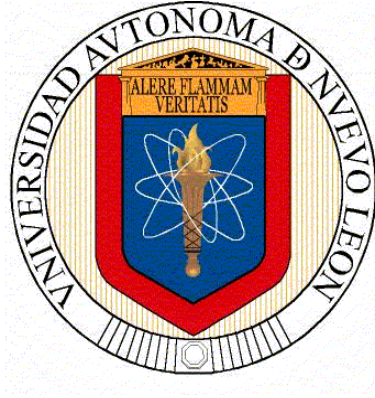


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE PRECIPITACIÓN EN LA
CUENCA RÍO BRAVO – SAN JUAN POR MEDIO DE PRODUCTOS
SATELITALES DE PRECIPITACIÓN Y ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS**

PRESENTA

DARIELA AMARANTA VÁZQUEZ RODRÍGUEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS
CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

AGOSTO 2023

Análisis de tendencias de precipitación en la cuenca Río Bravo – San Juan por medio de productos satelitales de precipitación y estaciones climatológicas.

Aprobación de la tesis:

Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián
Director de tesis

Dr. Roberto Carlos Fonseca Ortiz
Codirector Externo de tesis

Dr. José Luis Bruster Flores
Evaluador Interno

Dr. Gerardo de Jesús Fajardo San Miguel
Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación

A

la memoria y esfuerzo de Lázaro Rodríguez Acosta †,
mi Papá Chaparro que siempre me impulsó a conseguir el éxito.

Y a mis padres Elías Vázquez Godina y Juana Rodríguez Piña,
por su amor y dedicación.

V

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater la Universidad Autónoma de Nuevo León y mi casa de estudios la Facultad de Ingeniería Civil, por brindarme el conocimiento y oportunidades para formarme como profesional y como investigadora.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado mediante su sistema becas, sin el cual no hubiera sido posible realizar esta investigación.

A mi director de tesis, el Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián, por su guía y apoyo durante estos dos años. Le agradezco mucho que me haya tomado como su tesista y me permitiera desarrollarme en este campo tan bonito que es la hidrología.

Al Dr. José Luis Bruster Flores, por su ayuda y paciencia para desarrollar y comprender los códigos utilizados en esta tesis.

Al Dr. Carlos Roberto Fonseca Ortiz, por la guía y retroalimentación brindada durante el desarrollo de esta tesis.

A la Dra. Fabiola Doracely Yépez Rincón, por su guía y tutoría en el manejo de los sistemas de información geográfica.

Al Dr. Héctor de León, por su guía y tutoría durante estos dos años de maestría, le agradezco mucho su apoyo y consejos que me brindo como mi tutor, fue un placer coincidir con usted.

Al Instituto de Ingeniería Civil y su cuerpo académico Ciencias del Agua, así como al departamento de Geomática por brindarme las licencias de los programas utilizados durante el desarrollo de esta tesis.

A mi jefe el Dr. Benjamín Limón Rodríguez por su apoyo incondicional desde que lo conocí, gracias por creer en mi desde que era una casi ingeniera en mis

primeros años de licenciatura, por la confianza que depositó en mí durante mi servicio social en el Departamento de Ingeniería Ambiental, por las experiencias y conocimientos que me brindó durante mi maestría, por la confianza ahora que trabajo para usted y sobre todo por motivarme a seguir como investigadora.

A mis compañeros y amigos de los cubículos: Carlos Caballero, Lourdes Mata, Gabriel Morales, Deyna de la Fuente, Fernanda Hernández, Alan Arvizu, Paola Romero, Edwind Fariz, Sebastián Rodríguez, Javier Ramírez, Meraly López, Karla Medellín y Guillermo Elizondo. Gracias “*hermanes*” por hacer de estos dos años los más bonitos y divertidos.

A mis Quesadillas: Damaris Damas, Daniela Ríos, Andrea Acevedo, Karen Rodríguez, Jocelyn Saavedra, y Susana Arce, la amistad que me dio el internet y ha sobrepasado la barrera del espacio y el tiempo, mil gracias por acompañarme y estar conmigo, las quiero y aprecio demasiado.

A mis amigos de licenciatura Mariana Garza, Valeria Pena y Carlos Reyes, por su compañía desde aquellos días en la biblioteca de la FIC hasta ahora donde somos ingenieros en caminos profesionales distintos, pero en contacto y apoyándonos. Mil gracias por siempre hacerme reír y darme las mejores anécdotas.

A mis mejores amigas de toda la vida Mónica Rodríguez y Daniela Salcido, que me han estado en todos los momentos importantes de mi vida, incluso ahora que el destino nos ha llevado por rumbos distintos siempre están presentes, y sin importar qué siempre voy a querer y atesorar.

A mi tía Aracely Rodríguez por todo el apoyo que me ha brindado, mil gracias por impulsarme a seguir mis sueños y por escucharme. A mi tía Martha Rodríguez por todo su cariño, cuidado, y por todas sus enseñanzas.

A mis abuelos Antonia Piña y Lázaro Rodríguez†, por el cariño y consejos que me han brindado, por cuidarme y procurarme desde el primer día de mi vida.

A mi hermano, mi compañero de aventuras y al mejor regalo que me pudieron dar mis papás, gracias Shaiel por siempre estar ahí para mí, te quiero mucho hermanito.

Quiero agradecer con todo mi corazón a mis padres Elías Vázquez Godina y Juana Rodríguez Piña, por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida, por el amor y el cariño que me han demostrado y por forjarme como persona. Este logro también es para ustedes por siempre esforzarse en darme lo mejor.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción y Marco Teórico	1
1.1 Panorama.....	1
1.2 Precipitación.....	3
1.2.1 Variabilidad y Cambio Climático.....	4
1.3 Mediciones Climatológicas	5
1.3.1 Estaciones Climatológicas	6
1.3.2 Productos de Precipitación por Satélite	6
1.4 Tendencias	14
1.4.1 Tendencias De Precipitación.....	14
1.4.2. Pruebas paramétricas.....	15
1.4.3. Pruebas no paramétricas.....	18
1.5 Justificación.....	21
1.6 Hipótesis.....	23
1.7 Objetivo Principal	23
1.7.1 Objetivos particulares	23
Capítulo 2. Metodología.....	25
2.1 Zona de Estudio	25
2.1.1 Caracterización de la zona	25

2.1.2 Fuentes de agua disponibles e infraestructura	27
2.2 Información de precipitación.....	29
2.2.1 Estaciones climatológicas convencionales	30
2.2.2 Productos de Precipitación por Satélite	34
2.3 Caracterización y adecuación de la información	41
2.3.1 Formato y georreferenciación	41
2.3.2 Tiempo (zonas horarias)	46
2.4 Pruebas Estadísticas.....	48
2.4.1. Acumulados	48
2.4.2 Promedios.....	52
2.4.3 Correlación	56
2.4.4 Pruebas de Error	59
2.4.5 Pruebas BIAS	60
2.5 Tendencias	61
2.5.1 Mann – Kendall.....	61
Capítulo 3. Resultados y Discusión	65
3.1 Precipitación.....	66
3.1.1 Panorama general	66
3.1.2 Comportamiento espacial	69
3.2 Análisis mensual.....	73

3.2.1 Comportamiento por observación	74
3.2.2 Comportamiento por estación	81
3.3 Análisis Anual	105
3.3.1 Comportamiento por observación	105
3.3.2 Comportamiento por estación	109
3.4 Tendencias de precipitación	126
3.4.1 Tendencia detectada según las observaciones terrenas	126
3.4.2 El uso de PPS para detectar tendencias	135
Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones	138
Conclusión General	138
Conclusiones de los Productos de Precipitación Por Satélite	139
Conclusiones de la Tendencia de Precipitación	143
Limitaciones, Recomendaciones y Futuras Áreas de Estudio	144
Referencias Bibliográficas	146
Apéndices	164
Apéndice A. Códigos para extracción de información satelital	166
Apéndice A.1. Código para extracción de información de CMORPH en GNU Octave (version 7.1.0)	166
Apéndice A.2. Código para el renombre de capas de QGIS utilizando la Consola de Phytón.	168
Apéndice B. Códigos para pruebas estadísticas en RStudio version 4.2.0.	168

Apéndice B.1. Código para las pruebas MAE y RMSE.....	168
Apéndice B.2. Código para las pruebas Mann – Kendal	169
Apéndice B.3. Código para la prueba BIAS.....	170
Apéndice B.4. Código para la generación de correlaciones	171
Apéndice C. Tablas de información por estación.....	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca Río Bravo - San Juan	26
Figura 2. Tipos de clima presentes en la cuenca RH24B	27
Figura 3. Subcuencas, cauces e infraestructura en la cuenca Río Bravo - San Juan	28
Figura 4. Estaciones Climatológicas convencionales localizadas dentro de la cuenca	32
Figura 5. Página web CHRS Data Portal	36
Figura 6. Proceso y pagina web para obtención de datos CMORPH	38
Figura 7. Comparativa de tamaño de píxel y estaciones para IMERG	43
Figura 8. Comparativa de tamaño de píxel y estaciones para PERSIANN - CSS	44
Figura 9. Promedio mensual de precipitación por año de las Estaciones Climatológicas.....	50
Figura 10. Acumulados anuales por estación climatológica.....	67
Figura 11. Promedios anuales de precipitación por observación	67
Figura 12. Eventos extraordinarios ocurridos durante el período de estudio	68
Figura 13. Zonas propuestas para la cuenca Río Bravo - San Juan.....	69
Figura 14. Acumulados Anuales de Precipitación por año	70
Figura 15. Promedios mensuales de precipitación por año con información de las Estaciones Climatológicas Convencionales.....	74

Figura 16. Caja y bigotes de los promedios mensuales de precipitación por observación.....	76
Figura 17. CMORPH: Correlación de Pearson por estación para los meses de agosto, enero y julio.....	85
Figura 18. CMORPH: Correlación de Pearson por estación para los meses de febrero, septiembre y abril	86
Figura 19. CMORPH: Correlaciones de Spearman por estación para agosto, enero y julio,.....	88
Figura 20. CMORPH: Correlaciones de Spearman por estación para los meses de febrero, septiembre y abril	89
Figura 21. IMERG Correlaciones de Pearson por estación para los meses de agosto, enero y julio.....	92
Figura 22. IMERG Correlaciones de Spearman por estación para los meses de agosto, enero y julio.....	93
Figura 23. IMERG Correlaciones por estación para los meses de febrero, septiembre y abril. a) Correlaciones de Pearson. b) Correlaciones de Spearman	96
Figura 24. PERSIANN - CCS: correlaciones de Pearson por estación para los meses de agosto, enero, abril y julio.....	99
Figura 25. PERSIANN - CCS: correlaciones de Spearman por estación para los meses de agosto, enero y julio	100
Figura 26.PERSIANN - CCS: Correlaciones por estación para los meses de febrero, septiembre y abril. a) Correlación de Pearson. b) Correlación de Spearman	103

Figura 27. Caja y bigotes de los promedios de precipitación anual por observación	106
Figura 28. Correlación anual de Pearson para IMERG.....	111
Figura 29. Correlación Anual de Pearson para IMERG	112
Figura 30. BIAS Anual por estación para IMERG	114
Figura 31. Correlación anual de Pearson por estación para CMORPH	116
Figura 32. Correlación Anual de Spearman por estación para CMORPH.....	117
Figura 33. BIAS anual por estación para CMORPH	118
Figura 34. Correlación anual de Pearson por estación para PERSIANN – CCS	121
Figura 35. Correlación anual de Spearman por estación para PERSIANN – CCS	122
Figura 36. BIAS anual por estación para PERSIANN – CCS	123
Figura 37. Escenarios de promedios anuales para ECC	128
Figura 38. Promedios mensuales de precipitación	129
Figura 39. Tendencia Mann - Kendall mensual por estación (dónde ST es sin tendencia, S es significativo, NS es no significativo, los signos determinan si la tendencia es creciente (+) o decreciente (-))	132
Figura 40. Tendencia Mann - Kendall anual por estación	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales Productos de Precipitación por satélite y características	9
Tabla 2. Estaciones Climatológicas Convencionales seleccionadas y características.....	33
Tabla 3. Promedio Anual Estacional por Observación en milímetros	58
Tabla 4. Significancia y tendencia para valores de Z con alfa al 95%.....	63
Tabla 5. Resultados RMSE, MAE, BIAS, correlaciones de Pearson y Spearman por observación para los promedios mensuales.....	76
Tabla 6. Resultados de correlaciones de Pearson y Spearman para los promedios mensuales por observación en cada mes del año	78
Tabla 7. Resultados de RMSE, MAE y BIAS de los PMO por mes	81
Tabla 8. Correlación de Pearson y Spearman por estación con información de climas y elevaciones	83
Tabla 9. Rango de correlaciones de Pearson y Spearman para PERSIANN - CCS por mes.....	97
Tabla 10. Resultados de error, sesgo y correlaciones para los promedios anuales de precipitación por observación	106
Tabla 11. Valores mínimos y máximos de RMSE y MAE para IMERG.....	114
Tabla 12. Resultados mínimos y máximos de RMSE y MAE anuales para CMORPH.....	119
Tabla 13. Valores mínimos y máximos de RMSE y MAE para PERSIANN - CCS	124

Tabla 14. Promedios anuales y tendencia Mann - Kendall para las EEC	127
Tabla 15. Resultados de tendencia mensual por Man - Kendall	130
Tabla 16. Tendencia de Mann - Kendall anual por observación	136
Tabla 17. Tendencia Mann - Kendall mensual por observación	136
Tabla 18. Acumulado Anual de Lámina de Precipitación en milímetros de 2005 a 2012 por Estación y observación	172
Tabla 19. Acumulado Anual de Lámina de Precipitación en milímetros de 2013 a 2018 por estación y observación	174
Tabla 20. Promedio Mensual de Precipitación en milímetros por Estación Climatológica según cada observación.....	176
Tabla 21. Correlación de Pearson Mensual por Estación	178
Tabla 22. Correlación de Spearman Mensual por Estación	180
Tabla 23. Resultados de Correlación de Pearson, Spearman, RMSE, MAE, BIAS y promedio de precipitación anual por estación para cada observación.....	182
Tabla 24. Resultados de la Prueba Mann - Kendall mensuales y anuales por Estación	185

GLOSARIO

CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
ECC	Estación Climatológica Convencional
EMA	Estaciones Meteorológicas Automáticas
IMERG	3 Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement
IPCC	Panel Intergubernamental por el Cambio Climático
KMZ	Archivo que representar datos geográficos en tres dimensiones.
m.s.n.m.	Metros sobre nivel del mar
MEA	Error Medio Absoluto
MK	Prueba Mann - Kendall
NetCDF	Network Common Data Form
PAO	Promedio Anual por Observación
PERSIANN - CCS	Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks
PMO	Promedio Mensual por Observación
PPS	Producto de Precipitación por Satelite
PWM	Pulse-width modulation O Modulación por ancho de pulso
Ráster	Estructura o fichero de datos que representa una rejilla rectangular de píxeles o puntos de color
RMSE	Error Cuadrático Medio
Shapefile	Archivo de almacenamiento de la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas
SIG	Sistema de Información Geográfica
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
TIF	Formato de archivo de imágenes con etiquetas
TIR	Infrarrojo térmico geoestacionario
UTC	Coordinated Universal Time O tiempo universal coordinado
WMS	Warehouse Management System o Sistema de gestión de almacenes

RESUMEN

Dariela Amaranta Vázquez Rodríguez
septiembre 2023

Fecha de graduación:

Título: *Análisis de tendencias de precipitación en la cuenca Río Bravo – San Juan por medio de Productos Satelitales de Precipitación y Estaciones Climatológicas.*

Área de Estudio: Ingeniería ambiental, hidrología superficial.

Propósito y método de estudio:

Este trabajo se basó en dos objetivos principales: el primero enfocado en la evaluación sistemática de tres Productos de Precipitación por Satélite para identificar el producto con el rendimiento óptimo en la cuenca Río Bravo – San Juan, localizada en el noreste de México; el segundo es determinar la tendencia de precipitación presente en la cuenca mediante estaciones climatológicas convencionales para identificar la vulnerabilidad de cuenca y de zonas específicas. Además, se evaluó la eficiencia del producto de precipitación por satélite óptimo en las pruebas de tendencia.

El periodo de estudio esta comprendido entre el 1ero de enero de 2005 al 31 de diciembre de 2018, fechas determinadas conforme la disponibilidad de las fuentes de información. Los PPS utilizados fueron CMORPH, IMERG y PERSIANN – CCS, con su información de acumulados diarios. Debido a la diversidad del formato de los archivos, se utilizaron los archivos BIN y GeoTIFF para analizar la trabajabilidad de cada uno. La información de precipitación base, se obtuvo de 30 estaciones climatológicas convencionales localizadas en distintos puntos dentro de la cuenca de estudio.

El comportamiento de los PPS se evaluó mediante el implemento de diferentes pruebas estadísticas, entre ellas el Error medio absoluto, el error medio cuadrático, pruebas de sesgo (BIAS), correlación de Pearson y correlación de Spearman; relacionando las observaciones satelitales con las terrenas. Se evaluó el comportamiento en acumulados y promedios mensuales, estacionales y anuales. Los acumulados fueron utilizados para determinar el comportamiento de los PPS en zonas con diferentes características fisiográficas. Mientras que los promedios ayudaron a evaluar el rendimiento de los productos de manera general y no específica.

Para identificar y analizar la tendencia presente en la cuenca, se requirió el uso de la prueba Mann – Kendall evaluando series mensuales y anuales, para toda la cuenca y por zonas. Estos análisis se realizaron únicamente con la información de precipitación de las estaciones climatológicas para evitar y mitigar la influencia de los PPS en los resultados de las pruebas. Sin embargo, una vez que se obtuvo el producto con el mejor comportamiento, este fue utilizado en las pruebas de

tendencia para evaluar el rendimiento de su información en la aplicación de pruebas de tendencia.

La evaluación de los PPS determinó que el producto ideal para la cuenca es el producto CMORPH V.01 Daily, debido que obtuvo los rangos de error y sesgo más bajos en todos los tipos de acumulados y promedios. Además, las correlaciones obtenidas rondan entre los 0.6 y 0.8, dando una buena correlación entre el producto y las estaciones, independientemente de la serie de análisis o las zonas de la cuenca.

Por otro lado, IMERG mostró estar bien correlacionado con correlaciones mayores a 0.85, sin embargo, el resto de sus pruebas mostraron altos rangos de error y sesgo que tienden a la subestimación de la información de forma general y por zonas en todas las series de análisis.

El rendimiento obtenido para PERSIANN – CCS fue el menos satisfactorio, con resultados que tienden a la sobreestimación de hasta el doble de los valores reales en todas las temporalidades e independientemente de las zonas. Además, fue el producto menos correlacionado, con valores que van desde los -0.3 hasta los 0.4, tanto en las pruebas por zonas como de manera general.

Al aplicar la prueba de Mann – Kendall (MK), este mostró dos tipos de tendencia para cuenca: una tendencia creciente significativa a nivel mensual y una tendencia creciente no significativa en la serie anual. Esto indica que en la escala mensual las precipitaciones van en aumento, incrementando la precipitación mes a mes; pero de manera anual la serie cuenta con una variabilidad en la serie causada por los fenómenos de huracanes y sequías.

Por otro lado, las tendencias encontradas por zonas mostraron que las zonas montañosa y urbana presentan una tendencia creciente no significativa de manera mensual y decreciente no significativa en la serie anual. Esto sugiere que las zonas se encuentran en un estado vulnerable, que de no ser atendido en los próximos años la tendencia decreciente podría volverse significativa. Poniendo en riesgo a los ecosistemas y población.

Se utilizaron los productos CMORPH e IMERG, para evaluar su comportamiento en las pruebas de tendencia. Como era esperarse CMORPH obtuvo los valores más cercanos a los obtenidos con las estaciones convencionales, si bien los valores no eran totalmente iguales, la tendencia obtenida sí lo fue. Los resultados de IMERG no fueron similares, ni en cuantificación o valores ni en la determinación de la tendencia, incluso de manera mensual IMERG muestra un comportamiento de alta variabilidad que determina la serie sin tendencia.

Contribuciones y conclusiones:

En resumen, la evaluación de los PPS mostró que CMORPH tiene el mejor rendimiento, IMERG cuenta con correlaciones moderadas pero una alta

tendencia a la subestimación, mientras que PERSIANN – CCS mostró bajas correlaciones, sobrestimación y altos rangos de error.

El análisis de Mann – Kendall, detectó dos tendencias las cuales denotan una tendencia creciente de manera significativa en la serie mensual y no significativa en la serie anual; esto asociado a los eventos extraordinarios que ocurren en diversos momentos de la serie. Además, el análisis de las tendencias por zonas indicó que las zonas montañosas y centro urbana presentan fluctuaciones en las tendencias que las vuelven vulnerables con posibilidad de volverse decrecientes en ambas series de no actuar o tomar medidas que ayuden a la conservación de los recursos de ambas zonas.

