

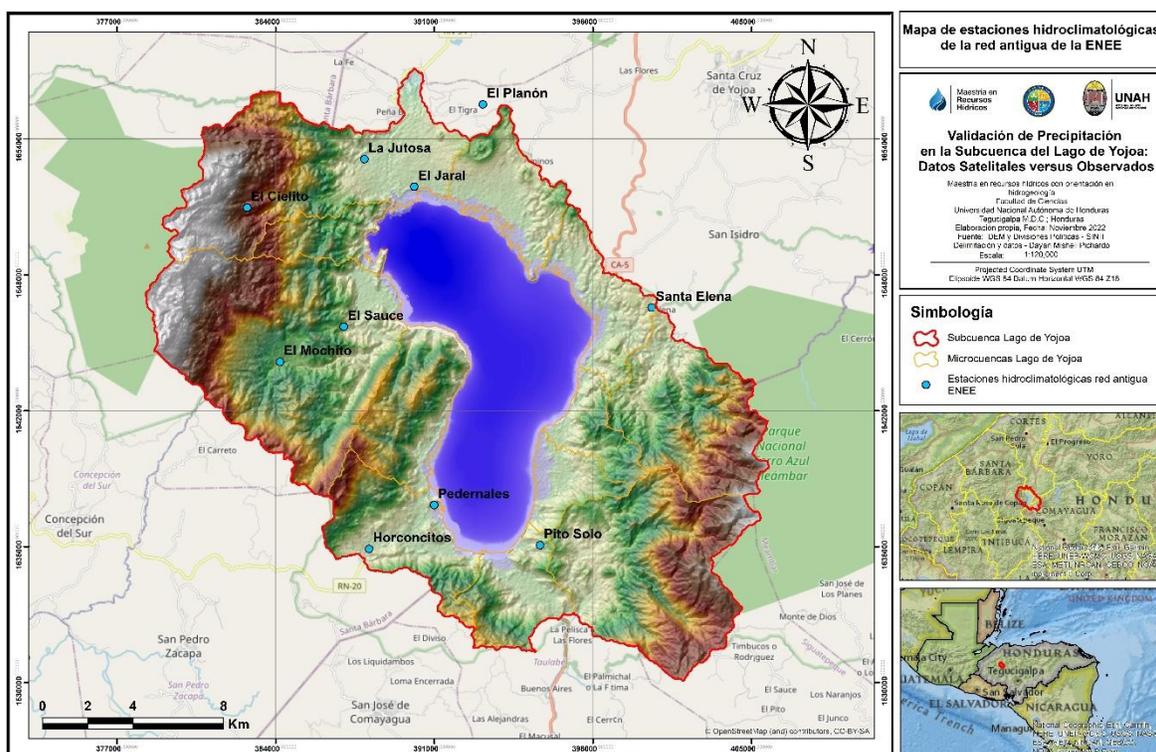
La red hidroclimatológica antigua de la ENEE para la subcuenca del Lago de Yojoa se encuentra conformada por 10 estaciones que registraban múltiples parámetros como ser: nivel en ríos (en algunas de ellas), precipitación, temperatura y evaporación entre otros. En

el caso de la precipitación, ésta se registraba mediante pluviómetros graduados en milímetros (mm) que una persona revisaba tres veces al día (7:00 a.m., 12:00 m y 5:00 p.m.) anotando en cada ocasión el valor medido en el mismo, posteriormente y para la conformación de la base de datos tradicional se sumaban las tres medidas para establecer la precipitación diaria y consecuentemente la mensual y anual. El periodo en el que este procedimiento se llevó a cabo varía de estación en estación y el desglose se puede observar en la Tabla 7.

6.2 Ubicación de sitios y periodo de análisis de cada estación

La ubicación y distribución geográfica de las estaciones utilizadas en este estudio se observa en los mapas a continuación.

MAPA 4 - ESTACIONES ANTIGUAS CON REGISTRO DE PRECIPITACIÓN DENTRO O CERCANAS A LA SUBCUENCA



Fuente: Elaboración propia

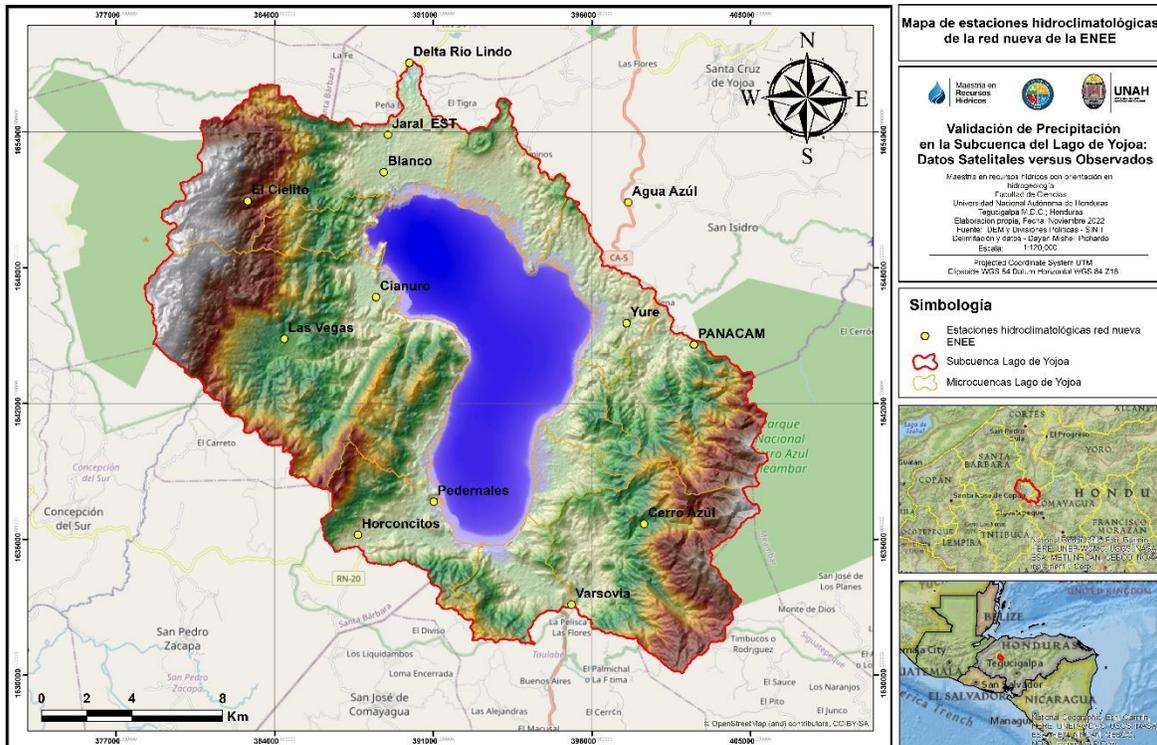
TABLA 7 – REGISTRO DE PRECIPITACIÓN EN ESTACIONES HIDROCLIMATOLÓGICAS RED ANTIGUA LAGO DE YOJOA ENEE

Estación	Precipitación	
	Fecha Inicial	Fecha Final
El Jaral	01/1960	05/2015
El Mochito	06/1984	05/2015
Pito Solo	01/1960	05/2015
Santa Elena	07/1971	12/2014
La Jutosa	06/1984	05/2015
El Planón	10/2005	05/2012
Horconcitos	09/2005	01/2015
El Cielito	09/2005	05/2015
Pedernales	09/2005	05/2015
El Sauce	09/2005	01/2009

Fuente: Elaboración propia

La red de estaciones antigua (Mapa 4) de la ENEE dejó de funcionar en mayo de 2015 y sus fechas de inicio son variables (Tabla 7), mientras que la red nueva (Mapa 5) comenzó a funcionar hasta enero y febrero de 2020 (Tabla 8). Por lo que el periodo de junio de 2015 hasta diciembre de 2019 no tiene datos en tierra.

MAPA 5 – ESTACIONES DE LA RED NUEVA CON REGISTRO DE PRECIPITACIÓN DENTRO O CERCANAS A LA SUBCUENCA



Fuente: Elaboración propia

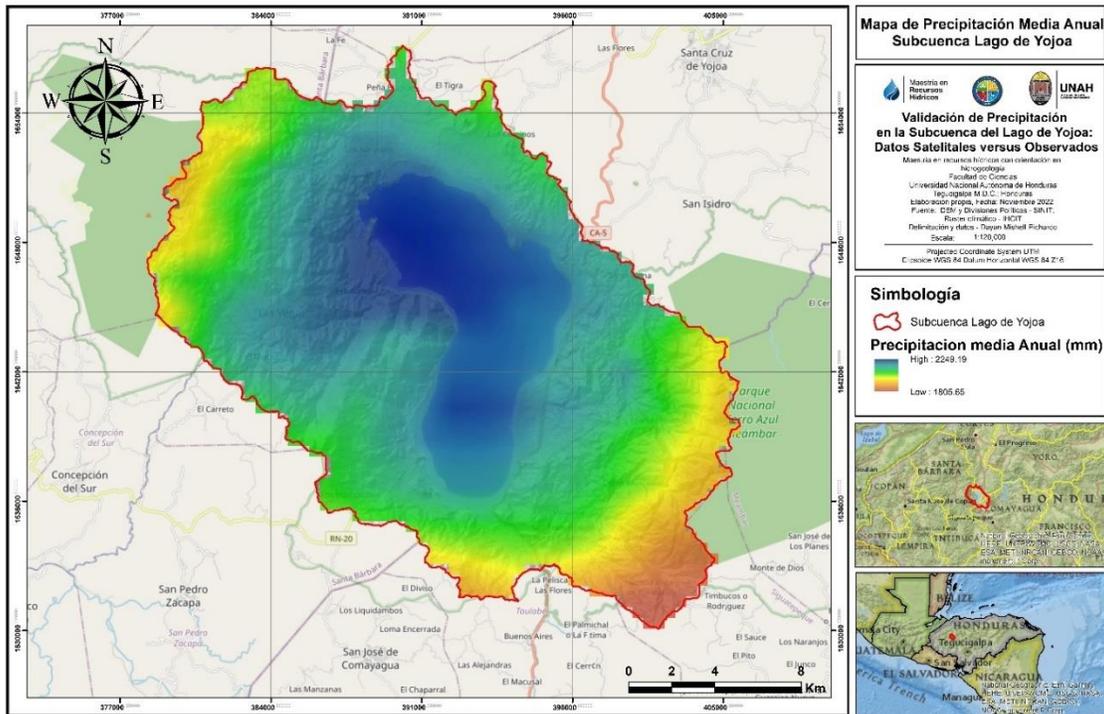
TABLA 8 - REGISTRO DE PRECIPITACIÓN EN ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS RED NUEVA LAGO DE YOJOA ENEE

Estación Nueva	Estación Antigua	Fecha Inicial Estaciones nuevas
PANACAM	Santa Elena	2020-01
El Jaral	El Jaral	2020-02
Las Vegas	El Mochito	2020-02
El Cielito	El Cielito	2020-02
Horconcitos	Horconcitos	2020-01
Pedernales	Pedernales	2020-02
Cerro Azul	-	2020-01
Agua Azul	-	2020-01
Varsovia	-	2020-01
Blanco	Rio Blanco	2020-01
Yure	Yure	2020-01
Cianuro	Cianuro	2020-01
Delta Rio Lindo	-	2020-01

Fuente: Elaboración propia

En el Mapa 6 se puede observar la precipitación media anual de la subcuenca que varía entre 1906.65 mm a 2249.19 mm. Cabe mencionar que este ráster, así como el de temperatura media anual (Mapa 7), fueron generados por el IHCIT de la UNAH entre 2012 y 2014 y están basados en interpolación de la data de estaciones en tierra de diferentes instituciones, y a falta de información actualizada, a la fecha sigue siendo referencia para los estudios de climatología de Honduras.

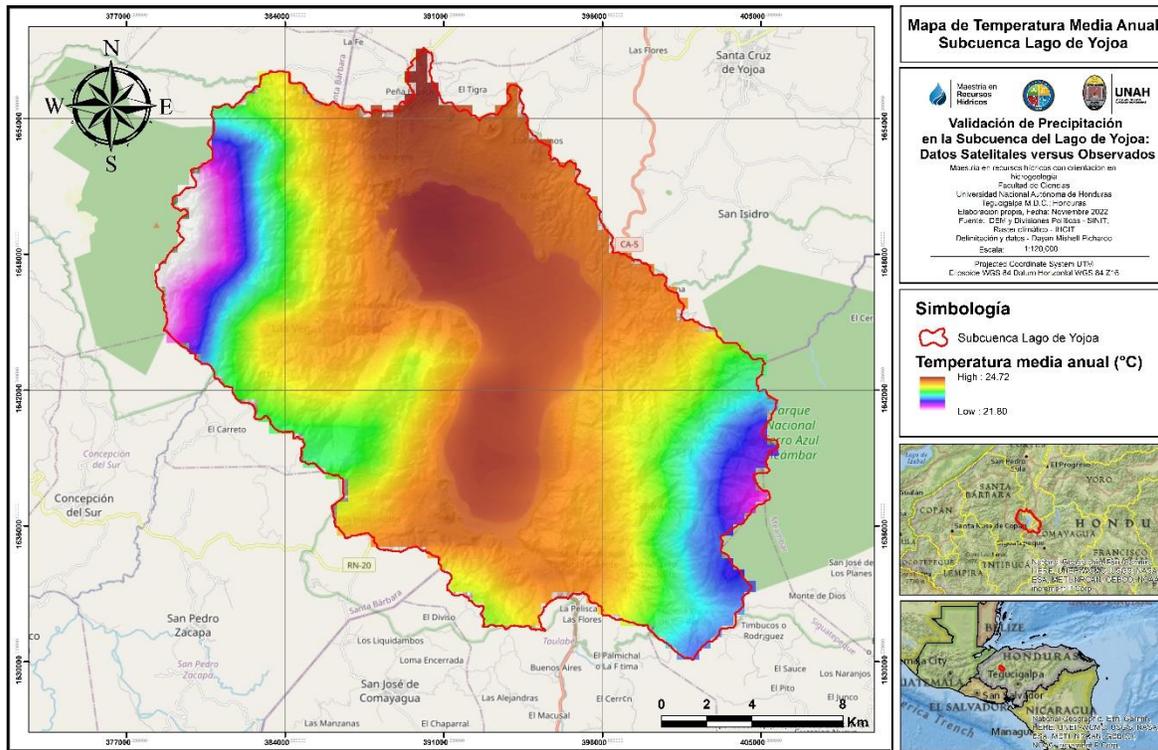
MAPA 6 - PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA SUBCUENCA



Fuente: Elaboración propia con base en mapeo del IHCIT (2012-2014)

La temperatura media anual de la zona (Mapa 7) varía cerca de los 22 a 25 grados centígrados, siendo más frío en las zonas montañosas y más cálido cerca del espejo del lago.

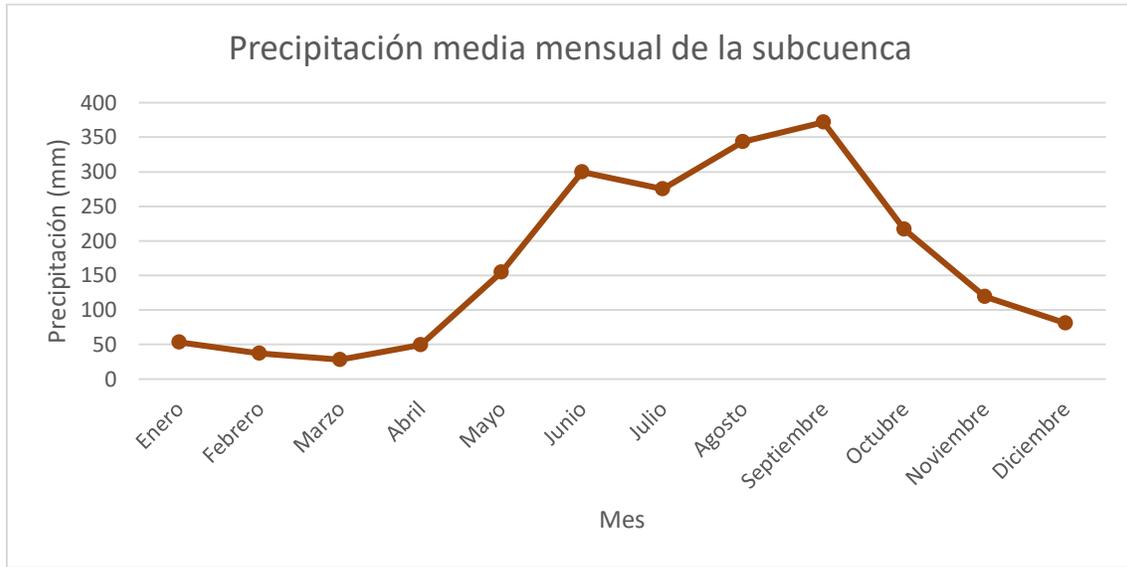
MAPA 7 - TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA SUBCUENCA



Fuente: Elaboración propia con base en mapeo del IHCIT (2012-2014)

La precipitación media mensual se encuentra desde aproximadamente 28 mm en el mes de marzo, hasta 372 mm en el mes de septiembre, lo anterior según datos del IHCIT. Los demás valores promedio mensuales se pueden observar en el Gráfico 1. Cabe mencionar que esta información tomada de los rasters generados por el IHCIT, se encuentra actualizada hasta el 2014 por lo que existen cerca de 10 años sin información más actualizada por lo que los datos promedio en la realidad pueden variar.

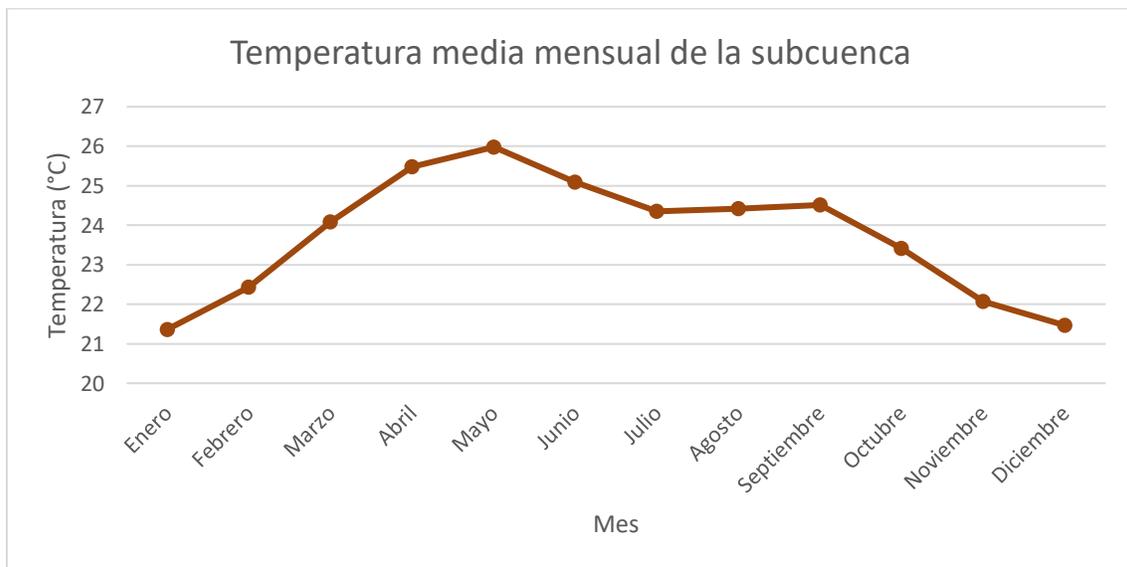
GRÁFICO 1 - PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA SUBCUENCA LAGO DE YOJOA



Fuente: Elaboración propia con base en mapeo del IHCIT (2012-2014)

La temperatura media mensual va desde los 21.4°C encontrándose en enero el punto mínimo y hasta 26°C en el mes de mayo como el valor más alto, lo anterior según datos del IHCIT. Los demás valores promedio mensuales se pueden observar en el Gráfico 2.

GRÁFICO 2 - TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE LA SUBCUENCA LAGO DE YOJOA



Fuente: Elaboración propia con base en mapeo del IHCIT (2012-2014)

7. CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA

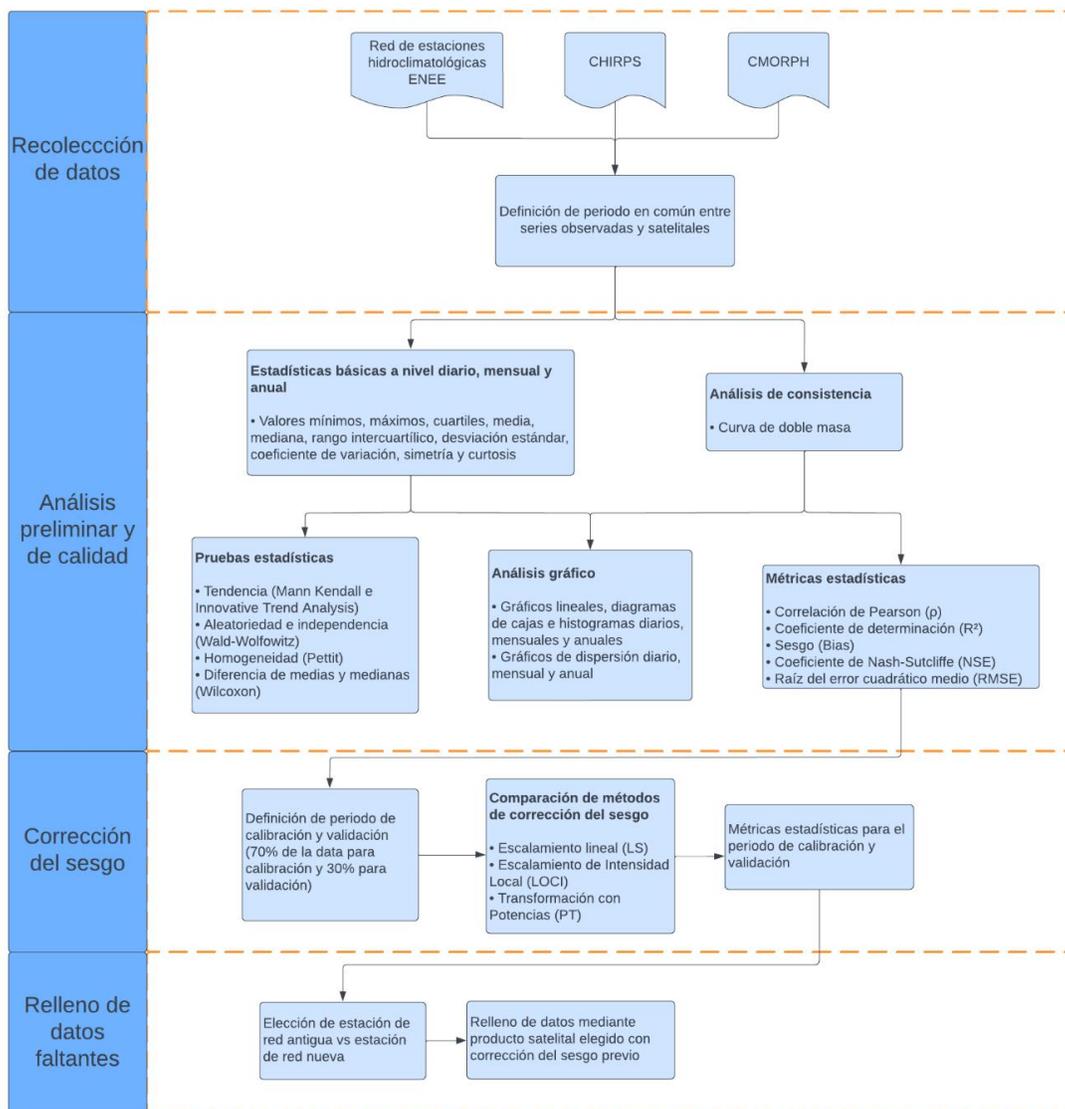
7.1 Tipo de investigación

Siguiendo un paradigma positivista o cuantitativo este estudio se fundamenta en el método hipotético deductivo donde se analiza estadísticamente la información recolectada basado en un enfoque longitudinal al recopilar datos en múltiples momentos a lo largo de un periodo.

7.2 Diseño de la investigación

La investigación se puede resumir mediante el esquema metodológico de la Ilustración 1.

ILUSTRACIÓN 1 - ESQUEMA METODOLÓGICO



Fuente: Elaboración propia

7.3 Recolección de datos

Se recolectaron los datos de precipitación de las 10 estaciones de la red antigua y de la red nueva ubicadas en la subcuenca del Lago de Yojoa. En la Tabla 7 se observa que existe una gran variabilidad en la fecha de inicio de las estaciones de red antigua, variando entre 1960 a 2005 los años de datos diarios disponibles. También se puede observar que desde el 2015 hasta el 2020 no hay datos, año en el cual la red nueva (Tabla 8) comienza a operar hasta la actualidad.

7.3.1 Datos observados

Las actividades realizadas consistieron en:

7.3.1.1 Evaluación de fuentes de datos hidroclimatológicos existentes y otra información relevante

Se identificaron y evaluaron las fuentes de datos dentro de la UH que contenían información de precipitación disponible, como ser pluviogramas, lecturas de pluviómetros enviadas en físico, la base de datos antigua en formato de Excel y la nueva base de datos en la plataforma Aquarius Time Series.

7.3.1.2 Revisión de formatos, plantillas, programas y otras herramientas.

Se realizó una revisión de los diferentes formatos utilizados en el almacenaje de las bases de datos incluidos los formatos de salida para posteriormente estandarizar el registro de la data empleada mediante formatos iguales para todos los años y estaciones.

7.3.1.3 Identificación de data faltante

Se identificó que el periodo 2015 a 2020 es el periodo faltante en toda la base de datos debido a que la red hidroclimatológica fue desmantelada a partir del año 2015 y recientemente en el año 2020 mediante un proyecto de construcción y equipamiento de estaciones telemétricas se lograron reinstaurar algunos de los sitios antiguos o cercanos a ellos. Adicionalmente dentro de la data existente existen vacíos a nivel diario, mensual y en algunos casos anual, lo que es analizado según cada caso.

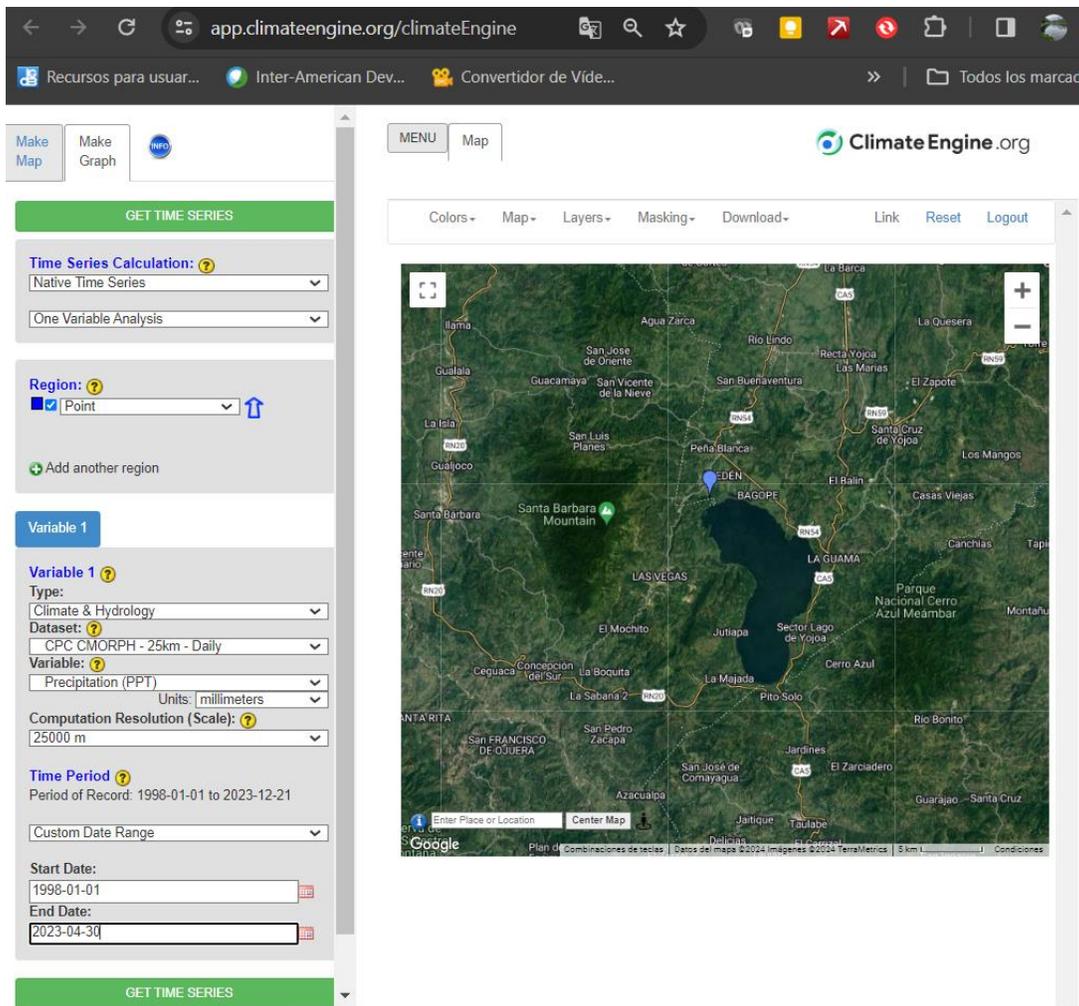
7.3.1.4 Análisis de los datos observados

Los análisis realizados a las series de datos observados se resumen en la sección 8.4.

7.3.2 Datos satelitales

Para la precipitación se compararon los datos satelitales de CHIRPS a una escala temporal diaria, y espacial de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ y los datos satelitales de CMORPH, a una escala temporal diaria, y espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. La data de ambos productos se encuentra disponible en diversos formatos (geoTIFF en formato, jpeg, pdf, csv, xls y otros), y se puede descargar mediante el repositorio alojado en climateengine.org (Ilustración 2). El formato utilizado en esta investigación fue csv.

ILUSTRACIÓN 2 - INTERFAZ DE DESCARGA DE DATOS SATELITALES DE CLIMATEENGINE.ORG



Fuente: (DRI, UCMERGED, GEE, Bureau of Land Management, NOAA-NIDIS, 2023)

7.3.2.1 CMORPH

EL CMORPH toma las estimaciones de precipitación que se generan a partir de la luminosidad de la temperatura, la cual es medida por los sensores SSM-I/SSMIS y el GPROF para los sensores TMI (Méndez, 2016). Para la estimación el sensor TMI se toma como prioritario, de no contar con esta información se utiliza la generada por AMSR-E, luego la del SSMI y por último la del AMSU-B. Cada pixel de la grilla generada contiene la metadata donde se identifica la información satelital de procedencia.

7.3.2.2 CHIRPS

El procedimiento que CHIRPS V2.0 realiza es una interpolación inteligente entre la climatología de precipitación mensual, observaciones satelitales de sensores infrarrojos geoestacionarios, TRMM 3B42, datos de precipitación del modelo atmosférico del sistema de pronósticos climáticos de la NOAA y por último datos observados de diversas fuentes (Méndez, 2016). En esta investigación se usó el conjunto de datos globales con una resolución de 0.05°.

7.3.3 Periodo de análisis

Se restringió el periodo de análisis a la intersección entre la data observada y la data satelital para cada estación, por lo que cada estación contiene dos periodos de análisis uno para CHIRPS (a partir de 1981) y otro para CMORPH (a partir de 1998), los cuales se pueden apreciar en la Tabla 9.

TABLA 9 - PERIODO DE ANÁLISIS PARA CHIRPS Y CMORPH

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

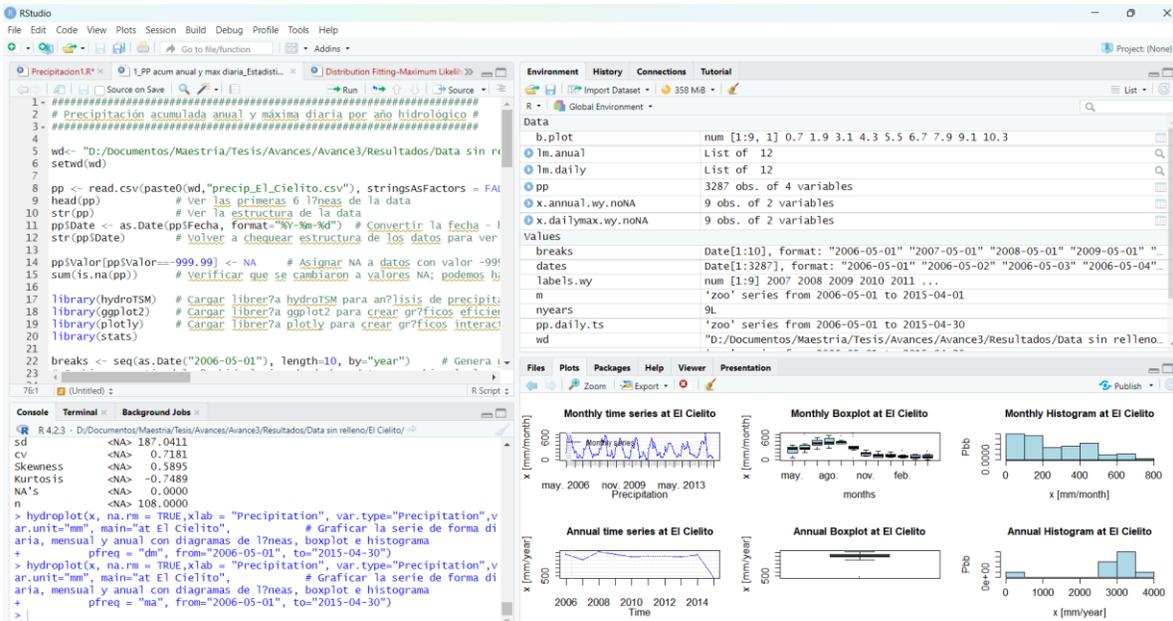
No.	Estación	Fecha	CHIRPS	CMORPH
6	El Planón	Inicio	1/5/2006	1/5/2006
		Final	30/4/2012	30/4/2012
7	El Sauce	Inicio	1/5/2006	1/5/2006
		Final	30/4/2008	30/4/2008
8	La Jutosa	Inicio	1/5/1985	1/5/1998
		Final	30/4/2015	30/4/2015
9	Pito Solo	Inicio	1/5/1981	1/5/1998
		Final	30/4/2015	30/4/2015
10	Santa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

Fuente: Elaboración propia

7.4 Análisis preliminar y de calidad de la data

Para realizar los cálculos y análisis se utilizaron códigos de programación en el lenguaje R y el programa RStudio versión 2023.03.0+386 (Ilustración 3), el cual ofrece amplias funcionalidades y configuraciones para el análisis de información hidroclimatológica distribuida en diferentes paquetes ya desarrollados, de los cuales se utilizaron hydroTSM, ggplot2, plotly, stats, trend y grid. Adicionalmente varios de los cálculos y gráficas se realizaron en Excel.

ILUSTRACIÓN 3 - INTERFAZ EN RSTUDIO



Fuente: Elaboración propia

El formato de archivos de entrada en el script de R consta de 2 columnas, la primera corresponde a la fecha en el formato yyyy-mm-dd mientras que la segunda corresponde al valor de la precipitación en milímetros como se observa en la Ilustración 4. Algunos de los scripts empleados son adaptaciones de los proporcionados en talleres de hidrología por el MSc. Julio Montenegro, mientras que otros han sido elaborados de forma propia, todos ellos para automatizar el proceso de creación de estadísticas básicas, generación de gráficos y otros.

ILUSTRACIÓN 4 - FORMATO DE ENTRADA DE DATOS PARA EL SCRIPT EN RSTUDIO

Archivo	Editar	Ver
Fecha,Valor		
2006-05-01,0		
2006-05-02,0		
2006-05-03,0		
2006-05-04,0		
2006-05-05,0		
2006-05-06,0		
2006-05-07,0		
2006-05-08,0		
2006-05-09,0		
2006-05-10,0.7		
2006-05-11,0.6		
2006-05-12,1.1		
2006-05-13,0.4		
2006-05-14,0.7		
2006-05-15,17.8		
2006-05-16,20.5		
2006-05-17,18.7		
2006-05-18,0.5		
2006-05-19,0		
2006-05-20,0.6		
2006-05-21,32.2		
2006-05-22,0		
2006-05-23,0.3		
2006-05-24,31.6		
2006-05-25,58.3		

Fuente: Elaboración propia

A través de los scripts se realizó la limpieza inicial de datos, como la conversión de formatos de fecha y la asignación de valores NA a datos faltantes. Se utilizaron varias bibliotecas, incluidas hydroTSM para el análisis de series temporales hidrológicas y ggplot2 para la visualización de datos. Las funciones principales incluyeron el cálculo de precipitaciones acumuladas y máximas diarias por año hidrológico, estadísticas básicas y la generación de una serie de visualizaciones detalladas como histogramas y boxplots para analizar las distribuciones de precipitación anual, mensual y diaria, permitiendo una interpretación clara y detallada de los patrones y variaciones de precipitación en el área estudiada.

Por medio del script también se aplicó la "Detección de Tendencias en Series de Tiempo utilizando métodos de Mann-Kendall e Innovative Trend Analysis (ITA)". Entre las librerías utilizadas se encuentran Kendall para realizar el test de Mann-Kendall, trend para análisis de tendencias y se evaluó la independencia de las series mediante el test de Wald-Wolfowitz. Adicionalmente, se generaron gráficos personalizados para visualizar dichas tendencias y los resultados de los tests, permitiendo una interpretación visual efectiva de los datos analizados. Estos análisis son críticos para entender los cambios en las precipitaciones a lo largo del tiempo y su posible impacto en la región estudiada.

Debido a los datos faltantes en las series diarias, y la suma posterior para obtener datos mensuales y anuales, se observó una gran variabilidad en las estadísticas en algunos casos, especialmente en la data anual. Por lo anterior, para el análisis mensual, se excluyeron meses con más del 10% de datos faltantes y para el análisis anual solo se tomaron aquellos años hidrológicos con registro mensual completo.

7.4.1 Estadísticas básicas

Para cada estación, inicialmente se realizó un análisis estadístico básico que incluyó la determinación de valores mínimos, máximos, media, mediana, cuartiles, rango intercuartílico, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría y curtosis para la data diaria en cada uno de los sitios, tanto para la data observada como para la satelital proveniente de CHIRPS y CMORPH.

7.4.2 Coherencia básica

Se analizó la coherencia básica de los datos como ser por ejemplo precipitaciones negativas. Se analizaron las 10 series de precipitación correspondientes a las estaciones seleccionadas en búsqueda de valores diarios negativos. Se hizo lo mismo para la data satelital.

7.4.3 Outliers (valores atípicos)

Para identificar valores atípicos se utilizó el método del Rango Inter cuartílico (IQR), para establecer un umbral máximo en el que se esperaría que estén las precipitaciones y poder evaluar los outliers que salgan de ese rango.

7.4.4 Análisis gráfico de las series

Se graficaron las series diarias, mensuales y anuales representadas por gráficos lineales, diagramas de caja de bigotes e histogramas para la data observada de cada una de las estaciones para analizar visualmente el comportamiento de las series. Adicionalmente, se elaboraron gráficos de dispersión de las series para verificar de una forma visual el ajuste entre las series observadas versus las satelitales.

7.4.5 Tendencia

Se utilizó la prueba de Mann-Kendall para evaluar si existe tendencia en la serie de tiempo. También, se usó el Análisis Innovador de Tendencias (ITA) para visualizar el comportamiento de las series mensuales observadas y satelitales, de manera que se apreciase si la tendencia es al aumento o decrecimiento de la precipitación, y verificar si presentan la misma tendencia entre ellas.

7.4.6 Métricas estadísticas

Se calcularon las métricas estadísticas del coeficiente de correlación de Pearson (ρ), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2) el sesgo (bias) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE).

7.4.7 Análisis de consistencia

Se aplicó la técnica de la curva de doble masa para comparar los registros de precipitación acumulada de una estación específica con el promedio acumulado de las estaciones de la subcuenca que poseen registros anuales para el mismo periodo de tiempo. Si la relación es estable, se concluye que la estación no presenta problemas de consistencia; de lo contrario, se identifican y excluyen datos anómalos antes de verificar nuevamente la consistencia de los datos restantes mediante el análisis de la curva de doble masa.

7.5 Corrección del sesgo

Las observaciones de la red antigua se dividieron en dos grupos, calibración y validación, como se muestra en la Tabla 10. Los datos del periodo de calibración (70% de los datos) se usaron para determinar los parámetros de los métodos de reducción de sesgo. Por otra parte, los datos del periodo de validación se utilizaron para evaluar el desempeño de los métodos de corrección de sesgo con datos no usados en su calibración, y así simular su desempeño cuando no haya observaciones en tierra.

TABLA 10 - PERIODO DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN PARA LA CORRECCIÓN DEL SESGO

No.	Estación	Fecha	Calibración	Validación
1	El Cielito	Inicio	1/5/2006	1/5/2012
		Final	30/4/2012	30/4/2015
2	El Jaral	Inicio	1/5/1981	1/5/2005
		Final	30/4/2005	30/4/2015
3	Horconcitos	Inicio	1/5/2006	1/5/2012
		Final	30/4/2012	30/4/2014
4	El Mochito	Inicio	1/5/1985	1/5/2006
		Final	30/4/2006	30/4/2015
5	Pedernales	Inicio	1/5/2006	1/5/2012
		Final	30/4/2012	30/4/2015
6	El Sauce	Inicio	1/5/2006	1/5/2007
		Final	30/4/2007	30/4/2008
7	La Jutosa	Inicio	1/5/1985	1/5/2006
		Final	30/4/2006	30/4/2015
8	Pito Solo	Inicio	1/5/1981	1/5/2005
		Final	30/4/2005	30/4/2015
9	Santa Elena	Inicio	1/5/1981	1/5/2004
		Final	30/4/2004	30/4/2014

Fuente: Elaboración propia

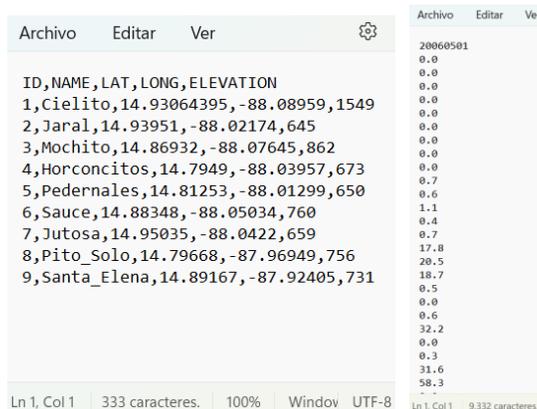
Se utilizaron los métodos de Escalamiento Lineal (LS), Escalamiento de Intensidad Local (LOCI) y Transformación con Potencias (PT). En el caso del LS se calculó un factor mensual para cada mes del año en cada una de las estaciones, haciendo coincidir los promedios mensuales de los datos satelitales con los obtenidos a partir de datos en tierra durante el

periodo de calibración. De forma similar al método LS, para el método LOCI se obtienen los parámetros para cada mes del año durante el periodo de calibración; estos parámetros son el factor de corrección y el umbral de excedencia para asegurar que la frecuencia de días húmedos en los datos corregidos coincida con la frecuencia de días húmedos observados. El método PT aplica una transformación exponencial a los datos, estimando un factor que corrija la varianza de la data satelital.

Estos tres métodos se aplicaron a través del software CMhyd para lo cual se creó un archivo general de ubicación, conteniendo las estaciones, su latitud, longitud, elevación y se creó un archivo de entrada de datos para cada estación con su fecha de inicio en el formato YYYYMMDD en la primera línea y la data de precipitación diaria a partir de la segunda línea (Ilustración 5) y reemplazando los datos faltantes de las series con -99.0. Estos archivos se crearon tanto para las series observadas como para las series satelitales teniendo en cuenta el periodo de calibración. Los archivos fueron cargados en la interfaz (Ilustración 6), donde se eligió el método a usar (LS, LOCI y PT) de forma individual en cada ocasión para obtener los resultados que permitan el análisis de cada estación mes a mes.