Basado en los resultados obtenidos en este trabajo se recomienda utilizar el producto CMORPH V.01 Daily como un complemento de las observaciones terrenas para análisis de tendencia dentro de las limitaciones de la cuenca Río Bravo – San Juan. Además de ser necesario el evaluar el rendimiento de este producto en otros estudios hidrológicos para determinar su funcionalidad.

Debido a que solo se exploraron las tendencias con un solo tipo de análisis, se recomienda que se implementen otro tipo de pruebas que ayuden a determinar y comprender el comportamiento de las precipitaciones en la cuenca. En específico en las zonas vulnerables.

ABSTRACT

Title: *Precipitation trend analysis in the “Bravo – San Juan River” basin using Satellite Precipitation Products and Climatology Stations.*

Study Area: Environmental Engineering, Superficial Hydrology

Purpose and method of the study:

This study pursued two primary objectives. Firstly, it aimed to assess the performance and identify a suitable Satellite Precipitation Product (SPP) for its application in the Bravo – San Juan River basin, located in Northeast Mexico. Secondly, the study aimed to analyze precipitation trends within the basin by utilizing data from rain gauges and climatological stations. Additionally, the efficacy of the SPPs was evaluated for their efficacy in hydrological studies.

The study spanned from January 1st, 2005, to December 31st, 2018, a period determined based on the availability of relevant dataset information. The SPPs utilized in this research encompassed CMORPH, GPM IMERG, and PERSIANN – CCS, with daily assessments conducted for each. Due to variations in file formats among the SPPs, were employed BIN and GeoTIFF files to analyze which formats have the best workability. Furthermore, daily cumulative data from rain gauges was incorporated for the same timeframe, employing data from 30 strategically positioned climatological stations within the basin.

To evaluate the performance of the SPPs, a comprehensive assessment approach was adopted. This involved the employing of various metrics such as RMSE, MAE, BIAS, Pearson correlation, and Spearman correlation. These metrics were applied in relation to the data collected from rain gauges, serving as benchmarks to gauge the effectiveness of the SPPs. The evaluation encompassed diverse time scales including monthly, seasonal, and yearly averages, as well as accumulative precipitation measurements. The accumulative measurements were analyzed for each of the 30 rain gauges, aiming to provide insights into the efficacy of the SPPs within specific zones of the basin.

Additionally, average precipitation observations were employed to assess the overall performance of the SPPs across the entire basin.

To identify and examine the precipitation trend within the basin, the Mann–Kendall test was utilized to monthly and yearly trends. Initially, this test was applied solely to the rain gauge data, enabling the determination of the present trend while mitigating any influence from SPP performance issues. The SPP product selected by demonstrating the most robust assessment and performance in the basin, were chosen to subsequently be employed to assess its specific performance in trend analysis within the basin.

The evaluation of SPP performance led to the determination that CMORPH V.01 emerged with the best performance, characterized by minimal errors and BIAS at monthly, seasonal, and yearly assessments. The correlations ranged from 0.6 to 0.8, independent of whether the analysis was conducted through the basin or zones in all-time series.

While the IMERG product exhibited strong correlations with the rain gauges, its error range was twice that of the average precipitation. Moreover, its BIAS consistently indicated underestimation across all time periods and analytical perspectives.

The performance of the PERSIANN – CCS product proved to be the least satisfactory. This was highlighted by its low correlation scores (ranging from -0.3 to 0.4) both in terms of individual stations and overall observations. Regardless of whether accumulative or average data were considered, this product consistently exhibited overestimation exceeding double the actual values across various basin zones and time frames.

The application of the Mann – Kendall test determined two trends in the basin: a statically significant positive trend at monthly average, and not statically significant positive trend at yearly average. This indicate that at monthly scale the precipitation is being increased by the years, but the average of yearly

precipitation was fluctuating by the phenomenon hurricanes - droughts, this increases the variability of the series and modifies the significance of the series.

Moreover, the trends observed across different zones reveal noteworthy patterns. Specifically, the urban and mountainous zones exhibit a non-statistically significant negative trend in the yearly analysis; while in the monthly analysis, these same zones display a non-statistically significant positive trend. This dual dynamic suggests that both these zones are more susceptible to the impacts of climate change. They are at risk of transitioning into statistically significant negative trends in the coming years unless proactive measures are taken to address water resource management, forest fire mitigation, and the urban heat island effect resulting from urbanization.

The application of CMORPH and IMERG in tandem with the MK test to discern precipitation trends and assess their performance has yielded distinct outcomes. Notably, CMORPH has demonstrated the most consistent alignment with the MK test results, albeit not necessarily in terms of numerical values, but rather in the analysis of trend significance. The MK results derived from IMERG diverged both in numerical values and trend indications. Interestingly, even the monthly analysis using IMERG suggested an absence of discernible trends.

As a result of these findings, it can be deduced that CMORPH exhibits strong performance in trend analysis within the Bravo – San Juan River basin. However, this conclusion comes with the suggestion of application in different hydrological studies to ascertain its suitability as the optimal product for this specific basin characteristics.

Contributions and conclusions:

In summary, CMORPH V.01 demonstrated the most favorable performance, IMERG exhibited moderate correlations with notable underestimation, while PERSIANN – CCS exhibited subpar correlations, substantial overestimation, and relatively higher errors compared to the other products.

The Mann–Kendall analysis unveiled distinct trends in the basin's precipitation patterns. Monthly averages showcased a statistically significant positive trend, reflecting a gradual increase in precipitation over time. In contrast, yearly averages exhibited non-statistically significant positive trends, marked by fluctuations due to droughts and hurricanes, introducing variability.

The analysis from zone-based trends indicate that urban and mountainous zones have non-statistically significant negative yearly trends, while monthly analysis unveiled non-statistically significant positive. This dual trend dynamic signals increased vulnerability to climate change impact. Unless proactive actions address water management, forest fires, and urbanization's heat island effect, these zones face a potential shift toward significant negative trends in the future.

Based on the findings of this study, it is recommended to consider CMORPH V.01 Daily as complement of terrestrial precipitation observations within the Bravo – San Juan River basin. This product's capabilities are highlighted, suggesting its potential to enhance the understanding of precipitation dynamics in the region.

The outcomes of the trend analysis underscore the importance of enhancing these trends through the utilization of additional tests, such as the standardized precipitation index (SPI). This approach holds particular significance for the vulnerable zones identified within this study. Incorporating SPI can provide a more comprehensive understanding of precipitation variability and its implications, offering valuable insights into the severity and duration of droughts or wet periods.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordan los motivos para esta investigación, el marco teórico que respalda los métodos y pruebas elegidos. Además, se exponen la justificación, hipótesis y objetivos, de esta investigación.

1.1 Panorama

Debido al cambio climático global que se ha observado en los últimos años, se han realizado diversas investigaciones alrededor del mundo en temas del uso y manejo de recursos hídricos, en ellas se han encontrado una tendencia a la baja en precipitación (Hu et al., 2019; Mirdashtvan et al., 2020; Sa'adi et al., 2019; Usman et al., 2018). Se ha encontrado que los días de lluvia han disminuido mientras que la intensidad de la precipitación ha ido en aumento en las zonas áridas y semiáridas (Méndez González et al., 2008).

En un panorama nacional, los reportes oficiales del Sistema Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua en su “Reporte Climatológico Anual” han reportado que la precipitación anual ha ido fluctuando, debido que en los años 2020 y 2022 se obtuvieron acumulados de precipitación por debajo del promedio histórico el cual es de 747.6 mm entre un 2.7% y 0.6% respectivamente (Comisión Nacional del Agua et al., 2022; Comisión Nacional del Agua & Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2021).

Estos reportes comentan que con base en los registros históricos nacionales del periodo 1941-2020, el año 1943 continúa siendo el más seco, mientras que 1958 fue el año más lluvioso. Por su parte, el año 2020 quedó clasificado como el vigesimoprimer año más seco, además de que fue el segundo año consecutivo con lluvias por debajo del promedio y con él se completaron 5 años con lluvias deficitarias en la década de 2011 a 2020 (Comisión Nacional del Agua & Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2021).

Como se menciona en la información anterior, se puede notar un cambio en las precipitaciones anuales del país, lo que trae consigo problemas de desabasto de agua para las zonas más áridas y las zonas menos desarrolladas. A su vez ha habido un incremento de huracanes y tormentas tropicales, los cuales generan problemas de inundación, desbordamiento de cauces y cuerpos de agua y que afectan directamente a las poblaciones aledañas a las zonas.

Aunque puede ser contradictorio el tener menos cantidad de lluvia, pero mayor presencia de fenómenos extraordinarios; algunos autores asocian estos comportamientos al cambio climático y de manera específica Bian et al., (2021) y Li et al., (2021) los asocian a los cambios de uso de suelo que han ocurrido debido al incremento de las zonas urbanas.

En México se han realizado diversos estudios en cuanto al tema de precipitaciones, sequías y eventos extraordinarios (Alvarez-Olguin & Escalante-Sandoval, 2017; Martínez Austria & Irula Lutzow, 2016; Martínez-Austria & Díaz-Jiménez, 2018; Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2012). Sin embargo, éstos han sido basados únicamente en información terrena de las Estaciones Climatológicas Convencionales y Estaciones Meteorológicas Automáticas proporcionadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Sistema Meteorológico Nacional (SMN); a diferencia de investigaciones en otras regiones a nivel global (Ahmad et al., 2015; Lauren et al., 2021; Mallick et al., 2021; Sa'adi et al., 2019) que han empleado además de sus observaciones terrenas datos de Productos de Precipitación por Satélite: PPS (o SPP por sus siglas en inglés). Mostrando estos productos como una alternativa y complemento ideal para países con suficiente información terrena como para regiones con déficit de información.

A pesar de que la información proporcionada por los PPS es global, esta no suele ser exacta, debido a que tiende a mostrar subestimación o sobreestimación de datos asociados a elementos fisiográficos como la orografía, la elevación, posicionamiento de la región, tipo de clima, urbanización, entre otros (Dezfooli et al., 2018; Sahlaoui & Mordane, 2019; Varouchakis et al., 2021a). Debido a estos

problemas, las investigaciones suelen enfocarse en encontrar qué producto es el adecuado para la región, y a partir de ahí, enfocar el uso de estos productos en estudios hidrológicos específicos.

Por lo que, con base a lo anterior, esta investigación tiene dos propósitos clave, el primero es realizar un análisis de tendencia de precipitación en un periodo de 13 años (2005 – 2018) en la cuenca del Río Bravo – San Juan ubicada en el Noreste de México. El segundo es conocer la viabilidad del uso de Productos de Precipitación por Satélite en la cuenca mediante la comparación con información obtenida de manera convencional.

1.2 Precipitación

La precipitación es considerada la parte fundamental del ciclo hidrológico, dónde “es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua” (Aparicio Mijares, 1992). Además Aparicio Mijares (1992) define la precipitación como el agua proveniente de la atmósfera en cualquier estado físico que se recibe en la superficie terrestre.

La precipitación se forma debido a la concentración de humedad que se tiene en la atmosfera dónde ocurre un cambio de fase del vapor de agua a líquido o sólido. Este proceso da como resultado la formación de nubes, sin embargo, para que se formen gotas, deben existir núcleos de condensación constituidos por polvo atmosférico o cristales de sales que les otorguen suficiente tamaño y peso.

Por otro lado, Sánchez San Román (2017) distingue la precipitación según su origen, de la siguiente manera:

- Ciclónicas, las cuales son provocadas por frentes de ciclones y son las causantes del mayor volumen de precipitación en una cuenca.
- De convección, estas se producen debido al ascenso de aire caliente a la atmosfera y son comúnmente llamadas como tormentas de verano.

- Orográficas, las cuales se presentan cuando las masas de aire húmedo son obligadas a ascender debido al choque o intercepción de una barrera montañosa.

El estudio de este fenómeno es básico para la realización de cualquier estudio hidrológico de carácter regional, la cuantificación de recursos hídricos, previsión de avenidas, estudios de erosión diseño de obras públicas, aprovechamiento de recursos, etc. Debido a fenómenos recientes, tales como el cambio y la variabilidad climáticos, el estudio del comportamiento de las precipitaciones es de suma importancia para detectar y asociar las zonas que podrían estar siendo impactadas por estos fenómenos.

1.2.1 Variabilidad y Cambio Climático

El Panel Intergubernamental por el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) en 2007 definió al cambio climático como una variación estadística importante en el estado medio del clima o en su variabilidad, la cual persiste durante un período prolongado de tiempo (normalmente decenios). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos (propios del planeta Tierra y sus interacciones con la atmosfera), cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras (IPCC, 2007).

El concepto de variabilidad climática hace referencia a las variaciones del estado medio y a otras características estadísticas como desviación típica, sucesos extremos del clima en todas las escalas temporales y espaciales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos (Solomon et al., 2007).

El IPCC reporta en su informe del 2007 que la mayor parte del aumento observado en el promedio mundial de temperaturas desde mediados del siglo XX es muy probablemente debido al aumento observado en concentraciones antropogénicas de gases de efecto invernadero, por lo que la influencia del ser humano ahora se extiende a otros aspectos del clima, los cuales incluyen el

calentamiento de los océanos, las temperaturas medias continentales, las temperaturas extremas y los patrones de viento. Además, se ha encontrado que algunos agentes forzantes pueden influir en el ciclo hidrológico de manera diferente a otros a través de sus interacciones con nubes. En particular, cambios en aerosoles puede haber afectado la precipitación y otros aspectos del ciclo hidrológico con más fuerza que otros agentes forzantes antropogénicos (Solomon et al., 2007).

1.3 Mediciones Climatológicas

Es importante medir la cantidad y el tiempo que dura la precipitación. Existen diferentes técnicas y dispositivos que sirven para medir la precipitación, los más comunes son los pluviómetros y los pluviógrafos; aunque se tiene una preferencia por el empleo de pluviómetros, ya que estos registran las lluvias máximas acumuladas en veinticuatro horas con lecturas de altura de lámina de agua en milímetros (Guerra Cobián, 2015).

Las estaciones meteorológicas, son sitios compuestos por distintas herramientas que miden factores climáticos. Existen estaciones climatológicas convencionales, estaciones meteorológicas automáticas, y radares. Todos estos contabilizan principalmente precipitación, temperatura, nubosidad y humedad, registran el comportamiento a nivel terrestre sin estimar la información, es decir que son elementos de medición y no de inferencia.

La medición y registro de las precipitaciones en México se lleva a cabo mediante la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por medio de estaciones climatológicas convencionales y estaciones meteorológicas automáticas, establecidas en puntos estratégicos a lo largo y ancho del territorio nacional (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019).

1.3.1 Estaciones Climatológicas

Las Estaciones climatológicas son un conjunto de instrumentos colocados a la intemperie que permiten medir las variaciones del clima, y se encuentran colocados en sitios estratégicos representativos de ambientes diversos.

Las mediciones hidro climatológicas contribuyen a mejorar la seguridad de los ciudadanos y los bienes ya que ayudan a mejorar los sistemas de alertamiento sobre eventos meteorológicos e hidrológicos extremos, permiten desarrollar nuevos métodos de pronóstico para prevención de inundaciones y contribuyen a mejorar la planeación de desarrollos urbanos, agrícolas, industriales y turísticos (CONAGUA, 2013).

Este tipo de estaciones registran la siguiente información:

- Temperatura: máxima absoluta, máxima media, media: mínima media, mínima absoluta.
- Humedad: relativa, absoluta, relación de mezcla, específica, presión del vapor.
- Viento: dirección y velocidad, ráfaga máxima.
- Nubosidad: tipo, altura, cantidad.
- Presión: máxima absoluta, máxima media, media, mínima media, mínima absoluta.
- Precipitación: cantidad, frecuencia, intensidad.
- Radiación.

1.3.2 Productos de Precipitación por Satélite

Con la llegada de los satélites meteorológicos geoestacionarios durante la década de 1960 y 1970, estos se colocaron sobre el ecuador en 5 a 6 posiciones alrededor del mundo para proporcionar una cobertura global. Con ello se han desarrollado varias técnicas para estimar la precipitación a partir de la radiación

visible e infrarroja (IR), interpolación con observaciones *In Situ*, modelados y reanálisis (Le Coz & van de Giesen, 2020).

Existen alrededor de 20 productos de precipitación globales y cuasi globales, divididos en cuatro clases según su recuperación y tratamiento de la información (Degefu et al., 2022); estas clases son

- Interpolación de mediciones: son productos de precipitación creados mediante la interpolación y/o reordenación con observaciones de pluviómetros u observaciones terrena (Degefu et al., 2022).
- Únicamente satelitales: estos productos son derivados de las microondas pasivas en órbita polar (PWM por sus siglas en inglés), mediante infrarrojo térmico geostacionario (TIR por sus siglas en inglés) o una combinación ambos (Degefu et al., 2022).
- Combinación de satélite y mediciones terrenas: funcionan mediante la fusión de TIR o PWM o ambos, combinados tambientes con observaciones de pluviómetros y, a veces, con datos de radar utilizando reanálisis de diferentes algoritmos de fusión de datos (Le Coz & van de Giesen, 2020).
- Productos reanalizados: se generan asimilando información derivada de modelos numéricos de generadores meteorológicos con observación terrestre o satelital (Balsamo et al., 2015).

Los datos de precipitación por satélite proporcionan un complemento atractivo para las observaciones terrestres, dado que aumentaron en gran medida la disponibilidad y el acceso a información de precipitación. Sin embargo, antes de utilizar la información satelital en cualquier tipo de estudio específico, la información debe evaluarse, comprobarse y analizarse. Ya que los datos satelitales involucran errores, variación de información, resolución espacial, coberturas, entre otros; debido a la complejidad de los algoritmos de recuperación y/o la presencia de obstáculos que afectan la capacidad de observación infrarroja (Balsamo et al., 2015; Beck et al., 2017; Degefu et al.,

2022; Duan et al., 2016; Le Coz & van de Giesen, 2020; Varouchakis et al., 2021a).

En otras palabras, cada producto de precipitación cuenta con mejor calidad en ciertos aspectos de las precipitaciones, como, por ejemplo, cantidad, frecuencia, intensidad, estacionalidad, distribución geográfica, etc. Por lo tanto, diferentes productos cumplen o proporcionan características diferentes y/o específicas para cierto tipo de estudios, por mencionar algunos ejemplos: estudios climatológicos, aplicación hidrológica, monitoreo agrometeorológico y monitoreo y pronóstico de sequías e inundaciones (Degefu et al., 2022).

Actualmente nueve sistemas de productos de precipitación por satélite son los más utilizados, los cuales proporcionan información de precipitación de manera global o regional, a distintas temporalidades, resolución y formatos. La Tabla 1 muestra estos productos, identificando sus datos más relevantes como los son la cobertura, la temporalidad referente a tiempo del acumulado de la lámina de precipitación, resolución en grados por píxel o kilómetros por píxel, el periodo de información referente a los años registrados en las bases de datos y el formato en el que se puede solicitar la información.

A pesar de lo comentado anteriormente, los Productos de Precipitación por Satélite (PPS) se han convertido en una de las fuentes de datos de precipitación complementarias más importantes en los estudios de hidrología, climatología y meteorología durante los últimos años (Ali et al., 2023; Bayissa et al., 2017; Hussein et al., 2021; Kazemzadeh et al., 2021; Kimani et al., 2017; Li et al., 2022; Parida et al., 2017; Y. Zhang et al., 2022). Estos productos se han aplicado con éxito en el estudio de patrones de precipitación a escala global y regional, debido a que proporcionan mapas de precipitación cuasi globales de alta resolución temporal (menor a 3 horas) y espacial (menores a 0.25 ° píxel) (Xiang Soo et al., 2020).