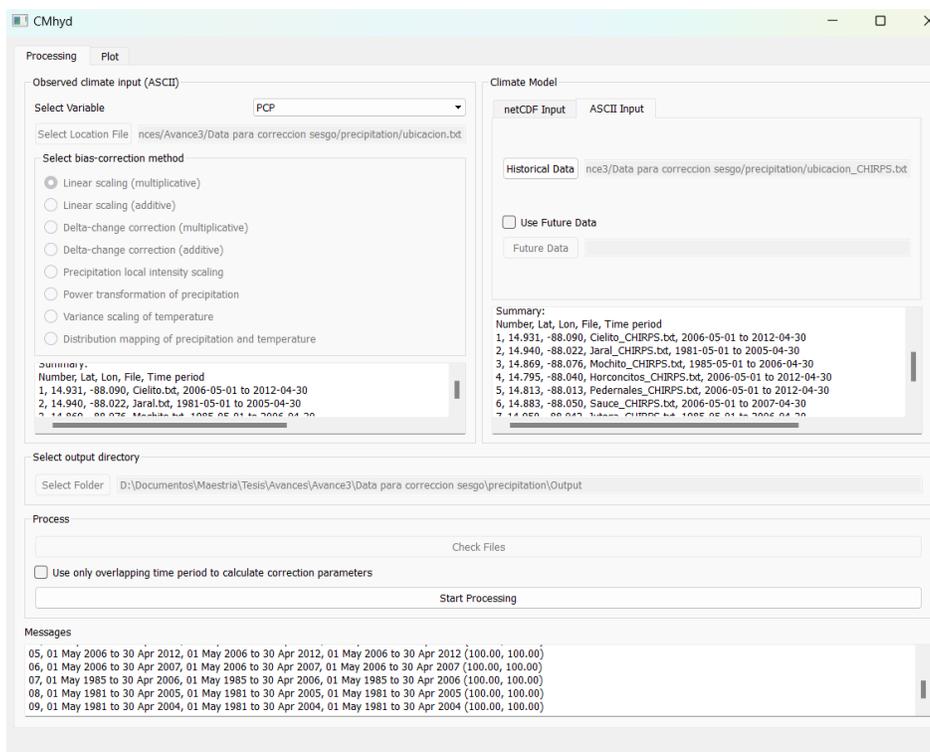
Posteriormente se calcularon y se compararon las métricas estadísticas de las series de precipitación corregidas de forma mensual, tanto para la calibración como para la validación.

ILUSTRACIÓN 5 - FORMATO DE ARCHIVOS DE UBICACIÓN DE ESTACIONES Y ENTRADA DE DATOS A CMHYD



Fuente: Elaboración propia

ILUSTRACIÓN 6 - INTERFAZ DE TRABAJO DE CMHYD



Fuente: Elaboración propia

7.6 Relleno de datos faltantes

Eligiendo la estación que presentó las mejores métricas luego de efectuada la corrección del sesgo, se definió el periodo a rellenar, tomando para ello la data satelital y aplicando el método de corrección de sesgo definido con base en los resultados del análisis de los tres métodos mencionados anteriormente.

Se eligió la estación de la nueva red que fuese la más cercana a la estación seleccionada de la red antigua, con el fin de tener una serie continua y poder validar por segunda ocasión la data satelital y ver si se puede utilizar esta data en ausencia de información en el área de estudio.

Se realizó el cálculo de las métricas para la estación nueva y se comparó con las métricas de calibración y validación de la estación antigua. Adicionalmente se contrastó de forma gráfica la serie completa para apreciar si el comportamiento de las 2 estaciones y la data satelital sigue un mismo patrón o tendencia.

8. CAPÍTULO VII: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Análisis preliminar y de calidad de la data

En esta sección se presentan las estadísticas descriptivas de la precipitación diaria, mensual y anual, tanto observada como proveniente de las fuentes satelitales CHIRPS y CMORPH.

8.1.1 Precipitación diaria

8.1.1.1 Estadísticas descriptivas de precipitación diaria

Se presenta un resumen de estadísticas de precipitación diaria (mm/d) en la Tabla 11, para la data observada versus la proveniente de CHIRPS y CMORPH, incluyendo el valor mínimo, primer cuartil (1Q), mediana, media, tercer cuartil (3Q), valor máximo, rango intercuartílico (IQR), límite superior del rango intercuartílico (LSI) desviación estándar (SD), coeficiente de variación (CV), asimetría (skewness), curtosis, datos faltantes (NA's) y número de datos (n) sin corrección del sesgo.

TABLA 11 - PRECIPITACIÓN DIARIA (MM/D)

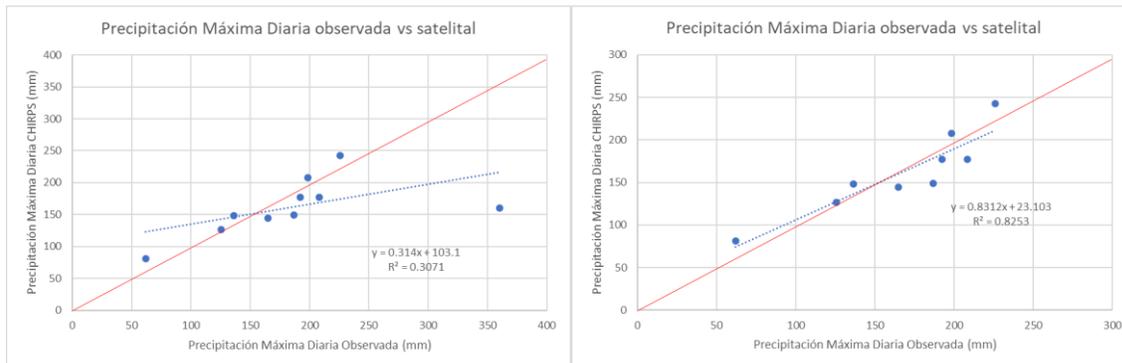
		Min	1Q	Median	Mean	3Q	Max	IQR	LSI	sd	cv	skewness	kurtosis	NA's	n
<i>El Cielito</i>	Data Obs.	0	0	0.5	8.6	10.1	125.5	10.1	25	15.9	1.9	2.8	9.0	1	3287
	CHIRPS	0	0	0.0	6.6	9.8	126.5	9.8	25	12.3	1.9	3.0	13.3	0	3287
	CMORPH	0	0	0.0	36.8	33.0	1206.0	33.0	83	86.1	2.3	4.5	31.1	0	3287
<i>El Jaral</i>	Data Obs.	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
<i>Horconitos</i>	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
<i>El Mochito</i>	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
<i>Pedernales</i>	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
<i>El Planon</i>	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

		Min	1Q	Median	Mean	3Q	Max	IQR	LSI	sd	cv	skewness	kurtosis	NA's	n
El Sauce	CHIRPS	0	0	0.0	7.4	11.0	160.2	11.0	27	13.9	1.9	3.6	21.6	0	2192
	CMOR PH	0	0	2.0	35.9	31.0	1791.0	31.0	78	85.4	2.4	7.3	106.0	0	2192
	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
La Jutosa	CMOR PH	0	0	0.0	31.2	27.5	602.0	27.5	69	67.1	2.1	3.4	14.5	0	731
	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
Pito Solo	CMOR PH	0	0	0.0	36.6	30.0	1396.0	30.0	75	88.1	2.4	4.9	38.7	0	6209
	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
Santa Elena	CMOR PH	0	0	0.0	30.7	25.0	1483.0	25.0	63	73.5	2.4	5.0	46.7	0	6209
	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
	CMOR PH	0	0	1.0	35.5	31.0	1791.0	31.0	78	83.2	2.3	5.4	57.3	0	5844

Fuente: Elaboración propia

Al comparar las estadísticas diarias máximas por estación entre la data observada y la data satelital proveniente de CHIRPS, se observa que varias estaciones registraron valores cercanos o superiores a 200 mm pero menores a 250 mm (específicamente durante los años 1993, 1998, 2003, 2007 y 2009). Estos valores elevados son coincidentes en varias estaciones, lo que sugiere la validez de los datos. No obstante, se identifica una discrepancia en la estación El Planón, que muestra valores considerablemente más altos, como un máximo diario de 360 mm en agosto de 2006. Este valor atípico podría deberse a errores de medición o instrumentación y al hacer la comparación entre la data de las otras estaciones por un lado incluyendo y por el otro excluyendo la estación El Planón se aprecia que afecta drásticamente el ajuste (Gráfico 3).

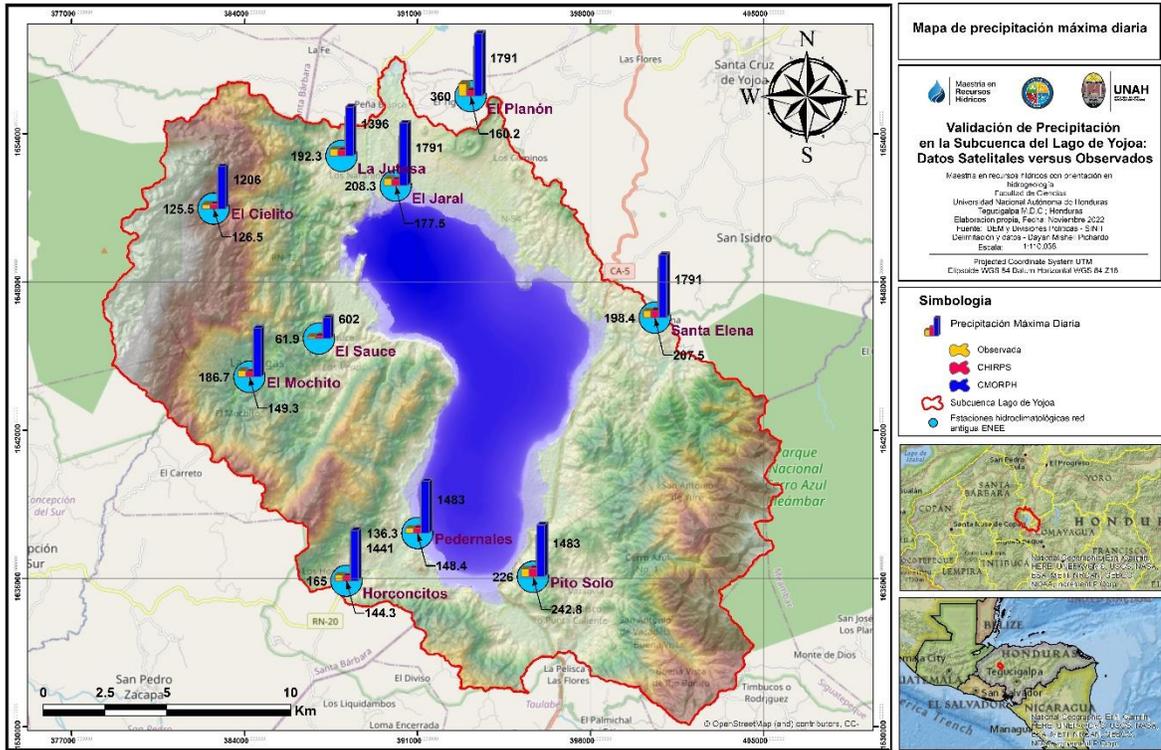
GRÁFICO 3 - COMPARACIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS OBSERVADAS VS SATELITALES (CHIRPS) CON ESTACIÓN EL PLANÓN (IZQUIERDA) Y EXCLUYÉNDOLA (DERECHA)



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, al analizar las estadísticas de la precipitación diaria satelital proveniente de CMORPH, se identificó una sobreestimación excesiva de los valores como se puede apreciar en el Mapa 8. Aunque se consultó la fuente (climateengine.org y NOAA) y se verificaron las unidades, fue recomendado por la NOAA usar 3 estaciones en tierra, ubicadas en la Mesa (La Lima, Cortés), Catacamas y Tegucigalpa las cuales se encuentran alejadas de la zona de estudio. Por lo anterior se decidió no continuar con el análisis de la data satelital de CMORPH ya que el usar 3 estaciones en tierra se aleja del objetivo de este estudio.

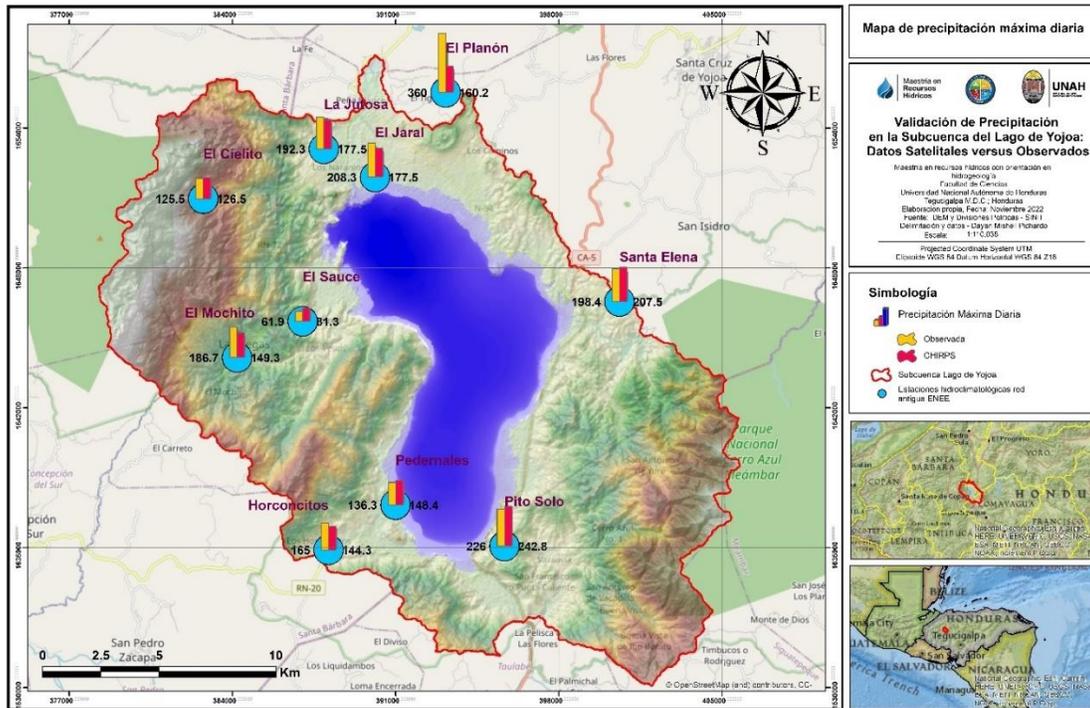
MAPA 8 - PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA



Fuente: Elaboración propia

Es relevante mencionar que al remover la data de CMORPH y analizando solo la data observada versus la data satelital de CHIRPS, la estación Pito Solo, ubicada al sur de la subcuenca, registra los valores más altos de precipitación, con picos de hasta 226 mm (Mapa 9). Estos registros a menudo se asemejan a los picos de la estación Santa Elena, ubicada al este de la subcuenca. Ambas estaciones, ubicadas en las faldas de la montaña Cerro Azul Meámbar, han estado registrando datos desde 1981.

MAPA 9 - PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA OBSERVADA VERSUS CHIRPS



Fuente: Elaboración propia

El análisis comparativo de la data diaria, tanto observada como satelital (CHIRPS) como se observa en la Tabla 11, muestra similitudes en la mayoría de los casos, incluso en presencia de datos faltantes en la serie observada.

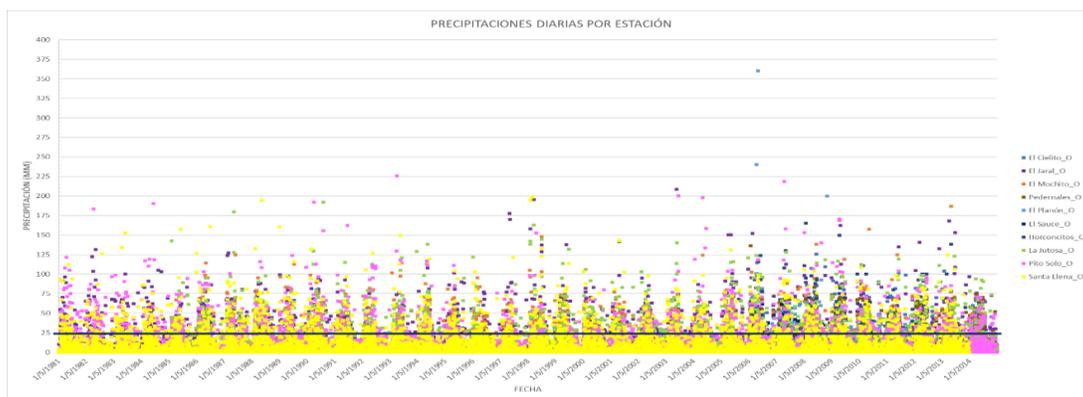
8.1.1.2 Coherencia básica

Al analizar las 10 series de tiempo en busca de valores negativos no se encontró ningún valor de este tipo, en consecuencia, tampoco existirán valores negativos en la precipitación mensual o anual ya que estas se derivan de la suma de las precipitaciones diarias.

8.1.1.3 Identificación de Outliers diarios

Según el método del IQR, cada estación tiene un umbral máximo diario o límite superior del rango intercuartílico (LSI), sin embargo por la cercanía de las estaciones se tomó un solo umbral correspondiente al máximo calculado entre todas las estaciones, el cual es de 25 mm (obviando el dato de 26 mm para la estación El Planón que no será tomada en cuenta) para la data observada y 27 mm para la data de CHIRPS (valores más altos de la Tabla 11). No obstante, las precipitaciones en la zona registran valores considerablemente más altos, como se muestra en el Gráfico 4.

GRÁFICO 4 - PRECIPITACIONES DIARIAS POR ESTACIÓN



Fuente: Elaboración propia

Dado que la identificación de valores anómalos en la precipitación diaria resulta complicada debido a su alta variabilidad natural, que puede incluir extremos cortos y eventos dispersos, se optó por analizar la precipitación a nivel mensual. Esta aproximación permite suavizar las fluctuaciones diarias y revelar tendencias más claras, facilitando la detección de valores atípicos, permitiendo un análisis más robusto y confiable de los patrones de precipitación. Este enfoque de agregación ayuda a identificar desviaciones significativas que podrían estar relacionadas con eventos climáticos anormales o errores en la recolección de datos, lo cual es crucial para estudios climatológicos y la gestión de recursos hídricos.

8.1.2 Precipitación mensual

Los meses eliminados debido a contener más del 10% de datos faltantes diarios se detallan en la Tabla 12.

TABLA 12 - MESES CON DATA OBSERVADA FALTANTE NO CONSIDERADOS



Fuente: Elaboración propia

8.1.2.1 Estadísticas descriptivas de precipitación mensual

La Tabla 13 presenta un resumen de las estadísticas de precipitación mensual (mm/mes) para la data observada y CHIRPS:

TABLA 13 - 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
Horconcitos	CMORPH	0	116	863	1071	1719	4377	1603	4124	1035	0.97	0.87	0.04	0	204
	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
El Mochito	CMORPH	0	63	861	990	1638	4340	1576	4001	969	0.98	0.91	0.33	0	96
	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
Pedernales	CMORPH	0	79	816	1114	1815	6189	1736	4419	1138	1.02	1.12	1.30	0	204
	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

		Min	1Q	Median	Mean	3Q	Max	IQR	LSI	SD	CV	SKEWNESS	KURTOSIS	NA's	N
El Planon	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
El Sauce	CMORPH	6	151	861	1093	1722	4241	1571	4078	1043	0.95	0.89	0.05	0	72
	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
La Jutosa	CMORPH	1	242	701	951	1684	3145	1442	3847	923	0.97	0.78	-0.59	0	24
	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
Pito Solo	CMORPH	0	79	816	1114	1815	6189	1736	4419	1138	1.02	1.12	1.30	0	204
	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
Santa Elena	CMORPH	0	64	688	933	1532	4167	1467	3733	960	1.03	0.99	0.36	0	204
	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

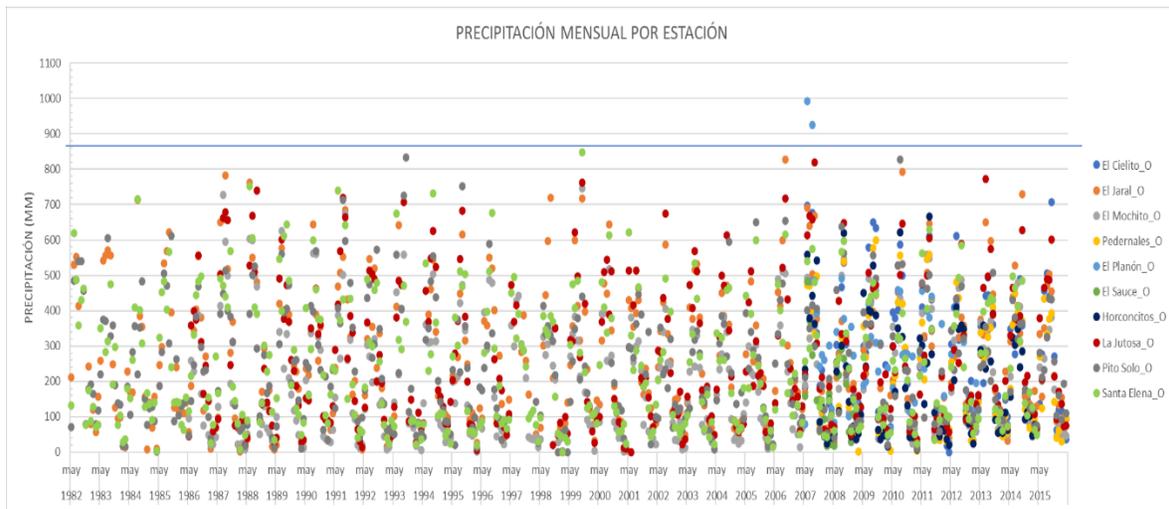
Fuente: Elaboración propia

8.1.2.2 Identificación de Outliers mensuales

Mediante el método del IQR, se identificó que el umbral máximo o límite superior del rango intercuartílico (LSI) debería encontrarse alrededor de los 872 mm al mes para la precipitación observada y 791 mm para la data de CHIRPS. En el resumen de la Tabla 13 se puede corroborar que la data de CMORPH presenta valores muy alejados de la data de CHIRPS y observada lo que se refleja claramente en las estadísticas elevadas de la media, mediana, máximos y otros.

En el Gráfico 5 se observa que todas las precipitaciones mensuales registradas se encuentran bajo el umbral máximo, a excepción de 2 registros correspondientes a la estación El Planon que superan dicho umbral y que corresponden a junio y agosto de 2006 con 924.9 y 993.4 mm respectivamente, y adicionalmente no hay otra estación que llegue a esos valores en esos u otros meses evaluados por lo que se eliminaron de los análisis posteriores.

GRÁFICO 5 – PRECIPITACIONES MENSUALES POR ESTACIÓN Y UMBRAL MÁXIMO SEGÚN IQR



Fuente: Elaboración propia

El valor mínimo mensual registrado por las estaciones observadas fue de 0 mm en varias ocasiones y estaciones. Estos valores no fueron descartados, debido a que estaciones vecinas presentaron bajos niveles de precipitación en esos periodos de igual manera. El valor máximo fue de 848.5 mm registrado en octubre de 1998 en la estación Santa Elena.

8.1.3 Precipitación anual

Debido a los meses faltantes (Tabla 14), el análisis estadístico anual representa gran variabilidad, por lo que para el análisis de la data observada se removieron los años con al menos un mes faltante.

TABLA 14 - AÑOS CON DATA OBSERVADA FALTANTE NO CONSIDERADOS

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

Simbología

El Cielito	
El Jaral	
Horconcitos	
El Mochito	
Pedernales	
El Planon	
El Sauce	
La Jutosa	
Pito Solo	
Santa Elena	

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la estación El Planón existían meses faltantes en todos los años de registro y en el caso de la estación El Sauce solo un año (de dos) tenía información de todos los meses. Por lo anterior la estación El Planón no fue considerada para los análisis posteriores al no poseer un año completo que pudiese ser representativo del patrón de precipitación asociado, mientras que la estación El Sauce fue incluida en los análisis posteriores pero teniendo en consideración de que con solo un año algunas estadísticas pueden variar considerablemente en relación al resto de estaciones.

8.1.3.1 Estadísticas descriptivas de precipitación anual

La Tabla 15 presenta un resumen de las estadísticas de precipitación anual (mm/año) para la data observada y CHIRPS:

TABLA 15 - PRECIPITACIÓN ANUAL (MM/AÑO)

		Min	1Q	Median	Mean	3Q	Max	IQR	LSI	SD	CV	SKEWNESS	KURTOSIS	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
	CHIRPS	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
	CHIRPS	2036	2532	2726	2753	2985	3342	454	3665	315	0.11	-0.07	-0.56	0.00	34
Horconcitos	Data Obs.	2014	2235	2492	2448	2537	2988	302	2990	340	0.14	0.22	-1.41	2.00	8
	CHIRPS	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
	CHIRPS	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
	CHIRPS	2032	2104	2250	2317	2477	2667	373	3036	247	0.11	0.22	-1.85	0.00	9
El Planon	Data Obs.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6
	CHIRPS	2320	2432	2647	2697	2939	3171	507	3700	343	0.13	0.18	-1.97	0.00	6
El Sauce	Data Obs.	2227	2227	2227	2227	2227	2227	0	2227	-	-	-	-	1.00	2
	CHIRPS	1971	1988	2005	2005	2022	2039	34	2073	48	0.02	0.00	-2.75	0.00	2
La Jutosa	Data Obs.	2473	2883	3183	3199	3399	4064	516	4173	391	0.12	0.42	-0.58	6.00	30
	CHIRPS	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
	CHIRPS	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
	CHIRPS	1869	2327	2503	2546	2703	3165	375	3266	307	0.12	0.05	-0.52	0.00	33

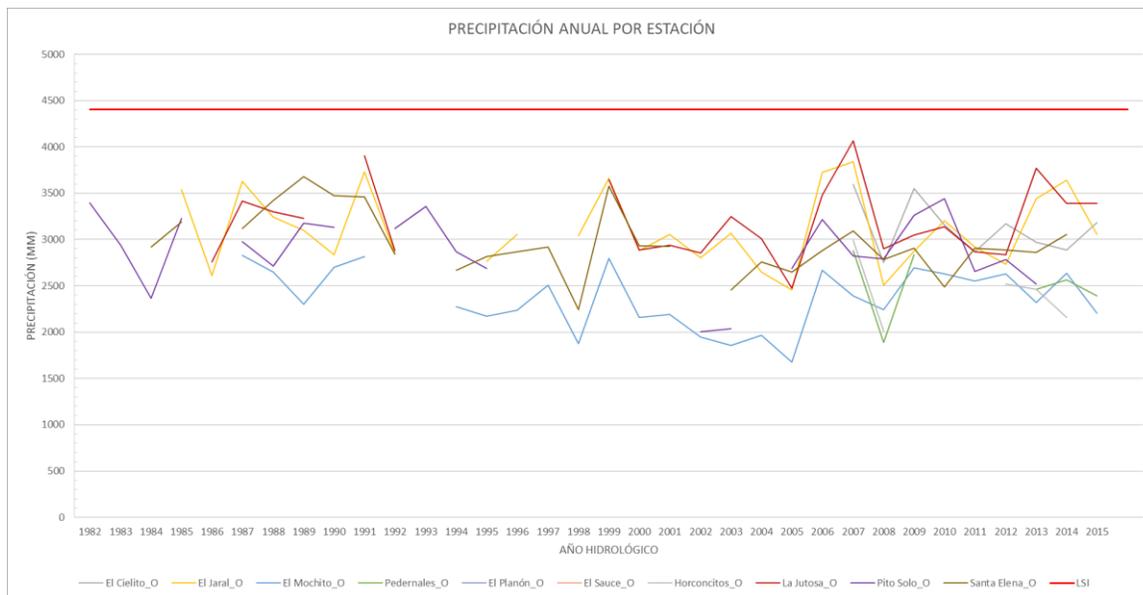
Fuente: Elaboración propia

8.1.3.2 Identificación de Outliers anuales

Mediante el método del IQR, se identificó que el umbral máximo debería estar alrededor de los 4407 mm al año para la precipitación observada y 3365 mm para la data de CHIRPS. En el Gráfico 6, se observa que todas las precipitaciones anuales registradas se encuentran bajo el umbral máximo. Adicionalmente se observan los vacíos en la continuidad anual de las series, esto debido a que varios años fueron excluidos del análisis por no contener información mensual completa, lo que alteraría la suma de las precipitaciones y de haberse incluido se verían precipitaciones anuales muy bajas, lo que no sería representativo de la realidad. 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.

GRÁFICO 6 - PRECIPITACIONES ANUALES POR ESTACIÓN Y UMBRAL MÁXIMO SEGÚN IQR

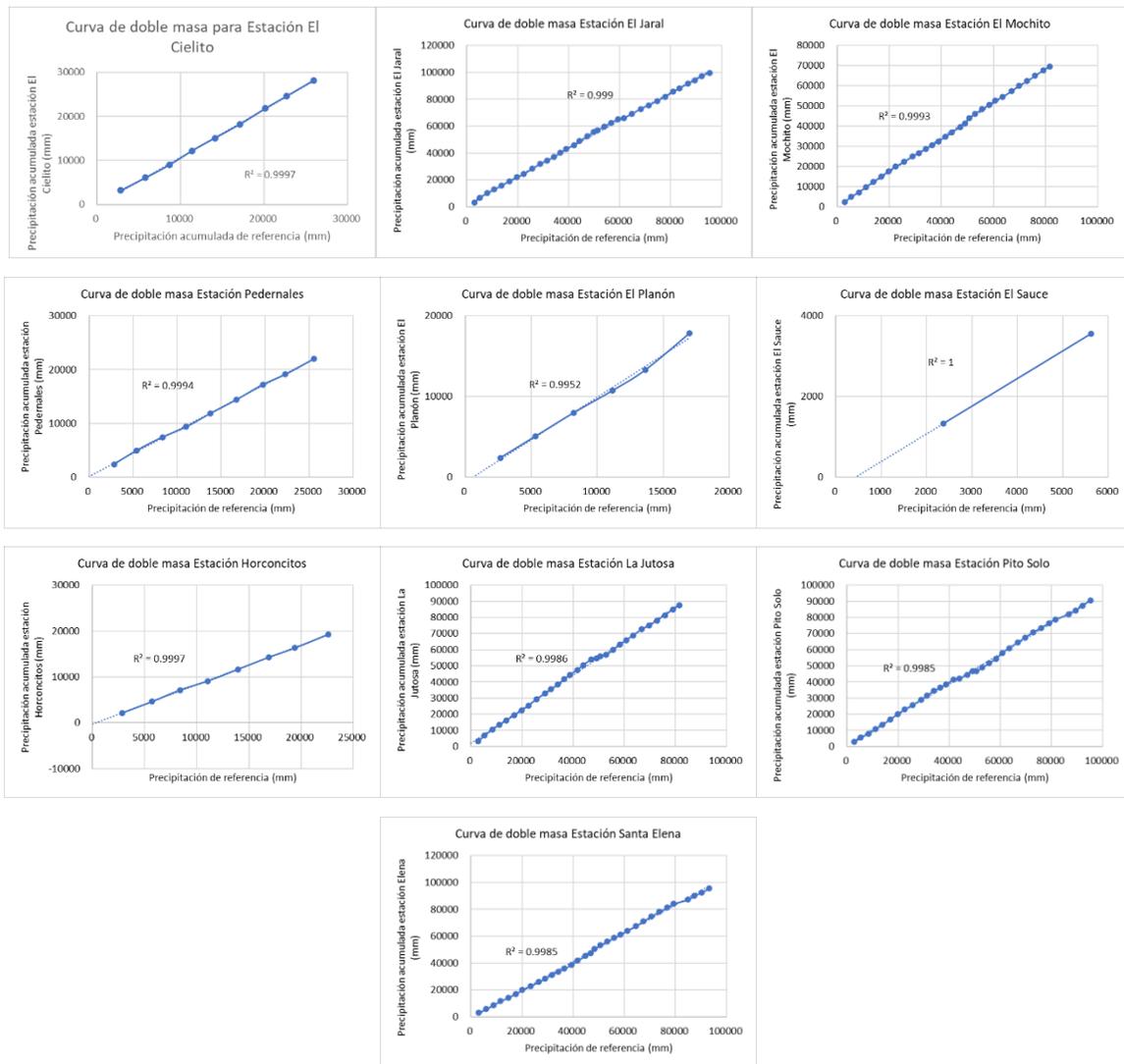


Fuente: Elaboración propia

8.1.3.3 Análisis de consistencia

Se muestra el análisis de consistencia anual mediante las curvas de doble masa (Gráfico 7), para las que se tomó en consideración las estaciones de la subcuenca que registraron precipitación durante el mismo periodo de tiempo. En el caso de la estación El Sauce, el R^2 es igual a 1 (ajuste perfecto), sin embargo, esto se debe a que solo se compararon dos años por lo que la recta solo conecta dos puntos entre sí. En general todas las estaciones muestran una buena homogeneidad de los datos a nivel anual siendo estos consistentes.

GRÁFICO 7 - CURVAS DE DOBLE MASA PARA LAS ESTACIONES OBSERVADAS



Fuente: Elaboración propia

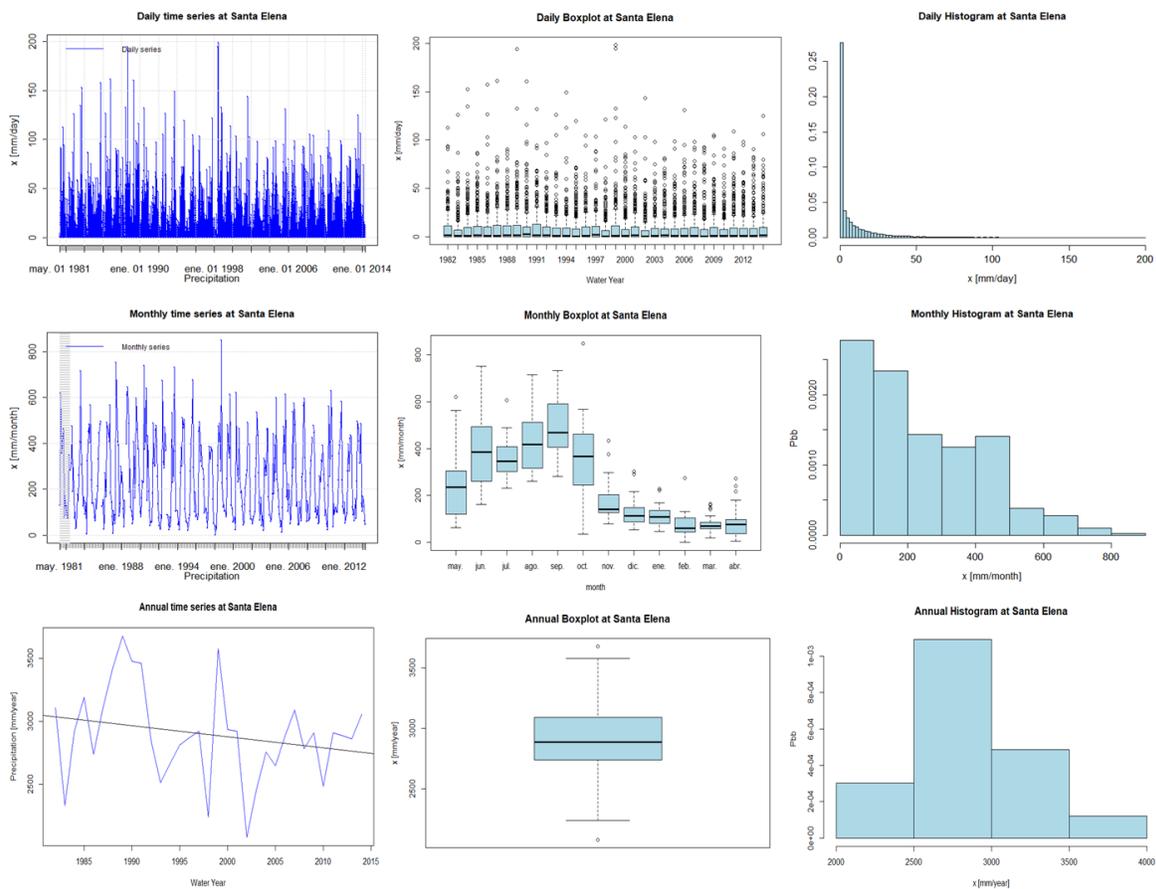
8.1.4 Análisis gráfico de las series

8.1.4.1 Gráficos lineales, diagrama de cajas e histograma de series observadas

A través de los gráficos lineales podemos visualizar la tendencia de la precipitación a lo largo del tiempo, como se puede observar en el Gráfico 8, en la estación Santa Elena se registra un decremento en la misma en el periodo 1985 a 2015. En el diagrama de cajas o bigotes se puede observar que en el mes de mayo comienza un régimen de precipitaciones en aumento, que va de mayo a septiembre u octubre y en decremento de noviembre a abril, lo que concuerda con el comportamiento del año hidrológico de Honduras. En el histograma

podemos observar que en el caso de la precipitación diaria, la mayoría de los valores que se registran son cercanos a cero por lo que se encuentran concentrados al lado izquierdo del gráfico, de igual manera en la precipitación mensual, la mayoría de registros se encuentra entre 0 y 100 mm/mes, seguido de 100 a 200 mm/mes; en el caso de la precipitación anual, los valores registrados se concentran entre 2500 y 3000 mm/año, seguido de valores entre 3000 y 3500 mm/año.

GRÁFICO 8 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN SANTA ELENA



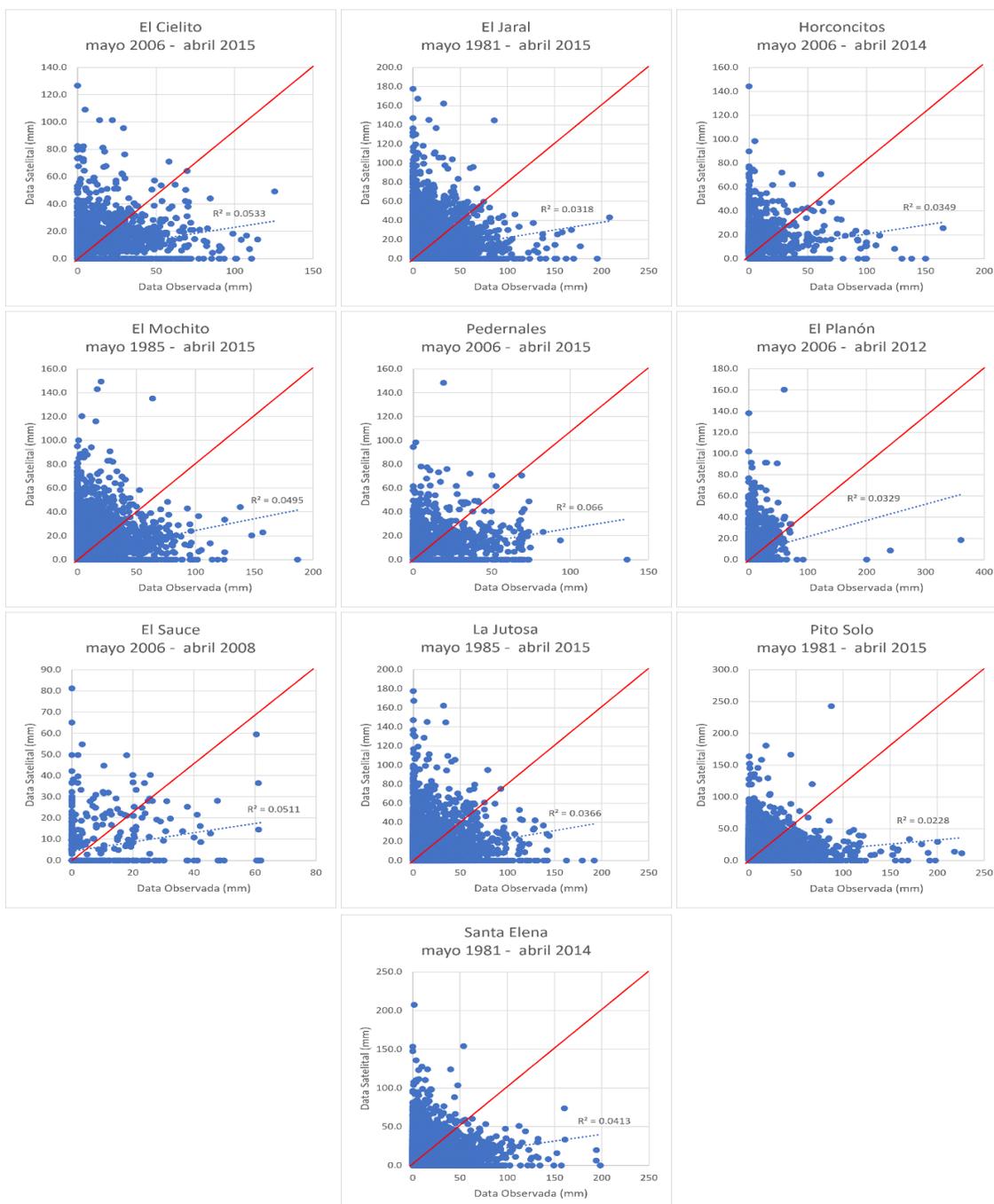
Fuente: Elaboración propia

El resto de las gráficas para cada estación pueden encontrarse en la sección de Anexos 1.

8.1.4.2 Gráficos de dispersión

En los gráficos de dispersión de la data diaria (Gráfico 9) se puede observar que la correlación entre la data observada versus la satelital es muy baja a nivel diario y no se observa ningún tipo de tendencia ya que se presenta mucha variabilidad.

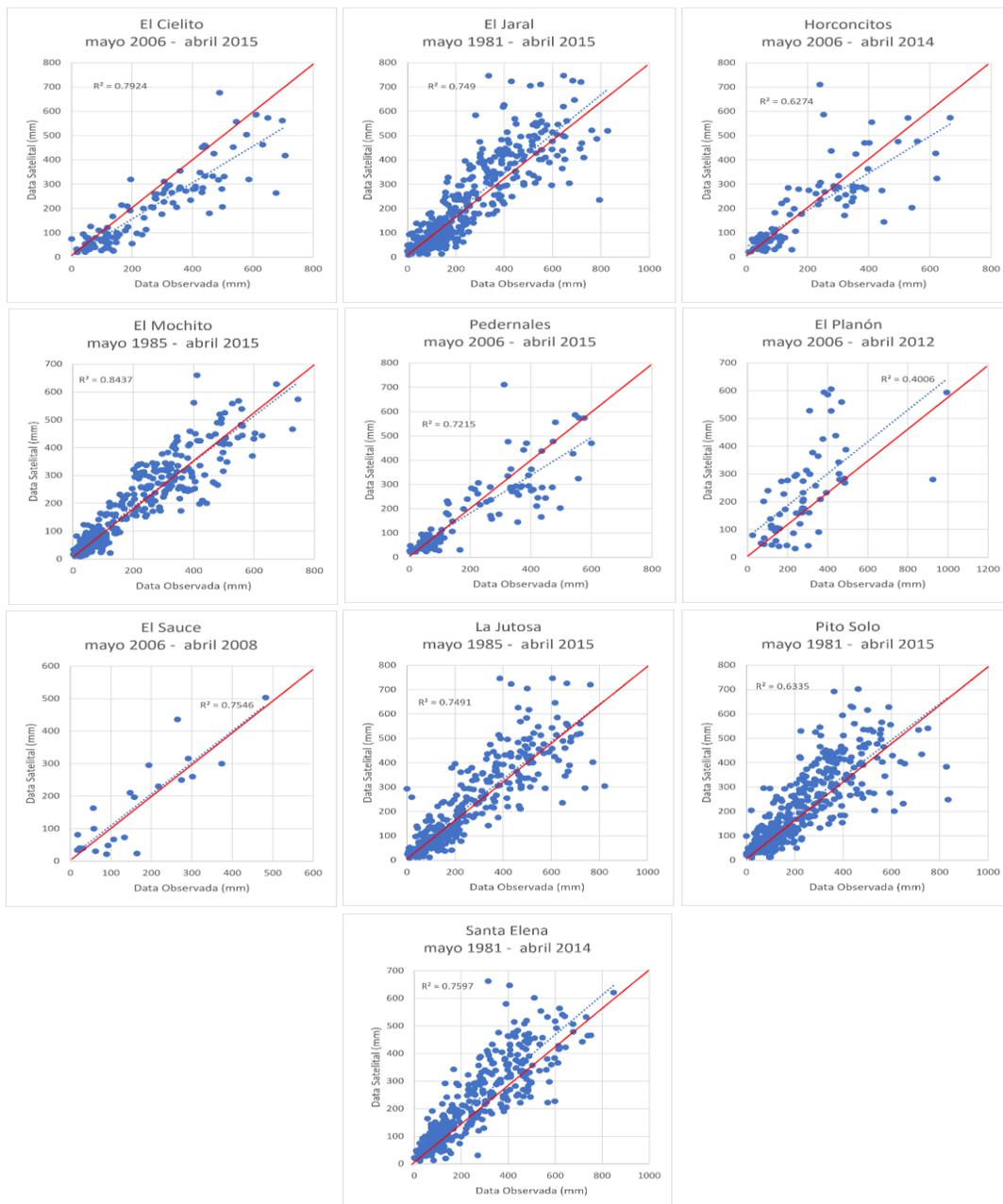
GRÁFICO 9 - DISPERSIÓN DATA OBSERVADA VS SATELITAL DIARIA



Fuente: Elaboración propia

En los gráficos de dispersión de la data mensual (Gráfico 10) se puede observar que la correlación entre la data observada versus la satelital mejora considerablemente en comparación con la data diaria. Se observa una mayor agrupación alrededor de la línea de 45°, lo que podría indicar un buen ajuste y buena representación de la variabilidad de la data observada en relación a la data proveniente de CHIRPS a nivel mensual.

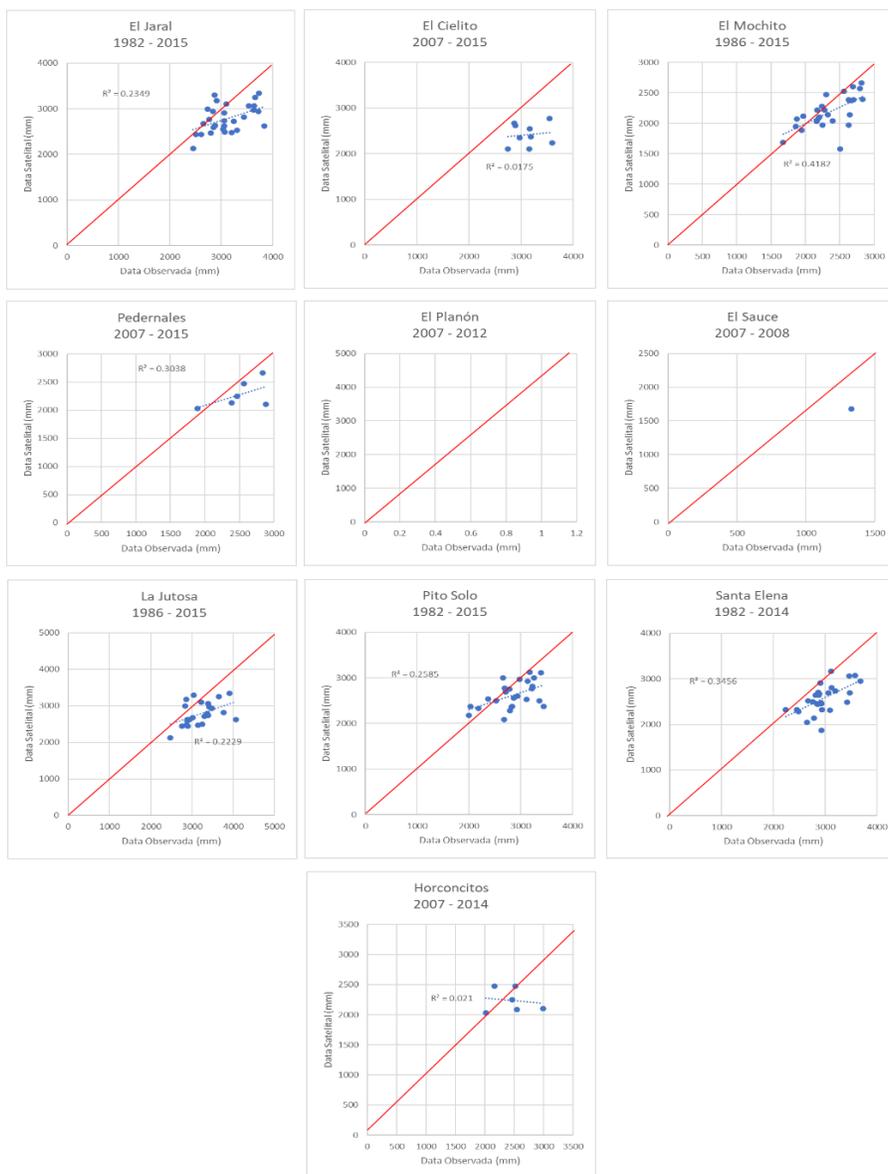
GRÁFICO 10 - DISPERSIÓN DATA OBSERVADA VS SATELITAL MENSUAL



Fuente: Elaboración propia

En los gráficos de dispersión de la data anual (Gráfico 11) se puede observar que la correlación entre la data observada versus la satelital mejora en comparación con la data diaria pero empeora considerablemente en relación con la data mensual. Esto podría deberse en algunos casos a que la cantidad de años existente no es suficiente para el análisis, o a las diferencias significativas en el acumulado anual que se aprecian de mejor manera en esta gráfica. Es por ello que se analizaron las relaciones entre las precipitaciones mensuales que presentan mejor correlación en los siguientes pasos.

Gráfico 11 - Dispersión data observada vs satelital anual



Fuente: Elaboración propia

8.1.4.3 Tendencia

La Tabla 16 resume los resultados de la prueba de Mann-Kendall para varias estaciones de monitoreo y tipos de datos (observados y CHIRPS). La prueba de Mann-Kendall se utiliza para identificar tendencias significativas en datos temporales. Los resultados se presentan junto con una evaluación de si se encontró una tendencia descendente o ascendente significativa o no se encontró una tendencia significativa en los datos.

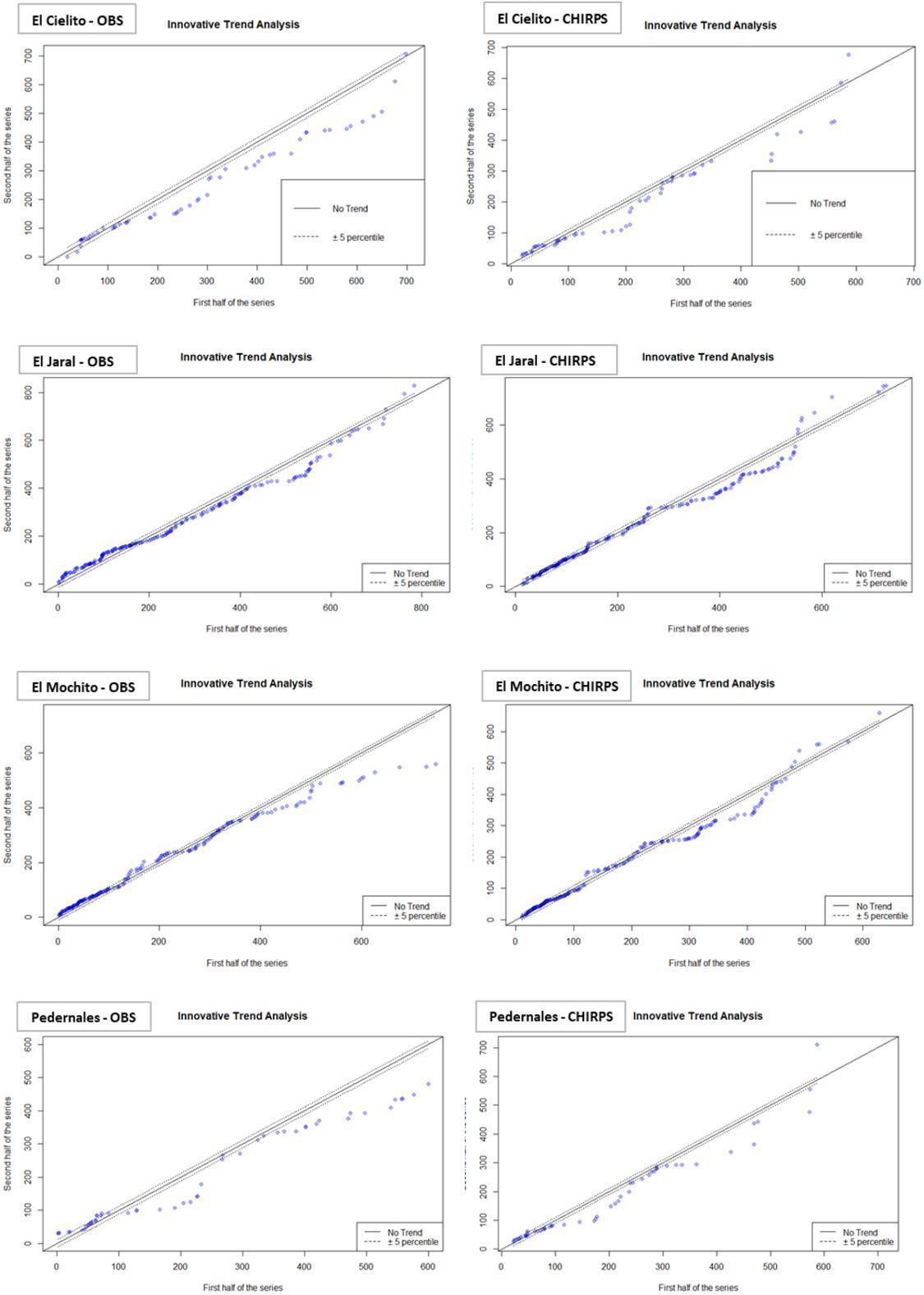
TABLA 16 - RESULTADOS DE PRUEBA DE TENDENCIA MANN-KENDALL

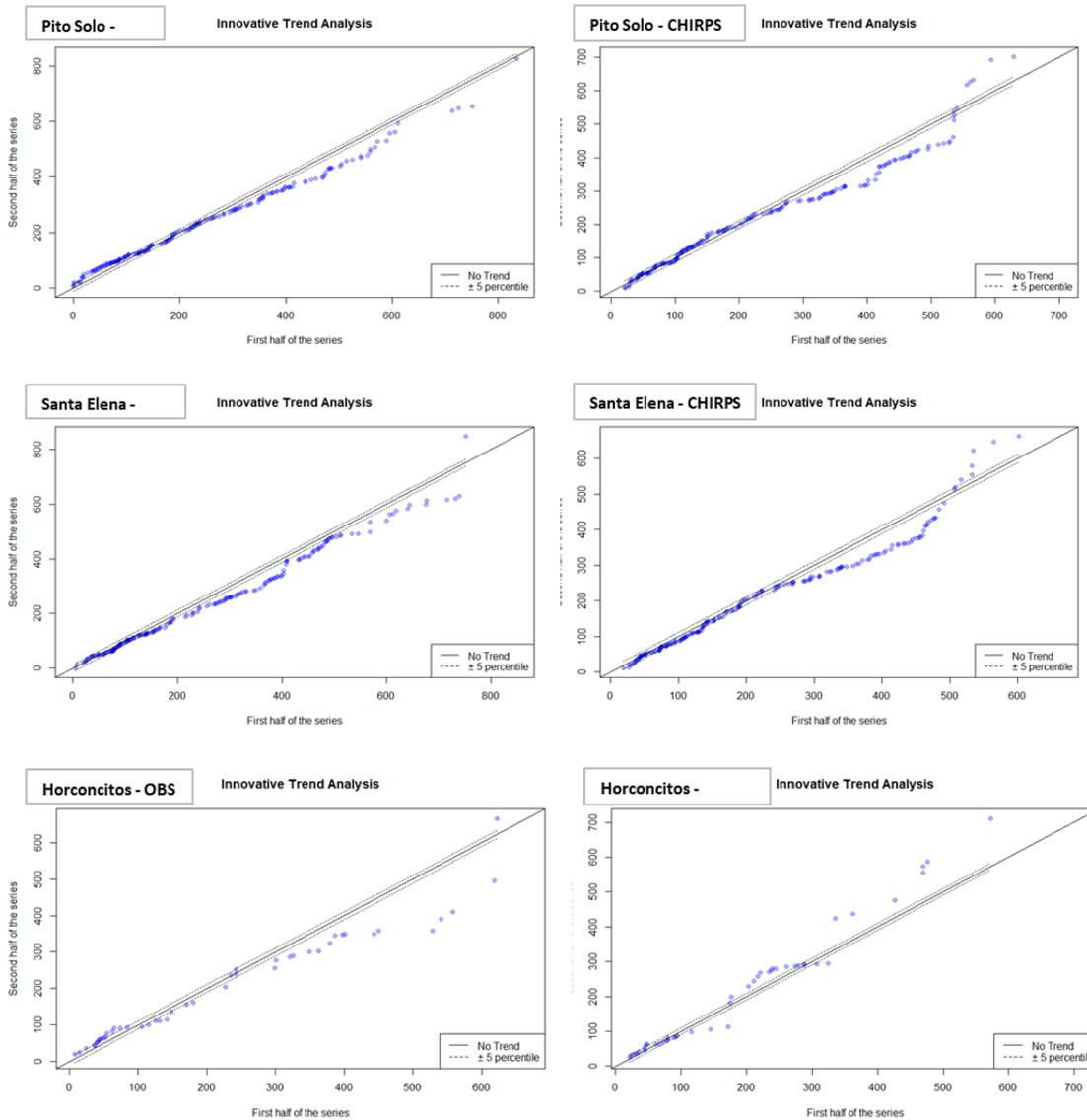
Estación	Data	Z	n	p-value	Tau	Tendencia
El Cielito	Data Observada	-1.0062	108.00	0.3143	-0.0658	Sin tendencia significativa
	CHIRPS	-0.38	108.00	0.70	-0.02	Sin tendencia significativa
El Jaral	Data Observada	0.03	387.00	0.98	0.00	Sin tendencia significativa
	CHIRPS	-0.47	387.00	0.64	-0.02	Sin tendencia significativa
Horconcitos	Data Observada	-0.80	94.00	0.43	-0.06	Sin tendencia significativa
	CHIRPS	-0.54	94.00	0.59	-0.04	Sin tendencia significativa
El Mochito	Data Observada	0.46	357.00	0.65	0.02	Sin tendencia significativa
	CHIRPS	-0.60	357.00	0.55	-0.02	Sin tendencia significativa
Pedernales	Data Observada	-0.46	103.00	0.64	-0.03	Sin tendencia significativa
	CHIRPS	-0.58	103.00	0.56	-0.04	Sin tendencia significativa
El Planon	Data Observada	-1.81	62.00	0.07	-0.16	Descendente significativa
	CHIRPS	-0.28	62.00	0.78	-0.02	Sin tendencia significativa
El Sauce	Data Observada	-1.97	22.00	0.05	-0.31	Descendente significativa
	CHIRPS	-2.20	22.00	0.03	-0.34	Descendente significativa
La Jutosa	Data Observada	0.78	338.00	0.44	0.03	Sin tendencia significativa
	CHIRPS	-0.07	338.00	0.95	-0.03	Sin tendencia significativa
Pito Solo	Data Observada	-0.73	381.00	0.47	-0.03	Sin tendencia significativa
	CHIRPS	-1.33	381.00	0.18	-0.05	Sin tendencia significativa
Santa Elena	Data Observada	-1.16	392.00	0.25	-0.04	Sin tendencia significativa
	CHIRPS	-1.12	392.00	0.26	-0.04	Sin tendencia significativa

Fuente: Elaboración propia

A través del ITA (Innovative Trend Analysis), de una forma visual se identificaron posibles tendencias tanto en las series observadas como las de CHIRPS a nivel mensual.

GRÁFICO 12 - RESULTADOS ITA OBSERVADO VS CHIRPS - ESTACIONES CON TENDENCIA APARENTE NEGATIVA



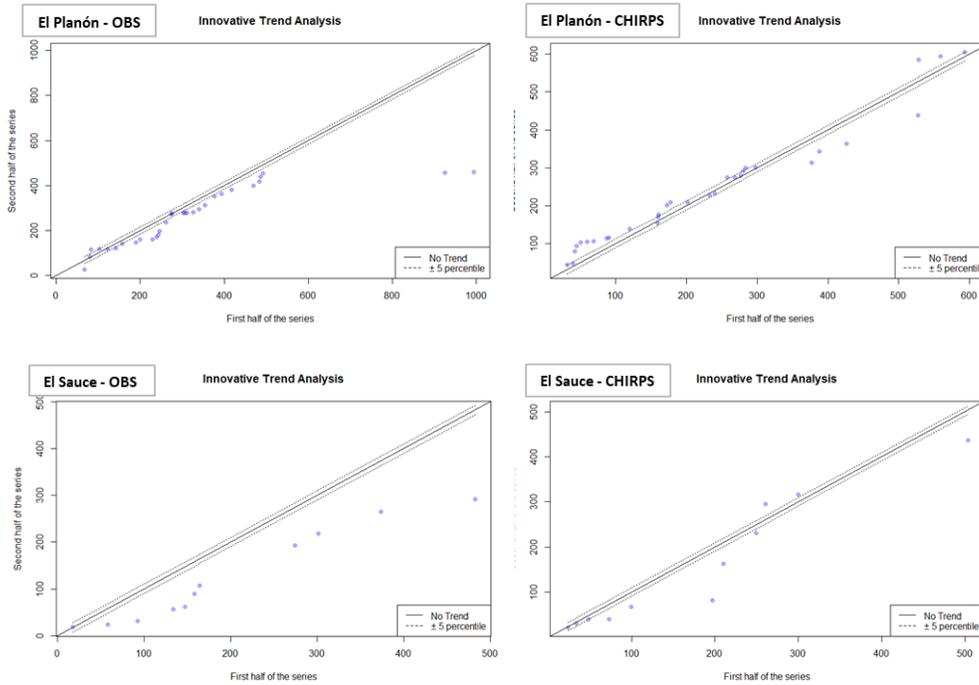


Fuente: Elaboración propia

En el caso de las estaciones El Cielito, El Jaral, El Mochito, Pedernales, Pito Solo y Santa Elena (Gráfico 12Gráfico 13), tanto en la data observada como en la satelital, se observa una mayor agrupación debajo de la línea de 45 grados, lo que indica que las observaciones en la primer mitad de la serie son mayores que las de la segunda mitad, lo que sugiere una tendencia negativa o un decremento en la variable a lo largo del tiempo. En el caso de la estación Horconcitos para la data observada los puntos se encuentran en su mayoría bajo la línea de 45 grados sugiriendo una tendencia negativa o en decremento, sin embargo la data satelital

muestra un agrupamiento de puntos sobre la línea lo que sugiere una tendencia positiva o en aumento.

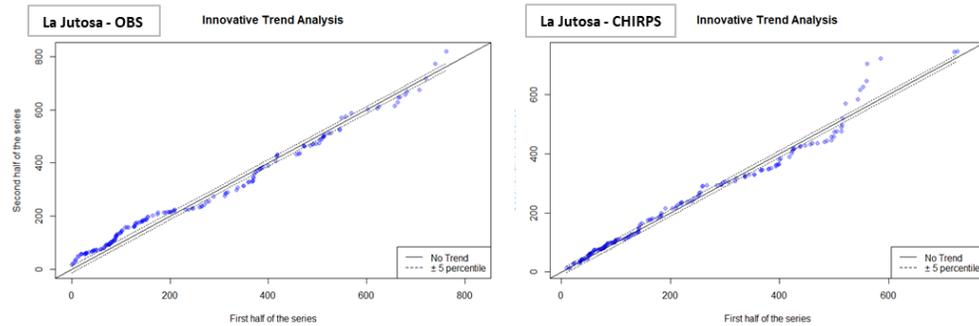
GRÁFICO 13 – RESULTADOS ITA OBSERVADOS VS CHIRPS – ESTACIONES CON TENDENCIA NO CONCLUYENTE



Fuente: Elaboración propia

Las estaciones El Planón y El Sauce (Gráfico 13) presentan muy pocas observaciones para poder concluir eficazmente a través de este método.

GRÁFICO 14 - RESULTADOS ITA OBSERVADO VS CHIRPS - ESTACIONES SIN TENDENCIA APARENTE



Fuente: Elaboración propia

Para la estación La Jutosa (Gráfico 14) la tendencia en ambas series no es clara de forma visual, al inicio para ambas parece ir levemente en aumento y luego levemente en decremento, sin embargo se mantiene muy cerca de la línea de 45 grados por lo que puede no haber tendencia en realidad.

Tanto el test de Mann-Kendall como el ITA resultan útiles para evaluar la tendencia, sin embargo aunque al parecer existe una tendencia al decremento en 17 de las 20 series analizadas (una observada y una satelital por ubicación) según el test de Mann-Kendall, la mayor parte de ellas no es una tendencia decreciente significativa a excepción de las estaciones El Planón y El Sauce, sin embargo, estas estaciones se pueden apreciar en el análisis gráfico ITA que no hay suficientes observaciones para concluir eficazmente.

8.1.4.4 Aleatoriedad e independencia

En la Tabla 17 se muestran los resultados de la prueba de Wald Wolfowitz para las series mensuales.

TABLA 17 - RESULTADOS PRUEBA WALD WOLFOWITZ

Estación	Data	Z	n	p-value
El Cielito	Data Observada	6.4751	108.00	0
	CHIRPS	6.8995	108.00	0
El Jaral	Data Observada	12.0461	387.00	0
	CHIRPS	13.6811	387.00	0
Horconcitos	Data Observada	4.9573	94.00	0
	CHIRPS	6.2858	94.00	0
El Mochito	Data Observada	12.2923	357.00	0
	CHIRPS	12.8725	357.00	0
Pedernales	Data Observada	6.4296	103.00	0
	CHIRPS	6.6305	103.00	0
El Planon	Data Observada	2.6881	62.00	0.0072
	CHIRPS	4.6772	62.00	0
El Sauce	Data Observada	2.9967	22.00	0.0027
	CHIRPS	3.4756	22.00	0.0005
La Jutosa	Data Observada	11.0407	338.00	0
	CHIRPS	12.5655	338.00	0
Pito Solo	Data Observada	9.9998	381.00	0
	CHIRPS	13.3746	381.00	0
Santa Elena	Data Observada	10.4259	392.00	0
	CHIRPS	13.1698	392.00	0

Fuente: Elaboración propia

Con valores absolutos de z mayores a 1.96 y p-value cercano o igual a cero para todas las estaciones, se sugiere que no se cumple la hipótesis nula de independencia y estacionariedad y los resultados son estadísticamente significativos. Esto podría indicar la presencia de tendencias, patrones no estacionarios u otros comportamientos en las series de tiempo que la hacen diferente de una serie de tiempo independiente y estacionaria.

8.1.4.5 Homogeneidad

En la Tabla 18 se muestran los resultados de la prueba de Pettit para las series mensuales.

TABLA 18 - RESULTADOS PRUEBAS PETTITT

Estación	Data	U	n	p-value	K	Año probable de cambio
El Cielito	Data Observada	438	108.00	0.8088	42	2010
	CHIRPS	282	108.00	1	6	2007
El Jaral	Data Observada	1802	387.00	1	268	2006
	CHIRPS	2396	387.00	1	159	1996
Horconcitos	Data Observada	392	94.00	0.6668	6	2007
	CHIRPS	286	94.00	1	76	2013
El Mochito	Data Observada	3037	357.00	0.5947	237	2005
	CHIRPS	2344	357.00	0.9711	87	1993
Pedernales	Data Observada	384	103.00	0.897	6	2007
	CHIRPS	284	103.00	1	73	2013
El Planon	Data Observada	239	62.00	0.4857	47	2011
	CHIRPS	163	62.00	1	57	2012
El Sauce	Data Observada	74	22.00	0.1045	6	2007
	CHIRPS	64	22.00	0.2199	6	2007
La Jutosa	Data Observada	2724	338.00	0.6336	219	2006
	CHIRPS	2022	338.00	1	66	1991
Pito Solo	Data Observada	3935	381.00	0.3745	135	1993
	CHIRPS	3568	381.00	0.5044	112	1991
Santa Elena	Data Observada	4801	392.00	0.2025	125	1992
	CHIRPS	3468	392.00	0.6054	136	1993

Fuente: Elaboración propia

El año probable de cambio proporciona una idea de cuándo podría haber ocurrido un cambio. Los resultados indican que la mayoría de las estaciones de monitoreo han experimentado cambios en sus patrones de precipitación en algún momento, sin embargo las mismas no son estadísticamente significativas (valor de $p > 0.05$), esto sugiere que las

series se pueden considerar homogéneas en el sentido de que no hay cambios estructurales significativos en los datos a lo largo del período analizado.

8.1.4.6 Diferencia de medias y medianas

En la Tabla 19 se muestran los resultados de la prueba de Wilcoxon:

TABLA 19 - RESULTADOS DE PRUEBA DE 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		
El Planon	Data Observada	2302	0.06
	CHIRPS		
El Sauce	Data Observada	238	0.94
	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		

Fuente: Elaboración propia

En las estaciones El Cielito, El Jaral y La Jutosa, los valores de p-value son bajos (<0.05), lo que indica que hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula y concluir que existen diferencias significativas entre los datos observados y CHIRPS en estas estaciones.

Por el contrario, en las estaciones Horconcitos, El Mochito, Pedernales, El Sauce, Pito Solo y Santa Elena con valores de p altos, no hay significancia estadística para rechazar la

hipótesis nula, lo que sugiere que las series observadas versus las satelitales (CHIRPS) son similares.

8.1.4.7 Métricas estadísticas

En la Tabla 20 (ordenada según el NSE), las primeras estaciones 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). Por otro lado, las últimas estaciones muestran un desempeño más bajo en comparación con las anteriores.

TABLA 20 - MÉTRICAS ESTADÍSTICAS PARA DATOS DE PRECIPITACIÓN MENSUAL OBSERVADA VS SATELITAL SIN CORRECCIÓN DEL SESGO

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
El Sauce	0.8687	68.8	0.7546	-7.3	0.6887
Pito Solo	0.7959	104.1	0.6335	15.0	0.6055
Horconcitos	0.7921	104.4	0.6274	7.4	0.5968
El Planón	0.6329	150.9	0.4006	50.9	0.2390

Fuente: Elaboración propia

Los valores de ρ que están más cerca de 1 ($\rho > 0.8$) como el caso de las estaciones El Mochito, Santa Elena, El Jaral, La Jutosa, Pedernales, El Cielito y El Sauce sugieren una correlación positiva fuerte entre las mediciones observadas y las satelitales, esto significa que cuando una de las series aumenta, la otra también tiende a aumentar y viceversa. En el caso de las estaciones El Planón, Horconcitos y Pito Solo que poseen valores de ρ que están entre 0.6 y

0.8, indican una correlación positiva moderada que todavía señala una tendencia a aumentar o disminuir juntas.

El RMSE por su parte nos indica que para las estaciones El Mochito y El Sauce (valores más bajos), las estimaciones satelitales son más cercanas a las observaciones en esas estaciones ya que difieren entre 66.64 y 68.87 mm de precipitación mensual respectivamente. La mayoría de las estaciones está en el rango de 93 a 105 mm de diferencia entre las series observada y satelital a excepción de la estación El Planón que presenta una diferencia de 151 mm.

En lo que respecta al R^2 , para la estación El Mochito se indica que la data satelital explica aproximadamente el 84.37% de la variabilidad observada por lo que tendríamos un buen ajuste; para las estaciones de Santa Elena, El Jaral, La Jutosa, Pedernales, El Cielito y El Sauce cuyo R^2 está entre 0.7 y 0.8, tendríamos un ajuste moderado; para las estaciones Pito Solo y Horconcitos cuyo R^2 está entre 0.6 y 0.7 se puede considera un ajuste aceptable mientras que para la estación El Planón (0.4) tenemos un ajuste bajo.

El sesgo (Bias) lo podemos clasificar con dos escenarios, para el primero tenemos un sesgo positivo en el cual las estimaciones satelitales para las estaciones El Mochito, Santa Elena, El Jaral, La Jutosa, Pedernales, El Cielito, Pito Solo, Horconcitos y El Planón presentan entre 30 y 60 mm al mes, por lo que se podría decir que están siendo sobreestimadas por la data satelital; para la estación El Sauce, las estimaciones satelitales tienden a ser menores que las mediciones reales, lo que podría indicar que el sistema satelital subestima la cantidad de precipitación en ese caso.

Para el NSE según los valores obtenidos, podemos indicar que el método utilizado para estimar la precipitación a través de CHIRPS para la estación El Mochito (0.8372) tiene una alta capacidad para representar las variaciones en los datos observados, lo que sugiere un ajuste excelente; para el caso de las estaciones Santa Elena, El Jaral, La Jutosa, Pedernales, El Cielito, El Sauce, Horconcitos y Pito Solo cuyo rango está entre 0.60 y 0.73, tiene una muy

buena capacidad para representar las variaciones en los datos observados y por último, para la estación El Planón (0.2390), el modelo tiene una capacidad satisfactoria entre las estimaciones y las observaciones quedando en el límite inferior en el cual menor a 0.2 sería insatisfactorio.

Por lo anterior las estaciones óptimas para los siguientes pasos serían por orden El Mochito, Santa Elena, El Jaral, La Jutosa, Pedernales, El Cielito, El Sauce, Pito Solo y Horconcitos, ya que sugieren una correlación positiva moderada a fuerte entre las mediciones observadas y las satelitales; un RMSE moderado cuya magnitud de diferencia oscila entre 66.64 y 104.42 mm de precipitación; un R^2 que va de 0.63 a 0.84 con lo que tendríamos un ajuste aceptable a bueno; un sesgo que va desde -7 hasta 59 mm aproximadamente, siendo la precipitación de CHIRPS mayormente sobreestimada en las estaciones y por último un NSE entre 0.60 a 0.84 que indica que la data de CHIRPS tiene una capacidad muy buena a excelente para representar las variaciones en los datos observados. La estación El Planón presenta los valores más altos de sesgo, la mayor diferencia entre los valores observados y satelitales y un ajuste bajo entre las series por lo que se eliminó del análisis posterior y numerosos meses faltantes por lo que no se continuará con el análisis de esa estación.

8.2 Corrección del sesgo

Para corregir el sesgo en los datos de CHIRPS, se implementaron dos métodos: Escalamiento Lineal (LS) y Transformación con Potencias (PT). El método de Escalamiento de Intensidad Local (LOCI) se descartó, debido a que, se observó que CHIRPS subestima el número de días de lluvia, en lugar de sobreestimarlos, como se muestra en la Tabla 21. Por esta razón, el método LOCI que está diseñado para ajustar la frecuencia y el número de días con precipitación, no resulta adecuado para estos datos.

Al utilizar el método PT, se recomienda utilizar los resultados del método LOCI con él, sin embargo debido a la inaplicabilidad del LOCI en este contexto, se utilizó la serie sin dicha integración. Aunque el LS no modifica la frecuencia de los días lluviosos, si corrige la media y estos resultados fueron comparados con los resultados del PT, mostrando el LS un mejor

desempeño. Todo esto proporciona una base para en el futuro poder llegar a validar y rellenar datos diarios por medio de un análisis inicial a través de estas escalas mensuales y anuales, ya que asegura que las correcciones aplicadas reflejen adecuadamente los patrones observados en escalas temporales más amplias, garantizando así una mejor representación y precisión en los datos diarios que se pudiese rellenar. Cada uno de los resultados obtenidos con los métodos LS y PT se pueden apreciar en las tablas siguientes.

TABLA 21 - DÍAS DE LLUVIA EN ESTACIONES EN TIERRA Y EN CHIRPS DURANTE EL PERIODO DE CALIBRACIÓN

Estación	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS
El Cielito	83	51	54	35	53	20	42	41	87	71	119	111
El Jaral	360	161	231	105	206	110	180	88	274	237	493	435
Horconcitos	54	44	40	32	38	20	34	42	72	78	100	110
El Mochito	259	121	145	81	130	73	92	81	234	219	440	399
Pedernales	78	44	72	32	48	20	46	47	76	78	101	93
El Sauce	10	6	4	5	10	4	3	6	7	14	23	20
La Jutosa	339	144	205	102	171	96	130	73	263	208	409	365
Pito Solo	314	207	199	128	149	108	128	86	219	248	392	418
Santa Elena	419	201	297	118	232	114	200	98	338	255	515	422
Estación	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS	Obs	CHIRPS
El Cielito	149	118	148	126	150	116	126	50	107	22	91	40
El Jaral	584	362	568	382	517	389	497	241	411	148	405	168
Horconcitos	126	117	126	120	105	111	89	55	66	18	72	39
El Mochito	485	354	486	374	478	388	424	220	352	128	278	107
Pedernales	148	117	153	120	123	92	110	52	83	17	83	31
El Sauce	25	17	18	19	23	18	12	8	8	2	17	8
La Jutosa	496	323	435	300	429	324	411	219	371	134	356	152
Pito Solo	459	366	475	388	447	385	459	247	366	139	355	196
Santa Elena	610	387	611	422	547	395	556	247	416	139	454	204

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 22 muestra los promedios de precipitación mensuales y factores de corrección usados en el método LS. Por otra parte, la Tabla 23 muestra los exponentes (bm) usados en el método PT. Los valores de cero en la Tabla 23 indican que bm no pudo ser encontrado porque la Ecuación 17 no tiene solución para la estación y mes correspondiente. En estos casos, se asumió que el exponente era igual a la unidad, esto conllevó a que el resultado del método PT coincida con el del método LS. En su mayoría, los valores de bm mostrados en la Tabla 23 son mayores que uno, lo que indica que los valores de CHIRPS corregidos por el método LS tienden a subestimar el coeficiente de variación (CV) de la precipitación diaria.

TABLA 22 - PROMEDIOS MENSUALES Y FACTORES USADOS EN EL MÉTODO LS CON LOS DATOS DE CHIRPS PARA EL PERIODO DE CALIBRACIÓN

Estación	Obs	CHIRPS	Factor	Obs	CHIRPS	Factor	Obs	CHIRPS	Factor	Obs	CHIRPS	Factor
	Enero			Febrero			Marzo			Abril		
El Cielito	132.2	80.4	1.64	100.6	63.8	1.58	69.2	26.3	2.64	105.8	76.3	1.39
El Jaral	121.2	89.6	1.35	75.9	67.8	1.12	59.5	53.7	1.11	73.7	49.4	1.49
Horconcitos	54.0	65.7	0.82	44.0	54.2	0.81	58.9	28.1	2.09	129.2	88.8	1.46
El Mochito	57.9	58.9	0.98	38.7	38.3	1.01	27.0	30.6	0.88	40.0	46.0	0.87
Pedernales	56.0	65.7	0.85	50.5	54.2	0.93	51.4	28.1	1.83	100.0	81.9	1.22
El Sauce	92.7	48.6	1.91	17.5	33.8	0.52	164.6	23.8	6.90	23.1	39.8	0.58
La Jutosa	119.5	87.5	1.37	75.1	64.9	1.16	59.1	49.8	1.19	63.4	48.6	1.31
Pito Solo	140.6	124.6	1.13	81.2	59.8	1.36	73.4	63.4	1.16	77.7	56.3	1.38
Santa Elena	107.2	117.4	0.91	69.5	63.3	1.10	74.9	55.4	1.35	89.0	63.2	1.41
	Mayo			Junio			Julio			Agosto		
El Cielito	273.4	201.9	1.35	399.2	324.1	1.23	483.6	413.9	1.17	514.1	356.9	1.44
El Jaral	174.2	194.5	0.90	372.3	372.8	1.00	470.5	435.3	1.08	503.4	460.9	1.09
Horconcitos	280.8	201.1	1.40	256.6	302.2	0.85	318.0	394.2	0.81	462.9	359.4	1.29
El Mochito	155.5	158.8	0.98	334.8	309.6	1.08	350.8	334.4	1.05	379.7	334.3	1.14
Pedernales	243.8	201.1	1.21	277.5	307.7	0.90	406.0	394.2	1.03	446.7	359.4	1.24
El Sauce	158.1	196.9	0.80	482.5	503.4	0.96	373.6	300.1	1.24	274.6	249.6	1.10
La Jutosa	189.0	189.9	1.00	358.9	363.1	0.99	486.2	424.0	1.15	512.4	431.8	1.19
Pito Solo	149.7	202.6	0.74	311.9	339.3	0.92	370.8	409.8	0.91	410.7	443.3	0.93
Santa Elena	225.0	200.7	1.12	433.6	341.9	1.27	363.0	367.9	0.99	423.5	406.7	1.04
	Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
El Cielito	514.1	398.6	1.29	318.3	261.0	1.22	158.6	131.0	1.21	111.7	73.4	1.52
El Jaral	504.5	452.0	1.12	328.9	300.0	1.10	220.5	159.4	1.38	166.3	121.8	1.36
Horconcitos	411.8	393.3	1.05	301.7	252.2	1.20	103.5	142.4	0.73	62.3	67.7	0.92
El Mochito	413.4	400.1	1.03	256.0	253.1	1.01	132.5	121.4	1.09	79.3	69.5	1.14
Pedernales	461.1	387.1	1.19	391.6	285.5	1.37	91.1	111.2	0.82	68.2	66.1	1.03
El Sauce	301.4	260.3	1.16	147.4	210.2	0.70	58.0	99.6	0.58	133.9	72.8	1.84
La Jutosa	539.6	452.5	1.19	319.5	322.4	0.99	225.4	152.3	1.48	162.7	121.8	1.34
Pito Solo	425.3	409.0	1.04	395.6	259.8	1.52	200.3	166.4	1.20	164.4	137.7	1.19
Santa Elena	484.2	409.2	1.18	375.5	252.4	1.49	185.7	169.1	1.10	140.0	129.9	1.08

Fuente: Elaboración propia

TABLA 23 - VALORES DE LOS EXPONENTES (BM) UTILIZADOS EN EL MÉTODO PT CON LOS DATOS DE CHIRPS PARA EL PERIODO DE CALIBRACIÓN

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
El Cielito	1.57	2.25	1.44	1.67	0.87	1.51	1.30	1.62	1.00	1.08	1.32	1.04
El Jaral	1.45	1.36	1.05	1.41	1.93	1.45	1.24	1.19	1.29	1.14	0.98	1.06
Horconcitos	0.00	0.00	0.00	1.47	1.03	1.37	1.43	1.77	1.20	0.91	0.00	0.00
El Mochito	0.00	0.92	0.00	1.45	1.95	1.28	1.26	1.17	1.16	1.17	1.07	0.98
Pedernales	0.83	1.98	1.53	1.65	1.10	1.40	1.23	1.35	1.17	0.96	0.99	0.43
El Sauce	1.78	0.00	3.38	0.00	1.52	0.42	1.39	0.00	0.00	1.58	0.00	0.00
La Jutosa	1.28	1.27	0.95	1.64	2.09	1.44	1.25	1.21	1.25	1.15	0.96	1.18
Pito Solo	1.32	1.19	0.96	1.56	1.57	1.34	1.50	1.31	1.32	1.23	0.82	0.86
Santa Elena	1.26	1.41	1.12	1.63	1.92	1.39	1.34	1.35	1.40	1.26	1.27	1.18

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 24 y Tabla 25 muestran las estadísticas mensuales del método LS para los periodos de calibración y validación (ver Tabla 10), respectivamente. De forma similar, la Tabla 26 y Tabla 27 presentan las estadísticas para el método PT. El Anexo 2 muestra los gráficos de las series de mensuales y en el Anexo 3 presenta los gráficos de dispersión.

Las estadísticas mostradas en las tablas de la Tabla 24 a la Tabla 27 muestran que los diferentes índices estadísticos son inferiores en el periodo de validación que en el de calibración como es de esperarse. Además, se puede notar que los coeficientes de determinación (R^2) y Nash Sutcliffe (NSE) son menores en las series corregidas que en las series originales durante el periodo de validación, no obstante, se puede observar que el sesgo de las series corregidas se reduce durante este periodo, por lo que se puede concluir que se reduce el sesgo al costo de reducir un poco la correlación y el NSE.