Tabla 1. Principales Productos de Precipitación por satélite y características

Nombre	Cobertura	Periodo de información	Temporalidad	Resolución	Formato
CHIRPS ^a	50°S - 50°N	1985 - 2023	Diario, mensual y anual	0.05° x 0.05° píxel	TIF y NetCDF
CMOPRH ^b	60°S – 60°N	2002 – 2019	30 minutos, 3 horas y diario	0.25° x 0.25° píxel	Binario y NetCDF
ERA5 ^c	Global	1940 - 2023	Cada hora	0.25° x 0.25° y 0.5° x 0.5° píxel	GRIB y NetCDF (en desarrollo)
GPCC ^d	Global	1979 – 2018	Mensual	0.5° x 0.5°; 0.1° x 0.1° y 2.5° x 2.5° píxel	NetCDF, GIF, y PDF
IMERG GPM ^e	60°S – 60°N	1997 – 2023	30 minutos, 3 horas, diario, 7 días y mensual	10 km /0.1° píxel	HDF5, TIF, NetCDF4
PERSIANN – CCS ^f	60°S – 60°N	2003 – 2023	1,3 y 6 horas, diario, mensual y anual	0.04° x 0.04° píxel	ArcGIS, TIF, Binario y NetCDF
PERSIANN – CDR ^f	60°S – 60°N	1983– 2023	Diario, mensual y anual	0.25° x 0.25° píxel	ArcGIS, TIF, Binario y NetCDF
PERSIANN ^f	60°S – 60°N	2000- 2023	1,3 y 6 horas, diario, mensual y anual	0.25° x 0.25° píxel	ArcGIS, TIF, Binario y NetCDF
TAMSAT ^g	Continente Africano incluido Madagascar	1983 - 2023	Diarios, 7 y 10 días, mensual y por estacional	0.0375° x 0.0375° píxel	NetCDF
TMPA – TRMM ^h	50°S - 50°N	1997 - 2019	30 minutos y diario	0.25° x 0.25° píxel	HDF, NetCDF y ACSII
TRMM 3B42 ^h	50°S - 50°N	1998 - 2019	Diario	0.25° x 0.25° píxel	HDF, NetCDF y ACSII

Referencias a)(CHIRPS: *Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations* | *Climate Hazards Center - UC Santa Barbara*, n.d.); b)(Joyce et al., 2004); c)(Bell et al., 2021; Hersbach et al., 2020); d)(*Wetter Und Klima - Deutscher Wetterdienst - Our Services - Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)*, n.d.); e)(NASA, 2023); f) (Nguyen et al., 2019); g) (R. I. Maidment et al., 2014; *TAMSAT* | *Www.Tamsat.Org.Uk*, n.d.); h)(*GES DISC Dataset: TRMM (TMPA) Precipitation L3 1 Day 0.25 Degree x 0.25 Degree V7 (TRMM_3B42_Daily 7)*, n.d.; *The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) | NASA Global Precipitation Measurement Mission*, n.d.; Huffman et al., 2010)

Recientemente se han realizado diversos estudios que comparan y comprueban la información satelital basándose en la información convencional terrena, ya sea por medio estaciones meteorológicas automáticas o convencionales para probar la efectividad de la información satelital. Varouchakis et al., (2021a) intentaron realizar un mapeo de precipitación utilizando estaciones físicas y datos satelitales para un periodo de información de 2009-2018 en la ciudad de Creta, Grecia. Los datos satelitales utilizados fueron los proporcionados por los productos CMORPH CDR y PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks) con datos de precipitación anual para ambas bases de datos. La conclusión no fue óptima, ya que los periodos de precipitación no han sido consistentes en los últimos años dificultando las correlaciones y el análisis matemático; sin embargo, con esto se obtuvo que los periodos de lluvia en la región han tenido cambios drásticos que podrían estar ligados al cambio climático.

Por otro lado, Dezfooli et al., (2018) realizaron una comparación de datos de precipitación obtenidos en 6 estaciones pluviométricas y 4 PPS, para el periodo de septiembre de 2003 a diciembre de 2007 en la cuenca Gorganrood ubicada el noroeste de Irán para identificar qué producto posee una mayor similitud con las mediciones obtenidas de las estaciones pluviométricas tradicionales. En el estudio fueron revisadas las mediciones diarias y horarias de precipitación evaluándolas por medio de correlaciones, pruebas de error absoluto, error medio, coeficiente de correlación de Pearson y BIAS. Los resultados mostraron que el satélite con mayor acercamiento fue TRMM-3B42V7, quien tiene mejor correlación con datos de las estaciones durante las estaciones de primavera a otoño. Por otro lado, el producto con menor aceptabilidad fue PERSIANN, quien solo es compatible con una sola estación durante la época de invierno. Los análisis por estación, anuales y mensuales arrojaron que los datos de los productos satelitales mensuales y anuales son más exactos, siendo los datos mensuales la mejor alternativa y/o complemento para las observaciones terrenas.

Este estudio implementa el uso de tres productos de precipitación por satélite, para evaluar su comportamiento en la región designada e identificar su eficacia para estudios posteriores. Los PPS seleccionados son los siguientes:

1.2.3.1 Climate Prediction Center (CPC) Morphing Technique (MORPH) (CMORPH)

El producto Centro de Predicción Climatológica con la Técnica de Transformamiento: CMORPH (por sus siglas en inglés), es administrado por los organismos Climate Prediction Center (CPC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). CMORPH es un producto de precipitación satelital puro que utiliza solo información infrarroja satelital sobre la evolución espacial y temporal de las nubes de lluvia y no las estimaciones de precipitación en sí mismas (Joyce et al., 2004); cuenta con dos versiones: CMORPH-V0.x y CMORPH-V1.0; sin importar la versión proporciona información precipitación para una cobertura espacial de 60 ° N – 60 ° S (Joyce et al., 2004; Xie et al., 2019).

La diferencia entre las versiones del producto recae en que la versión V1.0 es reprocesada por el mismo algoritmo base, esto se realiza principalmente para reducir la falta de homogeneidad sustancial introducida por el algoritmo en evolución de la versión V0.x. Para la versión V1.0 se incluyen las estimaciones de precipitación sin procesar: “solo de satélite”, así como productos de precipitación combinados de satélite de medición y corregidos por sesgo (Alsumaiti et al., 2020). En esta versión la corrección de sesgo se realizó ajustando las estimaciones del satélite contra un análisis diario de pluviómetros.

El producto CMOPRH mantiene su base de datos de acceso libre, la cual no requiere de la disposición de ningún tipo de información para su uso. CMORPH permite seleccionar tres tipos resoluciones espaciales y temporales: 8 km – 30 min, 0.25°píxel –3 por hora y 0.25°píxel –diaria, el producto maneja dos formatos de información binario (BIN) y NetCDF (Joyce et al., 2004).

1.2.3.2 Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN-CCS)

El sistema operativo de Estimación de Precipitación a Partir de Información de detección Remota utilizando Redes Neuronales Artificiales - El Sistema de Clasificación de Nubes (PERSIANN – CCS por sus siglas en inglés) es un producto de precipitación satelital de alta resolución global en tiempo real (0.04 ° x 0.04 ° o 4km x 4km;) desarrollado por el Centro de Hidro meteorología y Percepción Remota (CHRS) de la Universidad de California, Irvine (UCI) (Nguyen et al., 2019).

Este sistema (PERSIANN-CCS) permite la categorización de las características de los parches de nubes en función de la altura de las nubes, la extensión del área y la variabilidad de la textura estimada a partir de imágenes de satélite. El centro del funcionamiento del producto se encuentra en el algoritmo de segmentación de nubes de umbral variable, el cual permite la identificación y separación de parches individuales de nubes. Estos parches individuales se pueden clasificar según la textura, las propiedades geométricas, la evolución dinámica y la altura de la cima de las nubes. Así mismo, estas clasificaciones ayudan a asignar valores de lluvia a los píxeles dentro de cada nube en función de una curva específica que describe la relación entre la tasa de lluvia y la temperatura de brillo (Hong et al., 2004; Nguyen et al., 2019; Sadeghi et al., 2021).

1.2.3.3 Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG)

Las Recuperaciones Integradas de Múltiples satélites (IMERG por sus siglas en inglés) es el algoritmo unificado de EE. UU. que proporciona un producto de precipitación con base en múltiples satélites para el equipo de GPM (Global Precipitation Measurement) (Huffman et al., 2020).

El sistema IMERG se ejecuta dos veces casi en tiempo real, el output o datos de salida de IMERG están disponibles en múltiples ejecuciones, fuentes y formatos,

lo que puede generar confusión entre los usuarios. Sus tres principales versiones con respecto al análisis o reanálisis del algoritmo son:

- Producto multi – satélite “temprano”: 4 horas después de la hora de observación
- Producto multi – satélite “tardío”: 14 horas después de la hora de observación y una vez después de recibir el análisis de calibre mensual
- Producto de medición satelital “final”: 3 a 5 meses después del mes de observación

Las tres ejecuciones crean productos con resolución de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ píxel cada media hora (3IMERGHH). Mientras que la ejecución final posterior en tiempo real proporciona un conjunto de datos de combinación de calibre satélite de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ píxel mensuales (3IMERGM). En todos los casos, la salida contiene varios campos que proporcionan información sobre los datos de entrada, los campos intermedios seleccionados y la calidad de la estimación (NASA, 2023; NASA & Kelley, 2022).

Los conjuntos de datos IMERG están alojados tanto en la plataforma Precipitation Processing System (PPS), como en GES DISC, y cada sitio proporciona productos de valor agregado basados en los conjuntos de datos IMERG básicos como promedios diarios, archivos en formato GeoTIF y servidores WMS (Web Map Service) (Kazemzadeh et al., 2021; NASA & Kelley, 2022).

1.4 Tendencias

Las tendencias son cambios graduales de incremento o decremento en el tiempo de las variables estudiadas, asociadas comúnmente a factores climáticos. Específicamente los análisis de tendencias son un método para analizar el comportamiento de los datos durante un periodo de tiempo definido de manera estadística.

A la serie de observaciones registradas de acuerdo con un periodo de tiempo, se les llama “series de tiempo” y su análisis mide el efecto de la variación de los componentes el cual ayuda a entender lo ocurrido y a predecir las tendencias de la serie hacia el futuro (Paul et al., 2017).

1.4.1 Tendencias De Precipitación

La forma más fácil de analizar e interpretar el clima promedio de una región es en términos de medias anuales o estacionales de temperatura y/o precipitación (Ayllón, 2003). El análisis exploratorio de una serie hidro climática consiste en detectar por medios gráficos y cuantitativos la existencia o no de alguna tendencia y/o cambio además de la homogeneidad de la serie (Del Valle et al., 2010) .

Méndez González et al., (2008) analizaron la tendencia de precipitación a escala nacional en México, evaluando 739 estaciones climatológicas con datos diarios para un periodo de 36 años (1920 – 2004); utilizando la prueba no paramétrica de Mann – Kendall para determinar la tendencia. Los resultados mostraron que el mayor porcentaje de estaciones con tendencias significativas (incremento) se ubica en las regiones áridas y semiáridas, disminuyendo hacia las regiones lluviosas, desde 12.7 hasta 7.6%.

Un estudio realizado en la región Mixteca de (Martínez-Austria & Díaz-Jiménez, 2018), analizó la tendencia de precipitación y la relación entre el clima local y fenómenos de gran escala, como los eventos de El Niño y La Niña. Este análisis

de tendencia se realizó mediante la implementación del Índice Estandarizado de Precipitación (IEP) con información de 9 estaciones meteorológicas. Los resultados obtenidos mencionan que el IEP muestra una tendencia a la disminución, y esta información se encuentran en la misma dirección esperada en los escenarios de cambio climático. Al realizarse el análisis comparativo, éste mostró una alta correlación entre condiciones de baja precipitación y sequías con el fenómeno de El Niño.

Al momento de realizar un análisis exploratorio de una serie hidro climatológica se puede optar por diversos recursos como medios gráficos y cuantitativos que detecten la existencia o no de alguna tendencia, así como la homogeneidad de la serie. Algunos de estos métodos se mencionan a continuación.

1.4.2. Pruebas paramétricas

Las pruebas paramétricas requieren que los datos sean independientes y normalmente distribuidos, lo que rara vez es cierto para los datos de series temporales hidrológicas (Ahmad et al., 2015).

1.4.2.1. Diagrama de cajas

Es una forma gráfica de representar la tendencia central, la variabilidad, la simetría y la presencia de puntos atípicos dentro de una serie. En él se muestran los percentiles: 50 (la mediana), 25 (límite inferior) y 75 (límite superior), el mayor y el menor valor observado que no se considere atípico; los valores atípicos (1.5 veces la longitud de la caja) y extremos (3 veces la longitud de la caja) (Del Valle et al., 2010).

Para determinar si existe un cambio en la tendencia de la serie hidro climatológica se divide la misma en dos o más partes, de tal manera que se pueda observar a partir del diagrama de cajas de cada una de ellas si existen diferencias entre las características estadísticas de cada una de las partes de la serie (D. R. Maidment, 1993; Sánchez Carrión, 1999).

1.4.2.2. Coeficiente de Correlación de Pearson

Se define el coeficiente de correlación Pearson (CCP) como una medida numérica de la fuerza de la relación lineal entre dos variables, este coeficiente se denota con la literal r , como se muestra en la ec.1.

$$CPP = \frac{\sum_{i=1}^N (Psi - \overline{Ps})(Poi - \overline{Po})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Psi - \overline{Ps})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Poi - \overline{Po})^2}} \quad Ec.1$$

En principio, el coeficiente de correlación se puede calcular para cualquier conjunto de puntos, en muchos casos, estos constituyen una muestra aleatoria de una población de puntos, para estos casos el coeficiente de correlación se denomina correlación muestral, y es una estimación de la correlación poblacional (Navidi, 2006).

Los valores del coeficiente de correlación cercanos a 1 a -1 indican fuerte relación lineal; asimismo, valores cercanos a 0 indican una débil relación lineal. El coeficiente de correlación es igual a 1 (o a -1) sólo cuando los puntos en el diagrama de dispersión están exactamente sobre una recta de pendiente positiva (o negativa) (Haan, 1979; Llamas, 1993).

1.4.2.3. Error Medio Absoluto (MAE) y Error Medio Cuadrático (RMSE)

Estas pruebas son utilizadas para obtener la presión entre dos variables; se entiende por precisión al promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y valores observados.

El error medio absoluto (MAE por sus siglas en inglés) es la media de la magnitud de un conjunto de errores como se observa en la Ec.2:

$$MAE = \frac{\sum_{i=-1}^N |Psi - Poi|}{N} \quad Ec.2$$

Por otro lado, El error medio cuadrático (RMSE por sus siglas en inglés) nos indica la medida de las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y los observados como se muestra en la Ec.3. Valor puede resultar de \pm infinito, y entre mayor sea este valor mayor es el error.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=-1}^N (Psi - Poi)^2}{N}} \quad Ec.3$$

Dónde para ambas ecuaciones, Psi es la precipitación estimada por los productos por satélite (o los datos inferidos), Poi es la precipitación observada o medida de manera tradicional; y N es la ocurrencia de la precipitación o tamaño de muestra.

1.4.2.4 BIAS

El BIAS es una prueba que es utilizada para estimar la magnitud de una subestimación o sobrestimación entre dos valores (observado e inferido). Diversos autores (Dinku et al., 2018; Ramadhan et al., 2022; Saouabe et al., 2022; Tadesse et al., 2022; Varouchakis et al., 2021b; Wang et al., 2018) han utilizado esta prueba para complementar los resultados de error aplicados a los productos de precipitación por satélite y las observaciones terrenas para evaluar el valor de la estimación con respecto a su comportamiento. Esto ayuda a interpretar y detectar que productos presentan mejores resultados en cuanto a la aproximación de los valores reales.

Esta prueba se define como la media de la diferencia entre un valor observado y uno inferido; los resultados positivos determinan la sobreestimación mientras que los valores negativos la subestimación, el valor ideal es cero.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{Z}(Psi) - Z(Poi)] \quad Ec.4$$

Dónde en la Ec. 4 *Psi* es la precipitación estimada por los productos por satélite (o los datos inferidos), *Poi* es la precipitación observada o medida de manera tradicional; y N es la ocurrencia de la precipitación o tamaño de muestra.

1.4.3. Pruebas no paramétricas

Las pruebas no paramétricas se distinguen por no suponer una distribución normal en la serie, por lo que son realmente útiles bajo cualquier rango de distribuciones en una serie o población.

Para las pruebas no paramétricas, los datos deben ser independientes, pero los valores atípicos se toleran mejor. Las pruebas no paramétricas más comunes para trabajar con tendencias de series temporales son las pruebas Mann-Kendall y Spearman rho.

1.4.3.1 Prueba Mann–Kendall

La prueba Mann-Kendall es una prueba no-paramétrica (Kendall, 1957; Mann, 1945), sugerida para evaluar la tendencia en series de datos ambientales. Esta prueba consiste en la comparación entre los valores que componen una misma serie temporal, en orden secuencial (da Silva et al., 2015).

La hipótesis de la prueba declara la estabilidad de la serie temporal. Esto quiere decir que la sucesión de valores de la serie temporal denota deformación independiente y la distribución de la probabilidad debe permanecer la misma (serie aleatoria simples).

En una serie temporal de observaciones $x_1, x_2 \dots x_n$, Mann, (1945) propone que para que la hipótesis nula (H_0) sea verdadera, los datos que componen la serie temporal deben ser variables aleatorias, independientes e igualmente distribuidas. Mientras que para que la hipótesis alternativa (H_1) sea verdadera los datos de la serie temporal deben seguir una tendencia monótona, es decir que posea un cambio gradual en el tiempo que es consistente en una dirección.

Se considera que la prueba Mann-Kendall es el método más apropiado para analizar tendencias en series climatológicas. También que este método permite detectar y localizar el punto aproximado de inicio de una determinada tendencia.

Algunos autores han utilizado esta prueba para determinar las tendencias de precipitación en

1.4.3.2. Coeficiente de correlación de Spearman

La correlación de rangos de Spearman es una prueba no paramétrica que se utiliza para medir el grado de asociación entre dos variables.

Esta prueba supone que los datos de las series de tiempo son independientes y están distribuidos de manera idéntica, la hipótesis nula (H_0) indica que no hay tendencia a lo largo del tiempo; la hipótesis alternativa (H_1) es que existe una tendencia y que los datos aumentan o disminuyen con respecto a i .

La siguiente ecuación se utiliza para determinar la correlación de rangos de Spearman:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{Ec.5}$$

Donde en la Ec. 5 ρ es la correlación de Spearman, d_i la diferencia entre los rangos correspondientes a las variables y n el número de observaciones.

1.5 Justificación

La precipitación es una parte fundamental del ciclo hidrológico y es de las principales fuentes de recarga de una cuenca hidrológica. Su estudio y seguimiento ha ido tomando importancia en las últimas décadas debido a los cambios en su comportamiento en cuanto su intensidad, periodicidad y cantidad. Estos cambios, se asocian comúnmente a los cambios de uso de suelo, el aumento de temperaturas, la sobreexplotación de cuerpos de agua dulce y la contaminación de estos; todos también considerados causantes del cambio climático.

En diversos estudios se ha encontrado un descenso de la periodicidad de la precipitación, pero un incremento en su intensidad; lo que quiere decir que estamos teniendo precipitaciones más intensas con mayor espaciado entre ellas; por ende, es necesario conocer, entender y evaluar el comportamiento de las precipitaciones, debido a que no solo son necesarias para obtener agua y aprovecharla, si no también para prever problemas de inundaciones severas o sequías prolongadas.

La importancia de la precipitación recae en su medición (a lo largo del tiempo) y ubicación (espacialidad); sus datos (lámina de precipitación) actualmente son utilizados para diversos trabajos, como estudios hidrológicos, mapas de inundación, aprovechamiento de recursos hídricos, diseño de puentes, sistemas de alcantarillado, sistemas de drenaje sanitario y pluvial, obras de captación, obras de prevención de avenidas, por dar algunos ejemplos.

En México se cuenta con una amplia red de monitoreo de precipitaciones mediante la red de Estaciones Climatológicas Convencionales y recientemente con la implementación de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs), estas redes son insuficientes, debido a su cantidad y la inconsistencia en su información. Aun así, estos dos sistemas son las principales fuentes de

información meteorológica en el país y son las bases de datos oficiales de precipitación, por lo que en algunos casos es necesaria la implementación de distintos métodos y caracterizaciones para complementar la información de precipitación.

Este trabajo pretende analizar las tendencias de precipitación en la cuenca “Río Bravo – San Juan” haciendo uso de la información oficial de las Estaciones Climatológicas Convencionales e implementado el uso de información de tres Productos de Precipitación por Satélite. El análisis de tendencia está comprendido en un periodo de estudio de 14 años (2005 – 2018) con información de la lámina de precipitación acumulada diaria en milímetros. Con esto se pretende entender y observar el comportamiento de las precipitaciones en el ciclo hidrológico regional, analizando temporalidad, espacialidad, cantidad e intensidad de este fenómeno; además de proponer el uso de Productos de Precipitación por Satélite como una fuente complementaria de información de precipitación, evaluando su comportamiento y fiabilidad dentro de la cuenca estudio para su implementación en estudios posteriores.

El análisis comprende el comportamiento de las precipitaciones en la cuenca “Río Bravo – San Juan” de forma temporal mediante el uso de tendencias y de forma espacial con el implemento de imágenes satelitales. Proponiendo la implementación de información de precipitación satelital como una fuente complementaria para estudios de carácter hidrológico que ayuden a entender mejor su comportamiento y asociarlo de manera espacial a los cambios en las regiones debido a la urbanización y desertificación.

1.6 Hipótesis

Al analizarse los datos de precipitación, provenientes de estaciones terrenas y de sensores remotos mediante pruebas de sesgo, error y correlación, se podrán para obtener las tendencias espaciales y temporales dentro de la cuenca del Río Bravo – San Juan.

1.7 Objetivo Principal

Realizar un análisis de tendencia de precipitación mediante la aplicación de pruebas estadísticas con base en información obtenida de estaciones terrenas (estaciones climatológicas) y Productos de Precipitación por Satélite en la cuenca Río Bravo – San Juan, para obtener información que determine el comportamiento de la información satelital para coadyuvar a la conservación y aprovechamiento de los recursos hídricos de la región.

1.7.1 Objetivos particulares

1. Obtener información de precipitación de Estaciones Climatológicas Convencionales y de tres Productos de Precipitación por Satélite para analizar ambas fuentes mediante el implemento de pruebas estadísticas y Sistemas de Información Geográfica (SIG).
2. Analizar estadísticamente los datos de precipitación de las observaciones terrenas y satelitales aplicando pruebas paramétricas de correlación, error y sesgo para identificar su comportamiento espacial y temporal.
3. Realizar la prueba no paramétrica de tendencia Mann – Kendall con la información de las observaciones terrenas para determinar la tendencia de precipitación presente en la cuenca.
4. Analizar espacialmente la tendencia de precipitación para determinar las zonas vulnerables en la cuenca.

5. Identificar el Producto de Precipitación por Satélite con el mejor comportamiento temporal y espacial con el fin validar su aplicación en futuros estudios hidrológicos en la región.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Zona de Estudio

La zona de estudio elegida fue propuesta con base en conocimientos previos de la región y la situación de crisis hídrica que se presenta actualmente en el estado de Nuevo León. Se optó por trabajar en una de las subcuencas del Río Bravo, la cual tiene por nombre Cuenca RH24 Río Bravo – San Juan; esta cuenca cuenta con diferentes orografías, climas y asentamientos urbanos importantes, la cual la vuelve un reto para este estudio.

2.1.1 Caracterización de la zona

La zona de estudio es la cuenca “Río Bravo - San Juan” con denominación oficial RH24B. Está ubicada al noreste del territorio mexicano dentro de los estados de Coahuila de Zaragoza (cuenca alta), Nuevo León (cuenca media y baja) y Tamaulipas (cuenca baja).

La cuenca tiene un área aproximada de 34,293 km² (Luegue Tamargo, 2011); posee una singular posición geográfica dado que se sitúa entre la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo de México contando con elevaciones entre los 3,700 y los 50 m.s.n.m., como se observa en la Figura 1. Cuenca Río Bravo - San Juan.

Dentro de la cuenca de estudio se localizan dos áreas urbanas importantes para el sector industrial de México, el Área Metropolitana de Monterrey en el estado de Nuevo León, y Saltillo, la capital del estado de Coahuila de Zaragoza.

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) es de las zonas industriales más importantes del país y la tercera área metropolitana más poblada, por lo que esta cuenca tiene que suministrar agua a 5,046,743 habitantes distribuidos en los 13 municipios que conforman esta metrópoli, además de suministrar agua al resto de municipios que se encuentran dentro de la cuenca. Por otro lado, Saltillo

cuenta con 879,958 habitantes con un capital industrial centrado en rubro automotriz; y se apoya del municipio de Ramos Arizpe, dejando como sector secundario a los municipios de General Cepeda y Arteaga (INEGI, 2023).

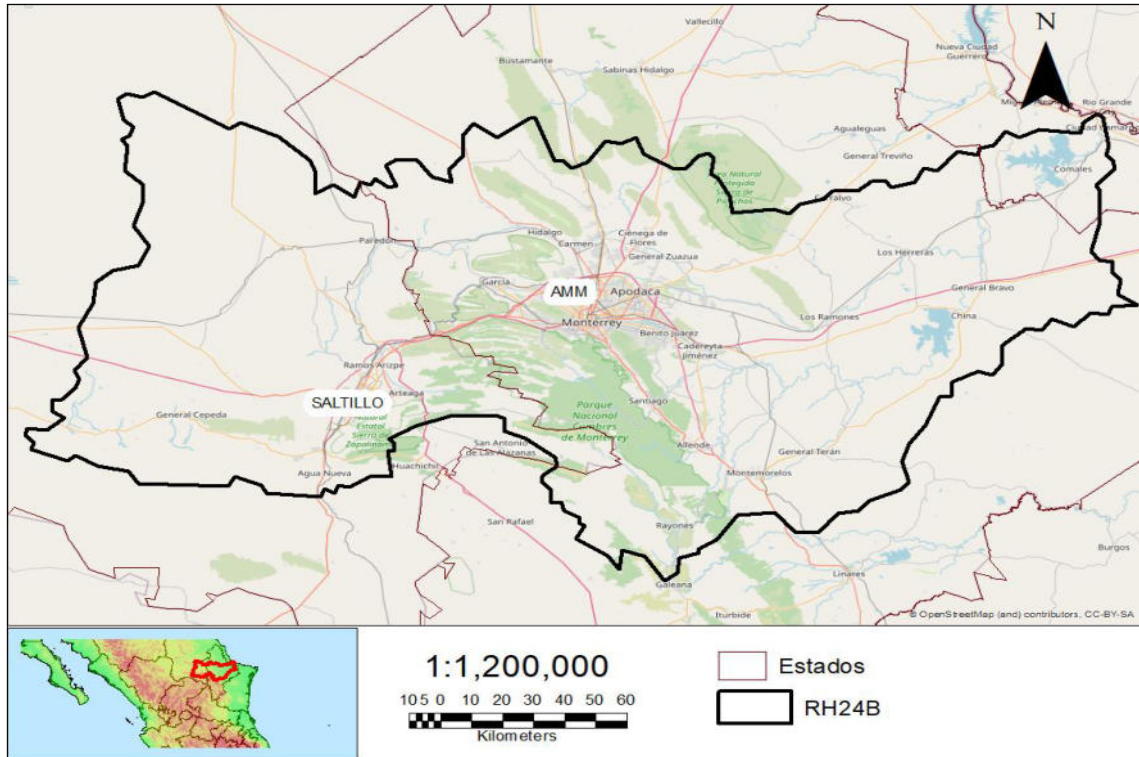


Figura 1. Cuenca Río Bravo - San Juan

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) indica que el clima de la zona está conformado por templado subhúmedo, templado semicálido húmedo, templado semifrío subhúmedo, seco cálido semi seco, seco templado y semifríos semisecos, y secos semicálidos muy secos, esto puede observarse en la Figura 2. Tipos de clima presentes en la cuenca RH24B¹. Con respecto a las temperaturas, estas varían de manera extrema con inviernos de entre los -3°C y 15°C, y veranos con temperaturas mínimas de 30°C (INEGI, 2021b).

Los estados involucrados cuentan con épocas similares de lluvia, la cual ocurre durante el verano en los meses de agosto y septiembre para Nuevo León y

¹ Para consultar los climas y características se recomienda leer “Diccionario de Climas de INEGI (2021b)

Coahuila con un acumulados anuales de precipitación de 650 mm y 400 mm respectivamente; mientras que Tamaulipas cuenta con 780 mm de precipitación anual con lluvias presentes en el verano durante los meses de junio a septiembre (Comisión Nacional del Agua et al., 2022; Comisión Nacional del Agua (CNA) & CONABIO, 1998; Comisión Nacional del Agua & Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2021).

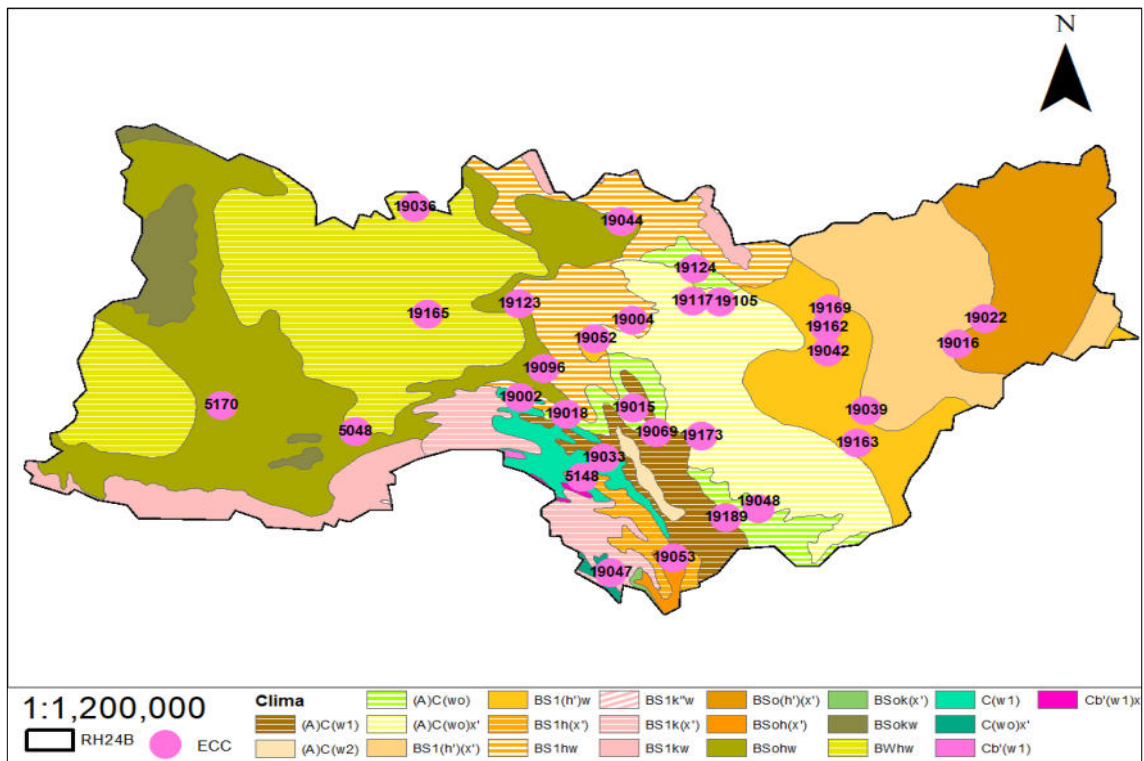


Figura 2. Tipos de clima presentes en la cuenca RH24B

2.1.2 Fuentes de agua disponibles e infraestructura

La cuenca Río Bravo – San Juan pertenece a la Región Hidrológica 24 “Cuenca del Río Bravo”. Esta cuenca está conformada por 6 subcuencas naturales referentes a los ríos: San Juan, Pesquería, Salinas, San Miguel, Monterrey, Ramos, y Pílon. Además de una subcuenca artificial deriva de la subcuenca San Juan, la cual pertenece a la cuenca de la presa Marte R. Gómez, esto puede

observarse en la Figura 3. Subcuencas, cauces e infraestructura en la cuenca Río Bravo - San Juan.

Referente a la infraestructura que se tiene en la cuenca, esta posee 3 presas que ayudan al abastecimiento de la población, esas presas son: Rodrigo Gómez (La boca) ubicada en el municipio de Santiago y El Cuchillo ubicada en el municipio de China, ambas abastecen a Nuevo León y el AMM; mientras que, la presa Marte R. Gómez (El Azúcar) ubicada en el estado de Tamaulipas, esta presa abastece las zonas de riego del distrito agrícola 025 “Bajo San Juan” (ver Figura 3).

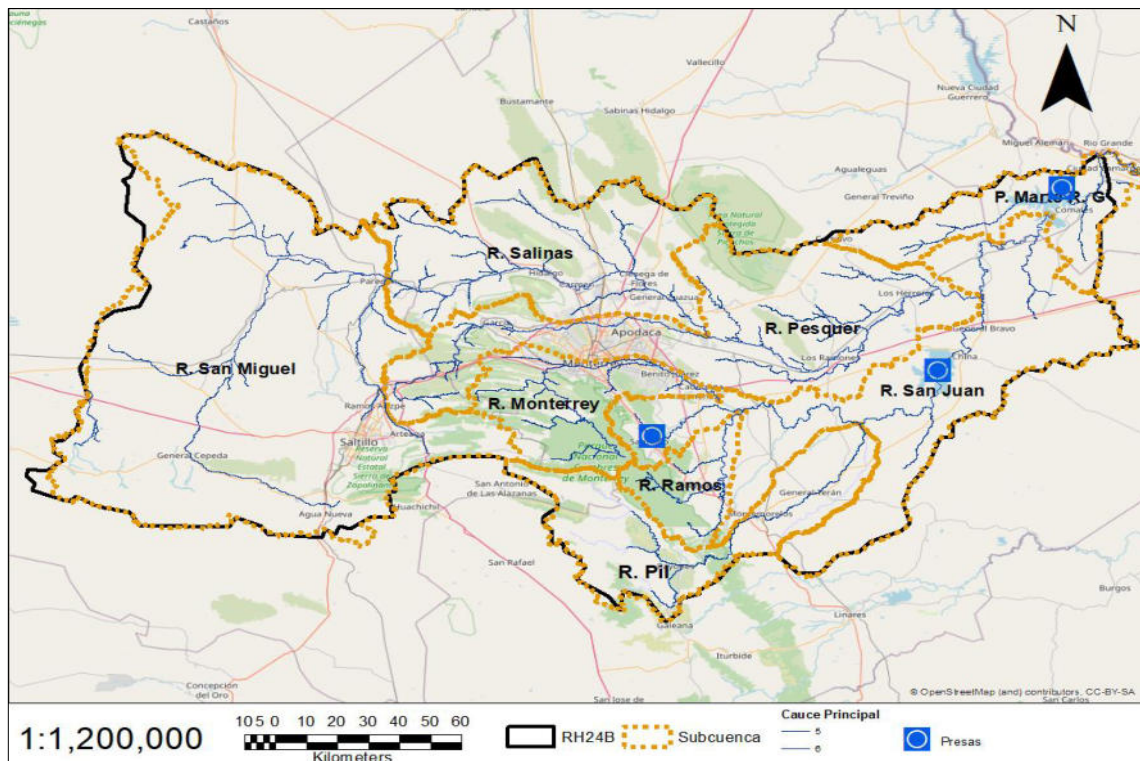


Figura 3. Subcuencas, cauces e infraestructura en la cuenca Río Bravo - San Juan

2.2 Información de precipitación

Para la obtención de información de precipitación fueron propuestas cinco fuentes de fuentes de información climatológica que proporcionaran específicamente información de precipitación, estas fuentes deberían ser de observaciones terrenas y proyecciones satelitales.

Las observaciones terrenas fueron propuestas la información de las Estaciones Climatológicas Convencionales (ECC) y las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) ambas administradas y proporcionadas por los organismos gubernamentales la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) quienes manejan la Base De Datos Climatológica Nacional en el formato de Información Estadística Climatológica (ECC) y las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) (*Servicio Meteorológico Nacional, n.d.*).

Para los Productos de Precipitación por Satélite (PPS), fueron propuestos tres productos, dos de ellos funcionan únicamente con información satelital, es decir que no hacen una recalibración con observaciones terrenas y un tercero que realiza una recalibración con información terrena. Los primeros dos productos son el Climate Prediction Center Morphing Technique (CMORPH) y la Estimación De Precipitación Por Sensores Remotos de Información Utilizando Redes Neuronales Artificiales y el Sistema de Clasificación de Nubes (PERSIANN – CCS, por sus siglas en inglés); y el segundo tipo de producto es El multi-satelite integrado recuperaciones de GPM (IMERG, por sus siglas en inglés).

Estos algoritmos son de acceso libre y son proporcionados por organismos internacionales como la National Aeronautics and Space Administration (NASA), el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS).

La temporalidad seleccionada para trabajar la información fue el acumulado diario de precipitación, es decir el acumulado de 24 horas. El periodo de tiempo

propuesto en un inicio fue para los años de 2005 – 2020, sin embargo, debido a la disponibilidad de la información, el periodo propuesto fue modificado del 1 de enero de 2005 al 31 de diciembre de 2018.

2.2.1 Estaciones climatológicas convencionales

La información de las observaciones terrenas fue obtenida de una única fuente, la Climatología Diaria de Base De Datos Climatológica de las Estaciones Climatológicas Convencionales (ECC). Se utilizó esta única fuente debido a que la lámina de precipitación a cada 10 minutos de las EMA's no está disponible en su totalidad para el periodo de tiempo propuesto y el área determinada, por lo que quedó descartada.

La base de datos de acceso libre de Información Estadística Climatológica (CNA et al., 2020) proporciona el registro histórico de las estaciones climatológicas convencionales del país. Cuentan con distintos periodos de información dependiendo de la fecha de inicio de operación de cada estación, sin embargo, la última actualización de información fue en 2020 con datos hasta el año 2018, por lo que para la fecha en la que se realizó esta investigación aún no se cuenta con información de los años 2019 a 2023.

De esta misma base de datos, fue obtenido el archivo KMZ que contiene la ubicación de las ECC (<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>), además del archivo shape de ubicación de Cuencas Nacionales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) et al., 2017). Con esta información fueron localizadas un total 59 de estaciones activas que se encuentran dentro de la cuenca de estudio, distribuidas de la siguiente manera: 48 en Nuevo León, 11 en Coahuila de Zaragoza y cero en Tamaulipas como se muestra en la Figura 4.

2.2.1.1 Selección de estaciones climatológicas

Al contar con un total de 59 estaciones dentro de la cuenca, fue ejecutada una segunda depuración de estaciones. Para realizarlo, se propuso trabajar con

aquellas estaciones que cuenten con al menos un 85% de información de precipitación diaria para el periodo de tiempo establecido, este porcentaje fue propuesto para contar con la mayor cantidad de información posible con un menor número de estaciones.

Este 85% es equivalente a 4346 días, los cuales deben de contener valores diferentes a “nulo” y mayores o iguales a 0 para que sean tomados como válidos. Esto debido a que los días que cuentan con la descripción de “nulo” o están en blanco, muestran que ese día no hubo un registro de la lámina de precipitación, por lo que no se conoce si ese día hubo o no precipitación, sin embargo, sí se toman en cuenta los días con valor de 0, ya que ese día sí hubo un registro el cual marca que no se presentó precipitación alguna.

La

Tabla 2 muestra las estaciones seleccionadas que cumplen con los criterios antes descritos, de manera que ID pertenece al identificador de la estación, el campo “Días” es total de días con información de precipitación, la ubicación mediante coordenadas, los días registrados por la estación, el “porcentaje de días” con respecto a los días registrados y un total ideal neto de 5114 días, y el “Promedio de Lámina de Precipitación” , diario (lamina promedio diario) y anual (lamina promedio anual de la estación) de manera histórica según el periodo de tiempo establecido, la información de la lámina de precipitación se encuentra en milímetros.

Al realizar esta segunda depuración, la cantidad de estaciones disminuyó considerablemente. De manera espacial como se observa en la figura # el estado de Nuevo León cuenta únicamente con 27 estaciones, mientras que para el estado de Coahuila de Zaragoza solo cumplieron 3 estaciones. Esto nos muestra de un inicio la inconsistencia en el sistema, evidenciando el problema principal y corroborando nuestra justificación de estudio.

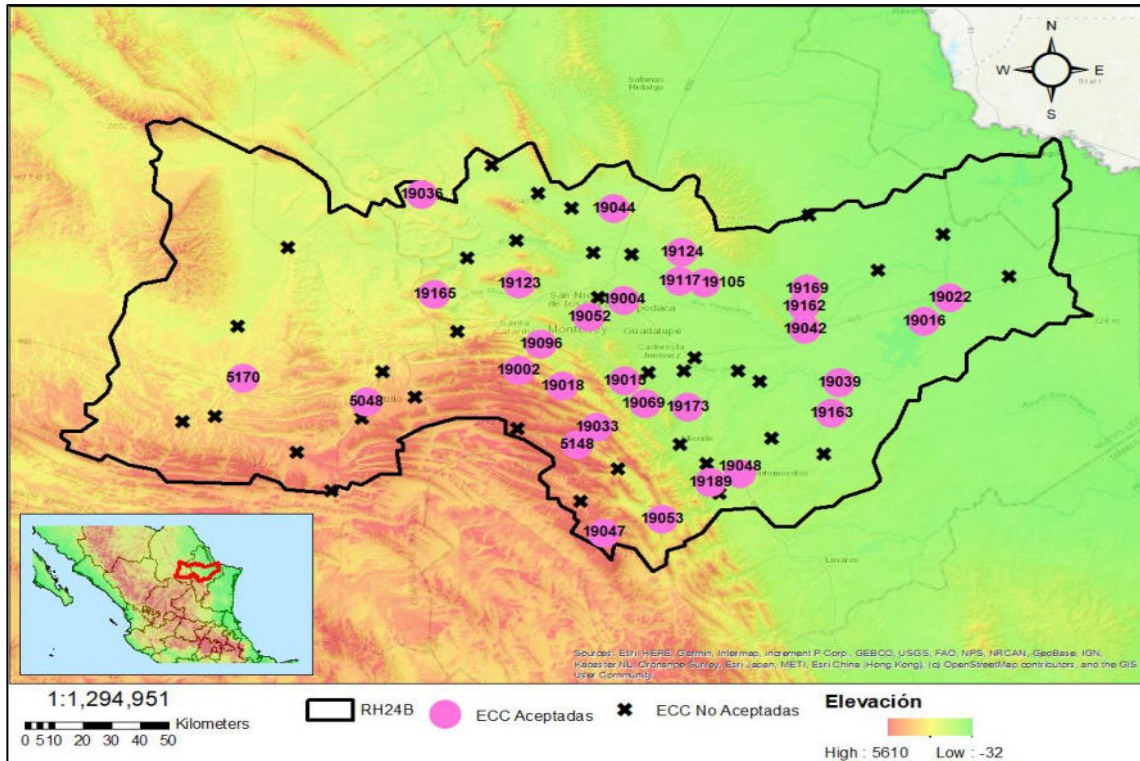


Figura 4. Estaciones Climatológicas convencionales localizadas dentro de la cuenca

Un análisis rápido realizado para las estaciones localizadas en Coahuila mostró que el año 2014 presenta una falta de información para los 365 días del año en las 11 estaciones de la zona, esto obviamente perjudica al total de información y se percibe como uno de los motivos por los cuales solo 3 estaciones cumplen con el porcentaje de información propuesto. Este mismo análisis de corroboración de información para las estaciones en el estado de Nuevo León, arrojó que 26 estaciones no cuentan con información para el año 2007, sin embargo, cuentan casi en su totalidad con la información diaria para el resto de los años. Por consiguiente, se trabajó con 30 estaciones climatológicas convencionales con información registrada entre el 1 de enero de 2005 al 31 de diciembre de 2018.