TABLA 24 - ESTADÍSTICAS MENSUALES CHIRPS-LS DURANTE EL PERIODO DE CALIBRACIÓN

Estación	ρ		RMSE (mm)		R^2		BIAS (mm)		PBIAS (%)		NSE	
	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.
El Cielito	0.91	0.92	103.7	80.4	0.84	0.84	-64.4	0.0	-24.3	0.0	0.72	0.83
El Jaral	0.92	0.92	80.0	74.1	0.84	0.85	-25.9	0.0	-10.3	0.0	0.82	0.85
Horconcitos	0.81	0.86	103.7	89.9	0.66	0.74	-11.5	0.0	-5.5	0.0	0.65	0.73
El Mochito	0.93	0.93	63.7	61.3	0.86	0.87	-9.4	0.0	-4.9	0.0	0.85	0.87
Pedernales	0.90	0.91	85.1	76.1	0.80	0.84	-25.0	0.0	-11.5	0.0	0.78	0.83
El Sauce	0.92	1.00	58.7	0.0	0.84	1.00	-15.7	0.0	-8.5	0.0	0.82	1.00
La Jutosa	0.91	0.92	89.2	77.9	0.83	0.84	-32.9	0.0	-13.0	0.0	0.80	0.84
Pito Solo	0.81	0.84	99.8	91.3	0.66	0.71	-10.8	0.0	-4.6	0.0	0.65	0.70
Santa Elena	0.90	0.92	87.4	69.9	0.81	0.85	-32.6	0.0	-13.2	0.0	0.77	0.85

Fuente: Elaboración propia

TABLA 25 - ESTADÍSTICAS MENSUALES CHIRPS-LS DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN

Estación	ρ		RMSE (mm)		R^2		BIAS (mm)		PBIAS (%)		NSE	
	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.
El Cielito	0.84	0.81	103.4	113.1	0.70	0.65	-47.5	22.8	-18.9	9.1	0.61	0.54
El Jaral	0.76	0.74	131.0	136.6	0.58	0.55	-28.3	-1.0	-10.6	-0.4	0.51	0.46
Horconcitos	0.75	0.76	106.5	120.5	0.56	0.58	4.4	21.9	2.3	11.4	0.33	0.14
El Mochito	0.90	0.90	73.3	72.9	0.81	0.81	-20.3	-11.3	-9.8	-5.5	0.79	0.80
Pedernales	0.75	0.75	106.1	124.6	0.56	0.56	-15.4	12.9	-7.5	6.2	0.45	0.24
El Sauce	0.87	0.91	79.4	88.1	0.76	0.83	34.9	54.2	26.2	40.7	0.30	0.14
La Jutosa	0.78	0.76	128.9	137.6	0.61	0.58	-35.1	0.6	-12.9	0.2	0.54	0.48
Pito Solo	0.76	0.73	113.0	117.8	0.57	0.53	-24.3	-12.5	-10.0	-5.2	0.51	0.46
Santa Elena	0.80	0.80	105.1	107.0	0.64	0.63	-28.9	2.9	-12.2	1.2	0.60	0.59

Fuente: Elaboración propia

TABLA 26 - ESTADÍSTICAS MENSUALES CHIRPS-PT DURANTE EL PERIODO DE CALIBRACIÓN

Estación	ρ		RMSE (mm)		R2		BIAS (mm)		PBIAS (%)		NSE	
	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.
El Cielito	0.91	0.90	103.7	91.4	0.84	0.81	-64.4	0.0	-24.3	0.0	0.72	0.78
El Jaral	0.92	0.91	80.0	77.3	0.84	0.84	-25.9	1.5	-10.3	0.6	0.82	0.83
Horconcitos	0.81	0.84	103.7	101.5	0.66	0.70	-11.5	0.0	-5.5	0.0	0.65	0.66
El Mochito	0.93	0.92	63.7	66.0	0.86	0.85	-9.4	-0.1	-4.9	-0.1	0.85	0.84
Pedernales	0.90	0.90	85.1	83.7	0.80	0.81	-25.0	0.0	-11.5	0.0	0.78	0.79
El Sauce	0.92	1.00	58.7	0.0	0.84	1.00	-15.7	0.0	-8.5	0.0	0.82	1.00
La Jutosa	0.91	0.91	89.2	81.6	0.83	0.83	-32.9	0.0	-13.0	0.0	0.80	0.83
Pito Solo	0.81	0.83	99.8	95.6	0.66	0.69	-10.8	0.0	-4.6	0.0	0.65	0.68
Santa Elena	0.90	0.92	87.4	74.0	0.81	0.84	-32.6	0.0	-13.2	0.0	0.77	0.84

Fuente: Elaboración propia

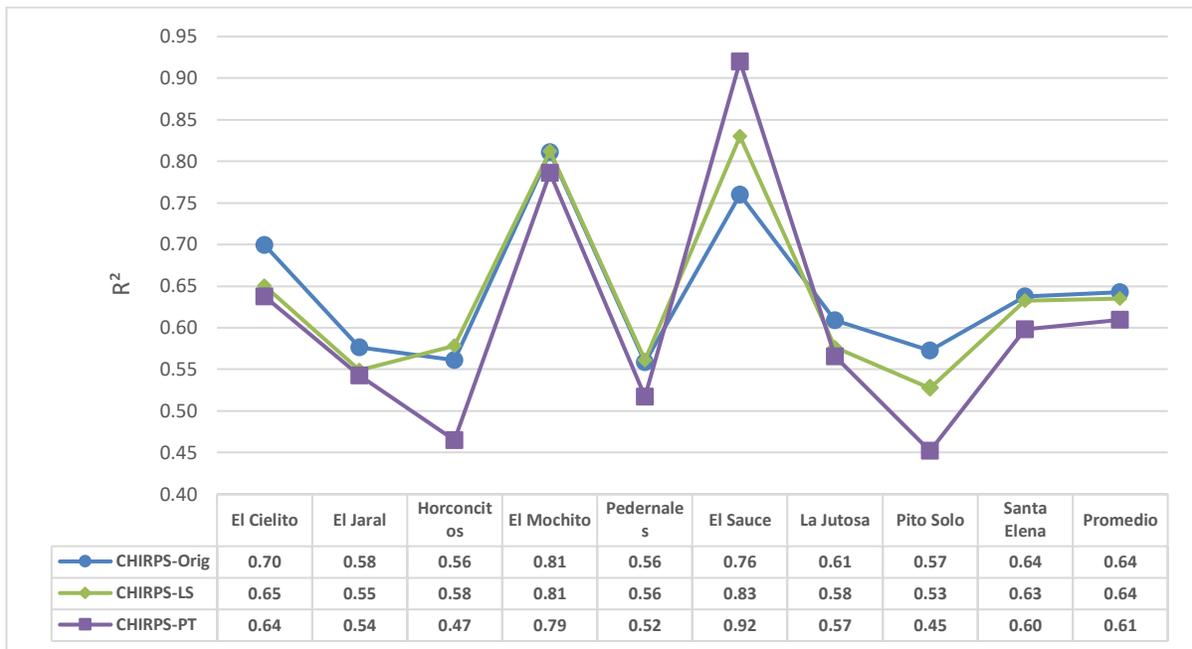
TABLA 27 - ESTADÍSTICAS MENSUALES CHIRPS-PT DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN

Estación	ρ		RMSE (mm)		R2		BIAS (mm)		PBIAS (%)		NSE	
	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.	Orig.	Corr.
El Cielito	0.84	0.80	103.4	122.1	0.70	0.64	-47.5	8.3	-18.9	3.3	0.61	0.46
El Jaral	0.76	0.74	131.0	138.8	0.58	0.54	-28.3	-2.5	-10.6	-0.9	0.51	0.45
Horconcitos	0.75	0.68	106.5	157.4	0.56	0.47	4.4	17.9	2.3	9.3	0.33	-0.47
El Mochito	0.90	0.89	73.3	80.3	0.81	0.79	-20.3	-18.7	-9.8	-9.1	0.79	0.75
Pedernales	0.75	0.72	106.1	138.1	0.56	0.52	-15.4	8.4	-7.5	4.1	0.45	0.07
El Sauce	0.87	0.96	79.4	97.0	0.76	0.92	34.9	79.8	26.2	60.0	0.30	-0.04
La Jutosa	0.78	0.75	128.9	140.9	0.61	0.57	-35.1	-1.8	-12.9	-0.7	0.54	0.46
Pito Solo	0.76	0.67	113.0	130.4	0.57	0.45	-24.3	-23.9	-10.0	-9.8	0.51	0.34
Santa Elena	0.80	0.77	105.1	113.2	0.64	0.60	-28.9	-2.6	-12.2	-1.1	0.60	0.54

Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 15 presenta los coeficientes de determinación (R2) para los diferentes resultados de precipitación en el periodo de validación. Se puede notar que las correlaciones más altas corresponden a los resultados de CHIRPS-Orig seguido por CHIRPS-LS y por último CHIRPS-PT. La estación El Sauce, al solo contener dos años en su registro, de los cuales uno se usó para calibración y otro para validación aparentemente muestra un buen ajuste, sin embargo, el periodo es muy corto para ser evaluado y concluir eficazmente.

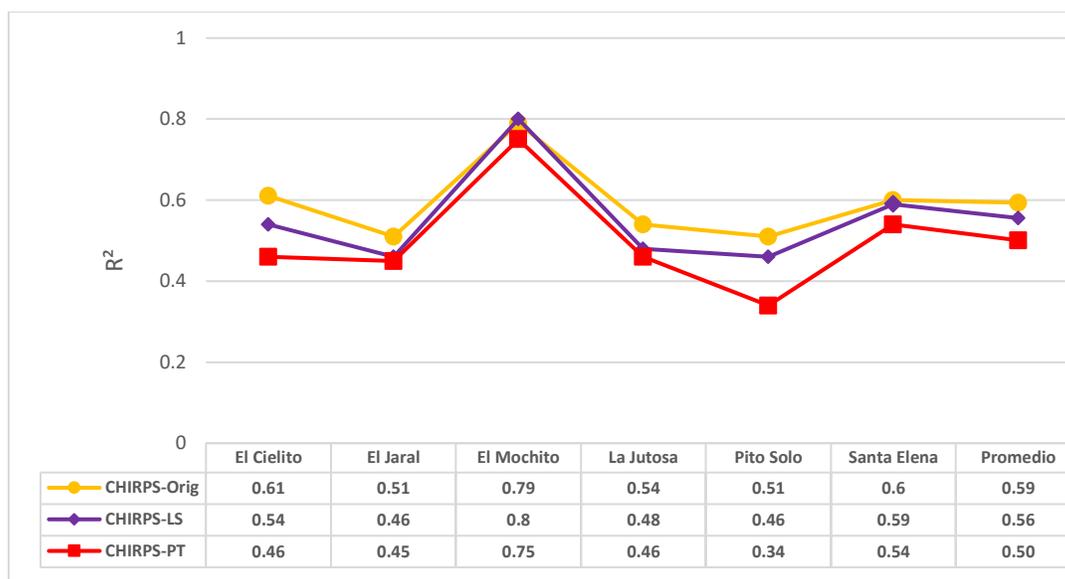
GRÁFICO 15 - COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN (R²) DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN



Fuente: Elaboración propia

En lo que respecta al coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) se puede apreciar que hay tres estaciones que tienen los valores más bajos y son Horconchos, El Sauce y Pedernales (anexo 4.1), los cuales, en la serie original reservada para validación, estaban por debajo de 0.45 y tanto para CHIRPS-LS como para CHIRPS-PT estos valores disminuyen aún más, mostrando una pobre capacidad para representar las variaciones observadas. Es por ello que estas tres estaciones provocan una drástica reducción en el promedio de las estaciones y al removerlas del análisis se consigue un mejor acercamiento al coeficiente NSE general, como se observa en el Gráfico 16. Aquí de forma similar al coeficiente de determinación, los valores más altos de NSE corresponden a CHIRPS-Orig, seguido por CHIRPS-LS y menor NSE para CHIRPS-PT.

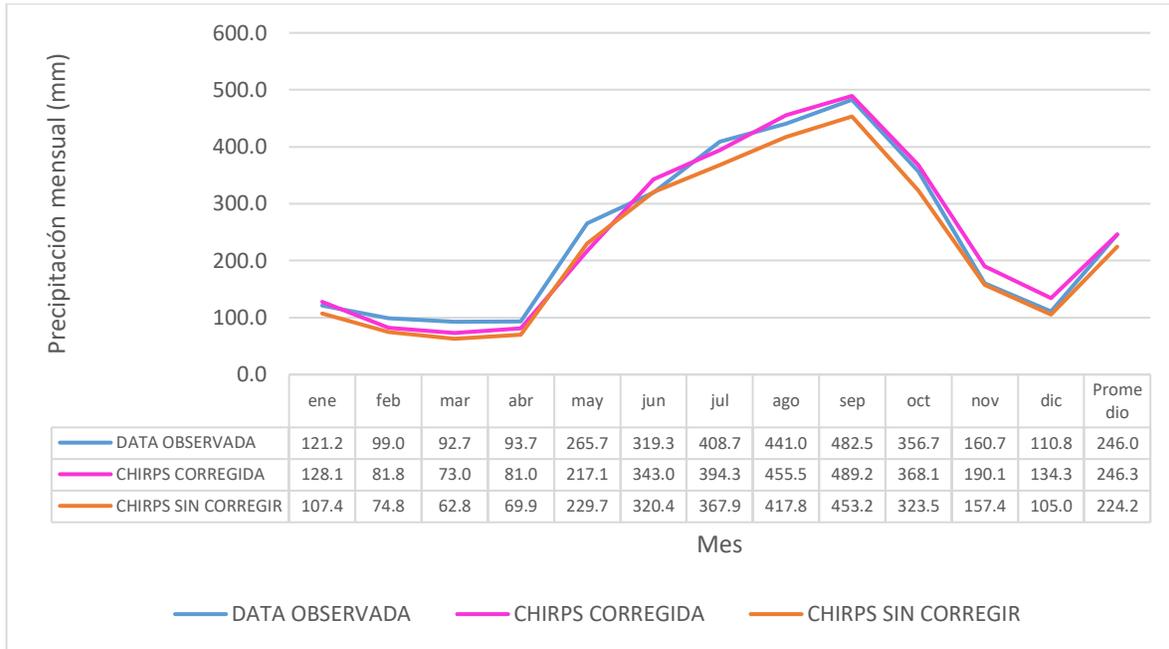
GRÁFICO 16 – COEFICIENTES DE NASH – SUTCLIFFE (NSE) DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN SIN ESTACIONES PEDERNALES, HORCONCITOS Y EL SAUCE



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 17 se aprecian las medias mensuales de la data observada versus la data de CHIRPS corregida y sin corregir. De forma general, el promedio de las estaciones con data de CHIRPS (224.2 mm) mejora al corregirse (246.3 mm) con relación a la data observada (246 mm) esto implica que hay una reducción exitosa en el sesgo. Cabe mencionar que las estaciones Pedernales, Horconchitos y El Sauce fueron removidas del análisis ya que presentan los coeficientes NSE más bajos

GRÁFICO 17 - MEDIAS MENSUALES DE LAS ESTACIONES CONJUNTAS SIN ESTACIONES PEDERNALES, HORCONCITOS Y EL SAUCE



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados anteriores durante el periodo de validación, los resultados en promedio de CHIRPS usando el método de Escalamiento Lineal (LS) presenta un mayor R^2 (0.64), NSE (0.56), PBIAS (2.14), ρ (0.80) y menor RMSE (113.13) en comparación con el método de Transformación con Potencias (PT) que tiene un R^2 (0.61), NSE (0.50), PBIAS (-0.62), ρ (0.78) y RMSE (124.24) que muestran (a diferencia del PBIAS) un desempeño más bajo en las métricas estadísticas, por lo que esto sugiere que las series obtenidas usando el método LS son de mejor calidad. Las gráficas y valores detallados para estas métricas estadísticas pueden encontrarse en la sección de Anexos 4.

Las series mensuales de CHIRPS-LS tienen una menor correlación (ρ) y menor coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) que las series de CHIRPS-Orig durante el periodo de validación (0.56 contra 0.59 y 0.78 contra 0.79 respectivamente) en promedio general. Sin embargo, CHIRPS-LS tiene un menor sesgo que CHIRPS-Orig (2.14% contra -9.96%). Por lo tanto, se puede concluir que aplicar el método LS a los datos de CHIRPS mejora el sesgo al costo de reducir un poco la correlación y el NSE. Sin embargo, el problema de estos productos es que subestiman los días de lluvia y, consecuentemente, sobreestiman la precipitación durante días de lluvia.

8.3 Relleno de datos faltantes

Para el relleno de datos se eligió la estación El Mochito, debido a que las métricas estadísticas para el periodo de validación con la corrección del sesgo aplicada por el método de LS, presentan valores de 0.81 en el R^2 , 0.8 en NSE, 0.9 en ρ , 72.9 mm de RMSE y -5.45% de sesgo, siendo de esta manera la estación con mejor ajuste, mejor capacidad para representar las variaciones observadas, mayor correlación y menor diferencia entre los valores observados y CHIRPS, así como una reducción en el sesgo. En vista de que la estación El Mochito dejó de funcionar en mayo de 2015 y la Estación Las Vegas que pertenece a la nueva red de estaciones comenzó su operación en febrero de 2020, se realizó el relleno de datos faltantes para el periodo 2015 – 2023, utilizando el periodo 2022 – 2023 como una segunda validación para comprobar si la nueva estación de Las Vegas se asemeja a la estación El Mochito.

8.3.1 Características y Ubicación de las estaciones de El Mochito y Las Vegas.

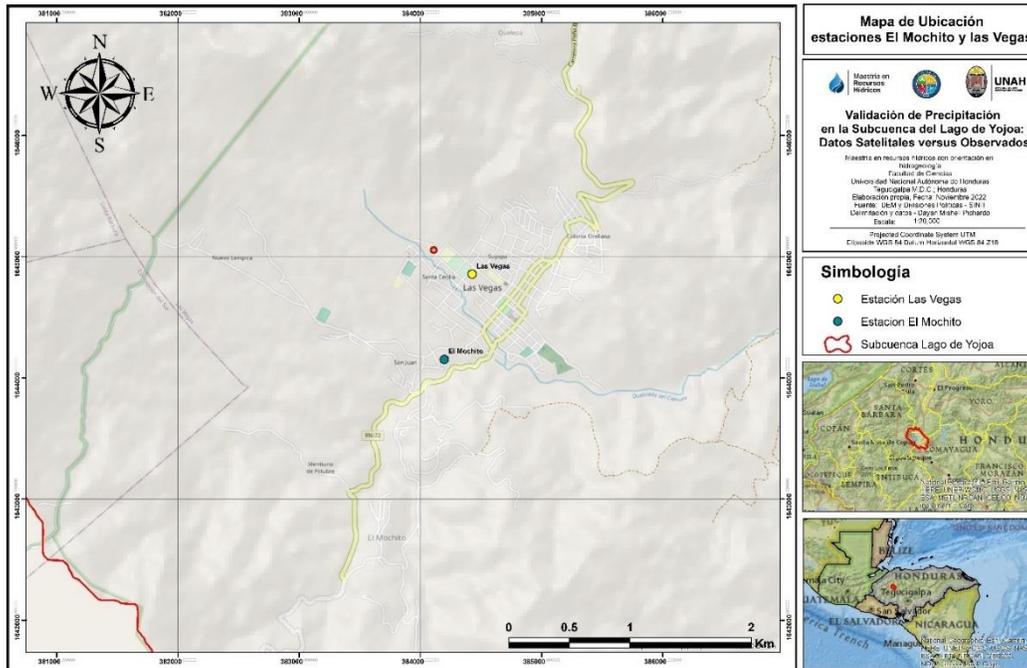
La distancia entre las estaciones de El Mochito y Las Vegas es solamente 739 m, por esta cercanía se podría considerar que la serie de Las Vegas es una continuación de la serie de El Mochito. Por otra parte, vale la pena notar que la estación Las Vegas tomó datos de forma intermitente desde febrero de 2020 y, fue hasta mayo de 2022 que la estación comenzó a tomar información de forma continua. En la Tabla 28 se muestran las coordenadas e información básica de las estaciones El Mochito y Las Vegas y en el Mapa 10 se puede apreciar la cercanía entre ambas.

TABLA 28 - ESTACIONES METEOROLÓGICAS EL MOCHITO Y LAS VEGAS

Estación	Tipo	Fecha Inicial	Fecha Final	Resolución temporal	Coord. UTM (WGS 84)		
					X	Y	Z
El Mochito	Pluviómetrica (PV)	06/1984	05/2015	Diaria	384428	1644855	881
Las Vegas	Hidroclimatológica Compacta (HMOC)	02/2020	Actualidad	15 minutos	384198	1644152	862

Fuente: Unidad de Hidrología ENEE

MAPA 10 - UBICACIÓN DE ESTACIONES EL MOCHITO Y LAS VEGAS



Fuente: Unidad de Hidrología ENEE

8.3.2 Relleno de datos faltantes y resultados mensuales estación El Mochito versus estación Las Vegas.

En la Tabla 29 se muestran los promedios de precipitación mensual para la estación El Mochito y la data satelital proveniente de CHIRPS, así como el factor de corrección obtenido por el método de Escalamiento Lineal (LS).

TABLA 29 - PROMEDIOS MENSUALES Y FACTORES DE CORRECCIÓN USADOS EN EL MÉTODO LS

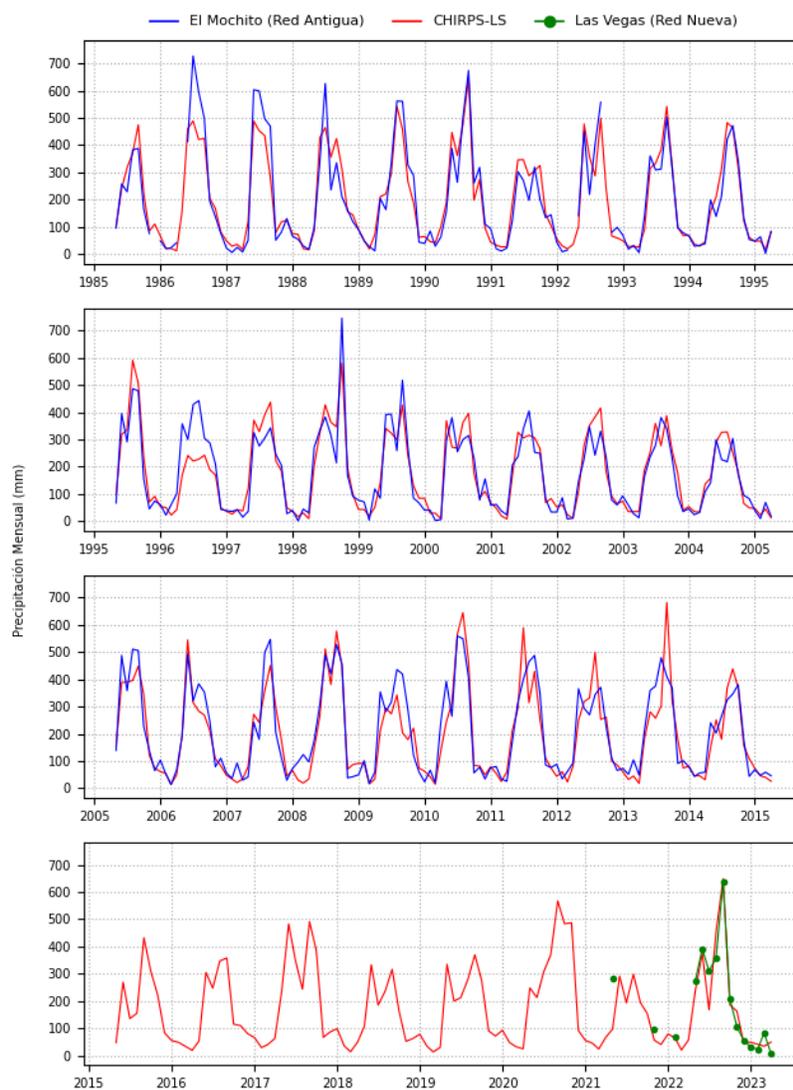
Mes	Promedio El Mochito (mm)	Promedio CHIRPS (mm)	Factor (LS)
Enero	57.9	58.9	0.98
Febrero	38.7	38.3	1.01
Marzo	27	30.6	0.88
Abril	40	46	0.87
Mayo	155.5	158.8	0.98
Junio	334.8	309.6	1.08
Julio	350.8	334.4	1.05
Agosto	379.7	334.3	1.14
Septiembre	413.4	400.1	1.03
Octubre	256	253.1	1.01
Noviembre	132.5	121.4	1.09
Diciembre	79.3	69.5	1.14

Fuente: Elaboración propia

Esta sección presenta los resultados del relleno de la estación El Mochito - Las Vegas utilizando los datos de precipitación CHIRPS y el método de corrección de sesgo Escalamiento Lineal (LS). El Gráfico 18 muestra la serie mensual completa de El Mochito y Las Vegas. En esta figura, se puede notar una muy buena correspondencia entre los datos mensuales de CHIRPS corregidos y los datos del periodo de validación (5/2006 a 4/2015) y de la nueva estación en Las Vegas.

Por otra parte, las estadísticas mensuales de ambas estaciones se muestran en la Tabla 30, donde se puede observar que a nivel mensual los datos CHIRPS, tanto corregidos como crudos, explican muy bien la varianza de estas estaciones: 81% del Mochito en el periodo de validación, y 85% de Las Vegas.

GRÁFICO 18 - SERIE COMPLETA EL MOCHITO Y LAS VEGAS



Fuente: Elaboración propia

El método LS elimina el sesgo completamente en el periodo de calibración y lo reduce en alrededor de 4% tanto para el periodo de validación como para los datos de la estación Las Vegas. Por otra parte, en la Tabla 30 se puede observar que, exceptuando los sesgos, las estadísticas tienden a ser menores para los datos corregidos que para los datos originales. Esto sugiere que la mejora del sesgo se logra al costo de reducir ligeramente el resto de las estadísticas. Se puede notar que la mejora del sesgo es ligera, esto se debe a que los factores de corrección para la estación El Mochito son bajos, oscilan entre 0.88 y 1.14, y a que el sesgo de la serie cruda es relativamente bajo. Pero es importante recalcar que este no es el caso para todas las estaciones.

TABLA 30 - ESTADÍSTICAS MENSUALES DE LA ESTACIÓN EL MOCHITO/LAS VEGAS

Estadística	Calibración (El Mochito)		Validación (El Mochito)		Red Nueva (Las Vegas)	
	Original	Corregida LS	Original	Corregida LS	Original	Corregida LS
ρ	0.928	0.930	0.900	0.901	0.930	0.923
R^2	0.861	0.865	0.811	0.812	0.865	0.852
RMSE (mm)	63.65	61.34	73.26	72.86	68.41	70.71
Bias (mm)	-9.37	0.00	-20.30	-11.26	-25.46	-17.54
PBIAS (%)	-4.94	0.00	-9.83	-5.45	-13.05	-8.99
NSE	0.855	0.865	0.793	0.795	0.843	0.832

Fuente: Elaboración propia

La serie de CHIRPS corregida (CHIRPS-LS) presenta una muy buena correlación a nivel mensual (0.92) y un bajo sesgo (-8.99%), así como un buen NSE (0.83), por esta razón, CHIRPS-LS se puede utilizar para rellenar los datos faltantes de la Vegas. De esta forma, la serie rellenada presentará muy buenos valores a nivel mensual, aunque la correlación a nivel diaria sea baja. Se puede notar que hay una buena correspondencia entre las estadísticas del periodo de validación y las correspondientes a la estación Las Vegas, como se muestra en la Tabla 30. Esto indica que la serie corregida de CHIRPS es representativa de ambas series.

Al utilizar la serie rellenada con CHIRPS-LS se debe tener en cuenta las limitaciones de la misma. Por ejemplo, la serie corregida de CHIRPS subestima el número de días húmedos, y sobreestima el promedio durante los días de lluvia.

9. CONCLUSIONES

- A. El objetivo de validar la calidad de los datos satelitales para el relleno en series de datos observados se cumple de manera concluyente para la data a nivel mensual. La aplicación de métricas estadísticas fundamentales, como la correlación de Pearson (ρ), el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación (R^2), y la evaluación del sesgo, ha revelado resultados consistentes en la mayoría de las estaciones. Salvo El Planón, todas las estaciones exhibieron correlaciones significativamente altas ($\rho > 0.79$), señalando una marcada concordancia con las mediciones satelitales y una destacada habilidad para reflejar variaciones en la precipitación observada. El NSE varió, alcanzando su punto máximo en El Mochito (0.84) y mostrando niveles moderados para otras estaciones (entre 0.6 y 0.73). Además, el R^2 superó 0.6 en todas las estaciones y llegó a un notable 0.84 en el caso de El Mochito. La implementación de pruebas adicionales de tendencia, aleatoriedad, homogeneidad y diferencia de medias y medianas consolidan la conclusión de que la precipitación de las series en tierra se asemeja sustancialmente a la de CHIRPS a nivel mensual, validando su uso para complementar las series temporales de datos observados.
- B. La data satelital de CHIRPS corregida mediante el método de escalamiento lineal (LS), se identificó como la fuente satelital más alineada con la climatología local en comparación con CMORPH. La evaluación de la fuente climatológica satelital CMORPH, presentaba sobreestimaciones sustanciales, lo que motivó su exclusión del análisis debido a discrepancias significativas con las estaciones terrestres de referencia. En contraste, esto subraya la importancia de una selección cuidadosa de fuentes climatológicas y metodologías de corrección para mejorar la precisión en el relleno de datos, consolidando así la confianza en la representación de la climatología de la región de estudio.

C. El objetivo de asegurar la continuidad en el registro climático desde 1981 hasta 2023 mediante el relleno de datos se logró a nivel mensual, relleno de 6 años de datos (72 meses) con una correlación a nivel mensual de hasta 0.92, sesgo de -8.99% y NSE de 0.83. Combinando la data de la estación antigua El Mochito, la data de CHIRPS corregida y la data de la nueva estación Las Vegas, se logró conformar una base de datos validada a nivel mensual. Estos resultados resaltan la efectividad de CHIRPS-LS en el relleno de datos faltantes a nivel mensual y aseguran una secuencia coherente y precisa en el registro climático a lo largo de las décadas evaluadas.

10. LIMITANTES & OPORTUNIDADES DE FUTURAS INVESTIGACIONES

- A. Al utilizar la serie rellena con CHIRPS-LS se debe tener en cuenta las limitaciones de la misma. Por ejemplo, CHIRPS subestima el número de días húmedos, y sobreestima el promedio durante los días de lluvia. Estas limitaciones podrían afectar la representación precisa de eventos meteorológicos específicos y sugerirían la necesidad de una cuidadosa interpretación de los datos, especialmente en contextos donde la frecuencia y la intensidad de la lluvia son factores críticos. Estas observaciones abren oportunidades para investigaciones futuras que busquen mejorar la precisión de la corrección y la representación de eventos climáticos.
- B. Este análisis es representativo de esta zona de estudio, no de todo el territorio hondureño y dentro de la misma subcuenca se validó con una estación de la nueva red por lo que podría extenderse a las demás estaciones en estudios posteriores. La extrapolación de los resultados de este estudio a otras regiones climáticas debe realizarse con precaución. Las condiciones meteorológicas y la disponibilidad de estaciones terrestres de referencia pueden variar significativamente en diferentes áreas geográficas. Por tanto, es fundamental considerar las características específicas de la región de interés antes de aplicar los métodos y conclusiones de este estudio.
- C. La utilización de datos satelitales y métodos de corrección puede estar sujeta a cambios en las plataformas satelitales, algoritmos de procesamiento y actualizaciones en las metodologías de corrección. Esto sugiere la importancia de verificar la disponibilidad de datos actualizados y ajustar los métodos según sea necesario para mantener la relevancia de las conclusiones a lo largo del tiempo.
- D. La representatividad de la localización de las estaciones terrestres de referencia utilizadas en este estudio puede ser un factor limitante. La ubicación estratégica de estas estaciones y su distancia con respecto a la zona de estudio podrían influir en la validez de las comparaciones. Se recomienda que futuras investigaciones consideren una red más extensa de estaciones de referencia para mejorar la robustez de los resultados.
- E. El enfoque de relleno de datos utilizado, aunque efectivo en este contexto, podría no ser óptimo para todas las variables meteorológicas o condiciones climáticas. Investigaciones adicionales podrían explorar la aplicación de métodos específicos para diferentes variables, como la temperatura o la velocidad del viento, y adaptar las estrategias de corrección según las particularidades de cada parámetro climatológico.

11. CONTRIBUCIONES

11.1 Trabajos de Investigación

11.1.1 Título del Trabajo de Investigación: Estimar el balance hídrico de la cuenca del Lago de Yojoa mediante el modelaje integrado de HydroBID WaterALLOC y ModFlow.

Autores: Wilber Manrique, Gerson Urtecho, Manuel Conde, Dayan Pichardo

Institución o Entidad: Unidad de Hidrología - Empresa Nacional de Energía Eléctrica

Fecha de Finalización: Agosto 2022

Resumen: Este estudio fusionó aportes de hidrología, cambio climático e hidrogeología para desarrollar el balance hídrico en la Cuenca del Lago de Yojoa. Bajo condiciones naturales, el análisis reveló la danza estacional de la precipitación y escorrentía, mientras que en escenarios modificados, emergieron déficits preocupantes de febrero a mayo.

La evaluación minuciosa de las demandas poblacionales y agrícolas señaló déficits durante los meses críticos, proyectando posibles impactos en la generación de energía debido a cambios en los flujos hacia el Lago de Yojoa. La interacción compleja entre aguas superficiales y subterráneas se evaluó mediante un modelo numérico en ModFlow, conectado a WaterALLOC. Se destacó la limitada entrada de agua subterránea, con el acuífero cuaternario emergiendo como un jugador clave.

Las conclusiones subrayan la urgencia de construir reservorios para mitigar los déficits hídricos y abogan por una gestión más robusta de los recursos hídricos en esta región vital. Este trabajo no solo revela la complejidad del sistema hídrico del Lago de Yojoa, sino que también proporciona fundamentos esenciales para la toma de decisiones y la planificación sostenible en la región.

11.1.2 Título del Trabajo de Investigación: Impulsando la Toma de Decisiones Basada en Pronósticos Hidrológicos: Herramientas, Estrategias Innovadoras y Mejores Prácticas.

Autores: Manuel Conde, Dayan Pichardo

Institución o Entidad: Unidad de Hidrología - Empresa Nacional de Energía Eléctrica

Fecha de Finalización: Junio 2022

Resumen: Este proyecto investigativo, liderado por la Unidad de Hidrología de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica, se centra en mejorar la toma de decisiones para las centrales hidroeléctricas mediante la generación precisa de pronósticos hidrológicos, destacando la importancia crítica del monitoreo de variables climáticas como la precipitación y calibración de modelos con series históricas como insumo clave. El objetivo primordial consistió en optimizar la planificación energética, especialmente vital durante eventos meteorológicos extremos como huracanes. Para alcanzar este propósito, se implementaron diversas herramientas, como GeoGLOWS, CAFFGS, algoritmos internos y el balance hídrico.

La metodología abordó la selección y evaluación meticulosa de modelos climáticos, respaldada por el uso de herramientas avanzadas para el análisis de datos meteorológicos e hidrológicos en tiempo real. Los resultados sobresalieron al demostrar la optimización en la gestión operativa de las centrales hidroeléctricas. Las conclusiones subrayaron la imperante necesidad de perfeccionar modelos hidrológicos, promover activamente la colaboración interinstitucional y la recomendación clave de implementar un Sistema de Soporte de Decisiones automatizado, alimentado por la red de estaciones hidroclimáticas y pronósticos de precipitación a corto y mediano plazo.

11.1.3 Título del Trabajo de Investigación: Estudio hidrológico e hidráulico para la Central Hidroeléctrica Cañaverál – Río Lindo en la Subcuenca del Lago de Yojoa

Autores: Manuel Conde, Dayan Pichardo

Institución o Entidad: Unidad de Hidrología - Empresa Nacional de Energía Eléctrica

Fecha de Finalización: Octubre 2021

Resumen: Para evaluar la viabilidad técnica de obras de infraestructura y cumplir con regulaciones ambientales, se realizó un exhaustivo análisis de las condiciones hidrológicas e hidráulicas del entorno. Empleando la metodología del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE. UU., se implementó el modelo HEC-HMS para simular hidrogramas de escorrentía, considerando eventos extremos con un periodo de retorno de 50 años. La modelación hidráulica con HEC-RAS permitió un análisis detallado de las condiciones geométricas del cauce. La caracterización de lluvias extremas y la generación de

hietogramas de diseño fueron fundamentales, destacando la importancia de comprender la precipitación en proyectos de infraestructura eléctrica.

Este estudio subraya la necesidad de considerar la variabilidad climática y adaptar modelos a cambios en la cobertura del suelo para una planificación precisa de proyectos de infraestructura eléctrica en entornos hidrológicamente sensibles.

11.2 Publicaciones

11.2.1 Estado de la publicación: En elaboración

Autores: Dayan Pichardo, Lenin Henríquez

Revista: Journal of Hydrology

Título del artículo: Satelital precipitation data validation in Central America: The case of the Yojoa's Lake Basin

Fecha de publicación: No definida

Resumen: Accurate precipitation data is needed and is crucial for water resources management and infrastructure planning. Although its importance, many times the information does not exist or is incomplete. Satellite data may supply data where is needed but requires validation. The basin of the Yojoa's Lake in Honduras was selected for analysis due its importance in hydropower generation and multiple stakeholders involved in water management. Dayli data from CHIRPS and CMORPH satellite databases were compared with ground stations. CMORPH did not present correlation (value inconsistency), but monthly CHIRPS data highlighted high correlation with ground stations ($r^2 > 0.6$) representing monthly variations. Using El Mochito station as a reference, monthly data voids between 2015-2022 were completed with corrected CHIRPS (NSE=0.87) using the Linear Scaling bias correction method and validating its consistency with the new Las Vegas station between 2022-2023 (NSE=0.8). This approach underlines the usefulness of CHIRPS to complete monthly data in Central America's region, consolidating its usefulness in decision-making and sustainable water resources management.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, K., Shahid, S., Ismail, T., Nawaz, N., & Wang, X. (2018). Absolute homogeneity assessment of precipitation time series in an arid region of Pakistan. *Atmósfera*, 31(3), 301-316.
- Allaire, J. (2011). RStudio: Integrated Development Environment for R. *The R User Conference* (pág. 14). Coventry, United Kingdom: University of Warwick.
- Asencios, H. (2016). *Corrección del sesgo de la precipitación estimada por satélite para la simulación de caudales en la cuenca del río Rímac*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Asociación de Municipios del Lago de Yojoa y su Área de Influencia (Amuprolago). (2021). *Asociación Mesa de Organizaciones Comanejadoras de Áreas Protegidas de Honduras (MOCAPH)*. Obtenido de <https://mocaph.wordpress.com/miembros/capitulo-centro-sur/amuprolago/>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2015). *Manual del software TREND - Pruebas estadísticas de series de tiempo hidrológicas*. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2022). *Balance Hídrico Dinámico Cuenca Lago de Yojoa*. Tegucigalpa, Honduras: Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Bozkurt, D., & Randanelli, R. (21 de Diciembre de 2020). *El papel clave de los satélites en la observación de la Tierra desde el espacio*. Obtenido de Center for Climate and Resilience Research (CR2): <https://www.cr2.cl/el-papel-clave-de-los-satelites-en-la-observacion-de-la-tierra-desde-el-espacio-primera-parte/>
- Cabrera, J. (2017). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). (2003). *Análisis de Contexto Territorial (ACT) y Plan de de Gestión de los Recursos Naturales (PGRN) de la subcuenca del Lago de Yojoa*. Tegucigalpa, Honduras: MARENA.
- Chaudhary, S., & Dhanya, C. (2019). Investigating the performance of bias correction algorithms on satellite-based precipitation estimates. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI*. 11149, págs. 1-7. India: Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Delhi.
- Chiew, F., & Siriwardena, L. (2005). *trend, trend / change detection software User Guide*. Australia: CRC for Catchment Hydrology.
- Confederación Hidrográfica España (CHE). (2021). *La Cuenca*. Obtenido de Caudales Circulantes: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2221&idMenu=2188>
- Cordeiro, A., & Blanco, C. (2021). Assessment of satellite products for filling rainfall data gaps in the Amazon region. *Natural Resource Modeling*, 34.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea, Tomo I*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Delgadillo, F. (2020). *Análisis comparativo de caudales obtenidos mediante modelación hidrológica (HydroBID, WEAP) aplicando escenario de cambio climático, zona de estudio cuenca Katari y lago menor del Titicaca La Paz-Bolivia*. Universidad de Alcalá; Universidad Rey Juan Carlos, Alcalá de Henares, España.
- Departamento de Estudio de Recursos. (2014). *Balance Hídrico Superficial y Subterráneo Cuenca Lago de Yojoa*. Tegucigalpa, Honduras: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).
- Desert Research Institute (DRI); University of California Merced (UCMERCED), Google Earth Engine (GEE), Bureau of Land Management, National Integrated Drought Information System (NOAA-NIDIS).

- (2023). *On-Demand Insights from Climate and Earth Observations Data*. Obtenido de <https://app.climateengine.org/climateEngine>
- Dirección Meteorológica de Chile, Subdepartamento Climatología y Meteorología Aplicada, Sección Meteorología Agrícola (DGAC). (2022). *Manual de Agrometeorología*. Chile: Dirección General de Aeronáutica Civil.
- Dore, M. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know? *Environment international*, 1167-1181.
- Duarte, L., Formiga, K., & Costa, V. (2022). Comparison of Methods for Filling Daily and Monthly Rainfall Missing Data: Statistical Models or Imputation of Satellite Retrievals? *Water*, 14(19), 3144.
- Fang, G., Yang, J., Chen, Y., & Zammit, C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2547-2559.
- Fu, X., Kuo, C., & Gan, T. (2014). Change point analysis of precipitation indices of Western Canada. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2592-2607.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., . . . Michaelsen, J. (2015). *The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes*. Obtenido de www.nature.com: <https://www.nature.com/articles/sdata201566>
- Global Water Partnership (GWP). (2011). *¿QUÉ ES CUENCA HIDRÓLOGICA?* Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- 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.
- Gopi, A., Sharma, P., Sudhakar, K., Ngui, W., Kirpichnikova, I., & Cuce, E. (2023). Weather Impact on Solar Farm Performance: A Comparative Analysis of Machine Learning Techniques. *Sustainability*, 439.
- Guijarro, J. (2004). Climatol: Software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos. *El Clima entre el Mar y la Montaña. Serie A, No. 4*, pág. 10. Santander, España: Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria.
- Guijarro, J. (2019). *Homogeneización de series climáticas con Climatol*. Islas Baleares, España: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).
- Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., & Piontek, F. (2013). A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 18.
- House, P. (2002). *Diagnóstico Ambiental del Lago de Yojoa, Honduras*. Tegucigalpa, Honduras: The Nature Conservancy.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales (IDEAM). (2019). *Glosario Meteorológico*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Estadística Honduras (INE). (2011). *Precipitación Pluvial en Honduras 2011-2015*. Tegucigalpa, Honduras: Instituto Nacional de Estadística Honduras (INE).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Glosario. (S. Planton, Ed.) *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, 204.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2015). *CAMBIO CLIMÁTICO 2014: Informe de Síntesis*. Ginebra, Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático(IPCC).
- Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP). (03 de 04 de 2022). *ISIMIP*. Obtenido de <https://www.isimip.org/>
- Jimeno, P., Blanco, P., Pérez, J., Cecilia, J., & Senent, J. (2021). Impact Assessment of Gridded Precipitation Products on Streamflow Simulations over a Poorly Gauged Basin in El Salvador. *Water*, 13(18), 1-21.
- Joyce, R., Janowiak, J., Arkin, P., & Xie, P. (2004). CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 487-503.
- Kay, K., Theerapol, C., Watin, T., & Piyamarn, S. (2020). Assessing Forecast Quality of HII Flood Forecast Service in Chao Phraya River Basin. *The 25th National Convention on Civil Engineering*, (págs. 1-10). Chonburi, Tailandia.
- Kocsis, T., Kovács, I., & Anda, A. (2020). Homogeneity tests and non-parametric analyses of tendencies in precipitation time series in Keszthely, Western Hungary. En S. Link, *Theoretical and Applied Climatology* (Vol. 13, págs. 849-859). Springer Link.
- Krajewski, W., & Smith, J. (2002). Radar Hydrology: Rainfall Estimation. *Advances in Water Resources*, 25(8-12), 1387-1394.
- Machiwal, D., & Jha, M. (2012). *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*. Dordrecht, Países Bajos: Springer.
- Mather, J. (1991). A History of Hydroclimatology. *Physical Geography*, 12, 260-273.
- Méndez, R. (2016). *Productos de precipitación satelital de alta resolución espacial y temporal en zonas de topografía compleja*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Molnar, P. (2011). *Calibration, Watershed Modelling*. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, Zürich. Switzerland.
- Murrell, P. (2020). *The Grid Graphics Package*. Obtenido de <https://github.com/pmur002/gridgraphics>
- Naghttini, M. (2017). *Fundamentals of Statistical Hydrology*. Brasil: Springer International Publishing.
- Nasrabadi, E., Abolfazl, S., & Asakereh, H. (2013). Comparison of Gridded Precipitation Time Series Data in APHRODITE and Asfazari Databases within Iran's Territory. *Atmospheric and Climate Sciences*, 3(2), 235-248.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). (2018). *Climate Data Record (CDR) Program - Climate Algorithm Theoretical Basis Document (C-ATBD) [Precipitation - CMORPH]*. ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA: U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2022). *NOAA CPC Morphing Technique ("CMORPH")*. Obtenido de National Weather Service - Climate Prediction Center: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph_description.html
- Noether, G. (1992). Introduction to Wilcoxon (1945) Individual Comparisons by Ranking Methods. En S. Kotz, & N. Johnson, *Breakthroughs in Statistics. Springer Series in Statistics* (págs. 191-1992). New York: Springer.

- Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). (2010). *Estudio del impacto del cambio climático sobre la agricultura y la seguridad alimentaria en la Republica Bolivariana de Venezuela*. Venezuela: Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO).
- Organización Mundial de Meteorología (OMM). (Julio de 2022). *Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR)*. Obtenido de <https://space.oscar.wmo.int/satellites>
- Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD). (2007). *Data and Metadata Reporting and Presentation Handbook*. París, Francia: OECD.
- Paredes-Trejo, F., Barbosa, H., & Lakshmi, T. (2017). Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of Arid Environments*, 26-40.
- Partal, T., & Kahya, E. (2006). Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes*, 20(9), 2011-2026.
- Pettitt, A. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, Vol. 28, 126-135.
- Pohlert, T. (2023). *Trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection*. Obtenido de <https://CRAN.R-project.org/package=Trend>
- Quesada, B., Wetterhall, F., & Westerberg, I. (2019). Characterising droughts in Central America with uncertain hydro-meteorological data. *Theoretical and Applied Climatology*, 2123-2138.
- R Core Team and contributors worldwide. (2023). *The R Stats Package*. Obtenido de <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/00Index.html>
- Rakhecha, P., & Singh, V. (2009). Precipitation and Its Measurement. En P. Rakhecha, & V. Singh, *Applied Hydrometeorology* (págs. 190-218). Springer.
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J. (2016). *SWAT Soil & Water Assessment Tool*. Obtenido de CMhyd. Climate Change for Watershed Modeling: <https://swat.tamu.edu/software/cmhyd/>
- República de Honduras. (2009). Acuerdo Ejecutivo No. 1422-2009 - Reglamento general de la ley de protección de la cuenca del Lago de Yojoa (Hondulago). *Diario Oficial La Gaceta*, págs. A3-A32.
- Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas (Mi Ambiente). (06 de Octubre de 2015). Tabla de Categorización Ambiental. *La Gaceta*, 33,851, pág. 57.
- Şen, Z. (2012). An innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9), 1042-1046.
- Sievert, C., Parmer, C., Hocking, T., Chamberlain, S., Ram, K., Corvellec, M., . . . Bruggemann, S. (2022). *Create Interactive Web Graphics via 'plotly.js'*. Obtenido de <https://plotly-r.com/>
- Silva, E., Campelo, J., Almeida, F., & Silva, R. (2019). Homogeneity Evaluation of Historical Rainfall and Temperature Series in Mato Grosso. *Journal of Experimental Agriculture International*, 35(3), 1-7.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). (2021). *SIAC*. Obtenido de Oferta de agua: <http://www.siac.gov.co/ofertaagua>
- Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH). (2021). *SIRH*. Obtenido de Demanda: <http://capacitacion.sirh.ideam.gov.co/homeSIRH/HOME/demanda-n3.html>
- Smith, T., Arkin, P., Bates, J., & Huffman, G. (2006). Estimating Bias of Satellite-Based Precipitation Estimates. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 841-856.