A diferencia de las imágenes satelitales, la información de las estaciones terrenas es proporcionada en archivos de documento de texto (.txt), por lo que estas tuvieron que pasar por un proceso de adecuación para agilizar y mejorar la

trabajabilidad de la información; estas adecuaciones se describen más adelante en el apartado 2.3 “Caracterización y adecuación”.

Tabla 2. Estaciones Climatológicas Convencionales seleccionadas y características

ID	Estación NOMBRE	Coordenadas		Días	Porcentaje de información	Promedio lamina de precipitación	
		LAT	LONG			Diario (mm)	Anual (mm)
5048	SALTILLO (DGE)	025.433°	-101.000°	4504	88.11	0.90	288.00
5148	POTRERO DE ABREGO	025.284°	-100.343°	4486	87.75	1.32	422.10
5170	LA ROSA	025.518°	-101.386°	4524	88.50	0.64	207.10
19002	AGUA BLANCA	025.544°	-100.523°	4394	85.95	2.11	661.50
19004	APODACA	025.794°	-100.197°	4671	91.37	1.80	599.20
19015	EL CERRITO	025.510°	-100.193°	4460	87.25	3.00	954.40
19016	EL CUCHILLO	025.718°	-099.256°	4606	90.10	1.74	572.60
19018	EL PAJONAL	025.490°	-100.389°	4543	88.87	1.69	548.90
19022	GENERAL BRAVO (DGE)	025.801°	-099.176°	4609	90.16	1.77	584.20
19033	LAGUNA DE SÁNCHEZ	025.346°	-100.280°	4621	90.40	2.60	859.10
19036	LA POPA	026.164°	-100.828°	4613	90.24	0.67	221.80
19039	LAS ENRAMADAS	025.501°	-099.521°	4703	92.00	1.94	652.20
19042	LOS RAMONES	025.691°	-099.631°	4470	87.44	1.80	575.30
19044	MAMULIQUE	026.117°	-100.228°	4618	90.34	1.54	508.60
19047	MIMBRES	024.974°	-100.259°	4892	95.70	1.82	635.60
19048	MONTEMORELOS	025.182°	025.182°	4361	85.31	2.72	847.70
19052	MONTERREY (OBS)	025.734°	-100.305°	4825	94.39	1.94	669.90
19053	RAYONES	025.021°	-100.077°	4676	91.47	1.73	577.20
19069	LA BOCA	025.429°	-100.129°	4739	92.70	3.01	1020.50
19096	LA HUASTEQUITA	025.639°	-100.455°	4622	90.41	1.29	424.80
19105	DOCTOR GONZÁLEZ	025.854°	-099.943°	4584	89.67	1.93	632.50
19117	EJIDO MARÍN	025.859°	-100.022°	4692	91.78	1.62	542.90
19123	GRUTAS DE GARCIA	025.850°	-100.524°	4737	92.66	0.98	331.50
19124	HIGUERAS (DGE)	025.962°	-100.016°	4397	86.01	1.61	504.50
19162	VISTA HERMOSA	025.771°	-099.634°	4398	86.03	2.52	791.90
19163	LAS BRISAS	025.396°	-099.546°	4381	85.70	2.04	639.20
19165	CHUPADEROS DEL INDIO	025.184°	-100.790°	4575	89.50	0.89	312.70
19169	GARZA GONZALES	025.832°	-099.624°	4548	88.97	1.94	628.70
19173	PALOMITOS (GE)	025.417°	-099.997°	4690	91.74	2.45	822.10
19189	EL PASTOR	025.152°	-099.927°	4562	89.24	3.17	1033.50

2.2.2 Productos de Precipitación por Satélite

Con base en distintos artículos e investigaciones (Dezfooli et al., 2018; Görner et al., 2012; Li et al., 2022; Ramadhan et al., 2022; Xiang Soo et al., 2020)) fueron seleccionados tres Productos de Precipitación por Satélite (PPS) de entre los nueve más utilizados en investigaciones recientes.

En un principio, se había optado por trabajar con el producto The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM 3B42V7), sin embargo, este algoritmo ha dejado de actualizarse, por lo que no cuenta con información para los años del 2018 en adelante, el algoritmo fue migrado y sustituido por el producto GPM IMERG. Debido a esto, se optó por utilizar GPM IMERG, ya que cuenta con información para el periodo de tiempo establecido, además, la base de datos sigue actualizándose día a día, por lo que permite su uso en estudios y proyectos futuros.

También fueron seleccionados los productos PERSIANN – CCS y CMORPH, los cuales cuentan con información suficiente para utilizarse en esta investigación y sus respectivas bases de datos sigue en constante actualización.

Estos productos presentan información en distintos formatos como ArcGIS, GeoTIF, NetCDF y Binario. Para este estudio, se dispuso a trabajar con los formatos ArcGIS (PERSIANN - CCS) y NetCDF (IMERG y CMORPH); sin embargo, por problemas al momento de abrir y trabajar con los archivos fue descartado el formato NetCDF, y fue sustituido por los formatos Binario (CMORPH) y GeoTIF (IMERG).

A continuación, se presenta la forma de obtención de la información satelital de cada producto.

2.2.2.1 PERSIANN–CCS

El sistema operativo, de visualización y de descarga del producto PERSIANN – CCS se encuentra en el sitio web “CHRS Data Portal”

(<https://chrsdata.eng.uci.edu/>) el cual es operado por The Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS). Este sitio web ofrece las diferentes versiones de la familia de productos PERSIANN de manera gratuita, solo con proporcionar una dirección de correo electrónico. El sitio web cuenta con un simulador de información que permite observar los datos disponibles según la versión, fecha, escala y la temporalidad deseada.

El sitio web cuenta con distintas características dentro de su visualizador (Figura 5) el cual permite elegir la versión (PERSIANN, CSC, CCS, y PDIR-Now), la temporalidad (1,3 y 6 horas, diaria, mensual y anual), el periodo de tiempo o las fechas de información, zona o dominio (whole globe, rectangle region, Country, political división, continental basin, major river, tributary, watershed, location, y user shapefile) y el formato de descarga (TIF, ArcGIS, NetCDF).

Para este estudio, se descargó la información de PERSIANN – CCS en formato ArcGIS, en temporalidad de acumulado diario, para el periodo de tiempo de 01/01/2005 al 31/12/2018 en un comprimido tipo “zip” (Soroosh Sorooshian et al., 2014). La zona de estudio fue seleccionada mediante la opción “watershed” donde se aprecia la subcuenca del Río Bravo – San Juan; esta opción permite la descarga directa de la cuenca sin la necesidad de realizar un subproceso de recorte desde una imagen global.

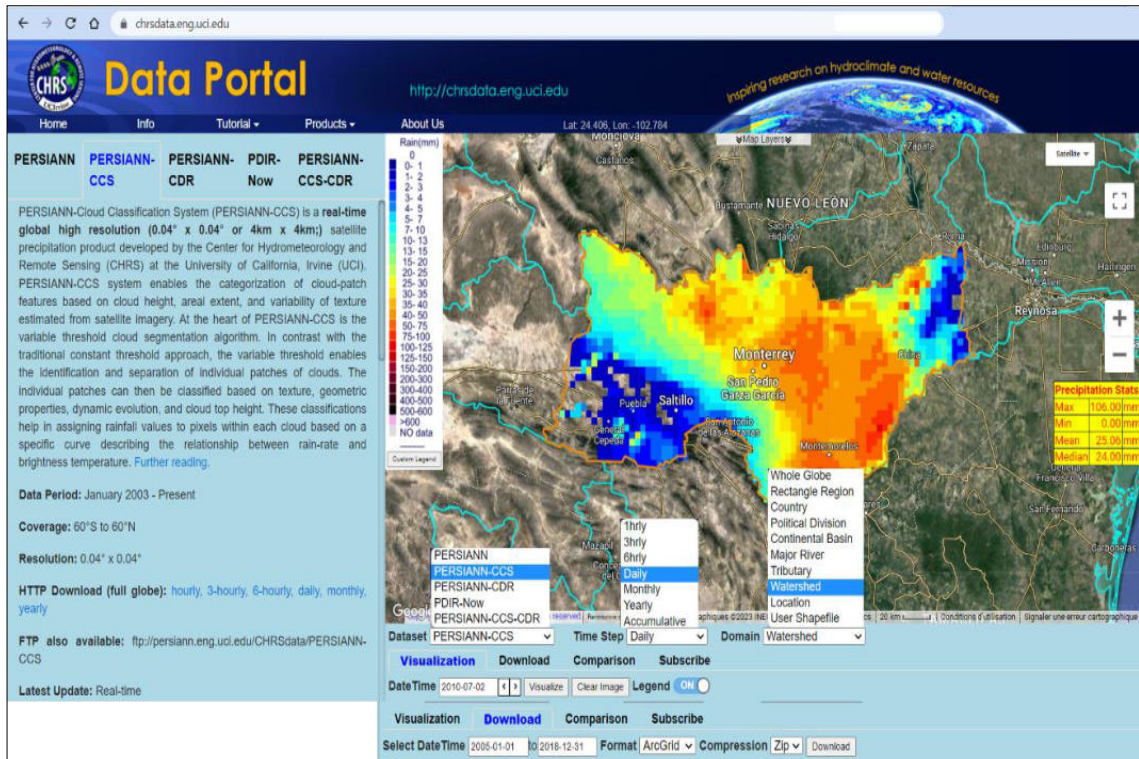


Figura 5. Página web CHRS Data Portal

Los archivos ArcGIS, fueron abiertos en el programa QGIS (QGIS Association, 2022), con un EPSG (Geodetic Parameter Dataset) compatible con el utilizado en las cartas topográficas e hidrológicas de INEGI.

Esta información no presentó problemas de carga de archivos, georreferenciación, y/o visualización por lo que esta no necesitó de ningún tipo de adecuación. La información diaria de precipitación fue organizada en proyectos anuales en el programa de forma consecutiva. La creación de los proyectos anuales en QGIS terminó el 1ero de junio de 2022.

2.2.2.2 IMERG

Para la obtención de la información del producto IMERG, se utilizó la plataforma “GES DISC” de la Earth Data Open Access for Open Science by NASA (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>). En esta plataforma de libre acceso se puede buscar y solicitar información de diversos algoritmos y satélites que sean parte del programa de la NASA. A pesar de ser una plataforma de libre acceso, es

necesario registrarse y llenar un formulario donde se describe que tipo de actividades, estudios o investigaciones se realizarán con la información solicitada.

El buscador funciona de forma similar al de CHRS Data Portal; GES DISC permite establecer el periodo de tiempo de información, dato o variable (precipitación, temperatura, escurrimiento, deshielos, flujos de agua, nevadas), temporalidad de la información (30 min, diario, y mensual), resolución espacial (donde aplique), y la zona o región (global, creación de rectángulos mediante coordenadas, y estados y cuencas para los Estados Unidos de América).

En un comienzo, fue descargada la información del año 2005 a nivel global en formato NetCDF, pero al realizar pruebas preliminares en QGIS, la información no podía ser abierta correctamente; posteriormente se presentaron problemas para la georreferenciación, la visualización y la extracción de información, por lo que se optó por cambiar el formato, optando por el formato GeoTIF.

La descarga de datos IMERG en formato GeoTIF, se realizó según lo explicado en el manual *The IMERG multi-satellite precipitation estimates reformatted as 2-byte GeoTIFF files for display in a Geographic Information System (GIS)* (Kelly, 2022). Donde indica que, para obtener los archivos, es necesario como primera instancia el registro en el portal “Precipitation Processing System” (PPS) (<http://registration.pps.eosdis.nasa.gov/>), y posteriormente acceder a la información que se requiere descargar en el portal “Final IMERG GIS” (<https://arthurhouhttps.pps.eosdis.nasa.gov/gpmdata/>) donde se localiza toda la información disponible hasta el momento de la “Final Version” de IMERG V.06.

Los archivos utilizados para esta investigación son el “Final IMERG 24-hour/Daily”; es decir los datos Finales de IMERG en acumulado de 24 horas o acumulado diario, en formato GeoTIFF para la Version 06, resolución Global a 0.1° x 0.1° píxel, con los datos del 01/01/2005 hasta el 31/12/2018 (Huffman et al., 2019).

En las pruebas realizadas para la apertura de los archivos al programa QGIS, fueron revisadas la georreferenciación de las imágenes globales, la visualización y la obtención de los datos de precipitación, todos los procesos fueron satisfactorios por lo que fueron organizados de manera conjunta con los proyectos anuales de PERSIANN – CCS.

2.2.2.3 CMORPH

El producto CMORPH, cuenta con su sitio de descarga de información <https://www.ncei.noaa.gov/data/>, en el cual después de seleccionar la ruta “cmorph-high-resolution-global-precipitation-estimates/access/daily/0.25deg”, es posible acceder a la información del acumulado diario de precipitación con resolución de 0.25 grados; posteriormente puede seleccionarse el año, mes y día que se requiera, tal como se observa en la Figura 6. La información de precipitación está generada en cobertura global en formato NetCDF.

Index of /data/cmorph-high-resolution-global-precipitation-estimates/access/daily/0.25deg

Name	Last modified	Size	Description
Parent Directory			
1998/	2020-01-16 09:04	-	
1999/	2020-01-16 09:04	-	
2000/	2019-03-18 18:58	-	
2001/	2019-03-18 18:58	-	
2002/	2019-03-18 18:58	-	
2003/	2019-03-18 18:58	-	
2004/	2019-03-18 18:58	-	
2005/	2019-03-18 18:58	-	
2006/	2019-03-18 18:58	-	
2007/	2019-03-18 18:58	-	
2008/	2019-03-18 18:58	-	
2009/	2019-03-18 18:58	-	
2010/	2019-03-18 18:58	-	
2011/	2019-03-18 18:58	-	
2012/	2019-03-18 18:58	-	
2013/	2019-03-18 18:58	-	
2014/	2019-03-18 18:58	-	
2015/	2019-03-18 18:58	-	
2016/	2019-03-18 18:58	-	
2017/	2019-03-18 18:58	-	
2018/	2019-05-14 09:01	-	
2019/	2020-05-14 23:13	-	
2020/	2021-05-14 03:56	-	
2021/	2022-03-25 12:54	-	
2022/	2023-01-13 13:46	-	

Parent Directory

Name	Last modified	Size	Description
01/	2019-03-18 18:56	-	
02/	2019-03-18 18:57	-	
03/	2019-03-18 18:58	-	
04/	2019-03-18 18:56	-	
05/	2019-03-18 18:58	-	
06/	2019-03-18 18:56	-	
07/	2019-03-18 18:58	-	
08/	2019-03-18 18:57	-	
09/	2019-03-18 18:57	-	
10/	2019-03-18 18:58	-	
11/	2019-03-18 18:58	-	
12/	2019-03-18 18:58	-	

Parent Directory

Name	Last modified	Size	Description
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050101.nc	2018-10-09 16:38	408K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050102.nc	2018-10-09 16:39	377K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050103.nc	2018-10-09 16:40	357K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050104.nc	2018-10-09 16:41	355K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050105.nc	2018-10-09 16:42	353K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050106.nc	2018-10-09 16:43	352K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050107.nc	2018-10-09 16:45	348K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050108.nc	2018-10-09 16:46	354K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050109.nc	2018-10-09 16:47	364K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050110.nc	2018-10-09 16:48	366K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050111.nc	2018-10-09 16:49	369K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050112.nc	2018-10-09 16:50	373K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050113.nc	2018-10-09 16:51	372K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050114.nc	2018-10-09 16:52	371K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050115.nc	2018-10-09 16:54	375K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050116.nc	2018-10-09 16:55	378K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050117.nc	2018-10-09 16:56	370K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050118.nc	2018-10-09 16:57	365K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050119.nc	2018-10-09 16:58	359K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050120.nc	2018-10-09 17:00	360K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050121.nc	2018-10-09 17:01	363K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050122.nc	2018-10-09 17:02	367K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050123.nc	2018-10-09 17:04	353K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050124.nc	2018-10-09 17:05	356K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050125.nc	2018-10-09 17:06	351K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050126.nc	2018-10-09 17:07	362K	
CMORPH_V1.0_ADJ_0.25deg-DLY_00Z_20050127.nc	2018-10-09 17:08	356K	

Annotations:

- AÑO:** 2005
- DÍAS:** 01
- MES:** 01

Figura 6. Proceso y pagina web para obtención de datos CMORPH

El sitio de descarga de CMORPH cuenta únicamente con información en escala global, a diferencia de PERSIANN – CCS e IMERG dónde los sitios de descarga permiten seleccionar regiones específicas en algunos formatos. Para la descarga de datos CMORPH no se presentaron problemas, además no es necesario ningún tipo de registro para la obtención de la información.

Sin embargo, al momento de abrir los archivos en QGIS se presentaron distintos inconvenientes, el primero fue encontrar la forma correcta de abrir archivos NetCDF mismo problema que se presentó anteriormente con IMERG, y de igual manera los archivos presentaron problemas de georreferenciación, visualización y por ende obtención de información.

Para el caso en concreto con CMORPH, el problema mayor fue el de la georreferenciación, debido a la posición y referenciación del producto del algoritmo. El producto presenta la información mediante bandas ráster en un mapa global, dónde se muestra al continente americano del lado derecho, y no del lado izquierdo como comúnmente estamos acostumbrados, utilizando coordenadas de 0° a 360° y no de -180° a 180°. Debido a esto, habría que cambiar la posición del mapa y la información contenida en las bandas para que coincida con la información que se tiene de la cuenca y las estaciones. Sin embargo, no fue posible encontrar un método para cambiar la georreferencia del mapa y las bandas de información ráster sin perder la información de precipitación, o recortar y trasladar la información contenida en el archivo sin que esta se perdiera o modificara, por lo que se tomó la decisión de cambiar el formato de entrada, optando por utilizar en su lugar los archivos binarios.

Al cambiar a formato binario, la información fue obtenida mediante el explorador Opera, ya que, el dominio de la página de acceso a esta información no es admitido por Google Chrome. La página donde se localiza esta información es (ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CMORPH_V1.0/CRT/), y es muy similar a la página donde se obtuvo la información NetCDF. Dado que se tuvo que descargar de nuevo la información, esta operación de descarga finalizó el 6 de junio de 2022.

Los datos obtenidos para trabajar con este producto fueron: CMORPH V0.1, en acumulado diario, resolución global a Tendencias Mensuales de Índices de Precipitación en México 0.25° x 0.25° píxel, en formato binario, para la información desde el 01/01/2005 hasta el 31/12/2018 (Xie et al., 2017).

Para adecuar la información fue necesario utilizar un programa diferente para trabajar con los datos de precipitación. El programa utilizado fue GNU Octave (John W. Eaton et al., 2019), donde mediante el empleo de códigos de programación se extrajo la información de precipitación con base en las coordenadas de la ubicación de las estaciones climatológicas convencionales (el código se muestra en el Apéndice A.1. Código para extracción de información de CMORPH en GNU Octave (version 7.1.0). Cabe resaltar que este no es visualizador de la información como QGIS, aquí solo pueden extraerse los datos de precipitación.

2.3 Caracterización y adecuación de la información

Como se mencionó anteriormente, cada fuente de información cuenta con formatos distintos, por lo que fue necesario adaptar todas y cada uno de los formatos de descarga para tener un espacio de trabajo lo más uniforme posible. Esta uniformidad comenzó con la información de precipitación diaria obtenida de las ECC de CONAGUA, posteriormente con la información de CMORPH y por último de los productos PERSIANN – CSS e IMERG.

2.3.1 Formato y georreferenciación

Para la visualización de los distintos archivos y la extracción de información se trabajó con el programa QGIS en su versión 3.22.3, y este se utilizó para trabajar los archivos en formato shape, ArcGIS y GeoTIF. Posteriormente fue implementado el programa GNU Octave para la extracción y georreferenciación de información binaria mediante un código de programación. Además, se utilizó el programa MS Excel para el manejo de la lámina de precipitación de las estaciones climatológicas convencionales.

A continuación, se explica cómo fueron trabajadas cada información de las distintas observaciones y que adecuación se realizaron en cada una.

2.3.1.1 Estaciones climatológicas convencionales

La información de las ECC es proporcionada en archivos tipo Documento de texto (.txt), por lo que, para trabajar con los datos de precipitación, estos fueron trasladados a formato Excel, donde se realizó una depuración de información en donde fue eliminada toda la información anterior al 1ero de enero de 2005, además de los datos de evaporación y las temperaturas máximas y mínimas.

Los datos comprendidos en el periodo de tiempo establecido fueron reacomodados respetando el orden cronológico de las fechas, evitando tener saltos de información para remplazarlos por espacios en blanco y así tener una serie consecutiva de tiempo.

Posteriormente, fueron generados 14 archivos de Excel los cuales almacenan de manera anual la información de las 30 Estaciones Climatológicas Convencionales. Estos archivos almacenan por año la precipitación diaria de cada ECC, en forma de una tabla de “366 x 31” o “367 x 31” dependiendo si el año es bisiesto.

Así mismo, fue generada una lista que contiene el identificador (ID) de las estaciones y sus coordenadas geográficas en un archivo Delimitado por Comas (.csv) que posteriormente fue utilizado para extraer la información de CMORPH, esto se explica a detalle en el apartado 2.3.1.3.

El archivo KMZ que contiene la ubicación georreferenciada de las estaciones fue abierto en QGIS, para convertirlo en un formato shape evitando perder sus datos de georreferenciación y así utilizarlo en los algoritmos de PERSIANN – CCS e IMERG.

Este archivo KMZ contiene todas estaciones que se encuentran operando en el país, por lo que se realizó un recorte de capa vectorial para eliminar todas las estaciones que se encuentren fuera de la cuenca de estudio. Esto arrojó las 59 estaciones mencionadas al principio, por lo que una vez que se obtuvo el Identificador de las estaciones finales, se modificó la tabla de atributos del archivo shape para eliminar las estaciones descartadas, este archivo con la información de la ubicación y datos de identificación de las estaciones dentro de la cuenca RH24B fue denominado como “Estaciones Climatológicas Finales”.

Este archivo shape es de suma importancia para tratar la información de los productos IMERG y PERSIANN – CSS como se explica en la siguiente sección.

2.3.1.2 IMERG y PERSIANN – CCS

Como se mencionó anteriormente, la información de precipitación de IMERG y PERSIANN – CCS fue trabajada utilizando el programa QGIS donde se realizaron proyectos por año que contienen la precipitación diaria de ambos

productos, la ubicación georreferenciada de las estaciones climatológicas convencionales y la cuenca RH24 Río Bravo – San Juan.

No se presentaron problemas en el encuadre de píxeles de las bandas ráster con la ubicación puntual vectorial de las estaciones climatológicas convencionales, esto debido a que ninguna estación se encontraba entre dos o más píxeles. Por lo que no fue necesario realizar ningún trabajo extra para determinar el píxel predominante; el encuadre de ambos productos se observa en las figuras Figura 7 y Figura 8; así como la diferencia del tamaño de píxel de ambos productos.

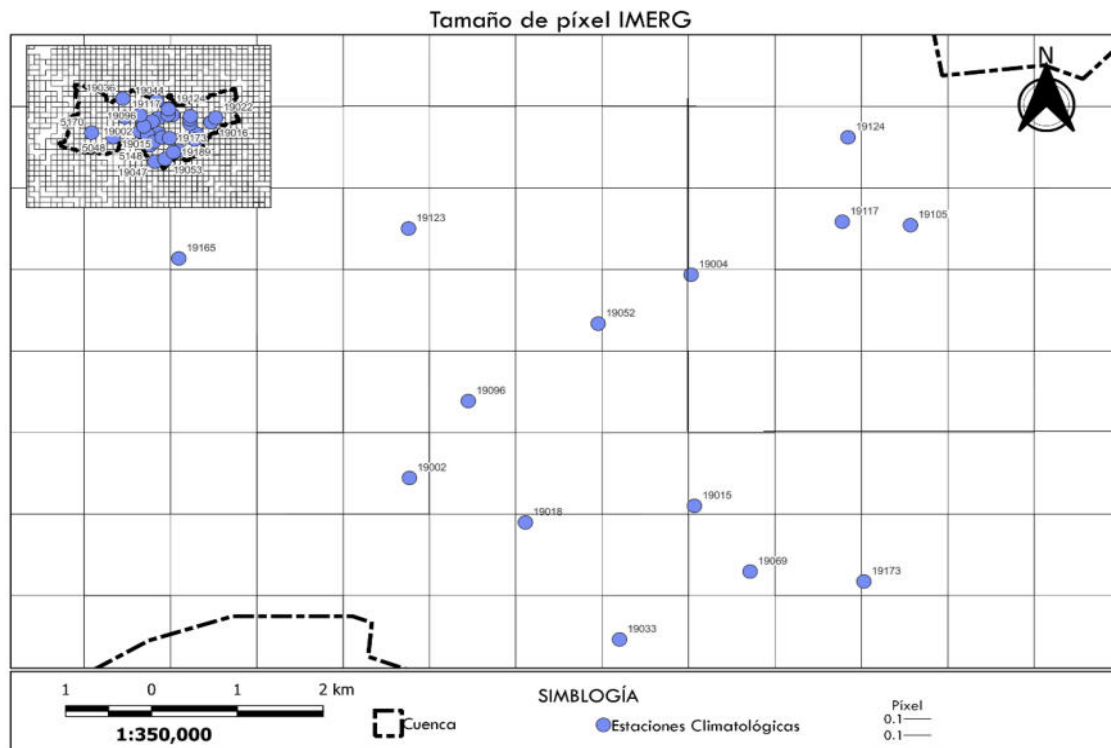


Figura 7. Comparativa de tamaño de píxel y estaciones para IMERG

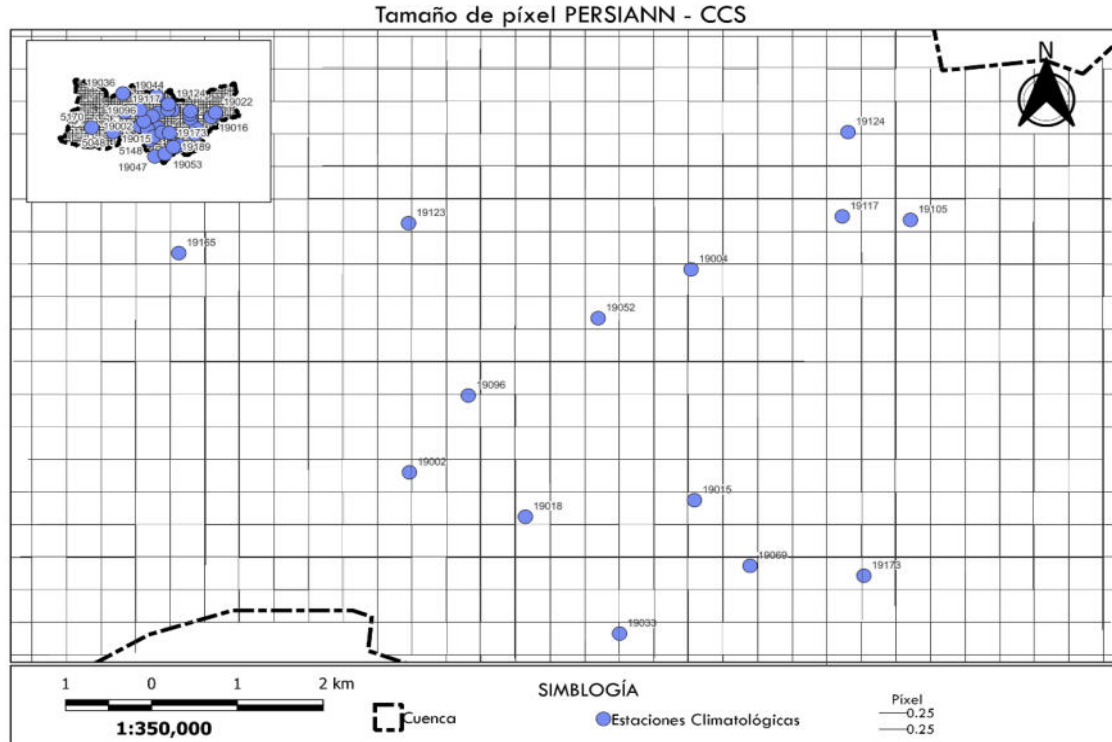


Figura 8. Comparativa de tamaño de píxel y estaciones para PERSIANN - CSS

Para la extracción de la precipitación de manera puntual de cada estación se utilizó la extensión "Point Sample Tool" (Jurgiel, 2020) que permite extraer los valores de la banda ráster con base en un archivo vectorial shape. Para utilizar esta extensión fue necesario cambiar los nombres de los archivos de ambos algoritmos de forma que fueran posible distinguir el algoritmo y la fecha sin exceder el número de caracteres admitidos por la extensión.

Para realizar este cambio de nombre en las 730 capas comprendidas en cada proyecto anual, fue utilizado la Consola de Phytion QGIS para agilizar el proceso de renombre; la consola permitió que mediante la implementación de un código fuera realizado el renombre automatizado de todas las capas por proyecto, evitando hacerlo capa por capa de manera manual. Este cambio de nombre solo ocurrió en las capas comprendidas dentro de cada proyecto anual, por lo que, los archivos originales no sufrieron ningún tipo de modificación.

Una vez realizado el renombre, se procedió a utilizar la extensión Point Sample Tool en cada proyecto anual extrayendo la información de precipitación por cada capa con base en el shape de las estaciones climatológicas convencionales. Este proceso generó un archivo shape único por producto el cual contiene de forma vectorial (puntos) las estaciones climatológicas y los datos de la precipitación que estaban comprendidos en la banda ráster de la capa original. Cada capa generada fue denominada como “*PERSIANNaño*” e “*IMERGaño*”, por ejemplo, PERSIANN2005 e IMERG2005.

La tabla de atributos de cada una de estas capas almacena la información de precipitación diaria en forma de 31 filas que representan las estaciones y 365 o 366 columnas que son las fechas, de manera que se tiene una tabla “31 x 366 – 367” por producto por año; en total fueron obtenidos 28 archivos shape que comprenden todos los datos de precipitación diaria.

Para poder trabajar la información posteriormente en conjunto con la información de las ECC, las tablas fueron exportadas a MS Excel en un total 26 archivos, dentro de cada archivo, la información fue transpuesta matricialmente para pasar de “366 x 31” a “31 x 366”, para trabajar la parte estadística de la investigación.

2.3.1.3 CMORPH

La forma en que se trabajó el producto CMORPH fue totalmente diferente a los productos IMERG y PERSIANN – CCS. Para este producto primero fue generada una tabla con el identificador único de las ECC con respectivas coordenadas geográficas (longitud, latitud), en un archivo en formato delimitado por comas.

La información binaria de CMORPH fue almacenada en 14 carpetas anuales con sus respectivas 12 carpetas mensuales; estas últimas contienen los datos diarios de precipitación en un comprimido (.bz2) por día.

Utilizando el programa GNU Octave se desarrolló un código de programación que realiza de forma simultánea diferentes procesos. El primero es descomprimir los archivos tipo (.bz2) que contienen los datos de precipitación de un día. Después,

una vez que el código descomprime los 365 o 366 archivos, procede a abrir los archivos binarios, para posteriormente con ayuda del archivo delimitado por comas extraer la información del píxel de manera puntual con base en las coordenadas de las Estaciones Climatológicas y los arreglos de píxel que especifica el mismo producto. Este código se muestra en el Apéndice A.1. Código para extracción de información de CMORPH en GNU Octave (version 7.1.0)

El código generó archivos por año que contienen la precipitación diaria en cada estación, dando como resultado una matriz de “365 – 366 (días) x 31(30 estaciones y la celda de la fecha)”; generando al final 14 archivos anuales de precipitación. Estas matrices están almacenadas en formato de contenedor de datos binarios (.mat) las cuales pueden abrirse y trabajarse en programas como, Matlab, Mathcad o RStudio, para realizar posteriormente el tratamiento estadístico de la información. Sin embargo, también fueron migradas a MS Excel, para tener un formato uniforme, de tal manera que la información de los productos satelitales y las observaciones terrestres presentan el mismo formato de diseño y acomodo facilitando la trabajabilidad.

Debido al formato de entrada (binario), no es posible obtener una visualización gráfica de la información de precipitación contenida en este algoritmo. Para la visualización gráfica se debe trabajar con el formato NetCDF, el cual como se explicó anteriormente no fue posible manejar en el programa QGIS. Gracias a este inconveniente de visualización, únicamente podrá estimarse de forma estadística la confiabilidad de este algoritmo.

2.3.2 Tiempo (zonas horarias)

La diferencia de las zonas horarias entre la información terrena y la satelital es de 6 horas, esto se debe a que los PPS trabajan con formato horario UTC (Coordinated Universal Time) mientras que las observaciones terrestres se manejan con la hora local (UTC – 6:00). Por lo que es el mismo día durante únicamente 19 horas, a esto se le debe restar el tiempo de medición establecido

por CONAGUA, el cual realiza las mediciones a las 8:00 am de cada día, obteniendo al final una coincidencia de únicamente de 16 horas.

Dado que CONAGUA no cuenta con registros suficientes de información a cada 10 minutos; y por cuestiones de tiempo para el tratamiento de la información de los productos de precipitación por satélite, se optó por trabajar toda la información con los acumulados diarios, y así determinar posteriormente mediante el tratamiento estadístico si la falta de concordancia con las horas de medición es un factor influyente significativo en la correlación de la información.

2.4 Pruebas Estadísticas

Para observar el comportamiento de la información satelital con respecto a la información terrena, fueron utilizados varios métodos de estadística descriptiva como de estadística inferencial.

Como primera instancia correspondieron las ejecuciones de la estadística descriptiva para la obtención de acumulados y promedios mensuales, estacionales y anuales, para ambas observaciones (terrenas y satelitales) de forma general y por estación.

Con esta información como base, fueron realizadas las pruebas de correlación y error para determinar la vialidad de la información satelital.

2.4.1. Acumulados

Utilizando como base los archivos de Excel generados para las distintas fuentes de información fueron realizados los acumulados mensuales, estacionales, anuales e históricos de las 30 estaciones para las cuatro fuentes de información u observaciones (ECC, CMORPH, PERSIANN – CSS, e IMERG).

Se entiende por “acumulado” a la sumatoria de los valores absolutos dentro de un periodo de tiempo establecido.

2.4.1.1 Mensuales

Los acumulados mensuales se definen empleando la Ec.6:

$$AMEm_e = \sum d1 + d2 + \dots + d30 + d31 \quad Ec.6$$

Dónde: AME es la precipitación mensual por estación, m indica el mes (1-12), el subíndice e indica la estación y dn son los milímetros de precipitación registrados por día (del 1 al 30 o 31 según sea el caso).

Esta ecuación se utilizó para los 12 meses del año en cada estación de cada tipo de observación de modo que, para las precipitaciones de marzo de 2015 de la estación 19052 de las observaciones terrenas tenemos (Ec. 7 y 8):

$$ECC \ AME_{3_{19052}} = 0.2 + 2.2 + \dots 3.3 + \dots + 0 \quad Ec.7$$

$$ECC \ AME_{3_{19052}} = 97.2 \text{ mm} \quad Ec.8$$

2.4.1.2 Estacionales

Los periodos estacionales se dividieron en dos estaciones, Estación Húmeda que comprende los meses de mayo a octubre, y Estación Seca que abarca los meses de enero a abril y noviembre y diciembre. Estos periodos se propusieron con base en la proyección grafica de los promedios mensuales de las estaciones climatológicas anuales (ver Figura 9).

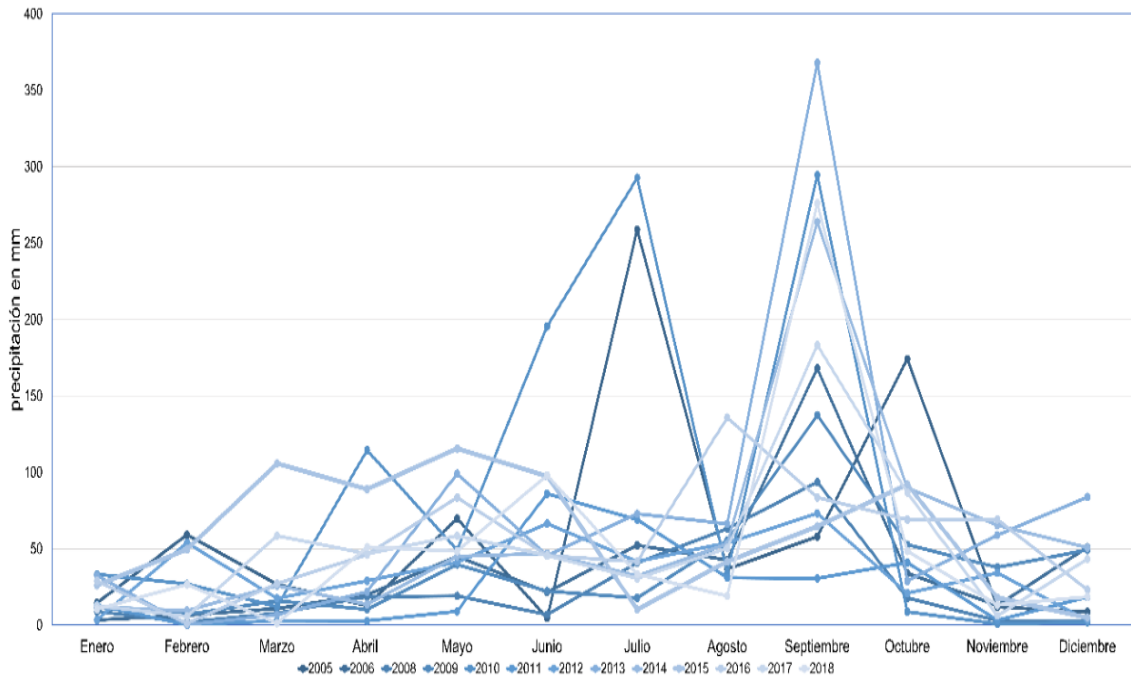


Figura 9. Promedio mensual de precipitación por año de las Estaciones Climatológicas

Los acumulados estacionales son la suma de la precipitación acumulada en los meses correspondientes a cada estación: húmeda (Ec. 9) y seca (Ec.10), de manera que:

$$AEH = AME_{05} + AME_{06} + AME_{07} + AME_{08} + AME_{09} + AME_{10} \quad Ec.9$$

$$AES = AME_{01} + AME_{02} + AME_{03} + AME_{04} + AME_{11} + AME_{12} \quad Ec.10$$

Dónde *AEH* es el acumulado de la precipitación en la estación húmeda, y *AES* es el acumulado de precipitación en la estación seca, ambos en milímetros.

Esta operación se realizó para las 30 estaciones en cada uno de los cuatro tipos de observaciones. De manera que se tiene los acumulados estacionales según las ubicaciones de las estaciones climatológicas, lo que ayuda a entender en parte el comportamiento espacial de la precipitación.

2.4.1.3 Anuales

Los acumulados anuales no provienen del acumulado mensual, si no de la sumatoria directa del acumulado diario de precipitación obtenido de las fuentes de información, por lo que:

$$AAE_a = \sum d1 + d2 + \dots + d365 + d366 \quad Ec.11$$

Dónde en la Ec.11, AAE es la precipitación acumulada anual por estación, el subíndice "a" el año, y dn la precipitación diaria registrada.

El AA fue obtenido para todas las estaciones climatológicas (30) de cada una de las observaciones (4). Este valor fue utilizado para ver el comportamiento de la precipitación cada año y como esta ha ido variando de forma espacial y temporal.

2.4.2 Promedios

Los promedios fueron realizados para realizar las correlaciones y errores de las observaciones de manera general y no puntal con las estaciones. De manera que se puede relacionar el comportamiento de las observaciones satelitales con respecto a las observaciones terrestres. Conjunto a esto, también se va eliminando el problema con la falta de días registrados, recordando que ninguna estación climatológica tiene 5112 días de registro.

2.4.2.1 Mensuales

Los promedios mensuales se generaron para conocer cuanta precipitación llueve en promedio por mes de manera histórica, por estación y por año.

De manera que se tienen dos promedios mensuales, el Promedio de Precipitación Mensual por Mes por Estación (PME), y el promedio de precipitación mensual por observación.

El primero se define como la sumatoria del acumulado mensual de un mes en específico de una estación del año 2005 al 2018 dividido entre el periodo de tiempo en estudio (14 años); y se puede expresar como se muestra en la ecuación 12:

$$PME m_e = \frac{[\sum_{2005}^{2018} AM m_a]}{14} \quad \text{Ec.12}$$

Dónde, *PME* es el Promedio Mensual, *m* el mes a evaluar (1-12), y el subíndice *e* corresponde a la estación, *AM* el acumulado mensual y el subíndice *a* al año. Es decir que para conocer el promedio de precipitación del mes de mayo de la estación 19052 con base en las estaciones climatológicas tenemos (Ec. 13, 14 y 15):

$$ECC \text{ PME5}_{19052} = \frac{[AM5_{2005} + AM5_{2006} + \dots + AM5_{2017} + AM5_{2018}]}{14} \quad \text{Ec.13}$$

$$ECC \text{ PME5}_{19052} = \frac{[74.1 + 36.1 + 81.9 + 21 + \dots + 94 + 54.3 + 68 + 23]}{14} \quad \text{Ec.14}$$

$$ECC \text{ PME5}_{19052} = 49.085 \text{ mm} \quad \text{Ec.15}$$

Por otro lado, el promedio de precipitación mensual por observación (PMO) se define como la sumatoria de AMm de un mes en específico desde la estación 1 a las 30 estaciones para un mismo año, dividido ente el total de estaciones (30), esto se expresa de la siguiente manera (Ec.16):

$$PMOm_a = \frac{[\sum_1^{30} AMm_e]}{30} \quad \text{Ec.16}$$

Siguiendo el ejemplo anterior, en las ecuaciones de la 17 a la 19, tenemos que para el mes de mayo del año 2015 el promedio de precipitación mensual registrado por las estaciones climatológicas sería:

$$ECC \text{ PMO5}_{2015} = \frac{[AM5_{5048} + AM5_{5148} + \dots + AM5_{19052} + AM5_{19189}]}{30} \quad \text{Ec.17}$$

$$ECC PMO5_{2015} = \frac{[113.6 + 110.3 + \dots + 94 + 204.6]}{30} \quad Ec.18$$

$$ECC PMO5_{2015} = 115.67 \text{ mm} \quad Ec.19$$

De esta manera, se obtuvieron el promedio de precipitación mensual por año de cada tipo de observación. Con esta información se realizaron las correlaciones mensuales por estación y observación, el error mensual por estación y observación. Y únicamente con los valores de las observaciones de las Estaciones climatológicas Convencionales se realizaron las pruebas de tendencia.