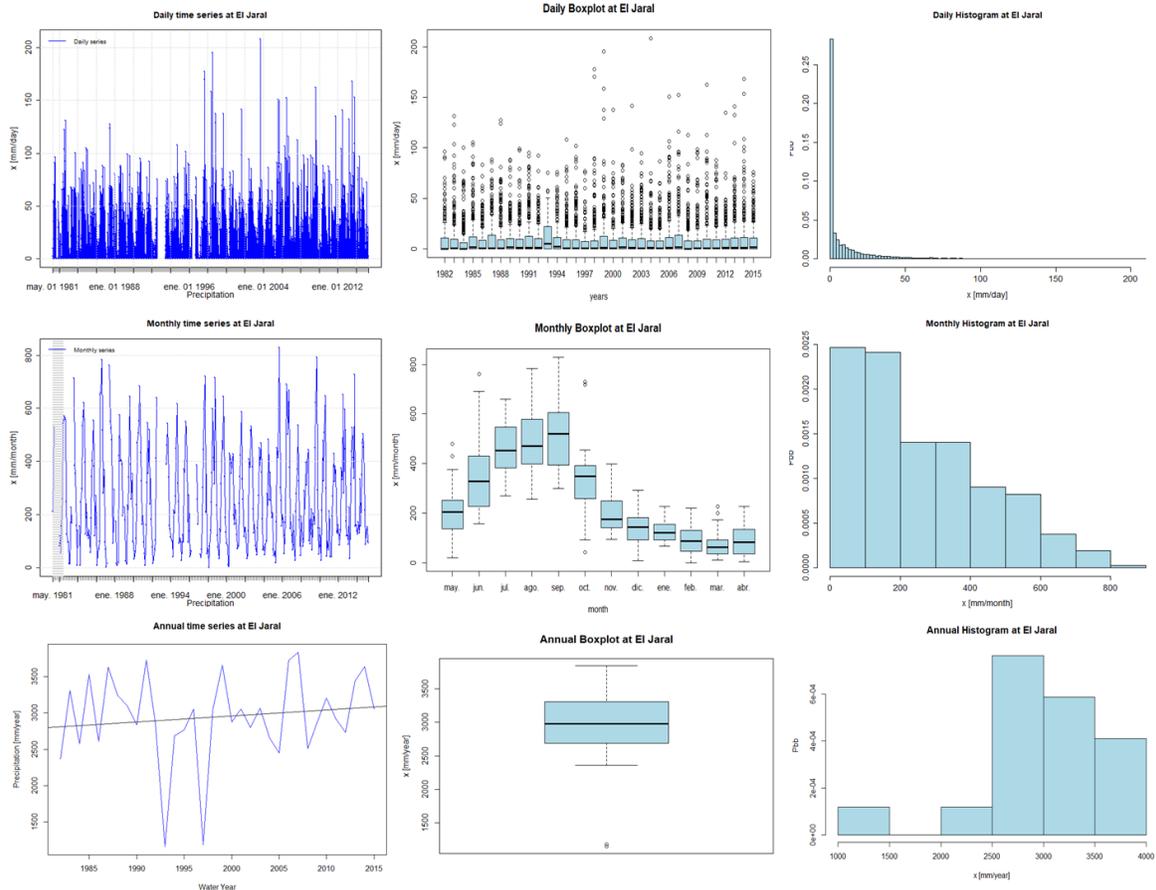
- Soo, E., Jaafar, W., Lai, S., Othman, F., Elshafie, A., Islam, T., . . . Hadi, H. (2020). Evaluation of bias-adjusted satellite precipitation estimations for extreme flood events in Langat river basin, Malaysia. *Hydrology Research*, 51(1), 105-126.
- Studer, E. (2007). *La contaminación ambiental del Lago de Yojoa: Un estudio bibliográfico respecto a un Sistema de Indicadores Ambientales*. Tegucigalpa, Honduras: Faculté Environnement, Naturel, Construit (ENAC) .
- 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.
- Ticona, A. (2009). *Modelación hidrológica de escenarios futuros de caudales medios con la aplicación del modelo hidrológico WEAP en la cuenca del río llave - Puno*. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Unidad de Hidrología (UH). (2022). *Balance Hídrico Dinámico de la Subcuenca del Lago de Yojoa*. Tegucigalpa, Honduras.
- University of California of Santa Barbara (UC Santa Barbara). (02 de Abril de 2022). *CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations*. Obtenido de Climate Hazards Center UC Santa Barbara: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- 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) .
- Wald, A., & Wolfowitz, J. (1943). An Exact Test for Randomness in the Non-Parametric Case Based on Serial Correlation. *The Annals of Mathematical Statistics* 14, 378-388.
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Pearson.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Obtenido de <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Yang, W., Andréasson, J., Graham, L., Olsson, J., Rosberg, J., & Wetterhall, F. (2010). Distribution-based scaling to improve usability of regional climate model projections for hydrological climate change impacts studies. *Hydrology Research*, 211-229.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 - A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. *Water International* 30 (4), 487-500.
- Yu, Y., & Chen, X. (2011). Study on the Percentage of Trend Component in a Hydrological Time Series Based on Mann-Kendall Method. *Journal of Natural Resources*, 26(9), 1585-1591.
- Zambrano, M. (2020). *hydroTSM: Gestión, Análisis e Interpolación de Series de Tiempo para Modelado Hidrológico*. Obtenido de <https://github.com/hzambran/hydroTSM>

13. ANEXOS

Anexo 1 - Gráficos lineales, diagrama de cajas e histograma para la precipitación diaria, mensual y anual observada en las estaciones

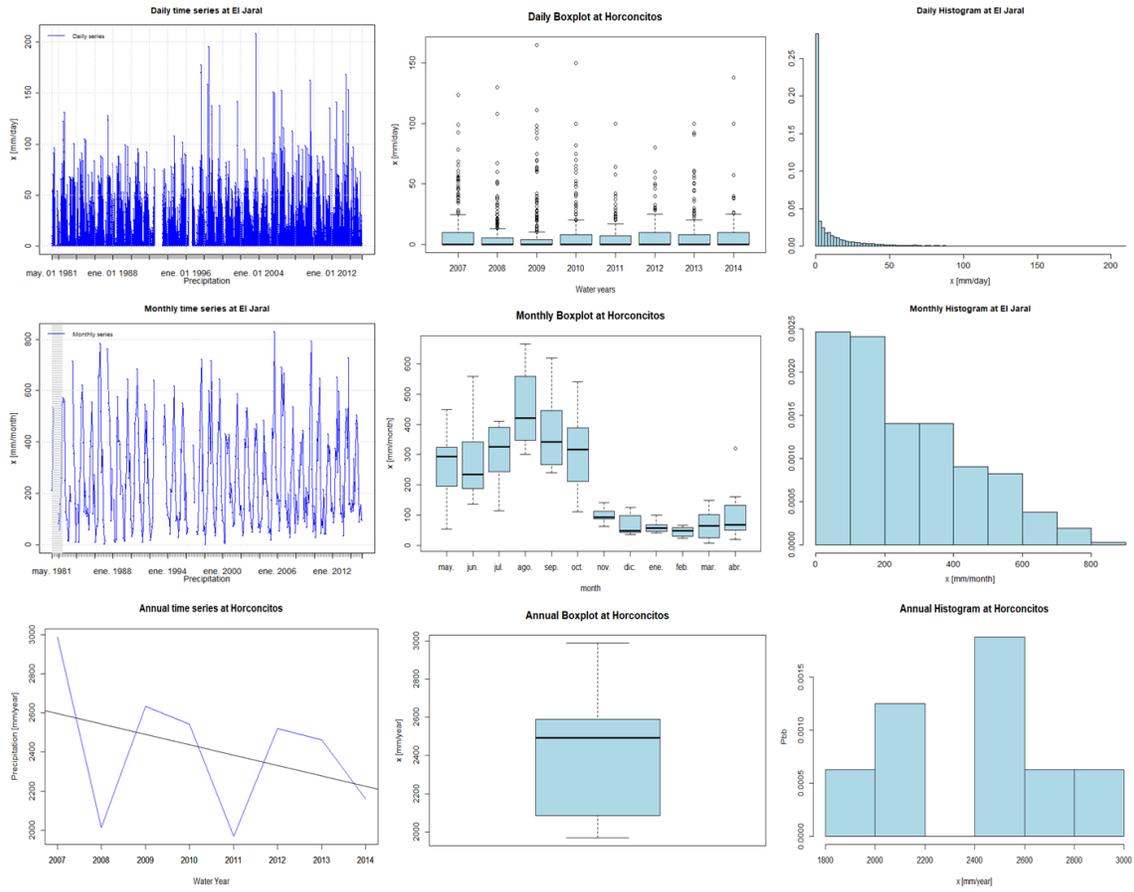
Esta sección presenta gráficos lineales, diagramas de cajas e histogramas que ilustran la distribución de la precipitación diaria, mensual y anual observada en cada estación meteorológica. Se ofrece una visión detallada de las variaciones en la precipitación a lo largo del tiempo, proporcionando una comprensión de los patrones climatológicos en cada ubicación específica.

ANEXO 1.1 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN EL JARAL



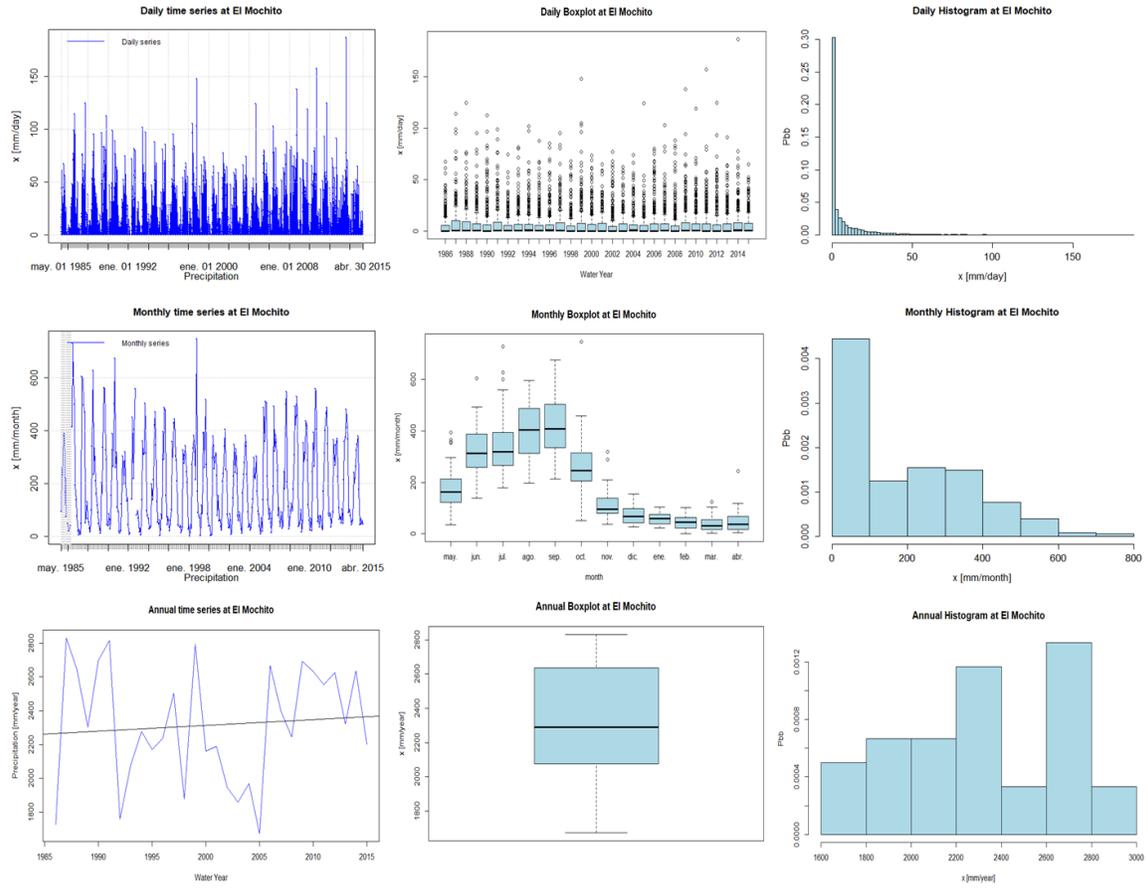
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 1.2 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN HORCONCITOS



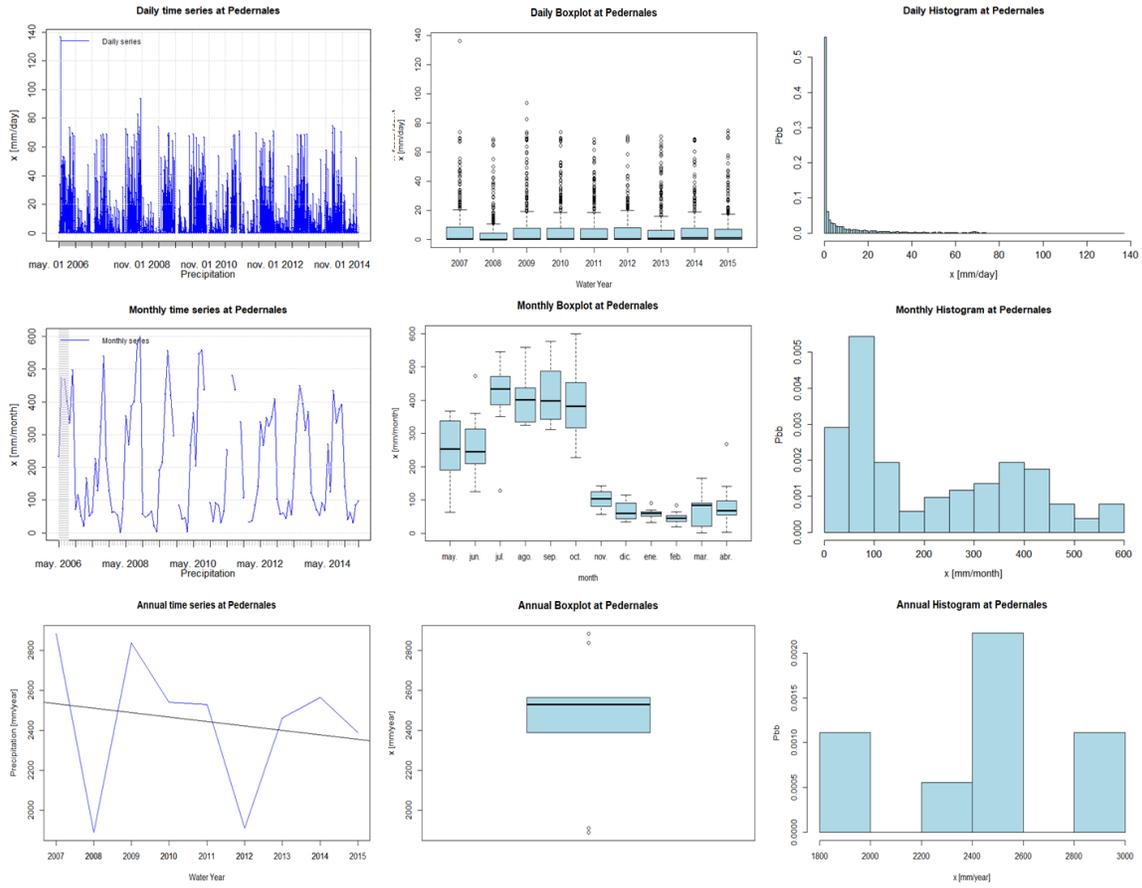
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 1.3 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN EL MOCHITO



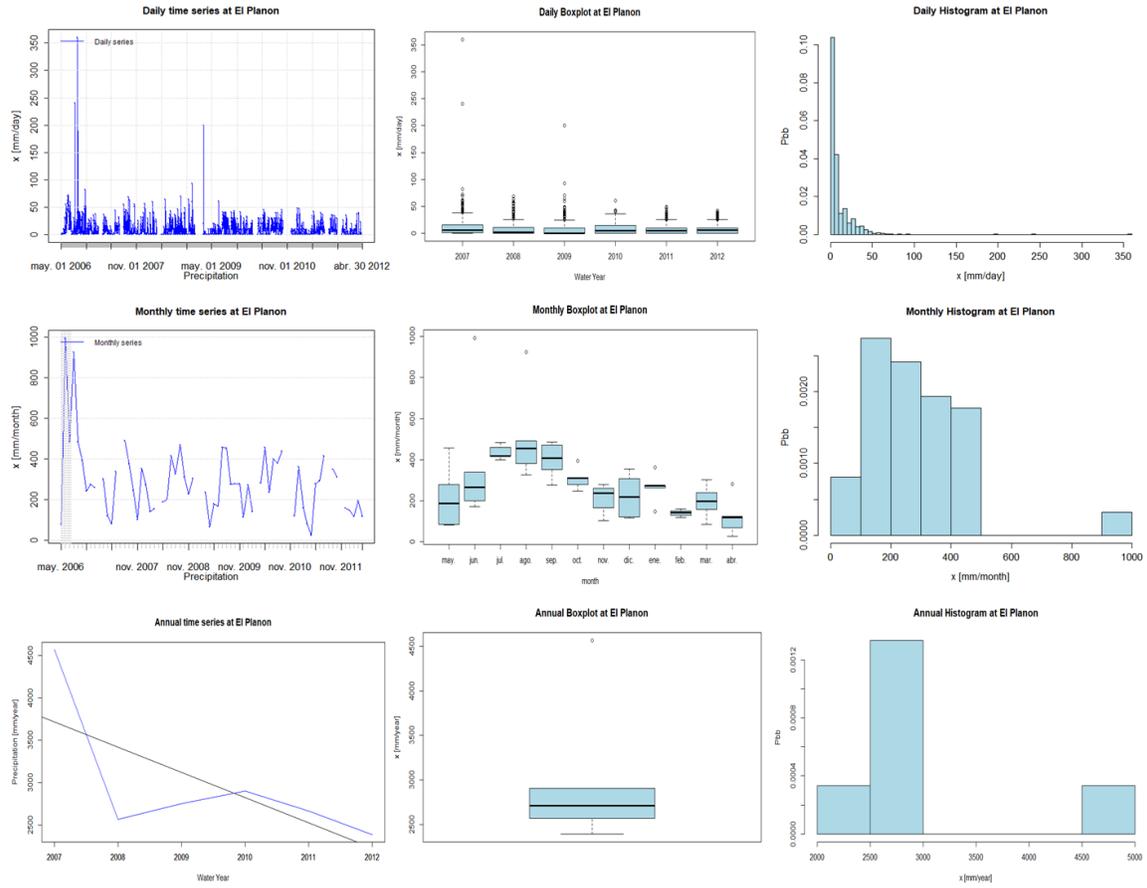
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 1.4 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN PEDERNALES



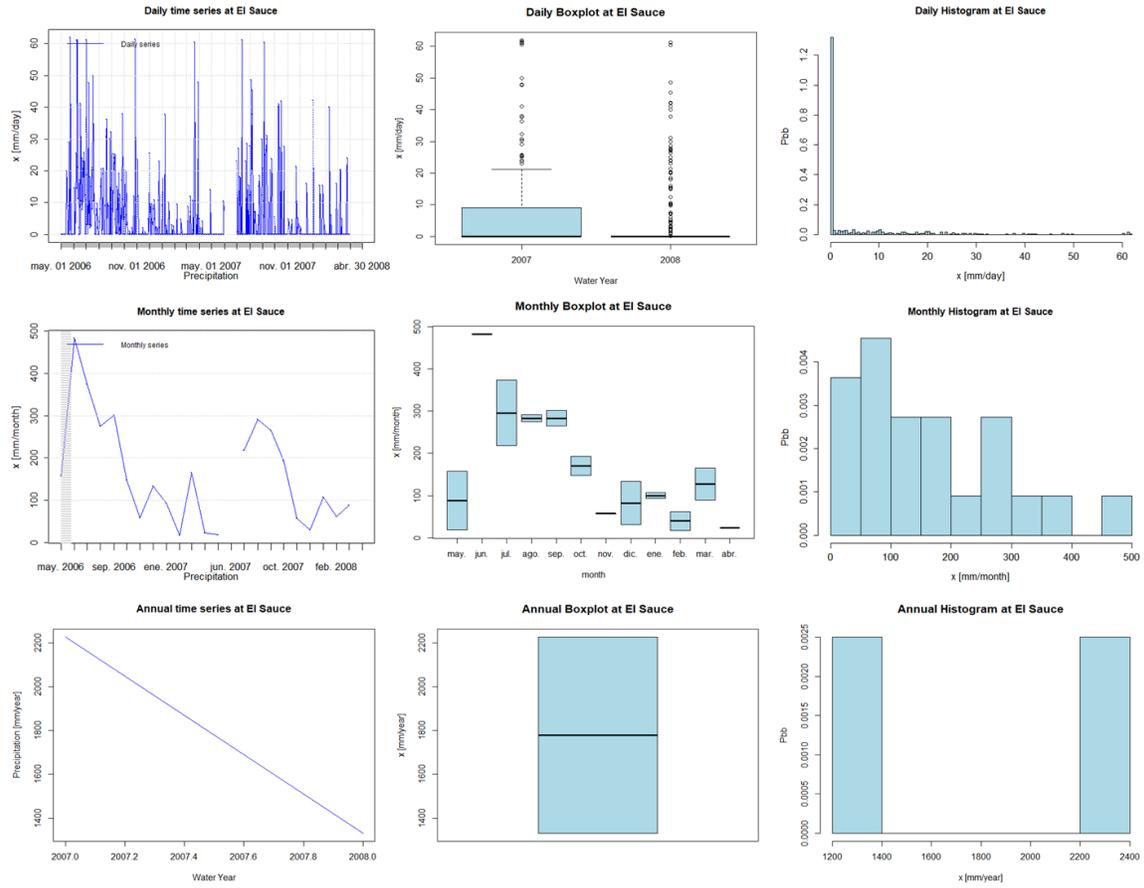
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 1.5 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN EL PLANÓN



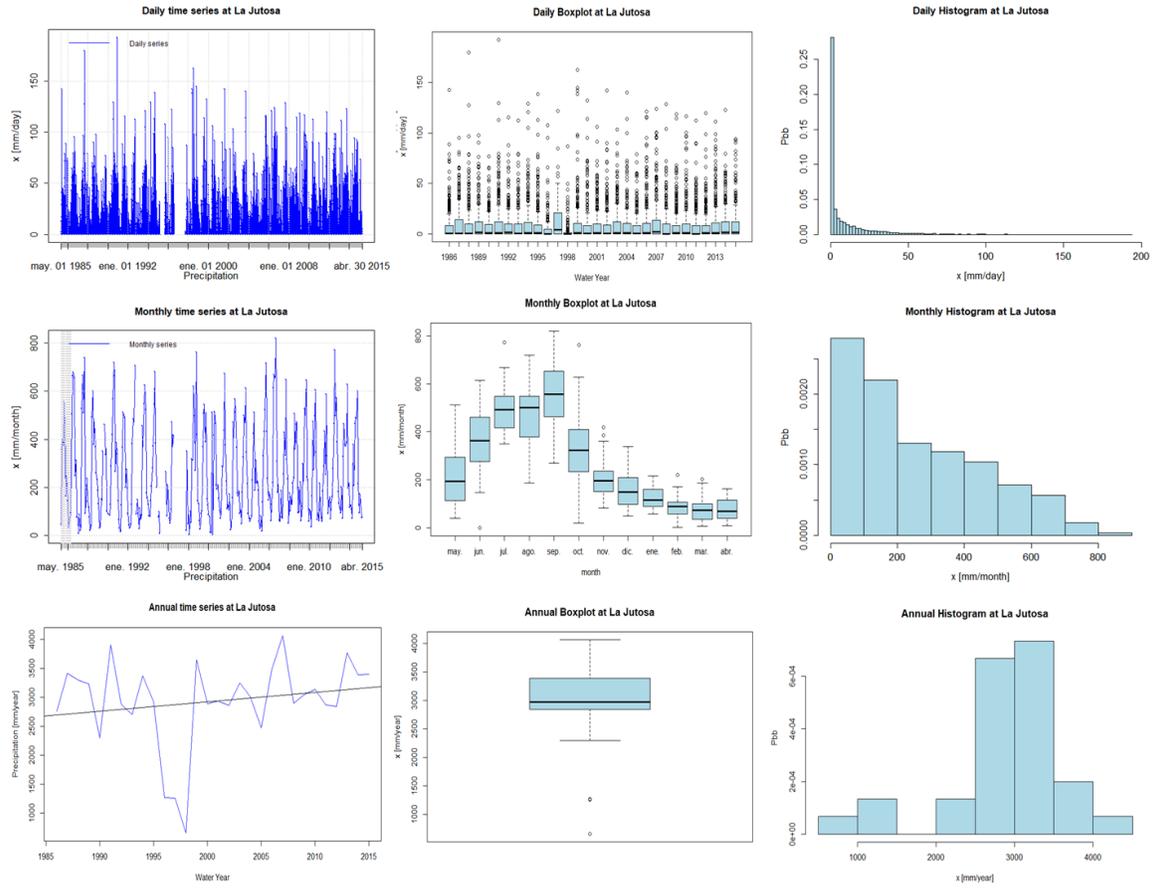
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 1.6 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN EL SAUCE



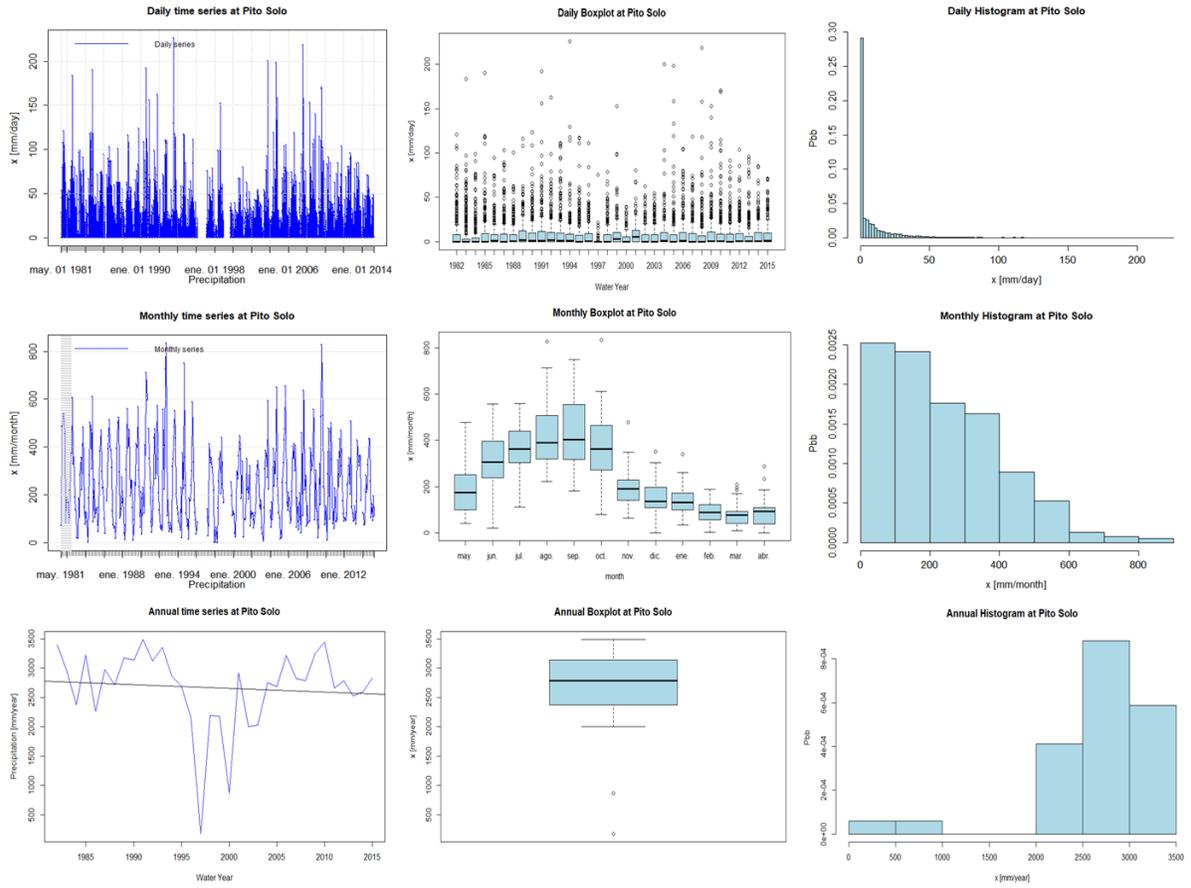
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 1.7 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN LA JUTOSA



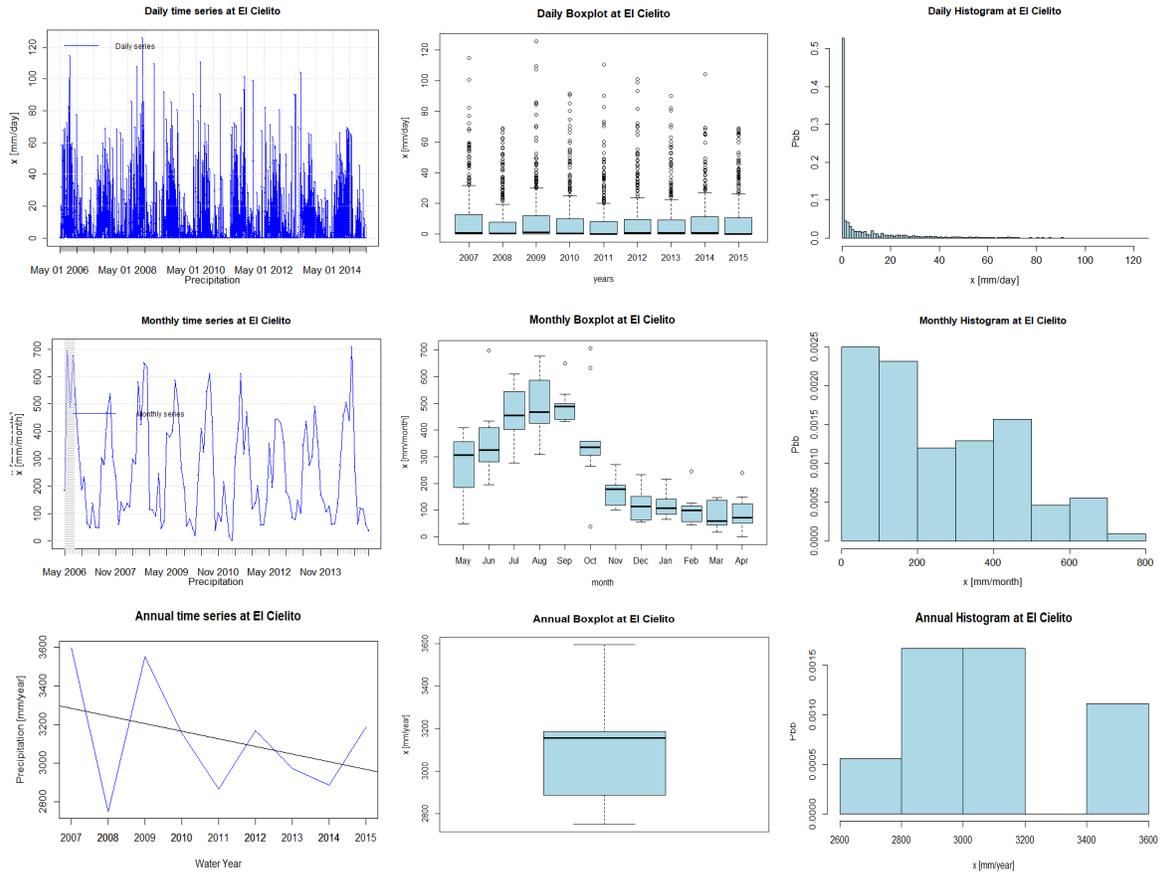
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 1.8 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN PITO SOLO



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 1.9 - GRÁFICO LINEAL, DIAGRAMA DE CAJAS E HISTOGRAMA PARA LA PRECIPITACIÓN DIARIA, MENSUAL Y ANUAL OBSERVADA EN ESTACIÓN EL CIELITO

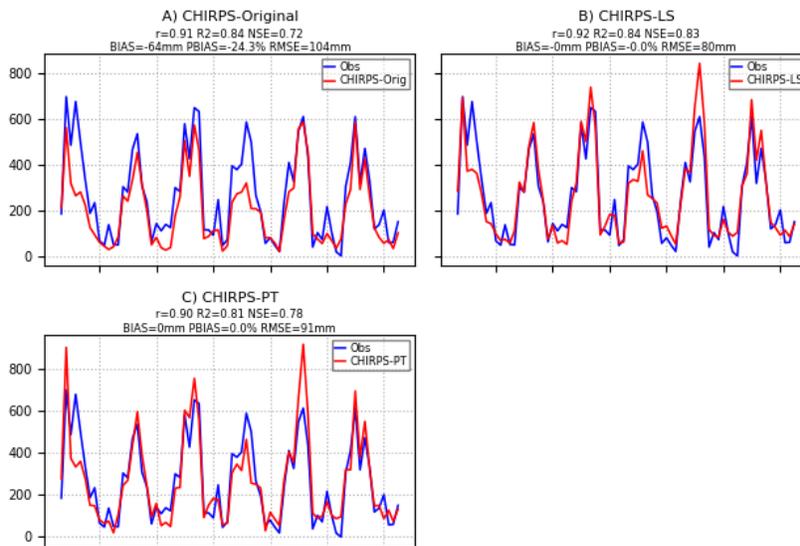


Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Gráficos de Series de Precipitación Mensual para los Periodos de Calibración y Validación

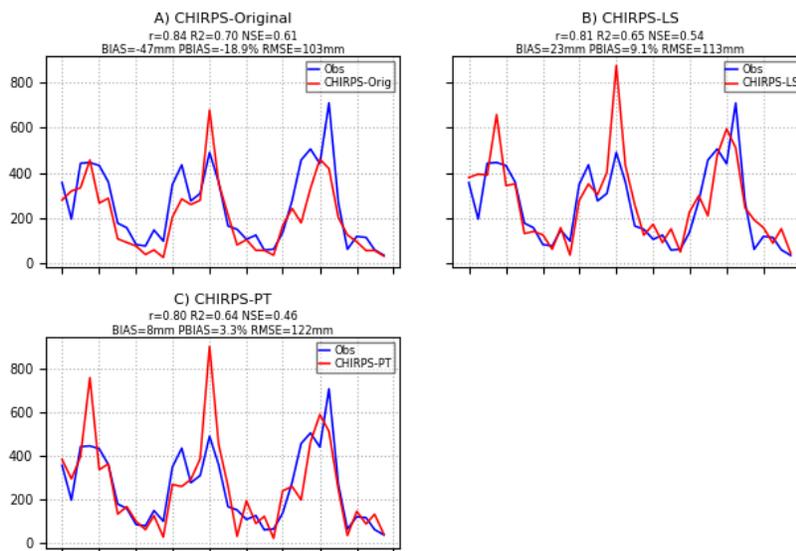
En esta sección, se encuentran gráficos que representan las series temporales de precipitación mensual para los periodos de calibración y validación donde se aprecia la data observada versus la de CHIRPS por los dos métodos (LS y PT) de corrección del sesgo junto a las métricas estadísticas para cada caso a modo de comparación conjunta.

ANEXO 2.1 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL CIELITO (CALIBRACIÓN)



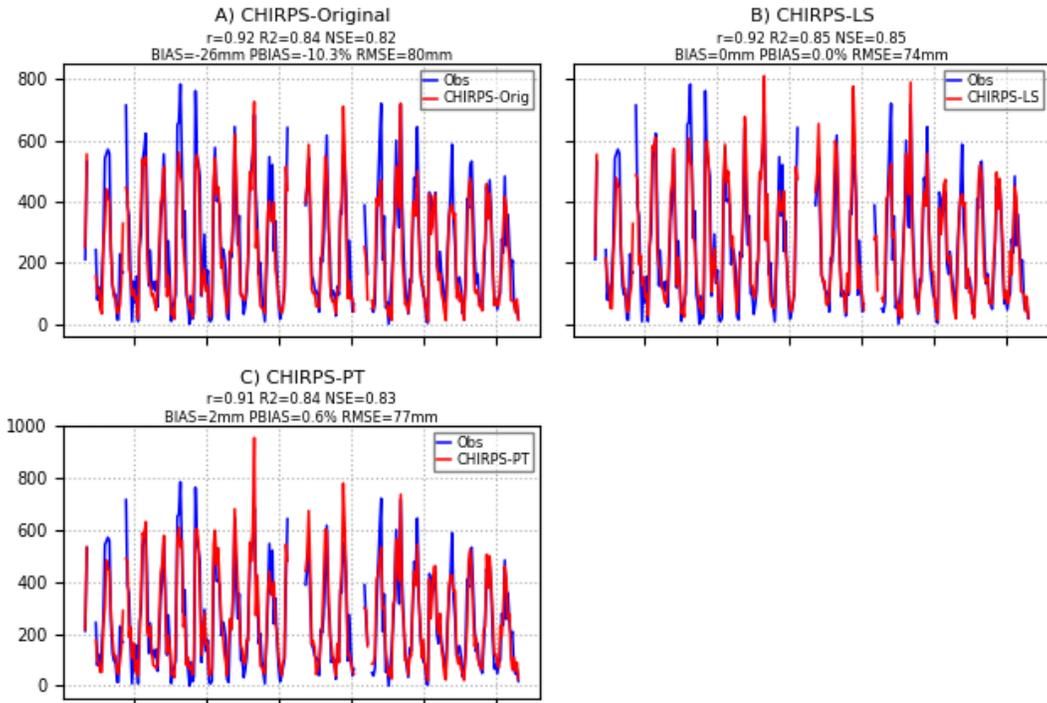
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.2 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL CIELITO (VALIDACIÓN)



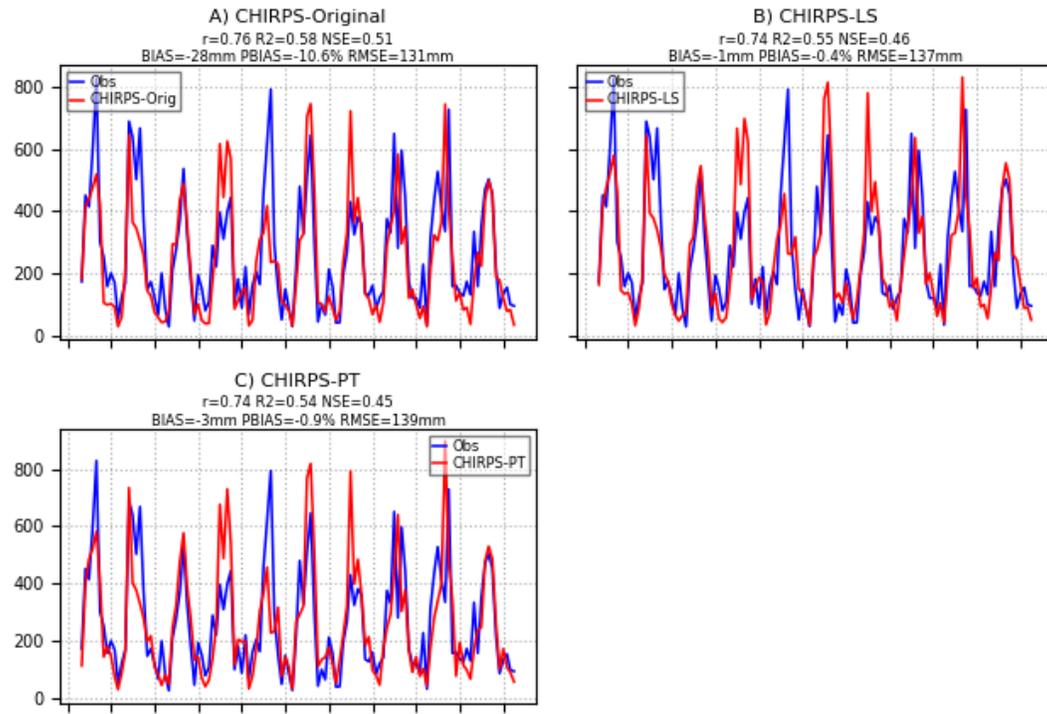
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.310 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL JARAL (CALIBRACIÓN)



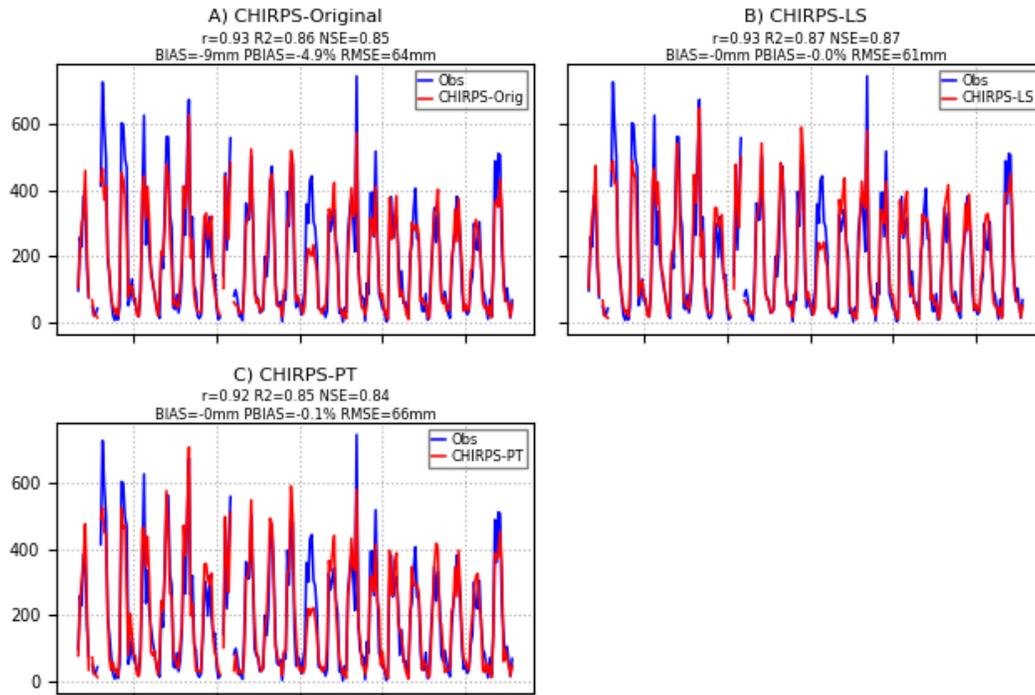
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.4 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL JARAL (VALIDACIÓN)



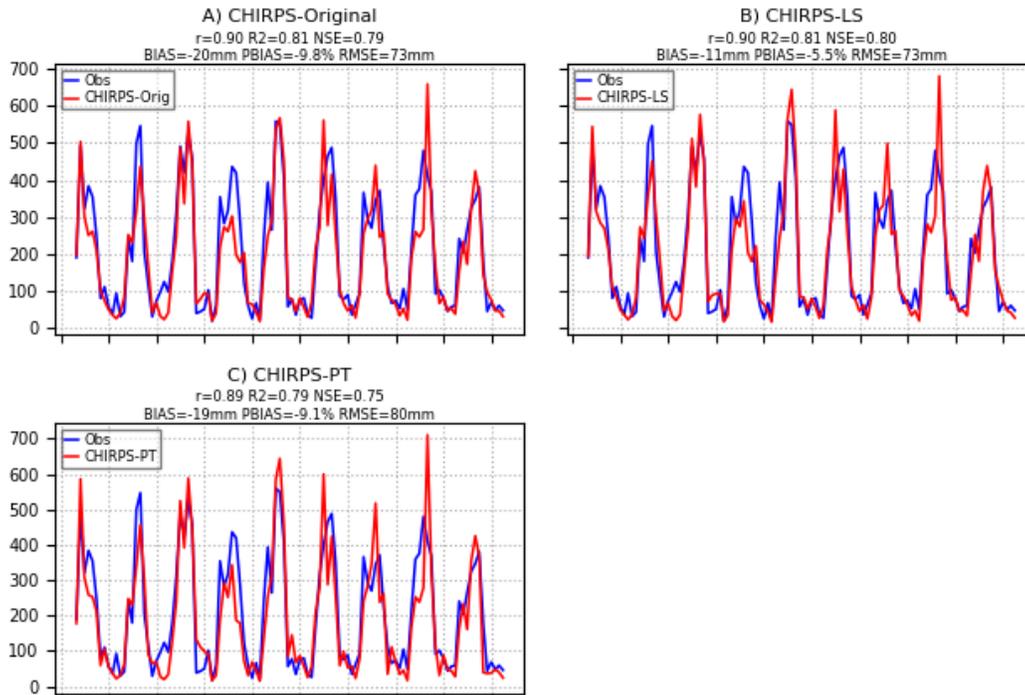
Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.5 - Series de Precipitación Mensual de El Mochito (Calibración)



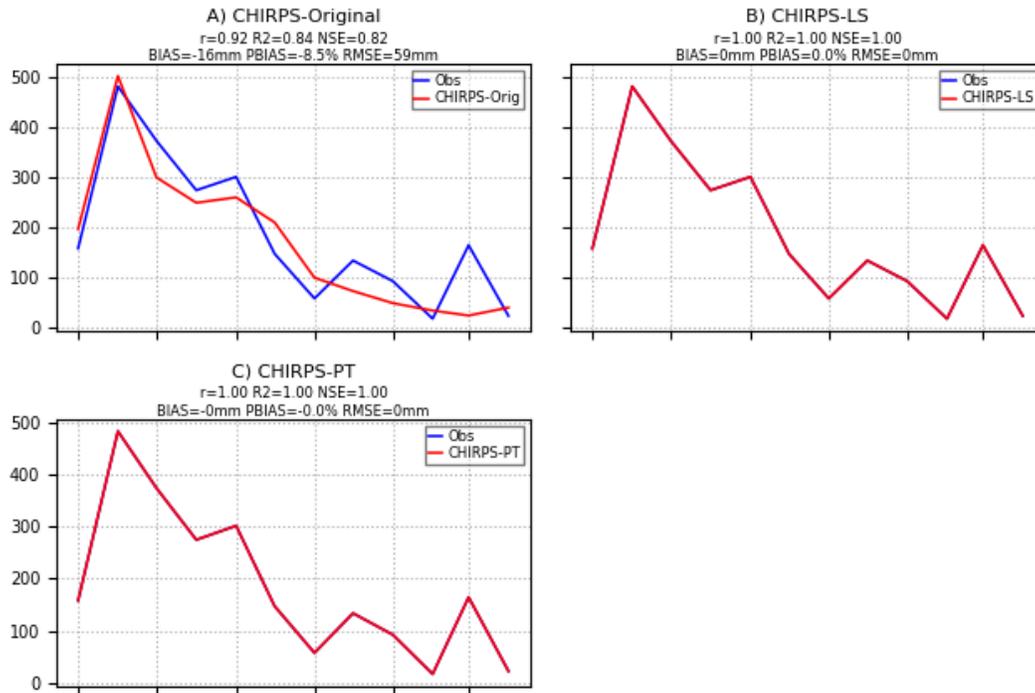
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.6 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL MOCHITO (VALIDACIÓN)



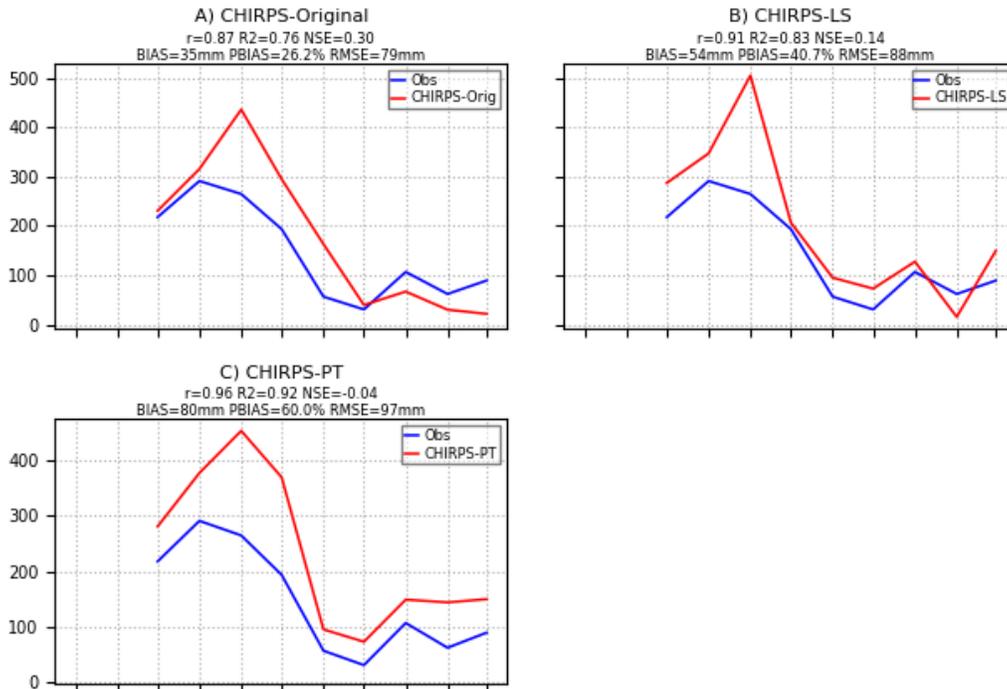
Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.7 - Series de Precipitación Mensual de El Sauce (Calibración)



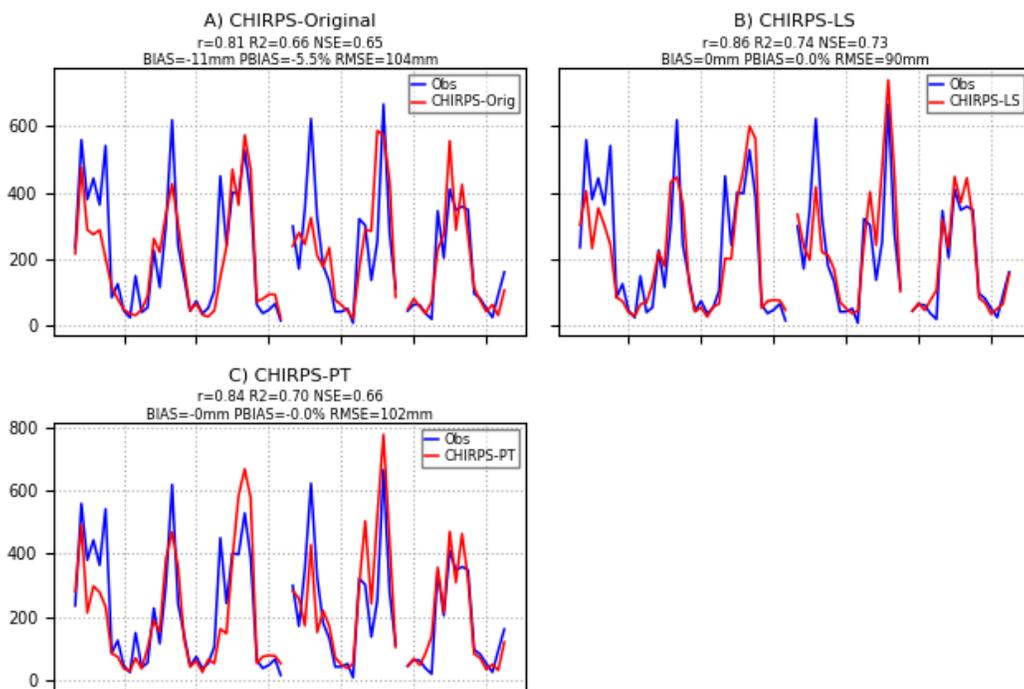
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.8 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL SAUCE (VALIDACIÓN)



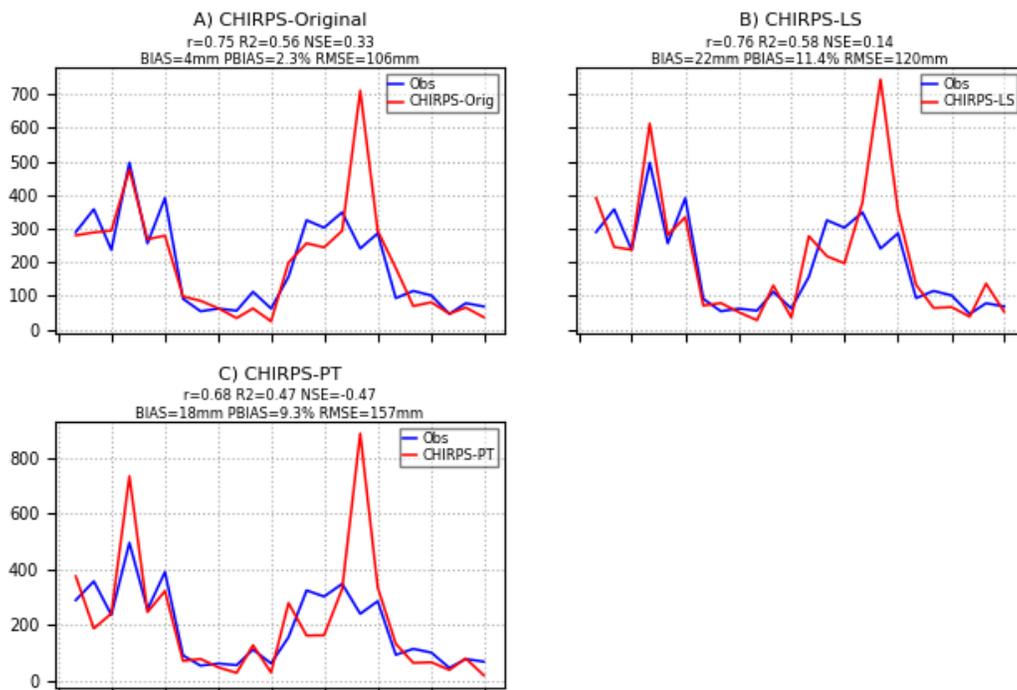
Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.9 - Series de Precipitación Mensual de Horconcitos (Calibración)



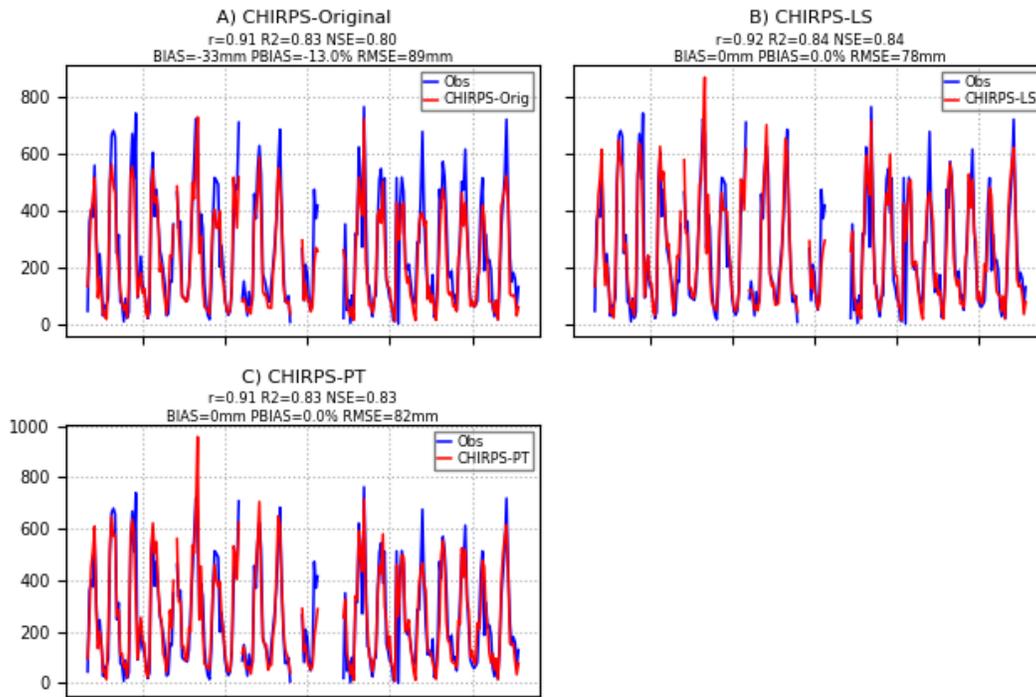
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.10 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE HORCONCITOS (VALIDACIÓN)



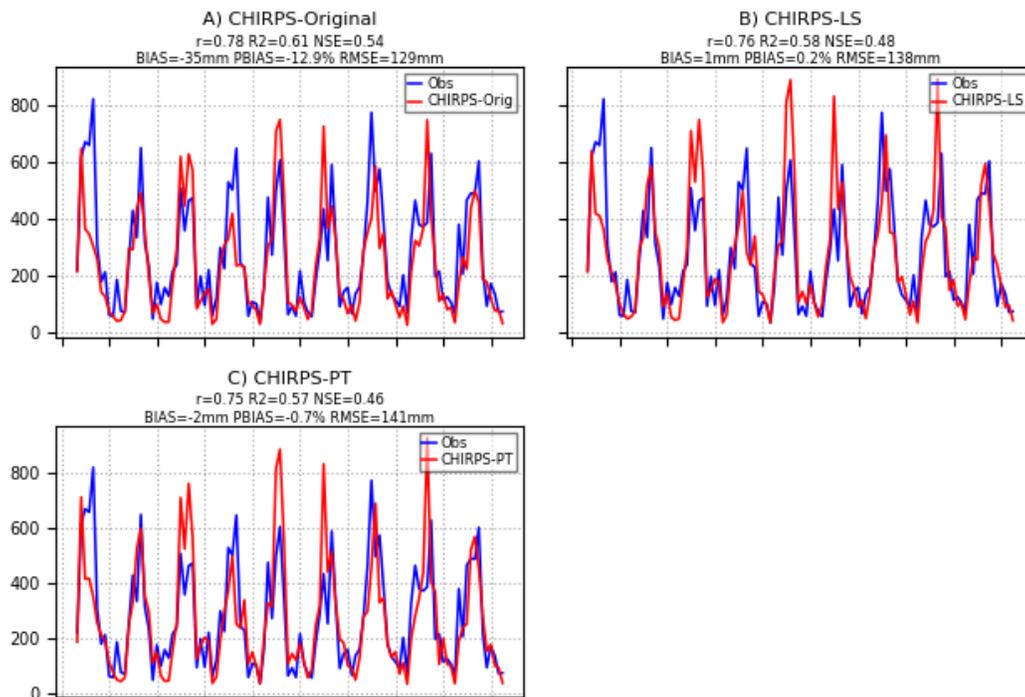
Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.11 - Series de Precipitación Mensual de La Jutosa (Calibración)



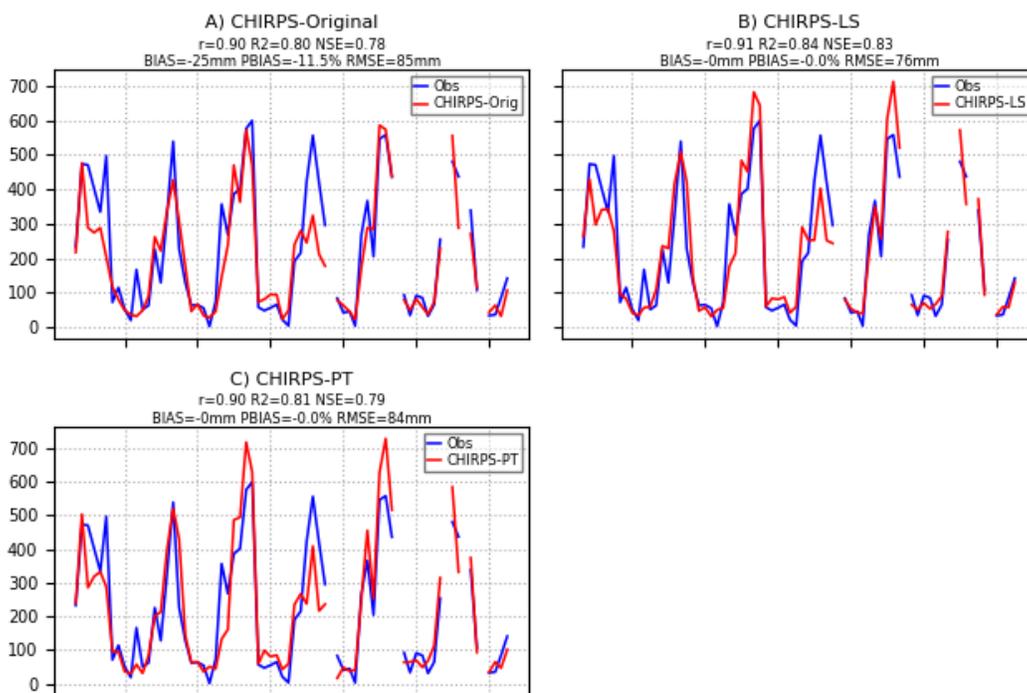
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.12 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA JUTOSA (VALIDACIÓN)



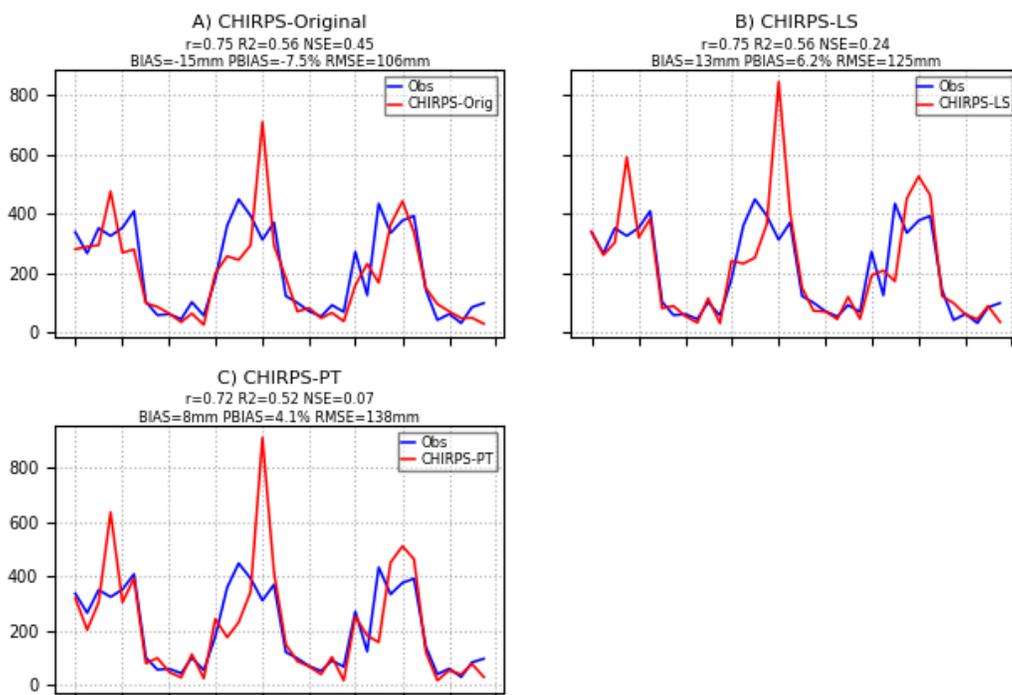
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.13 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE PEDERNALES (CALIBRACIÓN)



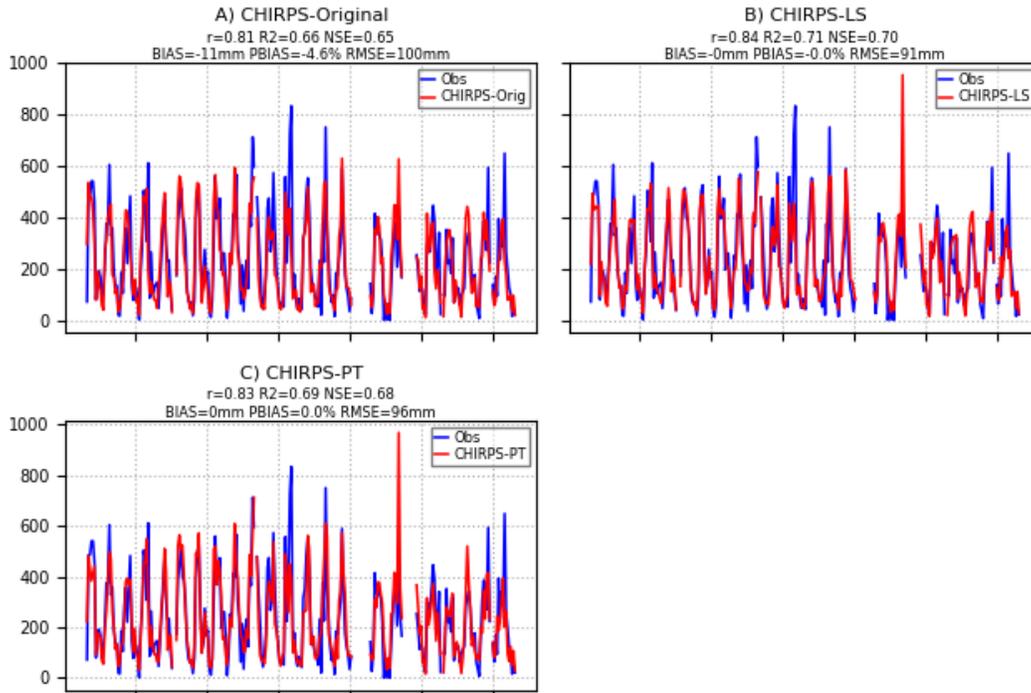
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.14 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE PEDERNALES (VALIDACIÓN)



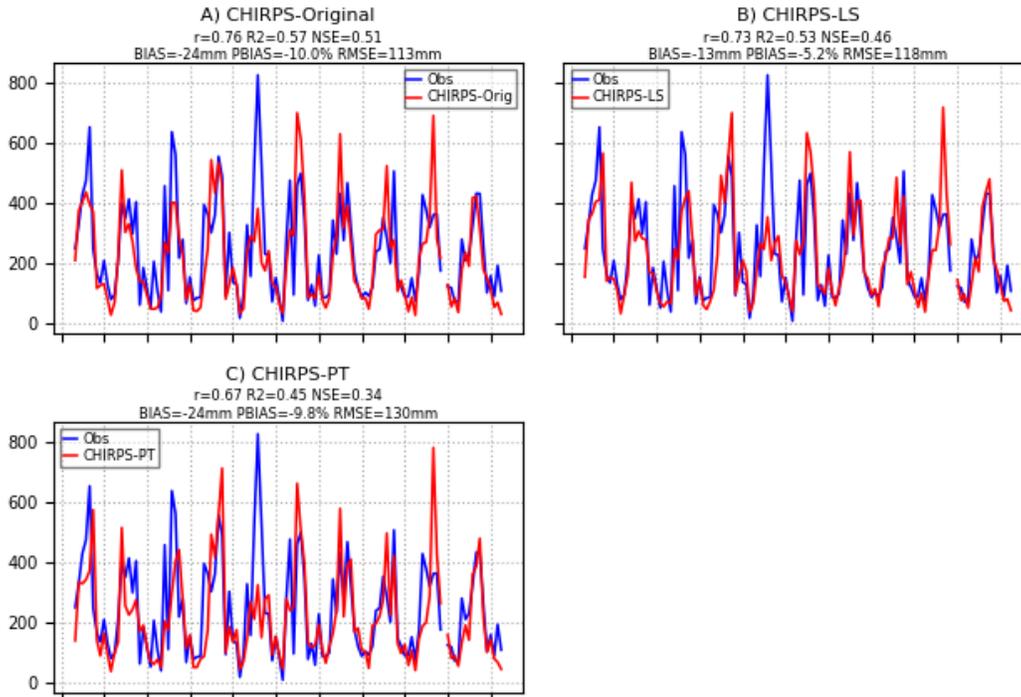
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.15 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE PITO SOLO (CALIBRACIÓN)



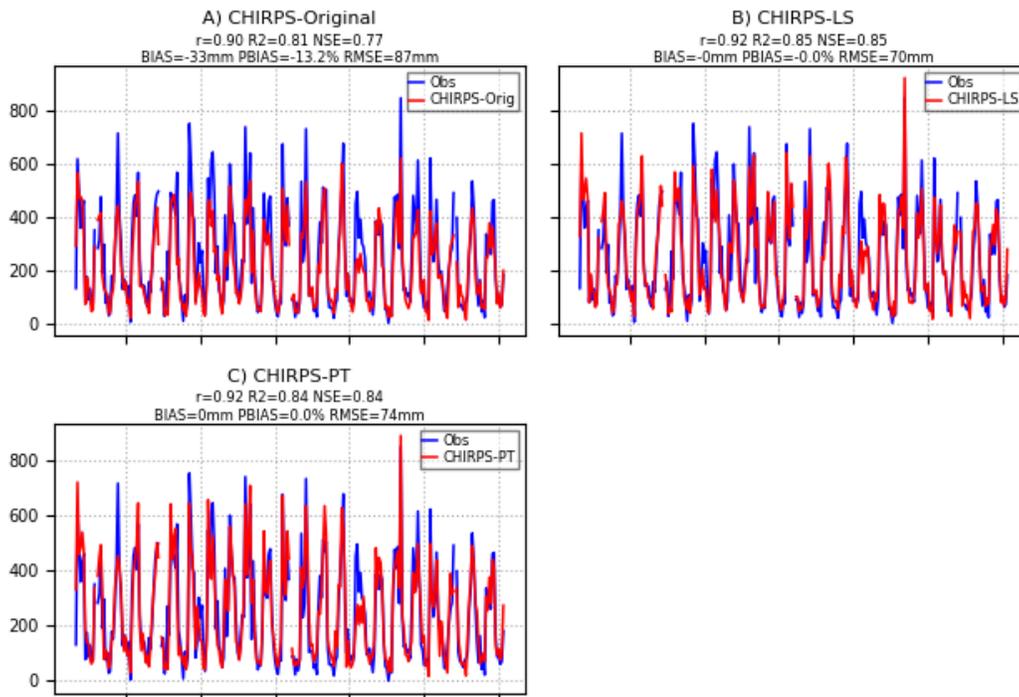
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.16 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE PITO SOLO (VALIDACIÓN)



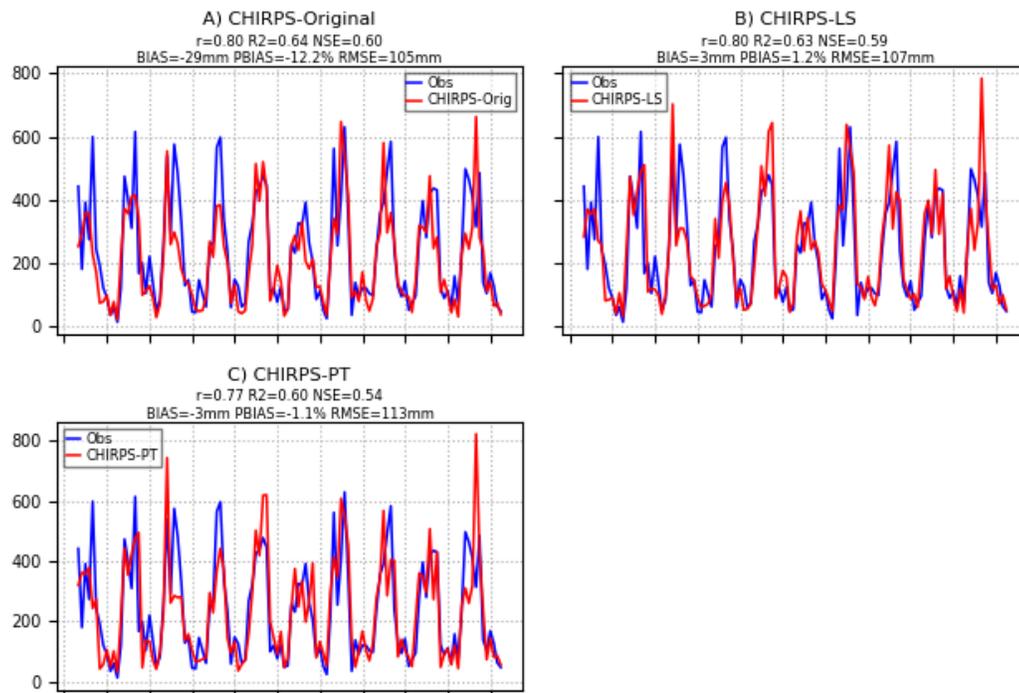
Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.17 - Series de Precipitación Mensual de Santa Elena (Calibración)



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2.18 - SERIES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE SANTA ELENA (VALIDACIÓN)

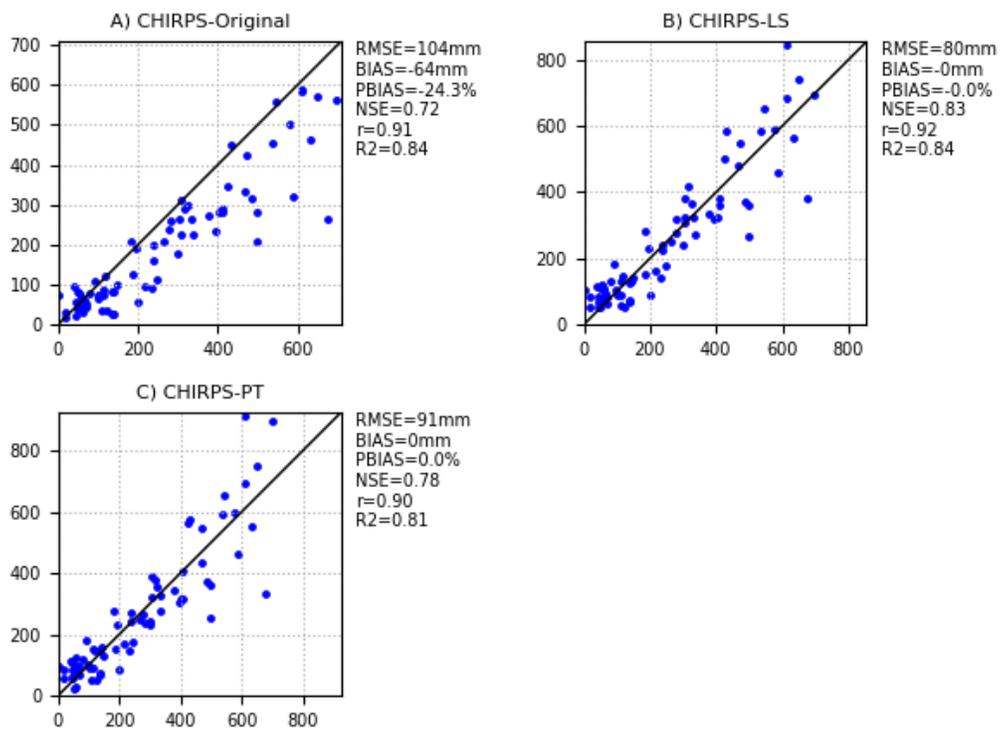


Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Gráficos de Dispersión de la Precipitación Mensual para los Periodos de Calibración y Validación

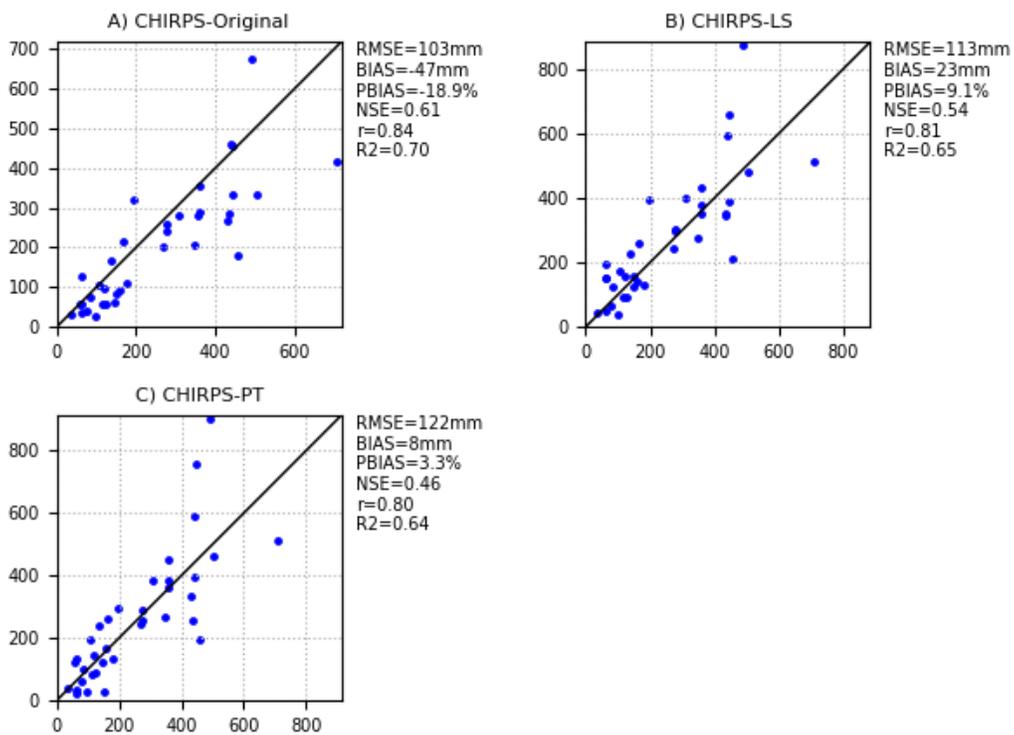
Los gráficos en esta sección muestran la dispersión de la precipitación mensual durante los periodos de calibración y validación para cada estación. Estos visuales facilitan la comparación de la variabilidad entre las mediciones observadas y satelitales (CHIRPS), proporcionando información clave sobre la concordancia entre ambas fuentes climatológicas y su cambio al aplicar los dos métodos (LS y PT) de corrección del sesgo junto a las métricas estadísticas para cada caso.

ANEXO 3.1 - GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL CIELITO (CALIBRACIÓN)



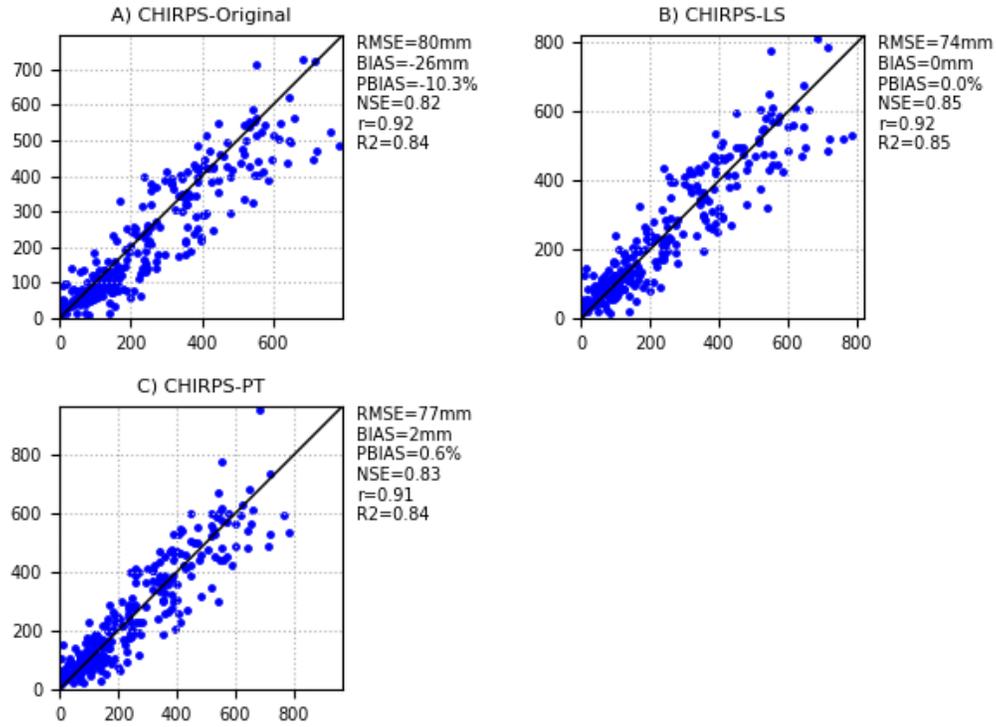
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3.2 - GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL CIELITO (VALIDACIÓN)



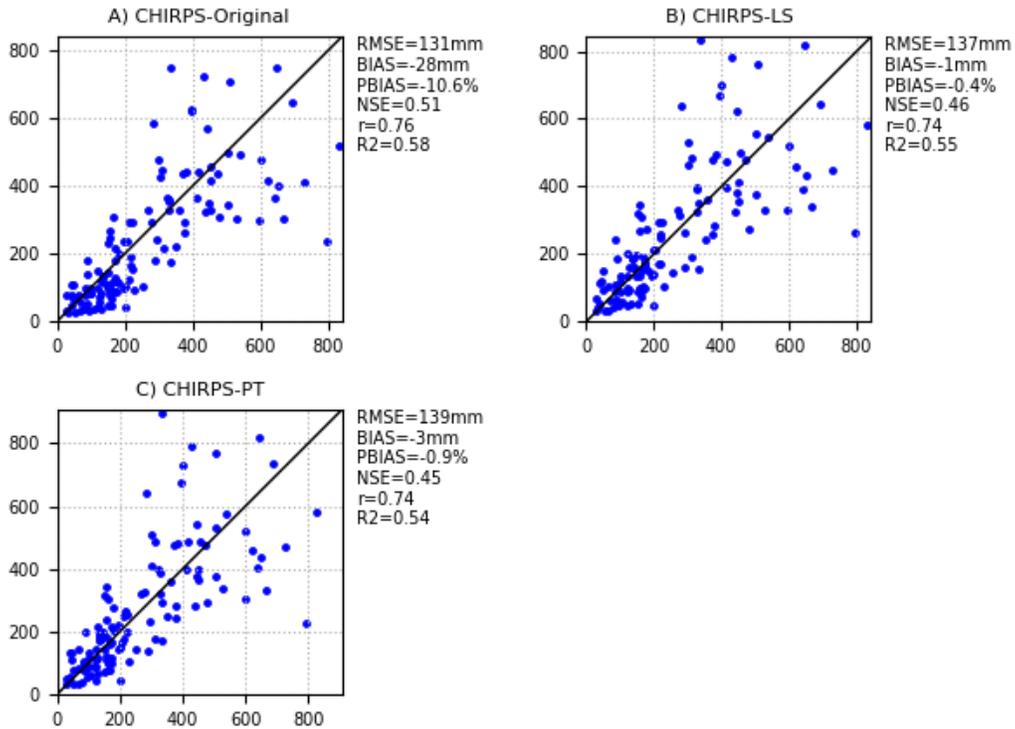
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3.3 - Gráficos de Dispersión de Precipitación Mensual de El Jaral (Calibración)



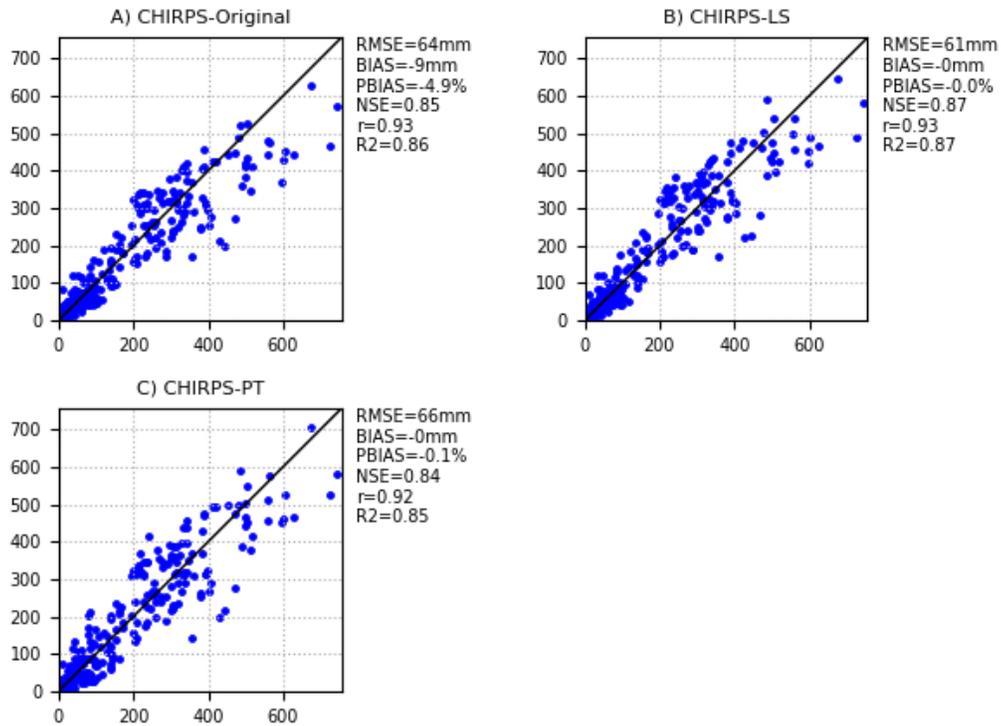
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3.4 - GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL JARAL (VALIDACIÓN)



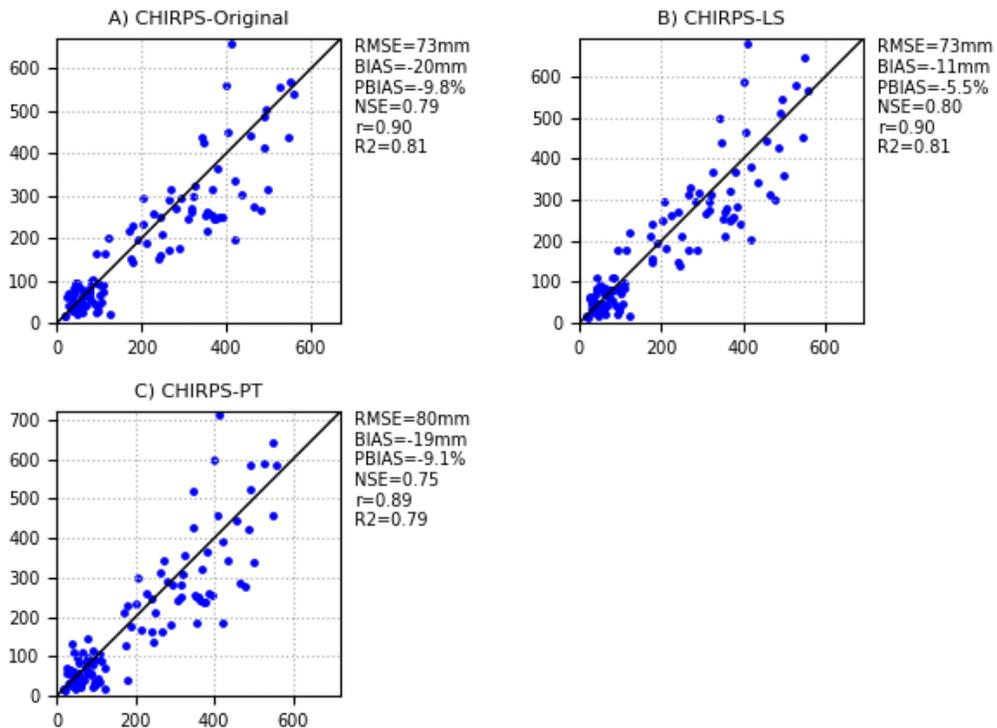
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3.5 - Gráficos de Dispersión de Precipitación Mensual de El Mochito (Calibración)