2.4.2.2 Estacionales

Los promedios estacionales fueron realizados solo por observación de forma anual, y no de manera puntual para cada estación.

De modo que el Promedio Estacional por Observación (PEO) se define como: el la sumatoria de los acumulados estaciones (húmedo o seco) de las 30 estacione, para un año específico dividido entre el total de estaciones tal y como se observa en las ecuaciones 20 y 21:

$$PEOH_a = \frac{[\sum_1^{30} AEH_e]}{30} \quad Ec.20$$

$$PEOS_a = \frac{[\sum_1^{30} AES_e]}{30} \quad Ec.21$$

Siguiendo el ejemplo anterior, tomando en cuenta el año y observación para la estación húmeda tenemos las ecuaciones 22 a 24:

$$ECC\ PEOH_{2015} = \frac{[AEH_{5048} + AEH_{5148} + \dots + AEH_{19052} + AEH_{19189}]}{30} \quad Ec.22$$

$$ECC\ PEOH_{2015} = \frac{[223.8 + 338.8 + \dots + 246.2 + 516.4]}{30} \quad Ec.23$$

$$ECC\ PEOH_{2015} = 329.91\ mm \quad Ec.24$$

Estos promedios estacionales se generaron para el estacional de cada año, para cada una de las observaciones, y fueron utilizados para las correlaciones entre las observaciones terrenas y las observaciones satelitales.

2.4.2.3 Anuales

A diferencia de los promedios estacionales que dependen de los acumulados mensuales, el promedio de precipitación anual depende directamente del acumulado anual por estación.

Esto indica que el Promedio Anual por Observación (PAO) es la sumatoria de los acumulados anuales de las estaciones 1 a la 30 para un año específico dividido entre el número de estaciones (Ec.25):

$$PAO_a = \frac{[\sum_1^{30} AA_e]}{30} \quad Ec.25$$

Tomando en cuenta el ejemplo anterior, para conocer el promedio de precipitación para el año 2015 obtenido con base en las estaciones climatológicas convencionales, tenemos las ecuaciones 26 a 28:

$$ECC\ PAO_{2015} = \frac{[AA_{5048} + AA_{5148} + \dots + AA_{19052} + AA_{19189}]}{30} \quad Ec.26$$

$$ECC\ PAO_{2015} = \frac{[421.8 + 1045.2 + \dots + 650 + 1179.1]}{30} \quad Ec.27$$

$$ECC\ PAO_{2015} = 716.34 \quad Ec.28$$

Estos promedios fueron generados para los 14 años en cada una de las observaciones, y se utilizaron para realizar las correlaciones y errores entre las observaciones terrenas y observaciones satelitales.

2.4.3 Correlación

Para identificar el comportamiento de los productos satélites con respecto a la información de las observaciones terrenas, se realizaron pruebas de correlación entre las observaciones a distintos acumulados y promedios.

Se realizaron dos análisis distintos, el Coeficiente de Correlación de Pearson (CPP) y el Coeficiente de Correlación de Spearman (CCS), el primero es una prueba paramétrica y el segundo es una prueba no paramétrica. Estos análisis serán de utilidad para identificar que producto satelital presenta una mayor similitud con respecto a los datos de precipitación obtenido de manera convencional.

Todas las pruebas se ejecutaron en el programa RStudio (RStudio Team, 2021), utilizando los packages “readxl” y “Hmisc”, descargados de la librería de RStudio. Para cada tipo de prueba se realizaron distintos códigos, según el tipo de información que se estuviera analizando, la base de estos códigos se muestra en Apéndice B.4. Código para la generación de correlaciones

La visualización gráfica de los valores de correlación fue ejecutada en el programa estadístico Past 4 (Hammer et al., 2001).

2.4.3.1 Mensuales

Para los datos mensuales, se realizaron dos análisis diferentes, el primero basado en los Acumulados Mensuales por Estación, el segundo en los Promedios mensuales por mes por Observación (PMO).

Utilizando los AME pruebas correlación, se pretende identificar el comportamiento por mes con respecto a la ubicación de cada estación, esto permite realizar un análisis espacial entre las observaciones terrenas y las satelitales obteniendo que meses presentan una mayor correlación en que zonas de la cuenca.

Esta prueba se ejecutó en RStudio, utilizando como base las hojas de cálculo de Excel generadas con los Acumulados mensuales por estación y año; y se acopló el código de la página 171.

Los Promedios Mensuales por Mes por Estación fueron la base para realizar la correlación mensual según el tipo de observación sin importar la especialización. De este modo de forma general se puede analizar que Producto Satelital está teniendo una mayor correlación según el mes, sin importar su ubicación o el año. Por lo tanto, fue ejecutada una correlación por mes con los promedios mensuales por un mes en específico entre las observaciones terrenas y las observaciones satelitales.

2.4.3.2 Estacionales

Con los Promedios Estacionales por Observación se ejecutaron las pruebas de correlación estacional según las observaciones, sin importar la estación o el año.

La Tabla 3. Promedio Anual Estacional por Observación en milímetros, muestra los valores de las estaciones húmedas y secas registradas por año por cada observación con los cuales se realizaron las correlaciones. Las pruebas de

correlación (Pearson y Spearman) se realizaron para cada estación (húmeda y seca) únicamente en el programa Past 4.

Tabla 3. Promedio Anual Estacional por Observación en milímetros

	ECC		CMORPH		PERSIANN - CCS		IMERG	
	*E H	**E S	E H	E S	E H	E S	E H	E S
2005	521.51	193.29	393.09	170.77	253.13	465.70	193.97	80.07
2006	330.05	87.94	333.32	178.60	531.40	401.67	179.90	66.77
2007	285.22	81.76	381.92	159.14	527.73	445.10	186.60	79.80
2008	639.51	96.56	463.26	94.36	526.13	185.90	254.27	39.00
2009	273.02	135.58	330.00	152.22	263.03	256.73	143.37	54.47
2010	865.88	196.85	631.60	219.47	378.23	315.20	316.73	105.53
2011	226.06	63.54	200.22	43.46	132.67	180.03	107.60	12.43
2012	256.40	183.23	255.30	136.48	240.60	517.83	117.57	71.13
2013	651.96	149.78	488.85	251.77	451.20	414.23	232.83	135.17
2014	441.59	216.58	407.32	194.59	385.00	296.20	197.37	93.40
2015	329.91	380.88	323.79	393.26	260.10	826.50	132.60	153.27
2016	375.86	279.82	463.26	94.36	348.57	462.27	183.30	116.37
2017	368.73	217.17	360.84	203.55	425.63	425.57	132.87	106.03
2018	475.20	151.74	451.73	125.06	662.40	440.27	193.63	62.30

*E H: Estación Húmeda; **E S: Estación Seca

2.3.3.3 Anuales

De manera anual fueron ejecutados dos tipos de análisis, el primero tomando como datos de entrada los Promedios Anuales por Observación para realizar las correlaciones entre las observaciones, y los Acumulados Anuales Por Estación para analizar de forma espacial las mayores y menores correlaciones presentadas. Ambas pruebas ayudaron a evaluar y determinar el comportamiento de la información, no solo por tiempo y espacialidad, si no también, si hay afectaciones al momento de elegir promedios o acumulados.

Las pruebas realizadas con los PAO fueron ejecutadas en Past 4 y RStudio, mientras que las realizadas con los AAE únicamente con RStudio, para este último el código utilizado se encuentra en el Anexo B.4.

2.4.4 Pruebas de Error

Fueron aplicadas dos pruebas para determinar la existencia error y su magnitud entre las observaciones terrenas y las observaciones satelitales. Estas pruebas permiten conocer la diferencia entre los valores y determinar la sobreestimación y/o subestimación de la información de los Productos de Precipitación por Satélite.

El Error Medio Absoluto (MAE) y el Error Cuadrático Medio (RMSE) fueron ejecutados en el programa RStudio utilizando el package “Metrics”, el cual requiere que se determine la función “actual” y la función “predicted”; dónde la primera función requiere de los datos reales y la segunda de los datos inferidos.

El código para ambas pruebas se encuentra en el Apéndice B.1. Código para las pruebas MAE y RMSE, este código se acopló según el acumulado o promedio trabajado.

Ambas pruebas fueron aplicadas a los siguientes periodos.

2.4.4.1 Mensuales

Con los Promedios de Precipitación Mensual por Mes por Estación (PME) fueron obtenidos los errores según el mes para cada observación, es decir que se tiene el RMSE y MAE para cada mes del año (enero a diciembre) de los tres productos satelitales. Estas pruebas no tomaron en cuenta la espacialidad (ubicación de las Estaciones Climatológicas), únicamente fueron tomados los valores del promedio de cada estación por mes de manera general sin importar el año. De esta manera se obtuvieron 36 valores RMSE y 36 de MAE.

2.4.4.2 Estacionales

Utilizando los Promedios Estacionales por Observación (PEO), fueron generados el RMSE y el MAE para cada estacional (húmedo y seco). De esta forma fue posible obtener 3 valores por prueba.

2.4.4.3 Anuales

El Promedio Anual por Observación (PAO) fue el utilizado para realizar las pruebas de error a nivel anual. De manera que se obtuvieron 3 resultados por prueba.

2.4.5 Pruebas BIAS

Para estimar si existe o no una subestimación o sobreestimación por parte de los productos satelitales de precipitación, se ejecutaron las pruebas de sesgo “BIAS” a los promedios por observación (mensual y anual) y a los acumulados por estación anuales. Los primeros para observar el comportamiento de los productos de manera general, y los segundos para asociar el clima y la elevación con el comportamiento de las observaciones satelitales.

Para llevar a cabo estas pruebas se utilizó el programa RStudio y las hojas de Excel con la información de los acumulados y promedios. El código base de la prueba se presenta en el Apéndice B.3. Código para la prueba BIAS; este código se ajustó dependiendo de los datos trabajados.

2.5 Tendencias

Para obtener las tendencias de precipitación presentes en la cuenca “Río Bravo – San Juan” en los años 2005 a 2018, fue elegida la prueba de Mann – Kendall, ya que diversos autores afirman y comprueban que es la prueba indicada en series hidro-climáticas (M. R. I. Baig et al., 2021; Júnior & Lucena, 2019; Mallick et al., 2021; Rahman et al., 2017).

2.5.1 Mann – Kendall

La prueba Mann – Kendall (MK) es una prueba no paramétrica utilizada comúnmente en series hidro-climáticas para determinar tendencias; para este trabajo la prueba fue ejecutada de forma simultánea en los programas Past 4 y RStudio haciendo uso de los mismos valores.

Para esta prueba, fueron utilizados en un principio únicamente los promedios de precipitación anual (PAO) y mensual (PMO) por observación de las Estaciones Climatológicas Convencionales, es decir los datos terrenos. Esto para evitar algún error en cuanto a la proyección en la tendencia debido a los datos de los productos de precipitación por satélite.

La prueba MK utilizó los promedios anuales por observación (13 datos) y los promedios mensuales por observación de cada mes de cada año (156 datos) para determinar la tendencia presente en la cuenca. También esta prueba se aplicó a los acumulados anuales por estación (13 datos por estación) y a los acumulados mensuales por estación (156 datos por estación), para determinar las tendencias de manera puntal en las zonas donde se ubica cada estación.

Para trabajar la información antes mencionada se utilizó el programa RStudio con el código localizado en el Apéndice B.2. Código para las pruebas Mann – Kendal.

Esta prueba define la pendiente S con una media cero como:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \text{Ec.29}$$

Dónde en la Ec.29 la función $\text{sgn}(x_j - x_i)$ y la variancia están definidas ecuación 30:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, \text{ sí } x_j - x_i > 0 \\ 0, \text{ sí } x_j - x_i = 0 \\ -1, \text{ sí } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad \text{Ec.30}$$

Dónde n es el número de datos, x_i y x_j son los valores de los datos en la serie de tiempo i y j ($j > i$), respectivamente.

$$V(S) = \frac{(n(n-1)(2n+5)) - \sum_{k=1}^m t_k(t_k-1)(2t_k+5)}{18} \quad \text{Ec.31}$$

En la ecuación 31, m es el número de grupos y t_k representa el número de colas extendidas de i . Una cola es un grupo de datos de la muestra que tienen los mismos valores. En casos donde $n > 10$, la prueba normal estándar Z_s se calcula como se muestra en la Ec.32:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}, \text{ sí } S > 0 \\ 0, \text{ sí } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}}, \text{ sí } S < 0 \end{cases} \quad \text{Ec.32}$$

Los valores positivos de Z_s representan una tendencia creciente, mientras que los valores negativos de Z_s , indican una tendencia decreciente. La hipótesis nula

se rechaza sí la tendencia es significativa cuando según el nivel de α , sí $|Z_s| > Z_{1-\alpha/2}$. $Z_{1-\alpha/2}$ es obtenida de las tablas de distribución normal estándar (Ahmad et al., 2015; Behzadi et al., 2020; Lauren et al., 2021).

Manejando un nivel de confianza al 95% ($\alpha= 0.05$), tenemos la Tabla 4 que muestra la tendencia y su significancia con respecto a los valores de Z:

Tabla 4. Significancia y tendencia para valores de Z con alfa al 95%

Z	Tendencia	Significancia
0	Sin tendencia	-
> + 1.96	Creciente	Significativa
< - 1.96	Decreciente	Significativa
< + 1.96	Creciente	No Significativa
> - 1.96	Decreciente	No Significativa

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del análisis de las observaciones convencionales y su información de precipitación; los resultados de las pruebas estadísticas realizadas a los datos de precipitación por satélite; y los resultados obtenidos de las pruebas de tendencia. Con el fin de evaluar lo obtenido y definir el comportamiento de las precipitaciones, la información satelital y las tendencias en la cuenca de estudio.

Se aborda un análisis del comportamiento espacial y temporal de las precipitaciones registradas con base en la información de las Estaciones Climatológicas Convencionales y sus registros históricos; con el fin de obtener un panorama completo del periodo de estudio a nivel cuenca y estación climatológica. Para obtener un panorama completo como base y generar un estimado de lo que se espera de las observaciones por satélite en ambos niveles.

Se analizaron los resultados obtenidos a distintas temporalidades de acumulados para evaluar el comportamiento de la información de precipitación. Las temporalidades se dividen en mensual con estacional, y anual. El análisis fue enfocado de forma estadística y espacial para cada una de las observaciones satelitales y estaciones climatológicas.

Se determinaron y analizaron las tendencias encontradas dentro de la cuenca de manera espacial y temporal. El análisis fue realizado a las temporalidades antes mencionadas, tanto a nivel cuenca (promedios), como por estación climatológica (acumulados).

A continuación, se muestran los resultados y su análisis.

3.1 Precipitación

En cuanto a las precipitaciones dentro de la cuenca Río Bravo – San Juan, se obtuvieron los acumulados y promedios a distintas temporalidades. Este proceso se realizó tanto para las estaciones convencionales como para las observaciones por satélite, de manera puntual por estación y general por observación.

Los registros de climatología diaria sirvieron para conocer la precipitación real dentro de la cuenca de estudio, y se tomaron como punto base de comparación para las pruebas y análisis.

Primero se muestran los resultados obtenidos de los acumulados y promedios para las observaciones convencionales y posteriormente para todas las observaciones satelitales. Además, se expone el comportamiento espacial de la precipitación según las observaciones convencionales.

3.1.1 Panorama general

Como se mencionó anteriormente, el promedio de precipitación anual de la región varía entre los 600 y 780 mm (Comisión Nacional del Agua & Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2021; INEGI, 2021; Sistema Meteorológico Nacional & CONAGUA, s/f). Esto se comprueba con los Promedios Anuales por Observación (PAO) obtenidos de las Estaciones climatológicas convencionales, los cuales indican promedios entre 600 y 700 mm (Figura 11).

De manera puntual, los Acumulados Anuales por Estación (AAE), muestran un comportamiento similar con acumulados anuales entre los 500 y 600 mm (Figura 10). Cabe destacar que, algunas estaciones promedian precipitaciones anuales entre los 200 y 400 mm, esto debido a que se encuentran la parte semiárida de la cuenca. A su vez, hay estaciones con promedios mayores a 700 mm, las cuales en su mayoría se encuentran en las zonas con climas mayormente semicálidos subhúmedos (Figura 2).

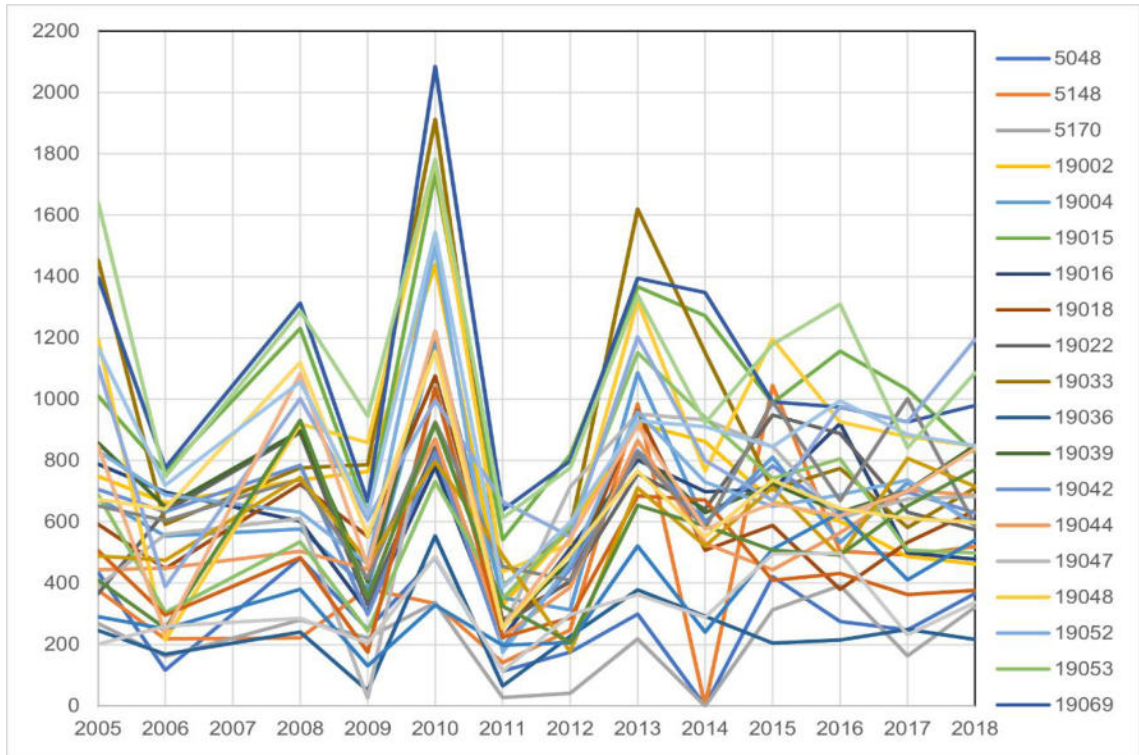


Figura 10. Acumulados anuales por estación climatológica

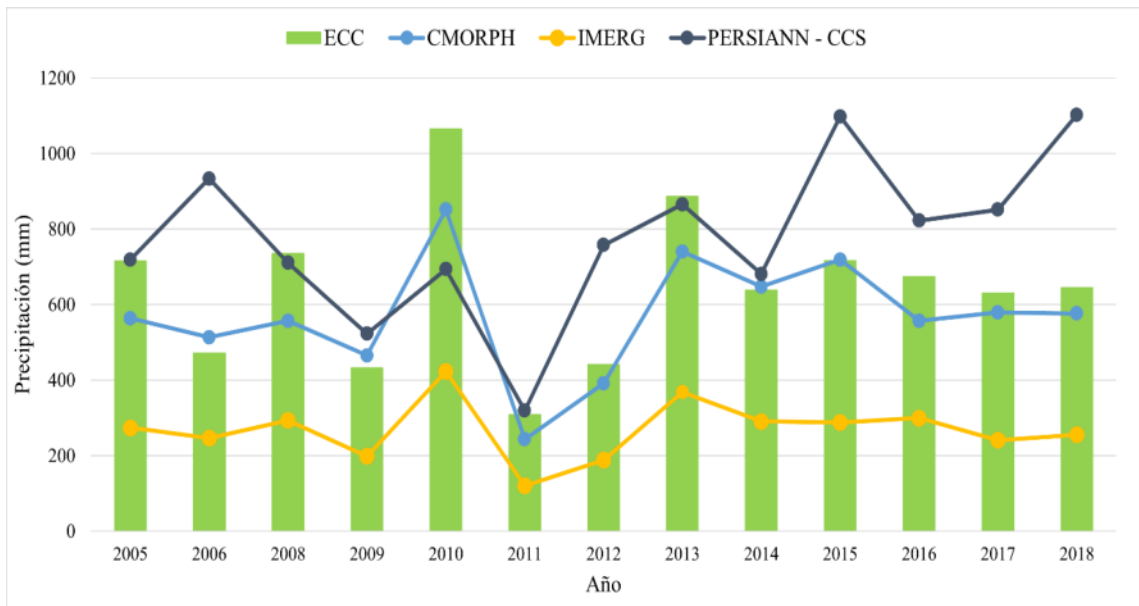


Figura 11. Promedios anuales de precipitación por observación

En el periodo de estudio ocurrieron 7 eventos (Ver Figura 12), entre ellos 4 huracanes ocurridos en los años 2005, 2008, 2010 y 2013; dos tormentas

tropicales en 2005 y 2010; y una depresión tropical en 2010 (NOAA Office for Coastal Management, 2023).