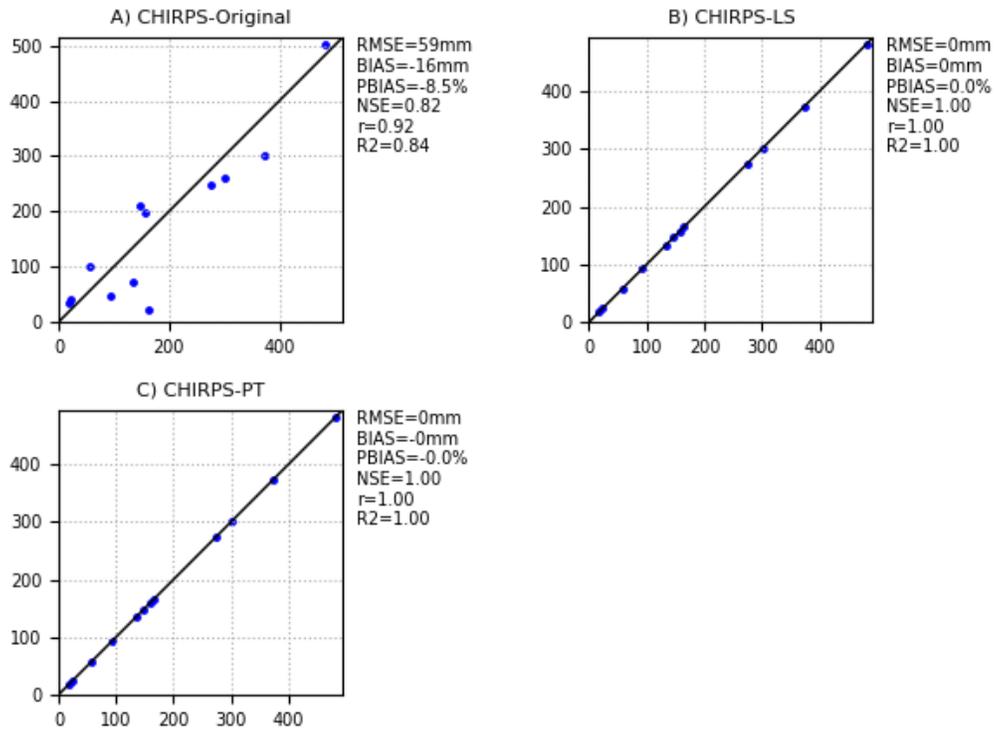
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3.6 - GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL MOCHITO (VALIDACIÓN)



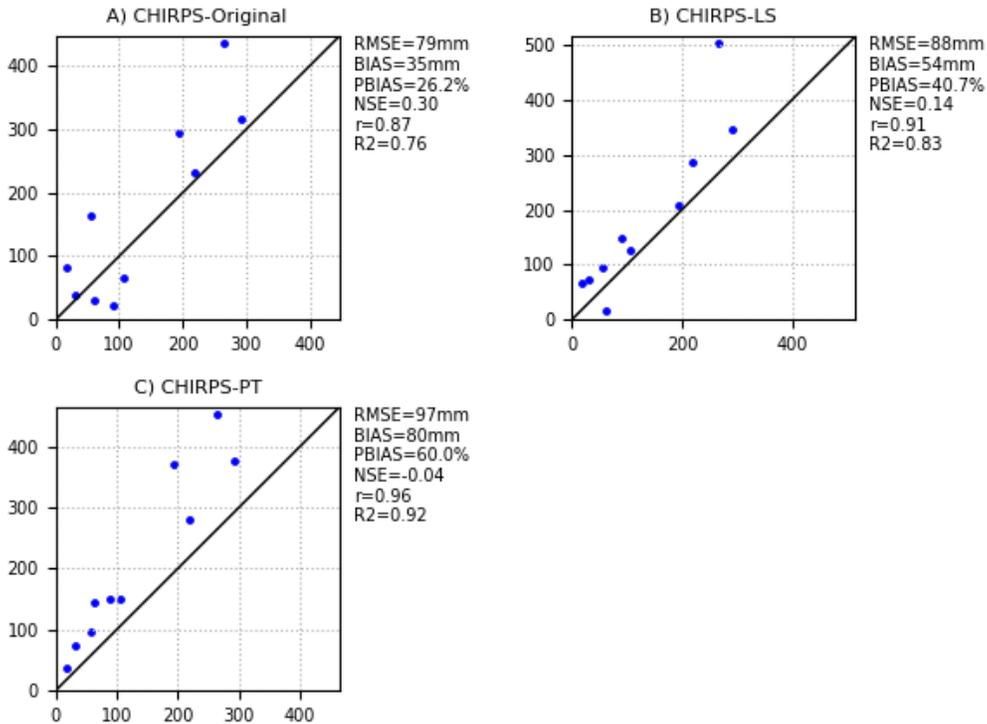
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3.7 - Gráficos de Dispersión de Precipitación Mensual de El Sauce (Calibración)



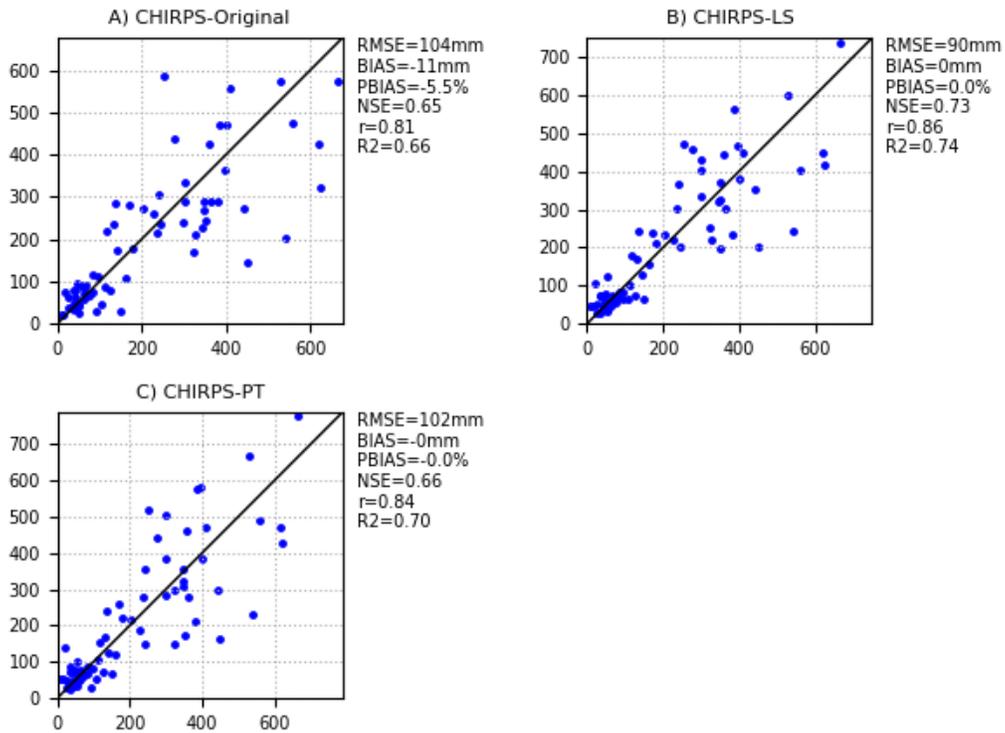
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3.8 - GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE EL SAUCE (VALIDACIÓN)



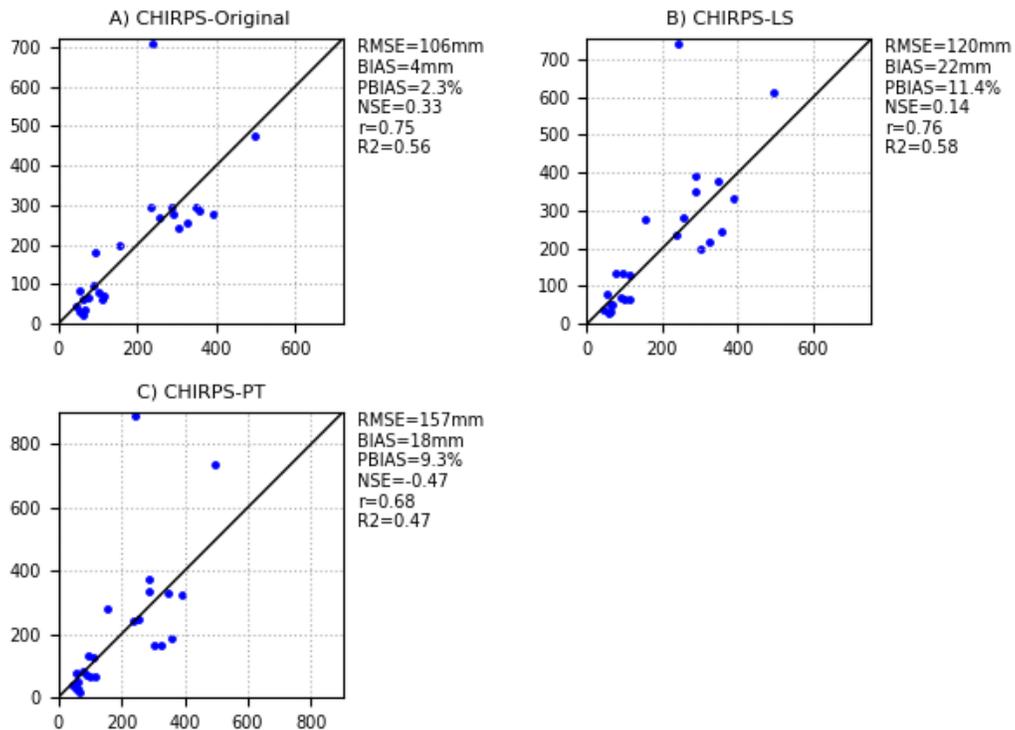
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3.9 - Gráficos de Dispersión de Precipitación Mensual de Horconcos (Calibración)



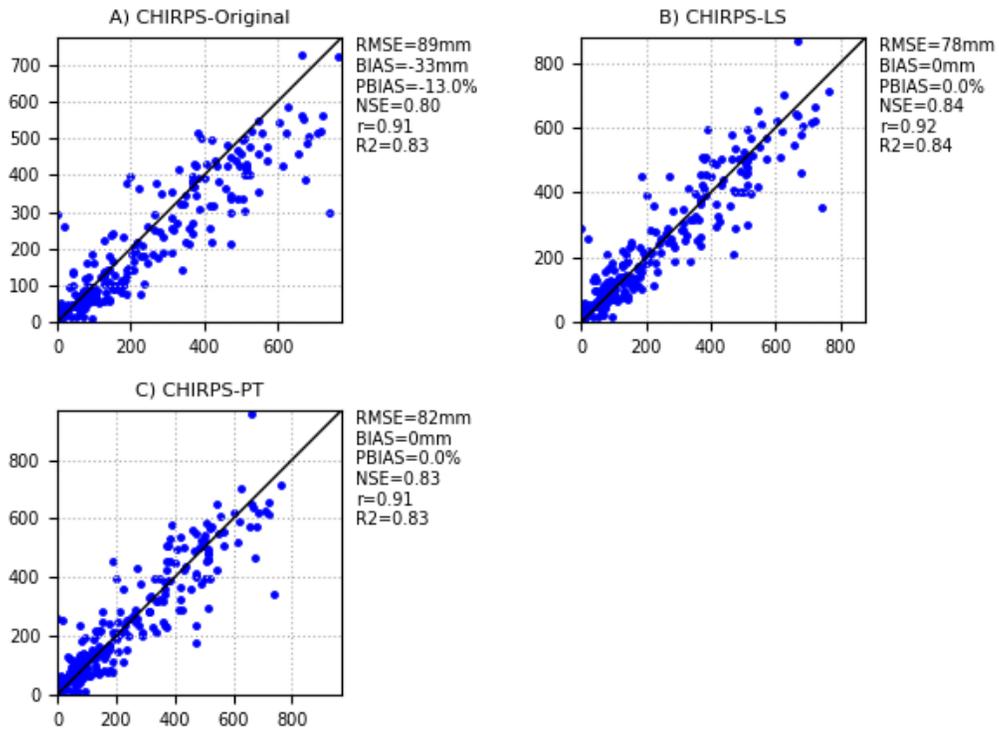
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3.10- GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE HORCONCOS (VALIDACIÓN)



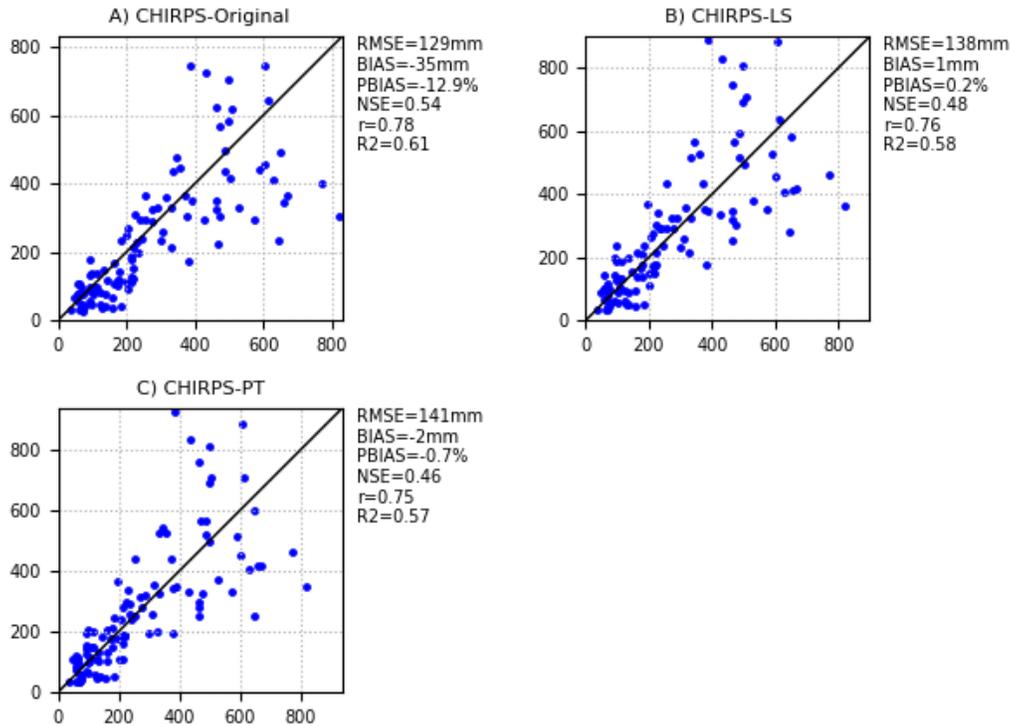
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3.11 - Gráficos de Dispersión de Precipitación Mensual de La Jutosa (Calibración)



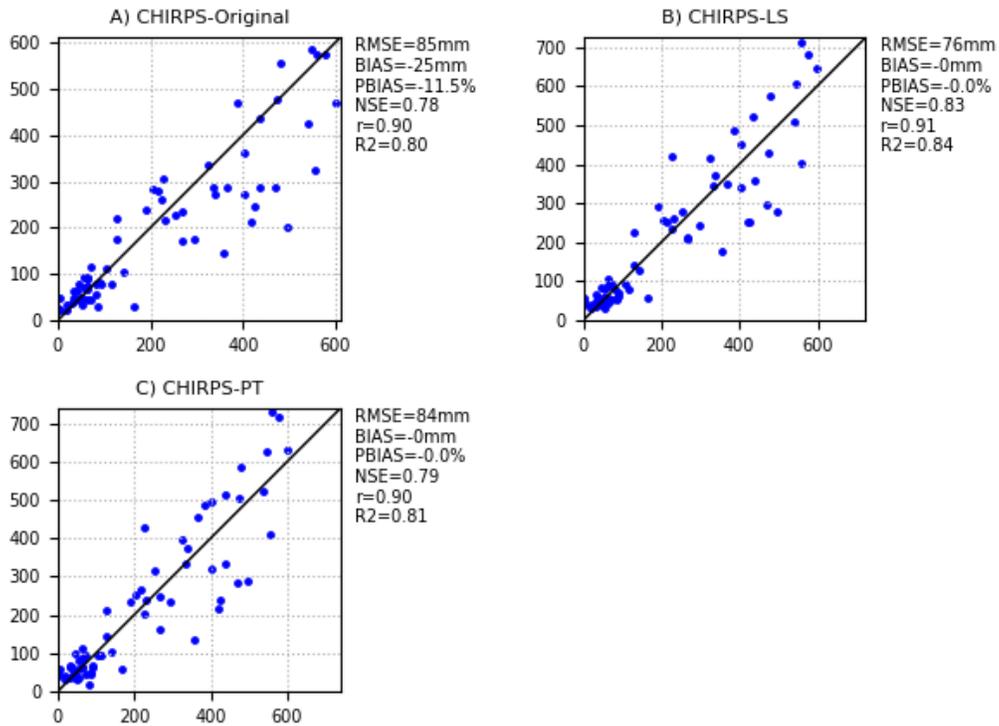
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3.12 - GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA JUTOSA (VALIDACIÓN)



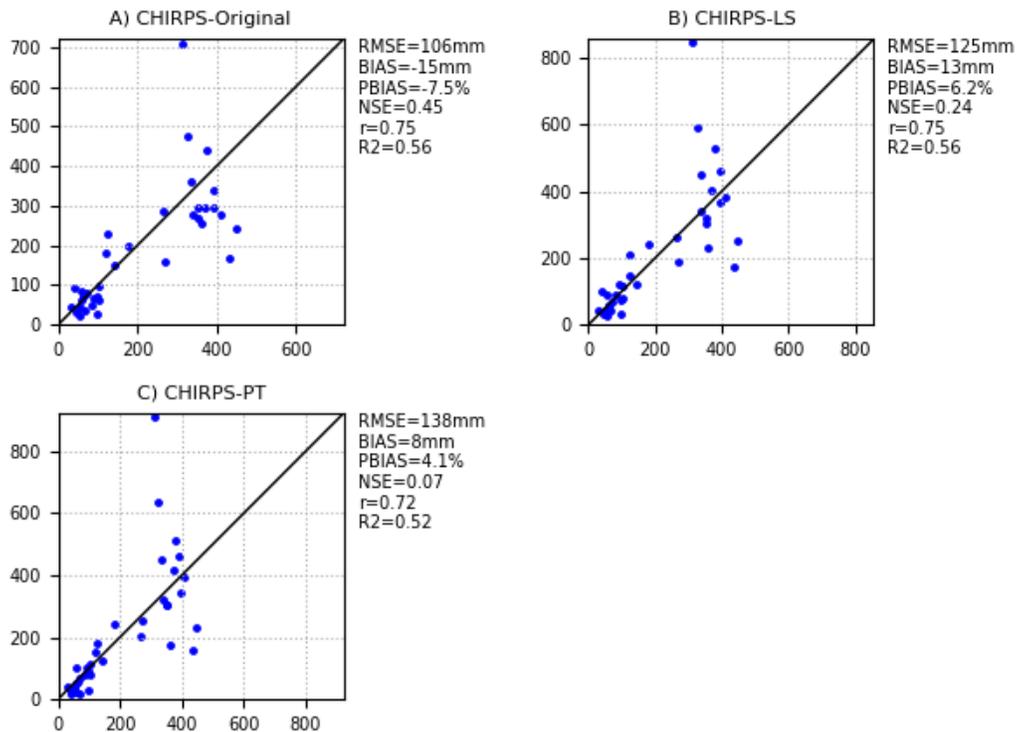
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3.13 - Gráficos de Dispersión de Precipitación Mensual de Pedernales (Calibración)



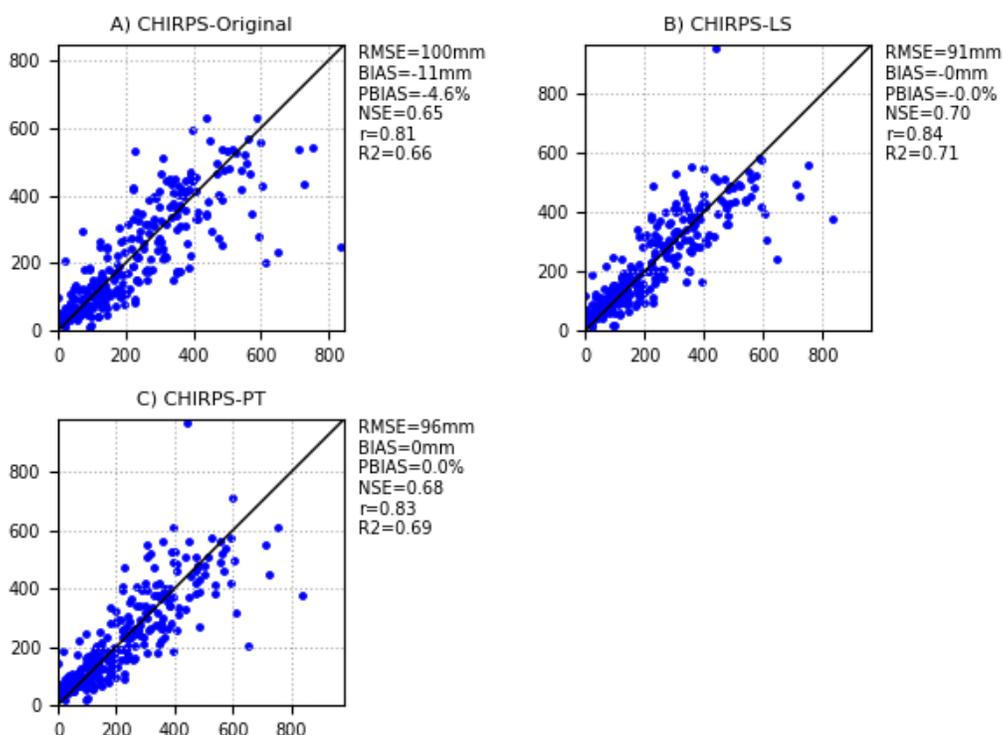
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3.14 - GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE PEDERNALES (VALIDACIÓN)



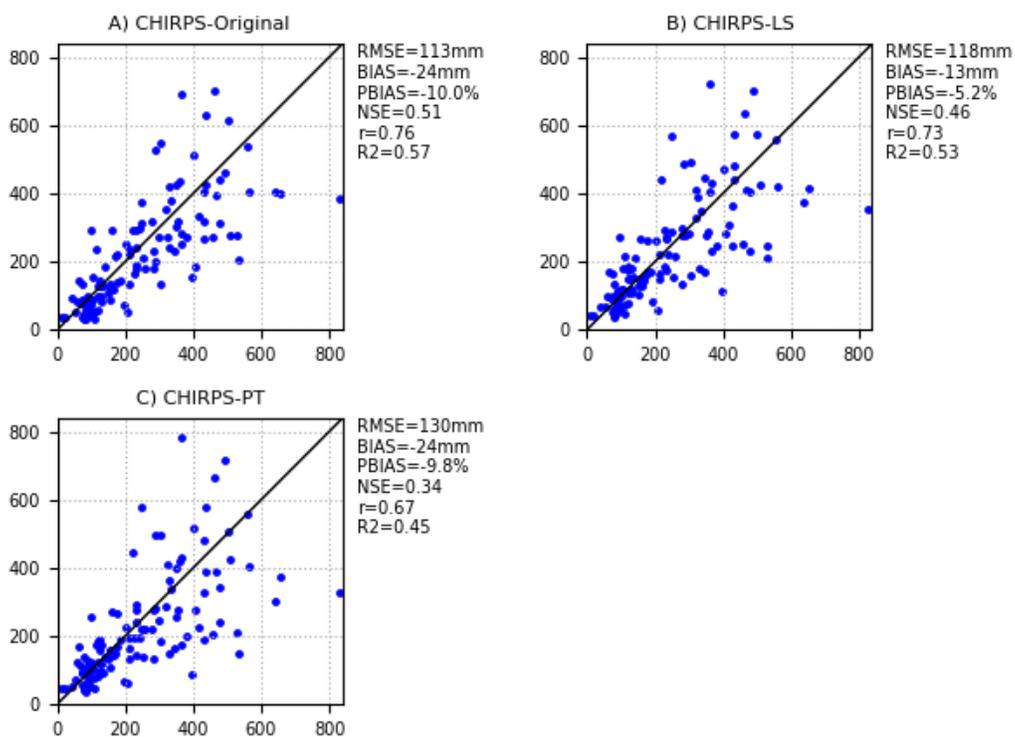
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3.15 - Gráficos de Dispersión de Precipitación Mensual de Pito Solo (Calibración)



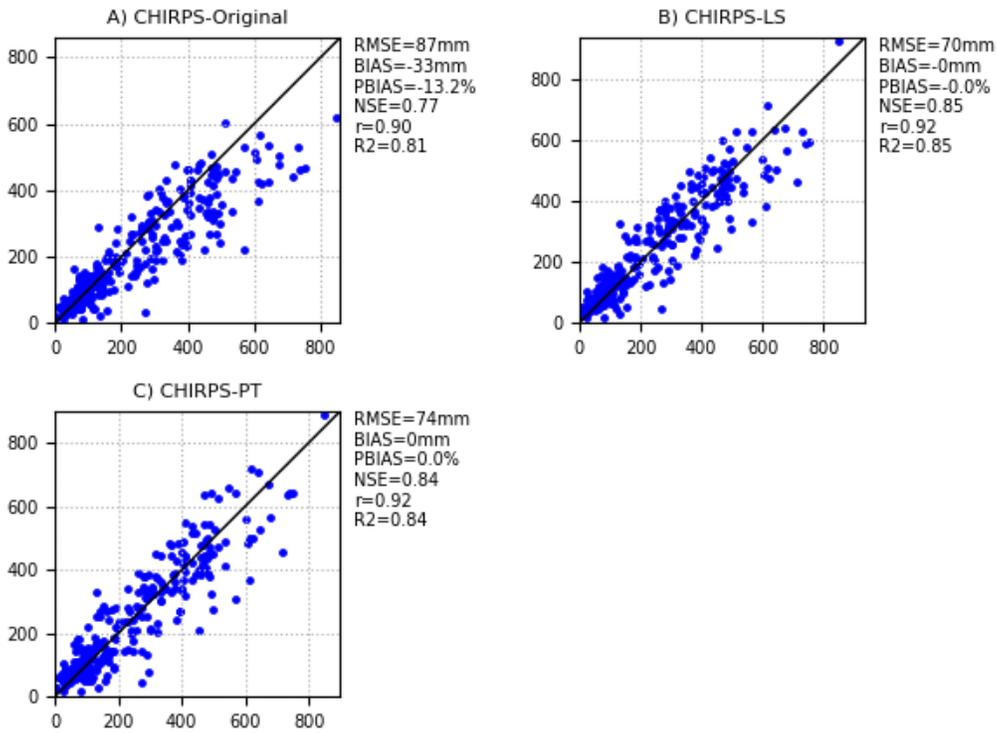
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3.16 - GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE PITO SOLO (VALIDACIÓN)



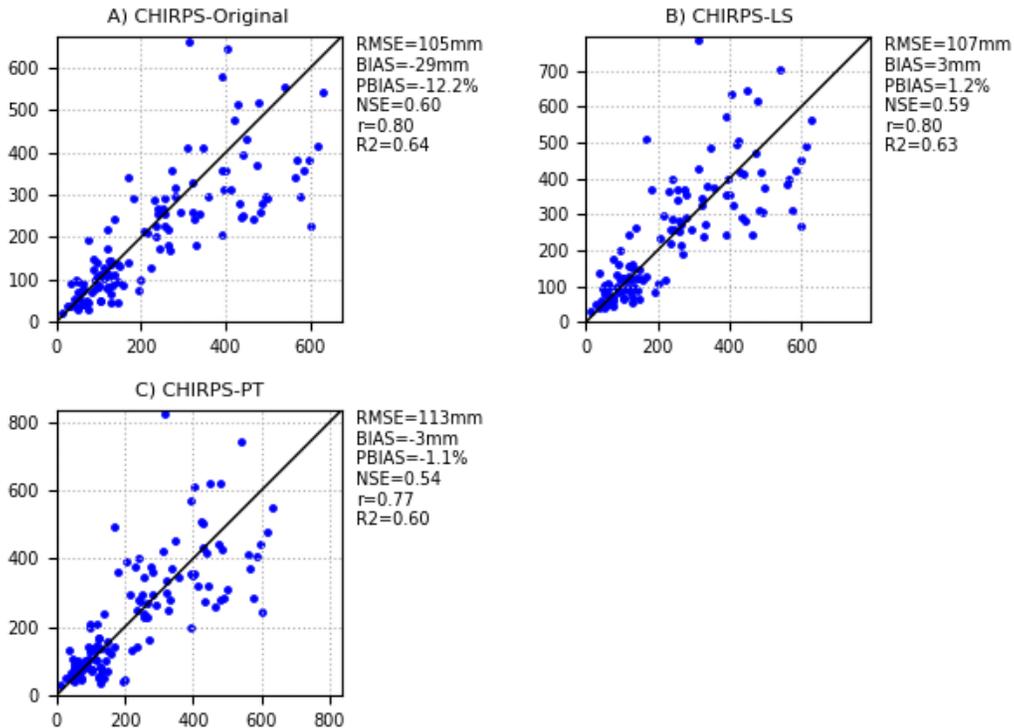
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3.17 - Gráficos de Dispersión de Precipitación Mensual de Santa Elena (Calibración)



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3.18 - GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL DE SANTA ELENA (VALIDACIÓN)

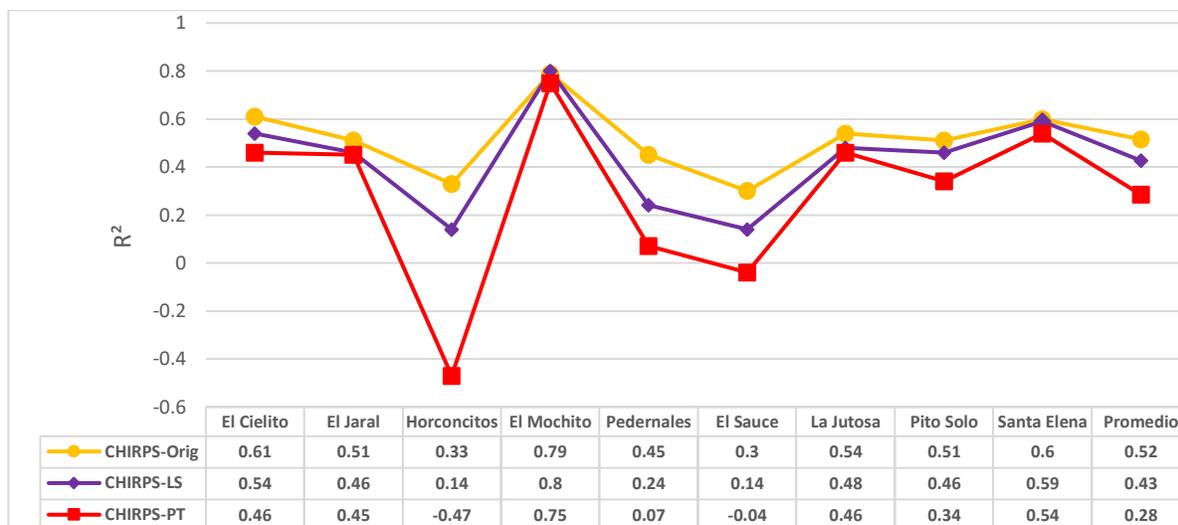


Fuente: Elaboración propia

Anexo 4 – Gráficos de métricas estadísticas

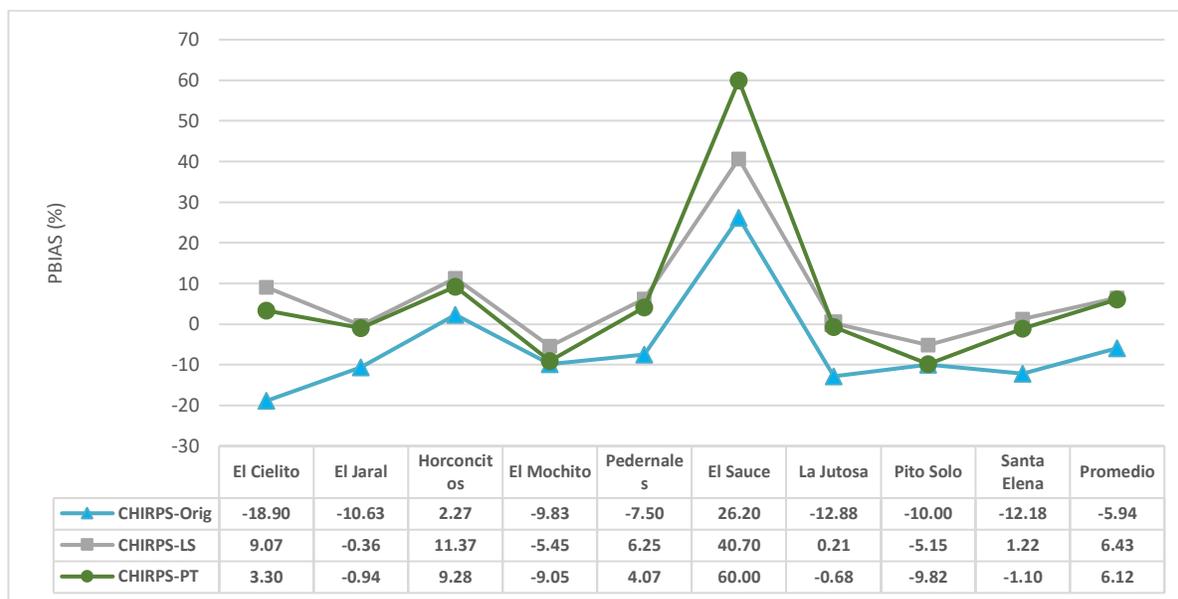
En esta sección, se presentan gráficos de métricas estadísticas utilizadas en el estudio para el periodo de validación de las estaciones. Estos visuales ofrecen una representación gráfica de la correlación de Pearson (ρ), el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y otros indicadores clave, proporcionando una visión integral del desempeño de las estaciones y la validez de las mediciones satelitales corregidas.

ANEXO 4.1 - COEFICIENTES DE NASH-SUTCLIFFE (NSE) DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN SIN ESTACIÓN EL PLANÓN



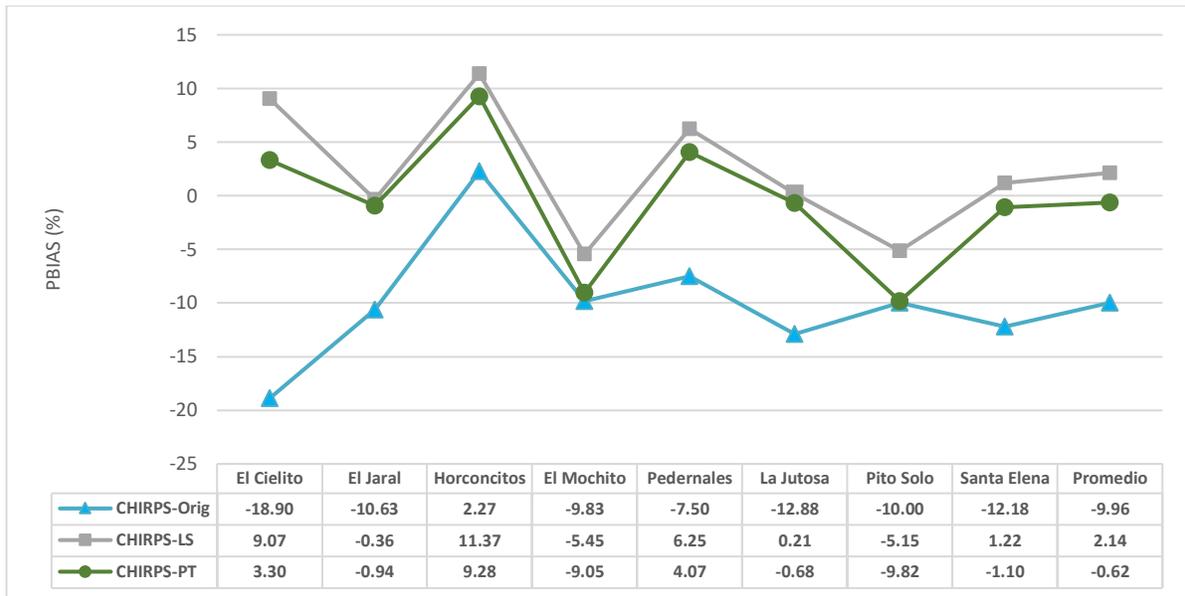
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4.2 - SESGO PORCENTUAL (PBIAS) DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN SIN ESTACIÓN EL PLANÓN



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4.3 - SESGO PORCENTUAL (PBIAS) DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN SIN ESTACIONES EL SAUCE Y EL PLANÓN



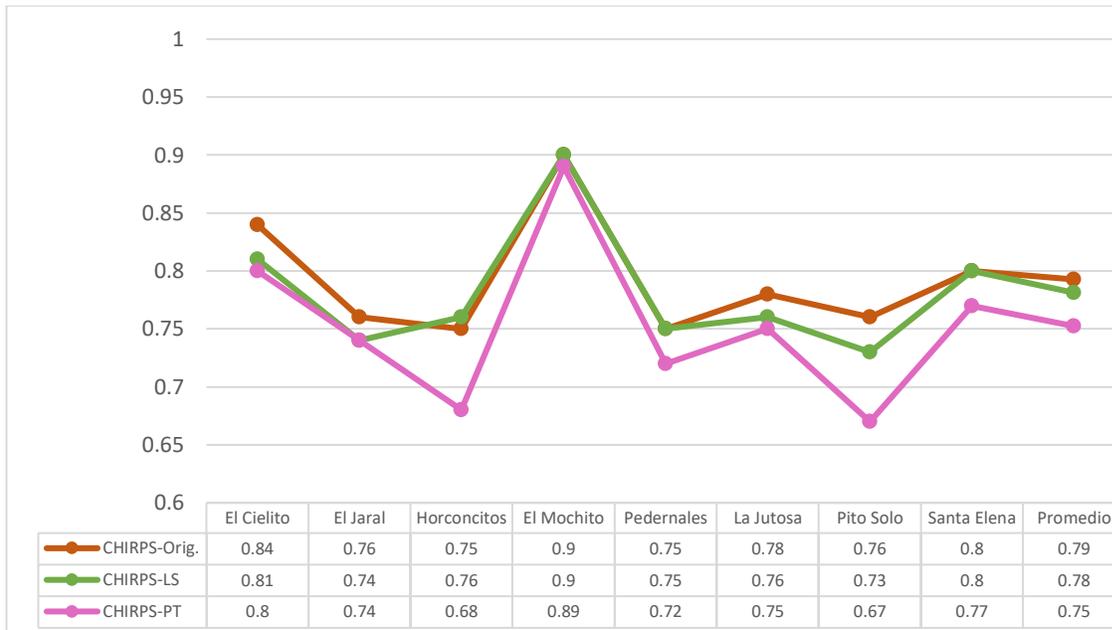
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4.4- CORRELACIÓN DE PEARSON (P) DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN SIN ESTACIÓN EL PLANÓN



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4.5 - CORRELACIÓN DE PEARSON (P) DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN SIN ESTACIONES EL SAUCE Y EL PLANÓN



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4.6 - ERROR CUADRÁTICO MEDIO DE LA RAÍZ (RMSE) DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN SIN ESTACIÓN EL PLANÓN



Fuente: Elaboración propia

Anexo 5 – Descripción de librerías y paquetes en R

ANEXO 5.1 - INFORMATION ON PACKAGE 'STATS'

Description:

```
Package: stats
Version: 4.2.3
Priority: base
Title: The R Stats Package
Author: R Core Team and contributors worldwide
Maintainer: R Core Team <do-use-Contact-address@r-project.org>
Contact: R-help mailing list <r-help@r-project.org>
Description: R statistical functions.
License: Part of R 4.2.3
Imports: utils, grDevices, graphics
Suggests: MASS, Matrix, SuppDists, methods, stats4
NeedsCompilation: yes
Built: R 4.2.3; x86_64-w64-mingw32; 2023-03-15 13:58:44 UTC; windows
ExperimentalWindowsRuntime: ucrt
```

Index:

```
.checkMFClasses Functions to Check the Type of Variables passed
to Model Frames
AIC Akaike's An Information Criterion
ARMAacf Compute Theoretical ACF for an ARMA Process
ARMAtoMA Convert ARMA Process to Infinite MA Process
Beta The Beta Distribution
Binomial The Binomial Distribution
Box.test Box-Pierce and Ljung-Box Tests
C Sets Contrasts for a Factor
Cauchy The Cauchy Distribution
Chisquare The (non-central) Chi-Squared Distribution
Distributions Distributions in the stats package
Exponential The Exponential Distribution
FDist The F Distribution
GammaDist The Gamma Distribution
Geometric The Geometric Distribution
HoltWinters Holt-Winters Filtering
Hypergeometric The Hypergeometric Distribution
IQR The Interquartile Range
KalmanLike Kalman Filtering
Logistic The Logistic Distribution
Lognormal The Log Normal Distribution
Multinomial The Multinomial Distribution
NLSstAsymptotic Fit the Asymptotic Regression Model
NLSstClosestX Inverse Interpolation
NLSstLfAsymptote Horizontal Asymptote on the Left Side
NLSstRtAsymptote Horizontal Asymptote on the Right Side
NegBinomial The Negative Binomial Distribution
Normal The Normal Distribution
PP.test Phillips-Perron Test for Unit Roots
Pair Construct paired-data object
Poisson The Poisson Distribution
SSD SSD Matrix and Estimated Variance Matrix in
Multivariate Models
SSasymp Self-Starting Nls Asymptotic Regression Model
SSasympOff Self-Starting Nls Asymptotic Regression Model
with an Offset
SSasympOrig Self-Starting Nls Asymptotic Regression Model
through the Origin
SSbiexp Self-Starting Nls Biexponential model
SSfol Self-Starting Nls First-order Compartment Model
SSfp1 Self-Starting Nls Four-Parameter Logistic Model
SSgompertz Self-Starting Nls Gompertz Growth Model
SSlogis Self-Starting Nls Logistic Model
SSmicmen Self-Starting Nls Michaelis-Menten Model
SSweibull Self-Starting Nls Weibull Growth Curve Model
```

SignRank	Distribution of the Wilcoxon Signed Rank Statistic
Smirnov	Distribution of the Smirnov Statistic
StructTS	Fit Structural Time Series
TDist	The Student t Distribution
Tukey	The Studentized Range Distribution
TukeyHSD	Compute Tukey Honest Significant Differences
Uniform	The Uniform Distribution
Weibull	The Weibull Distribution
Wilcoxon	Distribution of the Wilcoxon Rank Sum Statistic
acf	Auto- and Cross- Covariance and -Correlation Function Estimation
acf2AR	Compute an AR Process Exactly Fitting an ACF
add1	Add or Drop All Possible Single Terms to a Model
addmargins	Puts Arbitrary Margins on Multidimensional Tables or Arrays
aggregate	Compute Summary Statistics of Data Subsets
alias	Find Aliases (Dependencies) in a Model
anova	Anova Tables
anova.glm	Analysis of Deviance for Generalized Linear Model Fits
anova.lm	ANOVA for Linear Model Fits
anova.mlm	Comparisons between Multivariate Linear Models
ansari.test	Ansari-Bradley Test
aov	Fit an Analysis of Variance Model
approxfun	Interpolation Functions
ar	Fit Autoregressive Models to Time Series
ar.ols	Fit Autoregressive Models to Time Series by OLS
arima	ARIMA Modelling of Time Series
arima.sim	Simulate from an ARIMA Model
arima0	ARIMA Modelling of Time Series - Preliminary Version
as.hclust	Convert Objects to Class hclust
asOneSidedFormula	Convert to One-Sided Formula
ave	Group Averages Over Level Combinations of Factors
bartlett.test	Bartlett Test of Homogeneity of Variances
binom.test	Exact Binomial Test
biplot	Biplot of Multivariate Data
biplot.princomp	Biplot for Principal Components
bw.nrd0	Bandwidth Selectors for Kernel Density Estimation
cancor	Canonical Correlations
case.names	Case and Variable Names of Fitted Models
chisq.test	Pearson's Chi-squared Test for Count Data
cmdscale	Classical (Metric) Multidimensional Scaling
coef	Extract Model Coefficients
complete.cases	Find Complete Cases
confint	Confidence Intervals for Model Parameters
constrOptim	Linearly Constrained Optimization
contr.helmert	(Possibly Sparse) Contrast Matrices
contrasts	Get and Set Contrast Matrices
convolve	Convolution of Sequences via FFT
cophenetic	Cophenetic Distances for a Hierarchical Clustering
cor	Correlation, Variance and Covariance (Matrices)
cor.test	Test for Association/Correlation Between Paired Samples
cov.wt	Weighted Covariance Matrices
cpgram	Plot Cumulative Periodogram
cutree	Cut a Tree into Groups of Data
decompose	Classical Seasonal Decomposition by Moving Averages
delete.response	Modify Terms Objects
dendrapply	Apply a Function to All Nodes of a Dendrogram
dendrogram	General Tree Structures
density	Kernel Density Estimation
deriv	Symbolic and Algorithmic Derivatives of Simple Expressions
deviance	Model Deviance

df.residual	Residual Degrees-of-Freedom
diff.ts	Methods for Time Series Objects
diffinv	Discrete Integration: Inverse of Differencing
dist	Distance Matrix Computation
dummy.coef	Extract Coefficients in Original Coding
ecdf	Empirical Cumulative Distribution Function
eff.aovlist	Compute Efficiencies of Multistratum Analysis of Variance
effects	Effects from Fitted Model
embed	Embedding a Time Series
expand.model.frame	Add new variables to a model frame
extractAIC	Extract AIC from a Fitted Model
factanal	Factor Analysis
factor.scope	Compute Allowed Changes in Adding to or Dropping from a Formula
family	Family Objects for Models
family.glm	Accessing Generalized Linear Model Fits
family.lm	Accessing Linear Model Fits
fft	Fast Discrete Fourier Transform (FFT)
filter	Linear Filtering on a Time Series
fisher.test	Fisher's Exact Test for Count Data
fitted	Extract Model Fitted Values
fivenum	Tukey Five-Number Summaries
fligner.test	Fligner-Killeen Test of Homogeneity of Variances
formula	Model Formulae
formula.nls	Extract Model Formula from nls Object
friedman.test	Friedman Rank Sum Test
ftable	Flat Contingency Tables
ftable.formula	Formula Notation for Flat Contingency Tables
getInitial	Get Initial Parameter Estimates
glm	Fitting Generalized Linear Models
glm.control	Auxiliary for Controlling GLM Fitting
hclust	Hierarchical Clustering
heatmap	Draw a Heat Map
identify.hclust	Identify Clusters in a Dendrogram
influence.measures	Regression Deletion Diagnostics
integrate	Integration of One-Dimensional Functions
interaction.plot	Two-way Interaction Plot
is.empty.model	Test if a Model's Formula is Empty
isoreg	Isotonic / Monotone Regression
kernapply	Apply Smoothing Kernel
kernel	Smoothing Kernel Objects
kmeans	K-Means Clustering
kruskal.test	Kruskal-Wallis Rank Sum Test
ks.test	Kolmogorov-Smirnov Tests
ksmooth	Kernel Regression Smoother
lag	Lag a Time Series
lag.plot	Time Series Lag Plots
line	Robust Line Fitting
listof	A Class for Lists of (Parts of) Model Fits
lm	Fitting Linear Models
lm.fit	Fitter Functions for Linear Models
lm.influence	Regression Diagnostics
loadings	Print Loadings in Factor Analysis
loess	Local Polynomial Regression Fitting
loess.control	Set Parameters for Loess
logLik	Extract Log-Likelihood
loglin	Fitting Log-Linear Models
lowess	Scatter Plot Smoothing
ls.diag	Compute Diagnostics for 'lsfit' Regression Results
ls.print	Print 'lsfit' Regression Results
lsfit	Find the Least Squares Fit
mad	Median Absolute Deviation
mahalanobis	Mahalanobis Distance
make.link	Create a Link for GLM Families
makepredictcall	Utility Function for Safe Prediction
manova	Multivariate Analysis of Variance
mantelhaen.test	Cochran-Mantel-Haenszel Chi-Squared Test for Count Data

mauchly.test	Mauchly's Test of Sphericity
mcnemar.test	McNemar's Chi-squared Test for Count Data
median	Median Value
medpolish	Median Polish (Robust Twoway Decomposition) of a Matrix
model.extract	Extract Components from a Model Frame
model.frame	Extracting the Model Frame from a Formula or Fit
model.matrix	Construct Design Matrices
model.tables	Compute Tables of Results from an Aov Model Fit
monthplot	Plot a Seasonal or other Subseries from a Time Series
mood.test	Mood Two-Sample Test of Scale
na.action	NA Action
na.contiguous	Find Longest Contiguous Stretch of non-NAs
na.fail	Handle Missing Values in Objects
na.print	Adjust for Missing Values
naresid	Adjust for Missing Values
nextn	Find Highly Composite Numbers
nlm	Non-Linear Minimization
nlminb	Optimization using PORT routines
nls	Nonlinear Least Squares
nls.control	Control the Iterations in nls
nobs	Extract the Number of Observations from a Fit.
numericDeriv	Evaluate Derivatives Numerically
offset	Include an Offset in a Model Formula
oneway.test	Test for Equal Means in a One-Way Layout
optim	General-purpose Optimization
optimize	One Dimensional Optimization
order.dendrogram	Ordering or Labels of the Leaves in a Dendrogram
p.adjust	Adjust P-values for Multiple Comparisons
pairwise.prop.test	Pairwise comparisons for proportions
pairwise.t.test	Pairwise t tests
pairwise.table	Tabulate p values for pairwise comparisons
pairwise.wilcox.test	Pairwise Wilcoxon Rank Sum Tests
plot.HoltWinters	Plot function for HoltWinters objects
plot.acf	Plot Autocovariance and Autocorrelation Functions
plot.density	Plot Method for Kernel Density Estimation
plot.isoreg	Plot Method for isoreg Objects
plot.lm	Plot Diagnostics for an 'lm' Object
plot.ppr	Plot Ridge Functions for Projection Pursuit Regression Fit
plot.profile.nls	Plot a profile.nls Object
plot.spec	Plotting Spectral Densities
plot.stepfun	Plot Step Functions
plot.stl	Methods for STL Objects
plot.ts	Plotting Time-Series Objects
poisson.test	Exact Poisson tests
poly	Compute Orthogonal Polynomials
power	Create a Power Link Object
power.anova.test	Power Calculations for Balanced One-Way Analysis of Variance Tests
power.prop.test	Power Calculations for Two-Sample Test for Proportions
power.t.test	Power calculations for one and two sample t tests
ppoints	Ordinates for Probability Plotting
ppr	Projection Pursuit Regression
prcomp	Principal Components Analysis
predict	Model Predictions
predict.Arima	Forecast from ARIMA fits
predict.HoltWinters	Prediction Function for Fitted Holt-Winters Models
predict.glm	Predict Method for GLM Fits
predict.lm	Predict method for Linear Model Fits
predict.loess	Predict Loess Curve or Surface
predict.nls	Predicting from Nonlinear Least Squares Fits
predict.smooth.spline	Predict from Smoothing Spline Fit
preplot	Pre-computations for a Plotting Object

princomp	Principal Components Analysis
print.power.htest	Print Methods for Hypothesis Tests and Power Calculation Objects
print.ts	Printing and Formatting of Time-Series Objects
printCoefmat	Print Coefficient Matrices
profile	Generic Function for Profiling Models
profile.nls	Method for Profiling nls Objects
proj	Projections of Models
prop.test	Test of Equal or Given Proportions
prop.trend.test	Test for trend in proportions
qbirthday	Probability of coincidences
qqnorm	Quantile-Quantile Plots
quade.test	Quade Test
quantile	Sample Quantiles
r2dtable	Random 2-way Tables with Given Marginals
rWishart	Random Wishart Distributed Matrices
read.ftable	Manipulate Flat Contingency Tables
rect.hclust	Draw Rectangles Around Hierarchical Clusters
relevel	Reorder Levels of Factor
reorder.default	Reorder Levels of a Factor
reorder.dendrogram	Reorder a Dendrogram
replications	Number of Replications of Terms
reshape	Reshape Grouped Data
residuals	Extract Model Residuals
runmed	Running Medians - Robust Scatter Plot Smoothing
scatter.smooth	Scatter Plot with Smooth Curve Fitted by Loess
screeplot	Screeplots
sd	Standard Deviation
se.contrast	Standard Errors for Contrasts in Model Terms
selfStart	Construct Self-starting Nonlinear Models
setName	Set the Names in an Object
shapiro.test	Shapiro-Wilk Normality Test
sigma	Extract Residual Standard Deviation 'Sigma'
simulate	Simulate Responses
smooth	Tukey's (Running Median) Smoothing
smooth.spline	Fit a Smoothing Spline
smoothEnds	End Points Smoothing (for Running Medians)
sortedXyData	Create a 'sortedXyData' Object
spec.ar	Estimate Spectral Density of a Time Series from AR Fit
spec.pgram	Estimate Spectral Density of a Time Series by a Smoothed Periodogram
spec.taper	Taper a Time Series by a Cosine Bell
spectrum	Spectral Density Estimation
splinefun	Interpolating Splines
start	Encode the Terminal Times of Time Series
stat.anova	GLM Anova Statistics
stats-deprecated	Deprecated Functions in Package 'stats'
stats-package	The R Stats Package
step	Choose a model by AIC in a Stepwise Algorithm
stepfun	Step Functions - Creation and Class
stl	Seasonal Decomposition of Time Series by Loess
summary.aov	Summarize an Analysis of Variance Model
summary.glm	Summarizing Generalized Linear Model Fits
summary.lm	Summarizing Linear Model Fits
summary.manova	Summary Method for Multivariate Analysis of Variance
summary.nls	Summarizing Non-Linear Least-Squares Model Fits
summary.princomp	Summary method for Principal Components Analysis
supsmu	Friedman's SuperSmoother
symnum	Symbolic Number Coding
t.test	Student's t-Test
termplo	Plot Regression Terms
terms	Model Terms
terms.formula	Construct a terms Object from a Formula
terms.object	Description of Terms Objects
time	Sampling Times of Time Series
toeplitz	Form Symmetric Toeplitz Matrix
ts	Time-Series Objects
ts.plot	Plot Multiple Time Series

ts.union	Bind Two or More Time Series
tsSmooth	Use Fixed-Interval Smoothing on Time Series
tsdiag	Diagnostic Plots for Time-Series Fits
tsp	Tsp Attribute of Time-Series-like Objects
uniroot	One Dimensional Root (Zero) Finding
update	Update and Re-fit a Model Call
update.formula	Model Updating
var.test	F Test to Compare Two Variances
varimax	Rotation Methods for Factor Analysis
vcov	Calculate Variance-Covariance Matrix for a Fitted Model Object
weighted.mean	Weighted Arithmetic Mean
weighted.residuals	Compute Weighted Residuals
weights	Extract Model Weights
wilcox.test	Wilcoxon Rank Sum and Signed Rank Tests
window	Time (Series) Windows
xtabs	Cross Tabulation

ANEXO 5.2 - INFORMATION ON PACKAGE 'HYDROTSM'

Description:

```

Package:      hydroTSM
Type:        Package
Title:       Time Series Management, Analysis and Interpolation for Hydrological
Modelling
Version:     0.6-0
Authors@R:   c( person("Mauricio Zambrano-Bigiarini", email = "mzb.devel@gmail.com",
role=c("aut", "cre", "cph"),
comment=c(ORCID = "0000-0002-9536-643X")) )
Maintainer:  Mauricio Zambrano-Bigiarini <mzb.devel@gmail.com>
Description: S3 functions for management, analysis, interpolation and plotting of
time series used in hydrology and
related environmental sciences. In particular, this package is highly
oriented to hydrological modelling
tasks. The focus of this package has been put in providing a collection
of tools useful for the daily work
of hydrologists (although an effort was made to optimise each function
as much as possible, functionality
has had priority over speed). Bugs / comments / questions /
collaboration of any kind are very welcomed, and
in particular, datasets that can be included in this package for
academic purposes.
License:     GPL (>= 2)
Depends:     R (>= 2.10.0), zoo (>= 1.7-2), xts (>= 0.9-7)
Imports:     e1071, gstat, automap, sp (>= 1.1-0), lattice, mapproj, stats, utils,
methods, graphics, grDevices
Suggests:   knitr
VignetteBuilder: knitr
URL:        https://github.com/hzambran/hydroTSM
MailingList: https://stat.ethz.ch/mailman/listinfo/r-sig-ecology
BugReports:  https://github.com/hzambran/hydroTSM/issues
LazyLoad:   yes
NeedsCompilation: no
Repository:  CRAN
Packaged:   2020-03-11 15:22:03 UTC; hzambran
Author:     Mauricio Zambrano-Bigiarini [aut, cre, cph] (<https://orcid.org/0000-
0002-9536-643X>)
Date/Publication: 2020-03-11 16:50:03 UTC
Built:      R 4.2.3; ; 2023-04-02 06:27:18 UTC; windows

```

Index:

EbroCatchmentsCHE	Subcatchments of the Ebro River basin (Spain)
EbroDEM1000m	Digital Elevation Model (DEM) of the Ebro River basin (Spain)

EbroPPgis	Spatial location of raingauges on the Ebro River basin
EbroPPTsMonthly	Ebro Monthly Precipitation Time Series
KarameaAtGorgeQts	Karamea at Gorge, time series of hourly streamflows
MaquehueTemuco	San Martino, ts of daily precipitation.
OcaEnOnaQts	Oca in "Ona" (Q0931), time series of daily streamflows.
SanMartinoPPTs	San Martino, ts of daily precipitation.
annualfunction	Annual Function
climograph	Climograph
daily2annual	(sub)Daily/Monthly -> Annual
daily2monthly	(sub)Daily -> Monthly
dip	Days in Period
diy	Days in Year
dm2seasonal	(sub)Daily/Monthly -> Seasonal Values
drawTimeAxis	Customized Time Axis
dwdays	Amount of dry/wet days in a time series
dwi	Days with Information
extract	Extract from Zoo
fdc	Flow Duration Curve
fdcu	Flow Duration Curve with uncertainty bounds.
gists2spt	Time Series and GIS Info -> (pseudo)Spatio-Temporal Object
hip	Hours in Period
hydroTSM-package	Management, analysis, interpolation and plot of hydrological time series, with focus on hydrological modelling
hydrokrige	Krige for Hydrological Time Series
hydropairs	Visual Correlation Matrix
hydroplot	Hydrological time series plotting and extraction.
hypsothetic	Hypsometric Curve
infillxy	Infills NA values
istdx	Inverse Standarization
izoo2rzoo	Irregular Zoo -> Regular Zoo
ma	Moving Average
matrixplot	Matrixplot
mip	Months in Period
monthlyfunction	Monthly Function
mssplot	Multiple spplot
rmlstchar	Remove First Character(s)
seasonalfunction	Seasonal Function
sfreq	Sampling Frequency
smry	Summary
sname2ts	Station Name -> Time Series
stdx	Standarization
subdaily2daily	Sub-daily -> Daily
time2season	Date/DateTime character -> Seasonal character
vector2zoo	Vector -> Zoo
yip	Years in Period
zoo2RHtest	Zoo -> RHTest

ANEXO 5.3 - INFORMATION ON PACKAGE 'GGPLOT2'

Description:

```
Package:          ggplot2
Version:          3.4.2
Title:            Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics
Authors@R:        c( person("Hadley", "Wickham", , "hadley@posit.co", role = "aut",
comment = c(ORCID =
                  "0000-0003-4757-117X")), person("Winston", "Chang", role = "aut",
comment = c(ORCID =
                  "0000-0002-1576-2126")), person("Lionel", "Henry", role = "aut"),
person("Thomas Lin", "Pedersen", ,
      "thomas.pedersen@posit.co", role = c("aut", "cre"), comment =
c(ORCID = "0000-0002-5147-4711")),
      person("Kohske", "Takahashi", role = "aut"), person("Claus",
"Wilke", role = "aut", comment = c(ORCID
      = "0000-0002-7470-9261")), person("Kara", "Woo", role = "aut",
comment = c(ORCID =
      "0000-0002-5125-4188")), person("Hiroaki", "Yutani", role =
"aut", comment = c(ORCID =
      "0000-0002-3385-7233")), person("Dewey", "Dunnington", role =
"aut", comment = c(ORCID =
      "0000-0002-9415-4582")), person("Posit, PBC", role = c("cph",
"fnd")) )
Description:      A system for 'declaratively' creating graphics, based on "The
Grammar of Graphics". You provide the
graphical primitives to use, and it
                    data, tell 'ggplot2' how to map variables to aesthetics, what
                    takes care of the details.
License:          MIT + file LICENSE
URL:              https://ggplot2.tidyverse.org,
https://github.com/tidyverse/ggplot2
BugReports:       https://github.com/tidyverse/ggplot2/issues
Depends:          R (>= 3.3)
Imports:          cli, glue, grDevices, grid, gtable (>= 0.1.1), isoband, lifecycle
(> 1.0.1), MASS, mgcv, rlang (>=
                    1.1.0), scales (>= 1.2.0), stats, tibble, vctrs (>= 0.5.0), withr
(>= 2.5.0)
Suggests:         covr, dplyr, ggplot2movies, hexbin, Hmisc, knitr, lattice,
mapproj, maps, mapproj, multcomp,
                    munsell, nlme, profvis, quantreg, ragg, RColorBrewer, rgeos,
rmarkdown, rpart, sf (>= 0.7-3), svglite
                    (>= 1.2.0.9001), testthat (>= 3.1.2), vdiffr (>= 1.0.0), xml2
Enhances:         sp
VignetteBuilder:  knitr
Config/Needs/website: ggtext, tidyr, forcats, tidyverse/tidytemplate
Config/testthat/edition: 3
Encoding:         UTF-8
LazyData:         true
RoxygenNote:      7.2.3
Collate:          'ggproto.R' 'ggplot-global.R' 'aaa-.R' 'aes-colour-fill-alpha.R'
'aes-evaluation.R'
                    'aes-group-order.R' 'aes-linetype-size-shape.R' 'aes-position.R'
'compat-plyr.R' 'utilities.R'
                    'aes.R' 'utilities-checks.R' 'legend-draw.R' 'geom-.R'
'annotation-custom.R' 'annotation-logticks.R'
                    'geom-polygon.R' 'geom-map.R' 'annotation-map.R' 'geom-raster.R'
'annotation-raster.R' 'annotation.R'
                    'autolayer.R' 'autoplot.R' 'axis-secondary.R' 'backports.R'
'bench.R' 'bin.R' 'coord-.R'
                    'coord-cartesian-.R' 'coord-fixed.R' 'coord-flip.R' 'coord-map.R'
'coord-munch.R' 'coord-polar.R'
                    'coord-quickmap.R' 'coord-sf.R' 'coord-transform.R' 'data.R'
'facet-.R' 'facet-grid-.R'
                    'facet-null.R' 'facet-wrap.R' 'fortify-lm.R' 'fortify-map.R'
'fortify-multcomp.R' 'fortify-spatial.R'
                    'fortify.R' 'stat-.R' 'geom-abline.R' 'geom-rect.R' 'geom-bar.R'
'geom-bin2d.R' 'geom-blank.R'
                    'geom-boxplot.R' 'geom-col.R' 'geom-path.R' 'geom-contour.R'
'geom-count.R' 'geom-crossbar.R'
```

```

'geom-density.R' 'geom-density2d.R' 'geom-segment.R' 'geom-curve.R' 'geom-defaults.R' 'geom-ribbon.R'
'geom-dotplot.R' 'geom-errorbar.R' 'geom-errorbarh.R' 'geom-freqpoly.R' 'geom-function.R'
'geom-hex.R' 'geom-histogram.R' 'geom-hline.R' 'geom-jitter.R' 'geom-label.R' 'geom-linerange.R'
'geom-point.R' 'geom-pointrange.R' 'geom-quantile.R' 'geom-rug.R' 'geom-sf.R' 'geom-smooth.R'
'geom-spoke.R' 'geom-text.R' 'geom-tile.R' 'geom-violin.R' 'geom-vline.R' 'ggplot2-package.R'
'grob-absolute.R' 'grob-dotstack.R' 'grob-null.R' 'grouping.R' 'guide-bins.R' 'guide-colorbar.R'
'guide-colorsteps.R' 'guide-legend.R' 'guides-.R' 'guides-axis.R' 'guides-grid.R' 'guides-none.R'
'hexbin.R' 'import-standalone-obj-type.R' 'import-standalone-types-check.R' 'labeller.R' 'labels.R'
'layer.R' 'layer-sf.R' 'layout.R' 'limits.R' 'margins.R' 'performance.R' 'plot-build.R'
'plot-construction.R' 'plot-last.R' 'plot.R' 'position-.R' 'position-collide.R' 'position-dodge.R'
'position-dodge2.R' 'position-identity.R' 'position-jitter.R' 'position-jitterdodge.R'
'position-nudge.R' 'position-stack.R' 'quick-plot.R' 'reshape-add-margins.R' 'save.R' 'scale-.R'
'scale-alpha.R' 'scale-binned.R' 'scale-brewer.R' 'scale-colour.R' 'scale-continuous.R'
'scale-date.R' 'scale-discrete-.R' 'scale-expansion.R' 'scale-gradient.R' 'scale-grey.R'
'scale-hue.R' 'scale-identity.R' 'scale-linetype.R' 'scale-linewidth.R' 'scale-manual.R'
'scale-shape.R' 'scale-size.R' 'scale-steps.R' 'scale-type.R' 'scale-view.R' 'scale-viridis.R'
'scales-.R' 'stat-align.R' 'stat-bin.R' 'stat-bin2d.R' 'stat-bindot.R' 'stat-binhex.R'
'stat-boxplot.R' 'stat-contour.R' 'stat-count.R' 'stat-density-2d.R' 'stat-density.R' 'stat-ecdf.R'
'stat-ellipse.R' 'stat-function.R' 'stat-identity.R' 'stat-qq-line.R' 'stat-qq.R'
'stat-quantilemethods.R' 'stat-sf-coordinates.R' 'stat-sf.R' 'stat-smooth-methods.R' 'stat-smooth.R'
'stat-sum.R' 'stat-summary-2d.R' 'stat-summary-bin.R' 'stat-summary-hex.R' 'stat-summary.R'
'stat-unique.R' 'stat-ydensity.R' 'summarise-plot.R' 'summary.R' 'theme-elements.R' 'theme.R'
'theme-defaults.R' 'theme-current.R' 'utilities-break.R' 'utilities-grid.R' 'utilities-help.R'
'utilities-matrix.R' 'utilities-resolution.R' 'utilities-table.R' 'utilities-tidy-eval.R' 'zxx.R'
'zzz.R'
NeedsCompilation: no
Packaged: 2023-03-31 08:04:34 UTC; thomas
Author: Hadley Wickham [aut] (<https://orcid.org/0000-0003-4757-117X>),
Winston Chang [aut] (<https://orcid.org/0000-0002-1576-2126>), Lionel Henry [aut],
Thomas Lin Pedersen [aut, cre] (<https://orcid.org/0000-0002-5147-4711>), Kohske Takahashi
[aut], Claus Wilke [aut] (<https://orcid.org/0000-0002-7470-9261>), Kara Woo [aut]
(<https://orcid.org/0000-0002-5125-4188>),
Hiroaki Yutani [aut] (<https://orcid.org/0000-0002-3385-7233>),
Dewey Dunnington [aut] (<https://orcid.org/0000-0002-9415-4582>), Posit, PBC [cph, fnd]
Maintainer: Thomas Lin Pedersen <thomas.pedersen@posit.co>
Repository: CRAN
Date/Publication: 2023-04-03 14:10:02 UTC
Built: R 4.2.3; ; 2023-04-05 23:57:18 UTC; windows

```

Index:

```

+.gg          Add components to a plot
CoordSf      Visualise sf objects

```

aes	Construct aesthetic mappings
aes_colour_fill_alpha	Colour related aesthetics: colour, fill, and alpha
aes_eval	Control aesthetic evaluation
aes_group_order	Aesthetics: grouping
aes_linetype_size_shape	Differentiation related aesthetics: linetype, size, shape
aes_position	Position related aesthetics: x, y, xmin, xmax, ymin, ymax, xend, yend
annotate	Create an annotation layer
annotation_custom	Annotation: Custom grob
annotation_logticks	Annotation: log tick marks
annotation_map	Annotation: a map
annotation_raster	Annotation: high-performance rectangular tiling
autolayer	Create a ggplot layer appropriate to a particular data type
autoplot	Create a complete ggplot appropriate to a particular data type
borders	Create a layer of map borders
coord_cartesian	Cartesian coordinates
coord_fixed	Cartesian coordinates with fixed "aspect ratio"
coord_flip	Cartesian coordinates with x and y flipped
coord_map	Map projections
coord_polar	Polar coordinates
coord_trans	Transformed Cartesian coordinate system
cut_interval	Discretise numeric data into categorical
diamonds	Prices of over 50,000 round cut diamonds
draw_key	Key glyphs for legends
economics	US economic time series
expand_limits	Expand the plot limits, using data
expansion	Generate expansion vector for scales
facet_grid	Lay out panels in a grid
facet_wrap	Wrap a 1d ribbon of panels into 2d
faithfuld	2d density estimate of Old Faithful data
fortify	Fortify a model with data.
geom_abline	Reference lines: horizontal, vertical, and diagonal
geom_bar	Bar charts
geom_bin_2d	Heatmap of 2d bin counts
geom_blank	Draw nothing
geom_boxplot	A box and whiskers plot (in the style of Tukey)
geom_contour	2D contours of a 3D surface
geom_count	Count overlapping points
geom_crossbar	Vertical intervals: lines, crossbars & errorbars
geom_density	Smoothed density estimates
geom_density_2d	Contours of a 2D density estimate
geom_dotplot	Dot plot
geom_errorbarh	Horizontal error bars
geom_freqpoly	Histograms and frequency polygons
geom_function	Draw a function as a continuous curve
geom_hex	Hexagonal heatmap of 2d bin counts
geom_jitter	Jittered points
geom_label	Text
geom_map	Polygons from a reference map
geom_path	Connect observations
geom_point	Points
geom_polygon	Polygons
geom_qq_line	A quantile-quantile plot
geom_quantile	Quantile regression
geom_raster	Rectangles
geom_ribbon	Ribbons and area plots
geom_rug	Rug plots in the margins
geom_segment	Line segments and curves
geom_smooth	Smoothed conditional means
geom_spoke	Line segments parameterised by location, direction and distance
geom_violin	Violin plot
get_alt_text	Extract alt text from a plot
ggplot	Create a new ggplot

ggproto	Create a new ggproto object
ggsave	Save a ggplot (or other grid object) with sensible defaults
guide_axis	Axis guide
guide_bins	A binned version of guide_legend
guide_colourbar	Continuous colour bar guide
guide_coloursteps	Discretized colourbar guide
guide_legend	Legend guide
guide_none	Empty guide
guides	Set guides for each scale
hmisc	A selection of summary functions from Hmisc
label_bquote	Label with mathematical expressions
labeller	Construct labelling specification
labellers	Useful labeller functions
labs	Modify axis, legend, and plot labels
lims	Set scale limits
luv_colours	'colors()' in Luv space
margin	Theme elements
mean_se	Calculate mean and standard error of the mean
midwest	Midwest demographics
mpg	Fuel economy data from 1999 to 2008 for 38 popular models of cars
msleep	An updated and expanded version of the mammals sleep dataset
position_dodge	Dodge overlapping objects side-to-side
position_identity	Don't adjust position
position_jitter	Jitter points to avoid overplotting
position_jitterdodge	Simultaneously dodge and jitter
position_nudge	Nudge points a fixed distance
position_stack	Stack overlapping objects on top of each another
presidential	Terms of 12 presidents from Eisenhower to Trump
print.ggplot	Explicitly draw plot
print.ggproto	Format or print a ggproto object
qplot	Quick plot
resolution	Compute the "resolution" of a numeric vector
scale_alpha	Alpha transparency scales
scale_colour_brewer	Sequential, diverging and qualitative colour scales from ColorBrewer
scale_colour_continuous	Continuous and binned colour scales
scale_colour_discrete	Discrete colour scales
scale_colour_gradient	Gradient colour scales
scale_colour_grey	Sequential grey colour scales
scale_colour_hue	Evenly spaced colours for discrete data
scale_colour_identity	Use values without scaling
scale_colour_manual	Create your own discrete scale
scale_colour_steps	Binned gradient colour scales
scale_colour_viridis_d	Viridis colour scales from viridisLite
scale_linetype	Scale for line patterns
scale_linewidth	Scales for line width
scale_shape	Scales for shapes, aka glyphs
scale_size	Scales for area or radius
scale_x_binned	Positional scales for binning continuous data (x & y)
scale_x_continuous	Position scales for continuous data (x & y)
scale_x_date	Position scales for date/time data
scale_x_discrete	Position scales for discrete data
seals	Vector field of seal movements
sec_axis	Specify a secondary axis
stat_ecdf	Compute empirical cumulative distribution
stat_ellipse	Compute normal data ellipses
stat_identity	Leave data as is
stat_sf_coordinates	Extract coordinates from 'sf' objects
stat_summary_2d	Bin and summarise in 2d (rectangle & hexagons)
stat_summary_bin	Summarise y values at unique/binning x
stat_unique	Remove duplicates
theme	Modify components of a theme
theme_get	Get, set, and modify the active theme
theme_grey	Complete themes

txhousing Housing sales in TX
vars Quote faceting variables

ANEXO 5.4 - INFORMATION ON PACKAGE 'PLOTLY'

Description:

```
Package:                   plotly
Title:                    Create Interactive Web Graphics via 'plotly.js'
Version:                  4.10.1
Authors@R:                c(person("Carson", "Sievert", role = c("aut", "cre"), email =
"cpsievert1@gmail.com", comment = c(ORCID =
"0000-0002-4958-2844")), person("Chris", "Parmer", role = "aut", email =
"chris@plot.ly"), person("Toby",
"Hocking", role = "aut", email = "tdhock5@gmail.com"), person("Scott",
"Chamberlain", role = "aut", email =
"myrmecocystus@gmail.com"), person("Karthik", "Ram", role = "aut", email
= "karthik.ram@gmail.com"),
                          person("Marianne", "Corvellec", role = "aut", email =
"marianne.corvellec@igdore.org", comment = c(ORCID =
"0000-0002-1994-3581")), person("Pedro", "Despouy", role = "aut", email
= "pedro@plot.ly"), person("Salim",
"Brüggemann", role = "ctb", email = "salim-b@pm.me", comment = c(ORCID =
"0000-0002-5329-5987")),
                          person("Plotly Technologies Inc.", role = "cph"))
License:                  MIT + file LICENSE
Description:               Create interactive web graphics from 'ggplot2' graphs and/or a custom
interface to the (MIT-licensed)
                          JavaScript library 'plotly.js' inspired by the grammar of graphics.
URL:                      https://plotly-r.com, https://github.com/plotly/plotly.R,
https://plotly.com/r/
BugReports:               https://github.com/plotly/plotly.R/issues
Depends:                  R (>= 3.2.0), ggplot2 (>= 3.0.0)
Imports:                  tools, scales, httr (>= 1.3.0), jsonlite (>= 1.6), magrittr, digest,
viridisLite, base64enc, htmltools (>=
0.3.6), htmlwidgets (>= 1.5.2.9001), tidyr (>= 1.0.0), RColorBrewer,
dplyr, vctrs, tibble, lazyeval (>=
0.2.0), rlang (>= 0.4.10), crosstalk, purrr, data.table, promises
Suggests:                MASS, maps, hexbin, ggthemes, GGally, ggalluvial, testthat, knitr,
devtools, shiny (>= 1.1.0), shinytest (>=
1.3.0), curl, rmarkdown, Cairo, broom, webshot, listviewer, dendextend,
maptools, rgeos, sf, png, IRdisplay,
                          processx, plotlyGeoAssets, forcats, palmerpenguins, rversions,
reticulate, rsvg
LazyData:                true
RoxygenNote:             7.2.1
Encoding:                UTF-8
NeedsCompilation:        no
Packaged:                2022-11-04 22:38:43 UTC; cpsievert
Author:                  Carson Sievert [aut, cre] (<https://orcid.org/0000-0002-4958-2844>),
Chris Parmer [aut], Toby Hocking [aut],
                          Scott Chamberlain [aut], Karthik Ram [aut], Marianne Corvellec [aut]
                          (<https://orcid.org/0000-0002-1994-3581>), Pedro Despouy [aut], Salim
Brüggemann [ctb]
                          (<https://orcid.org/0000-0002-5329-5987>), Plotly Technologies Inc.
[cph]
Maintainer:              Carson Sievert <cpsievert1@gmail.com>
Repository:              CRAN
Date/Publication:        2022-11-07 07:30:03 UTC
Built:                   R 4.2.3; ; 2023-04-02 05:21:13 UTC; windows

Index:

TeX                      Render TeX in a plotly graph using MathJax
add_annotatons          Add an annotation(s) to a plot
add_data                Add data to a plotly visualization
add_fun                 Apply function to plot, without modifying data
add_trace               Add trace(s) to a plotly visualization
```

animation_opts	Animation configuration options
api_create	Tools for working with plotly's REST API (v2)
as.widget	Convert a plotly object to an htmlwidget object
as_widget	Convert a list to a plotly htmlwidget object
attrs_selected	Specify attributes of selection traces
bbox	Estimate bounding box of a rotated string
colorbar	Modify the colorbar
config	Set the default configuration for plotly
embed_notebook	Embed a plot as an iframe into a Jupyter Notebook
event_data	Access plotly user input event data in shiny
event_register	Register a shiny input value
event_unregister	Un-register a shiny input value
export	Export a plotly graph to a static file
geom2trace	Convert a "basic" geoms to a plotly.js trace.
get_figure	Request a figure object
gg2list	Convert a ggplot to a list.
ggplotly	Convert ggplot2 to plotly
group2NA	Separate groups with missing values
hide_colorbar	Hide color bar(s)
hide_guides	Hide guides (legends and colorbars)
hide_legend	Hide legend
highlight	Query graphical elements in multiple linked views
highlight_key	Highlight/query data based on primary key
hobbs	Hobbs data
knit_print.api_grid	Embed a plotly grid as an iframe in a knitr doc
knit_print.api_grid_local	Embed a plotly grid as an iframe in a knitr doc
knit_print.api_plot	Embed a plotly figure as an iframe in a knitr doc
last_plot	Retrieve the last plot to be modified or created.
layout	Modify the layout of a plotly visualization
mic	Mic data
offline	Plotly Offline
orca	Static image exporting via orca
partial_bundle	Use a partial bundle of plotly.js
plot_dendro	Plot an interactive dendrogram
plot_geo	Initiate a plotly-geo object
plot_ly	Initiate a plotly visualization
plot_mapbox	Initiate a plotly-mapbox object
plotly-shiny	Shiny bindings for plotly
plotlyProxy	Modify a plotly object inside a shiny app
plotly_IMAGE	Create a static image
plotly_POST	Create/Modify plotly graphs
plotly_build	'Build' (i.e., evaluate) a plotly object
plotly_data	Obtain data associated with a plotly graph
plotly_empty	Create a complete empty plotly graph.
plotly_example	Run a plotly example(s)
plotly_json	Inspect JSON sent to plotly.js
print.api	Print method for a 'generic' API response
print.api_grid	Print a plotly grid object
print.api_grid_local	Print a plotly grid object
print.api_plot	Print a plot on plotly's platform
rangeslider	Add a range slider to the x-axis
raster2uri	Encode a raster object as a data URI
remove_typedarray_polyfill	Remove TypedArray polyfill
res_mn	Minnesotan Indian Reservation Lands
save_image	Save plot as a static image
schema	Acquire (and optionally display) plotly's plot schema
showRGB	View colors already formatted by toRGB()
signup	Create a new plotly account.
style	Modify trace(s)
subplot	View multiple plots in a single view
toRGB	Convert R colours to RGBA hexadecimal colour values
toWebGL	Convert trace types to WebGL
to_basic	Convert a geom to a "basic" geom.

wind

Wind data

ANEXO 5.5 - INFORMATION ON PACKAGE 'TREND'

Description:

```
Package:          trend
Version:         1.1.5
Date:           2023-03-26
Title:          Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection
Authors@R:      person(given = "Thorsten", family = "Pohlert", email =
"thorsten.pohlert@gmx.de", comment =
c(ORCID = "0000-0003-3855-3025"), role = c("aut", "cre"))
Depends:        R (>= 3.0)
Description:     The analysis of environmental data often requires the
detection of trends and change-points. This
package includes tests for trend detection (Cox-Stuart Trend
Test, Mann-Kendall Trend Test,
(correlated) Hirsch-Slack Test, partial Mann-Kendall Trend
Test, multivariate (multisite)
Mann-Kendall Trend Test, (Seasonal) Sen's slope, partial
Pearson and Spearman correlation trend
test), change-point detection (Lanzante's test procedures,
Pettitt's test, Buishand Range Test,
Buishand U Test, Standard Normal Homogeneity Test), detection
of non-randomness (Wallis-Moore
Phase Frequency Test, Bartels rank von Neumann's ratio test,
Wald-Wolfowitz Test) and the two
sample Robust Rank-Order Distributional Test.
Imports:        extraDistr (>= 1.8.0)
Suggests:      strucchange, Kendall, psych, datasets
Classification/MSC-2010: 62F03, 62G10, 62M10, 62P12
License:       GPL-3
Encoding:     UTF-8
ZipData:      yes
NeedsCompilation: yes
RoxygenNote:  7.2.2
Packaged:     2023-03-26 12:38:51 UTC; thorsten
Author:       Thorsten Pohlert [aut, cre] (<https://orcid.org/0000-0003-
3855-3025>)
Maintainer:   Thorsten Pohlert <thorsten.pohlert@gmx.de>
Repository:   CRAN
Date/Publication: 2023-03-26 17:20:02 UTC
Built:       R 4.2.3; x86_64-w64-mingw32; 2023-04-02 02:35:47 UTC; windows
ExperimentalWindowsRuntime: ucrt
Archs:       x64
```

Index:

```
PagesData      Simulated data of Page (1955) as test-example
               for change-point detection
bartels.test   Bartels Test for Randomness
br.test        Buishand Range Test for Change-Point Detection
bu.test        Buishand U Test for Change-Point Detection
cs.test        Cox and Stuart Trend Test
csmk.test      Correlated Seasonal Mann-Kendall Test
hcb            Monthly concentration of particle bound HCB,
               River Rhine
lanzante.test  Lanzante's Test for Change Point Detection
maxau          Annual suspended sediment concentration and
               flow data, River Rhine
mk.test        Mann-Kendall Trend Test
mult.mk.test   Multivariate (Multisite) Mann-Kendall Test
partial.cor.trend.test Partial Correlation Trend Test
partial.mk.test Partial Mann-Kendall Trend Test
pettitt.test   Pettitt's Test for Change-Point Detection
plot.cptest    Plotting cptest-objects
```

rrhod.test	Robust Rank-Order Distributional Test
sea.sens.slope	Seasonal Sen's Slope
sens.slope	Sen's slope
smk.test	Seasonal Mann-Kendall Trend Test
snh.test	Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) for Change-Point Detection
summary.smktest	Object summaries
wm.test	Wallis and Moore Phase-Frequency Test
ww.test	Wald-Wolfowitz Test for Independence and Stationarity

ANEXO 5.6 - INFORMATION ON PACKAGE 'GRID'

Description:

Package:	grid
Version:	4.2.3
Priority:	base
Title:	The Grid Graphics Package
Author:	Paul Murrell <paul@stat.auckland.ac.nz>
Maintainer:	R Core Team <do-use-Contact-address@r-project.org>
Contact:	R-help mailing list <r-help@r-project.org>
Description:	A rewrite of the graphics layout capabilities, plus some support for interaction.
Imports:	grDevices, utils
License:	Part of R 4.2.3
NeedsCompilation:	yes
Built:	R 4.2.3; x86_64-w64-mingw32; 2023-03-15 14:01:04 UTC; windows
ExperimentalWindowsRuntime:	ucrt

Index:

Grid	Grid Graphics
absolute.size	Absolute Size of a Grob
arrow	Describe arrows to add to a line.
as.mask	Define a Soft Mask
calcStringMetric	Calculate Metric Information for Text
convertUnit	Convert Between Different grid Coordinate Systems
current.viewport	Get the Current Grid Viewport (Tree)
dataViewport	Create a Viewport with Scales based on Data
depth	Determine the number of levels in an object.
deviceLoc	Convert Viewport Location to Device Location
drawDetails	Customising grid Drawing
editDetails	Customising grid Editing
editViewport	Modify a Viewport
explode	Explode a path into its components.
gEdit	Create and Apply Edit Objects
gPath	Concatenate Grob Names
getNames	List the names of grobs on the display list
gpar	Handling Grid Graphical Parameters
grid-package	The Grid Graphics Package
grid.DLapply	Modify the Grid Display List
grid.add	Add a Grid Graphical Object
grid.bezier	Draw a Bezier Curve
grid.cap	Capture a raster image
grid.circle	Draw a Circle
grid.clip	Set the Clipping Region
grid.copy	Make a Copy of a Grid Graphical Object
grid.curve	Draw a Curve Between Locations
grid.delay	Encapsulate calculations and generating a grob
grid.display.list	Control the Grid Display List
grid.draw	Draw a grid grob
grid.edit	Edit the Description of a Grid Graphical Object
grid.force	Force a grob into its components
grid.frame	Create a Frame for Packing Objects
grid.function	Draw a curve representing a function
grid.get	Get a Grid Graphical Object

grid.grab	Grab the current grid output
grid.grep	Search for Grobs and/or Viewports
grid.grill	Draw a Grill
grid.group	Draw a Group
grid.layout	Create a Grid Layout
grid.lines	Draw Lines in a Grid Viewport
grid.locator	Capture a Mouse Click
grid.ls	List the names of grobs or viewports
grid.move.to	Move or Draw to a Specified Position
grid.newpage	Move to a New Page on a Grid Device
grid.null	Null Graphical Object
grid.pack	Pack an Object within a Frame
grid.path	Draw a Path
grid.place	Place an Object within a Frame
grid.plot.and.legend	A Simple Plot and Legend Demo
grid.points	Draw Data Symbols
grid.polygon	Draw a Polygon
grid.pretty	Generate a Sensible ("Pretty") Set of Breakpoints
grid.raster	Render a raster object
grid.record	Encapsulate calculations and drawing
grid.rect	Draw rectangles
grid.refresh	Refresh the current grid scene
grid.remove	Remove a Grid Graphical Object
grid.reorder	Reorder the children of a gTree
grid.segments	Draw Line Segments
grid.set	Set a Grid Graphical Object
grid.show.layout	Draw a Diagram of a Grid Layout
grid.show.viewport	Draw a Diagram of a Grid Viewport
grid.stroke	Stroke or Fill a Path
grid.text	Draw Text
grid.xaxis	Draw an X-Axis
grid.xspline	Draw an Xspline
grid.yaxis	Draw a Y-Axis
gridCoords	Create Sets of Coordinates for Grid Grobs
grob	Create Grid Graphical Objects, aka "Grob"s
grobCoords	Calculate Points on the Perimeter of a Grob
grobName	Generate a Name for a Grob
grobWidth	Create a Unit Describing the Width of a Grob
grobX	Create a Unit Describing a Grob Boundary Location
legendGrob	Constructing a Legend Grob
makeContent	Customised grid Grobs
patterns	Define Gradient and Pattern Fills
plotViewport	Create a Viewport with a Standard Plot Layout
pushViewport	Maintaining and Navigating the Grid Viewport Tree
resolveRasterSize	Utility function to resolve the size of a raster grob
roundrect	Draw a rectangle with rounded corners
showGrob	Label grid grobs.
showViewport	Display grid viewports.
stringWidth	Create a Unit Describing the Width and Height of a String or Math Expression
unit	Function to Create a Unit Object
unit.c	Combine Unit Objects
unit.length	Length of a Unit Object
unit.pmin	Parallel Unit Minima and Maxima
unit.rep	Replicate Elements of Unit Objects
unitType	Return the Units of a Unit Object
valid.just	Validate a Justification
validDetails	Customising grid grob Validation
viewport	Create a Grid Viewport
viewportTransform	Define a Group Transformation
vpPath	Concatenate Viewport Names
widthDetails	Width and Height of a grid grob
xDetails	Boundary of a grid grob
xsplinePoints	Return the points that would be used to draw an Xspline (or a Bezier curve).