Con el análisis anual de las precipitaciones se pudo observar que los años que presentan los mayores volúmenes precipitación (Figura 10 y Figura 11), son aquellos en los cuales se presentó algún tipo de evento extraordinario, como tormenta tropical o huracán. Mientras que los años con la menor cantidad de lluvia registrada, son los años inmediatos siguientes a estos eventos.

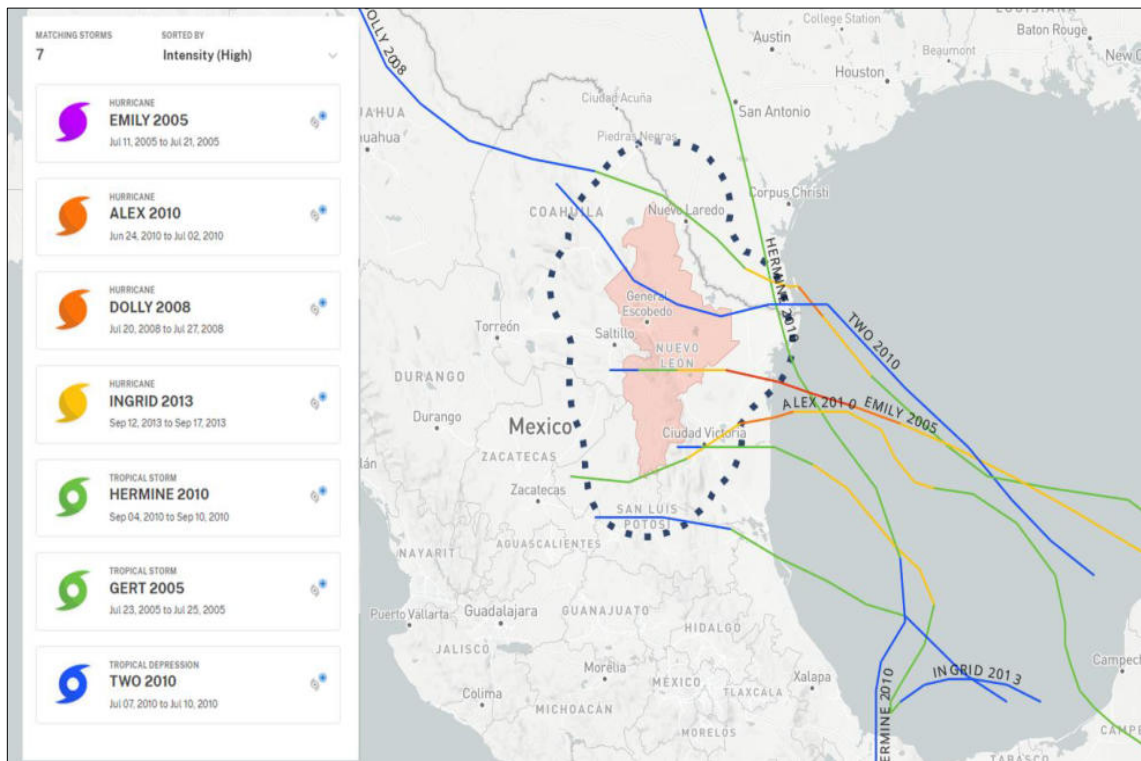


Figura 12. Eventos extraordinarios ocurridos durante el período de estudio

También, podemos observar que desde el año 2013 no han ocurrido eventos extraordinarios dentro del periodo de estudio. Ya que en los años posteriores ocurrieron 4 eventos durante los años 2019, 2020 y 2022 (NOAA Office for Coastal Management, 2023).

Esto nos indica que la cuenca depende mucho de estos fenómenos para abastecerse Figura 14 a sí misma y a su población. Lo que la vuelve vulnerable a periodos de desabasto, como los ocurridos recientemente en 2022, y

anteriormente en la década de los ochenta y noventa (Benavides, 2022; Esparza - Hernández et al., 2014).

3.1.2 Comportamiento espacial

Con base en los acumulados anuales de precipitación por estación (AAE), utilizando únicamente la información terrena se generaron mapas de precipitación (ver Figura 14. Acumulados Anuales de Precipitación por año), con el fin de determinar el comportamiento espacial de las precipitaciones en los últimos años. Así mismo, para fines de identificación por zonas el comportamiento espacial se dividió la cuenca en 6 zonas dependiendo de las características más importantes, esto se puede visualizar en la Figura 13. Zonas propuestas para la cuenca Río Bravo - San Juan.

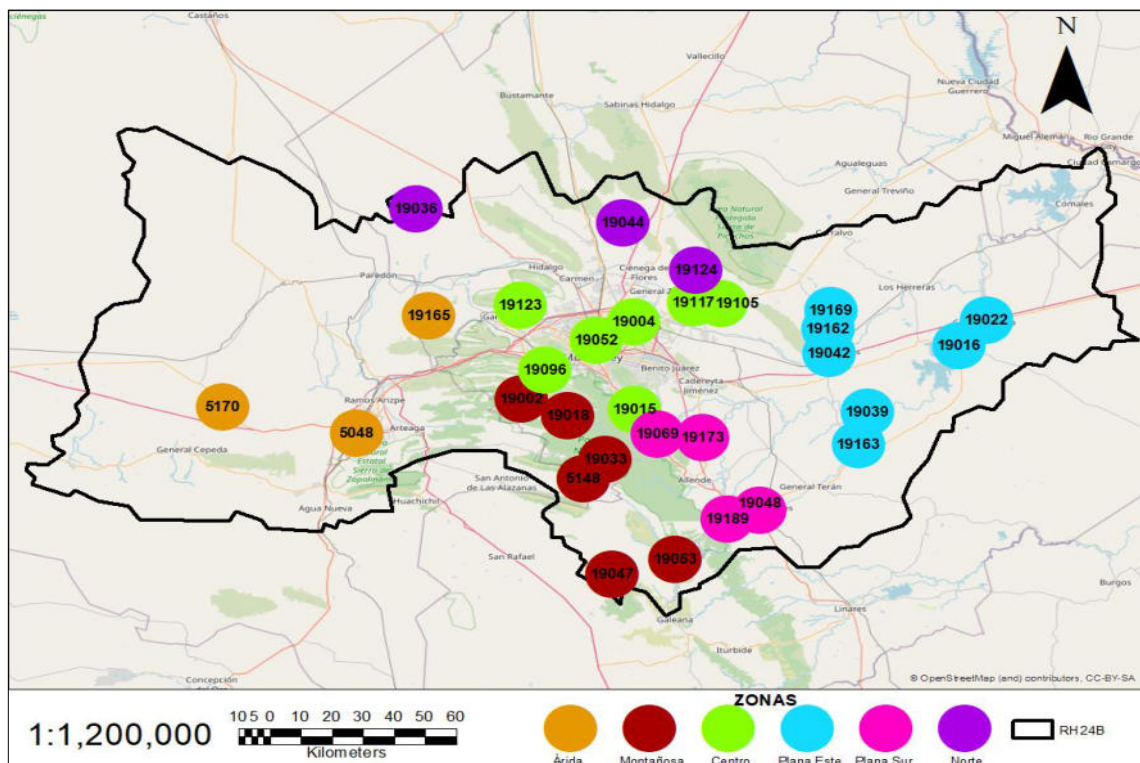


Figura 13. Zonas propuestas para la cuenca Río Bravo - San Juan

De esta forma se obtuvieron las zonas que presentan mayores acumulados de precipitación. Y como los acumulados han fluctuado con los años. En la Figura 14. Acumulados Anuales de Precipitación por año, puede observarse que los

años más secos son 2006, 2009, 2011 y 2012, donde la mayoría de las zonas no superan los 400 mm de precipitación acumulados.

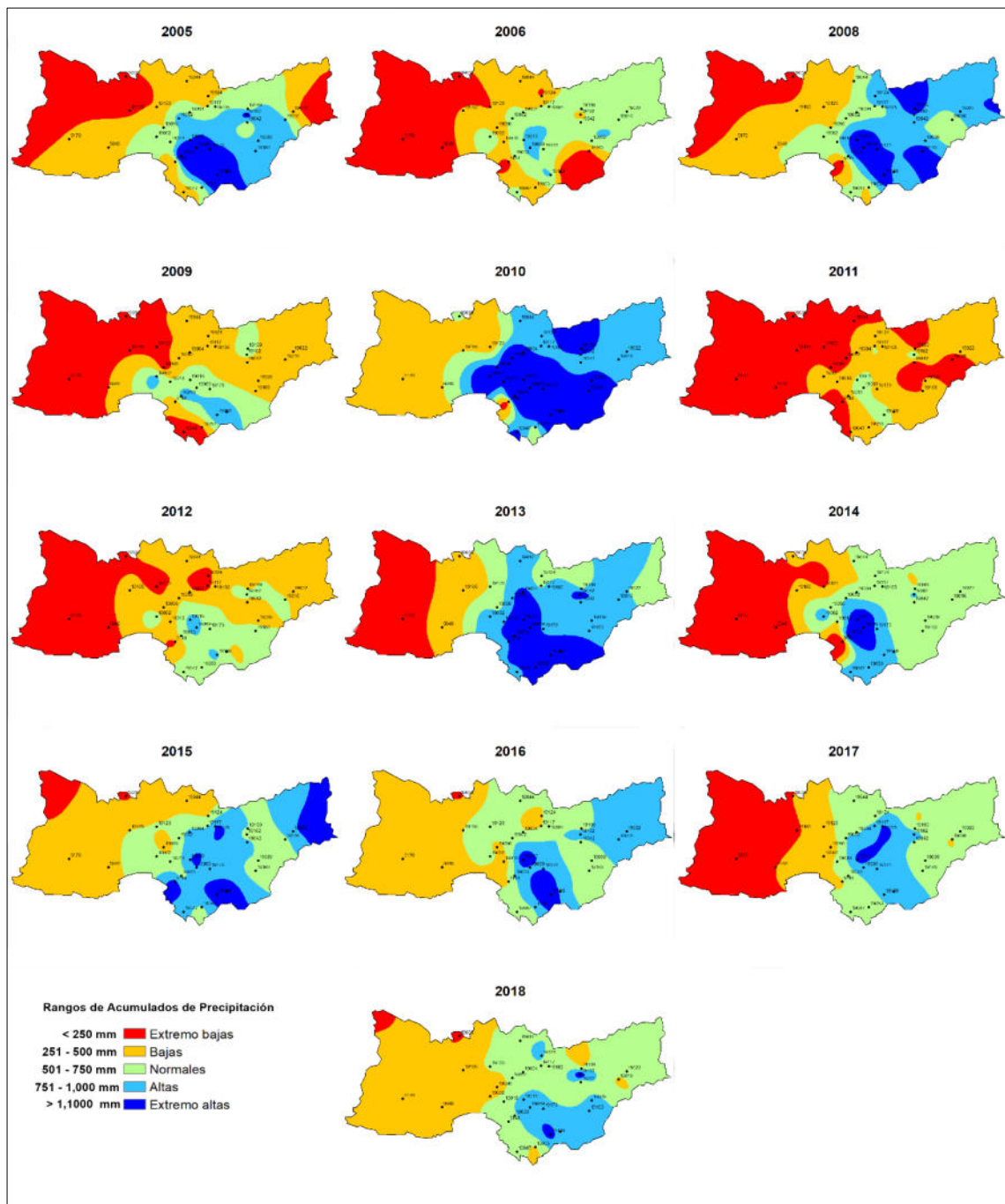


Figura 14. Acumulados Anuales de Precipitación por año

El análisis indica que la zona central de la cuenca que abarca los municipios de Monterrey, Santiago y Allende cuenta con la mayor presencia de precipitación.

Incluso en los años más secos, esta zona sigue manteniéndose por arriba de los 400 mm de precipitación. Mientras que, en los años más húmedos, cuenta con acumulados por arriba de los 1000 mm de precipitación.

Por otro lado, las zonas áridas y semiáridas que pertenecen a los municipios de Saltillo, General Cepeda, Arteaga y Garcia no sobrepasan los 600 mm de precipitación incluso en los años más húmedos. Sin embargo, si han llegado a registrar acumulados anuales por debajo de los 200 milímetros.

Con esta información queda claro que los climas y la orografía presente en la cuenca tienen gran influencia en el comportamiento de las precipitaciones. Por ende, es necesario analizar el comportamiento de las observaciones satelitales en cada una de las zonas y determinar las áreas más vulnerables.

3.2 Análisis mensual

El análisis mensual se realizó de dos maneras diferentes: el primero para identificar y analizar el comportamiento general a nivel cuenca de las observaciones satelitales con respecto a las terrenas, y el segundo de manera puntal, analizando el comportamiento de las observaciones satelitales con respecto a cada una de las estaciones climatológicas. De esta forma se obtuvieron los análisis a nivel cuenca y nivel estación climatológica de forma espacial y temporal.

Para llevar esto a cabo, se analizaron los resultados obtenidos de las pruebas MAE, RMSE, BIAS, Correlación de Pearson y Correlación de Spearman utilizando los datos de acumulados mensuales por estación (AME) y los promedios mensuales por observación (PMO).

Con los AME y PMO fue posible encontrar los patrones de comportamiento de la precipitación dentro de la cuenca y posteriormente el comportamiento de los productos de precipitación por satélite.

La Figura 15, muestra los promedios mensuales de precipitación por año de las estaciones climatológicas convencionales. Como se observa, el año 2007 quedó omitido debido a que 27 estaciones no cuentan con información para dicho año. Así mismo, se pueden visualizar los meses con mayor y menor presencia de precipitaciones.

Los meses de junio, julio, y septiembre cuentan con mayor presencia de precipitaciones siendo el mes de septiembre el más “húmedo”, esto concuerda con la época de lluvias de la región la cual indica lluvias en verano (junio-septiembre). Por el contrario, los meses de noviembre a mayo presentan tener una menor presencia de precipitaciones, con enero presentándose como el mes más “seco” con promedios menores a 50 mm de precipitación, seguido de los meses de febrero y noviembre.

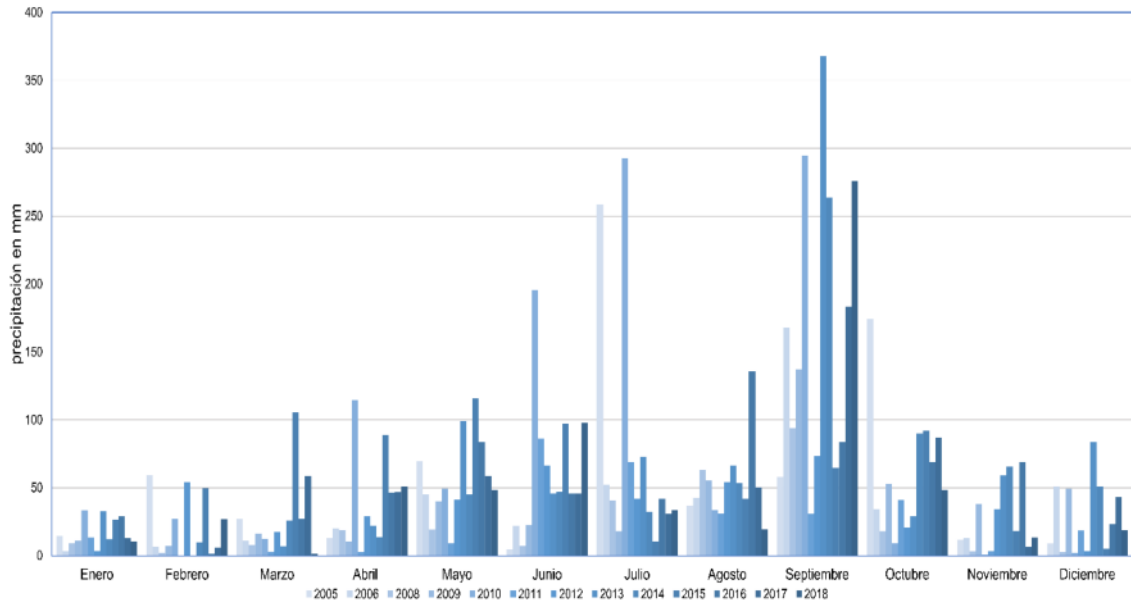


Figura 15. Promedios mensuales de precipitación por año con información de las Estaciones Climatológicas Convencionales

Con base en esta información se identificaron dos estaciones: la Estación Húmeda (EH) que abarca los meses de junio a octubre; y la Estación Seca (ES) abarcando los meses de enero a mayo, noviembre y diciembre. Con base en ello, se determina el comportamiento de los productos de precipitación por satélite para cada estacional.

A continuación, se presenta de forma detallada los resultados obtenidos para los análisis por observación y por estación.

3.2.1 Comportamiento por observación

La información mensual por observación se analizó de dos maneras, mes a mes e histórico: el primero mediante el análisis de los PMO para cada uno de los meses del año, y el segundo de manera de serie hidro climática con el PMO de los 156 meses que abarca el periodo de estudio.

3.2.1.1. Análisis histórico mensual

La Figura 16 exhibe el comportamiento de los PMO históricos de todas las observaciones. Dónde a primera instancia se percibe que IMERG y PERSIANN

– CCS tienden a tener problemas de subestimación y sobreestimación con respecto a la información de las observaciones terrenas convencionales. El comportamiento de cada producto se observa de manera más detallada en la Tabla 5, la cual indica los resultados obtenidos para las pruebas RMSE, MAE, BIAS, correlación de Pearson y Spearman.

De CMORPH se obtuvieron los valores menores de RMSE, MAE, y BIAS los cuales no sobrepasan los 30 mm; y los resultados de ambas correlaciones fueron 0.91 y 0.87. Con estos resultados se puede determinar que CMORPH tiene un buen comportamiento en la cuenca de estudio a nivel de promedios mensuales derivados de los acumulados diarios que proporciona el producto. El valor de BIAS obtenido fue de -2.92 mm, lo que indica una subestimación; aunque esta puede considerarse pequeña teniendo en cuenta que los promedios de precipitación por mes varían entre los 10 y 160 mm, esto indica una buena estimación de las precipitaciones. Sin embargo, los valores de ambas pruebas de error sobrepasan los 10 mm, lo que indica que en algunos meses no se está registrando el 100% de las precipitaciones, para determinar los meses en los que podría estar ocurriendo esto, se realizó el análisis mes a mes, del cual se había más adelante.

Para IMERG, se encontraron resultados interesantes, sus correlaciones fueron las más altas con valores de 0.93 para ambas pruebas, lo cual lo hace el producto mejor correlacionado. Sin embargo, para el resto de las pruebas, sus resultados no fueron los esperados. El BIAS de este producto indica una subestimación de 27.0 mm, y los valores de error fueron de hasta 40 mm, estos resultados muestran que no se están estimando más de la mitad de las precipitaciones, además de presentar una variabilidad de la información considerable. Teniendo en cuenta que las precipitaciones de la región a nivel mensual no superan en su mayoría los 100 mm, el producto no está captando las precipitaciones cortas o esporádicas.

En el caso PERSIANN – CCS, este producto mostró los peores resultados con valores de RMSE y MAE de 60.54 y 40.14 mm respectivamente. BIAS de 15.87

mm, y correlaciones 0.50 y 0.52 para Pearson y Spearman. De manera general los resultados indican una sobrestimación de los acumulados mensuales, que en algunos casos podría llegar a ser del doble, al igual que la variabilidad asociada a los resultados de error. Los valores de correlación no son los más bajos a comparación de los obtenidos en otras investigaciones (F. Baig et al., 2023; Dezfooli et al., 2018), pero sí lo son con respecto a los obtenidos para el resto de los productos utilizados en este proyecto.

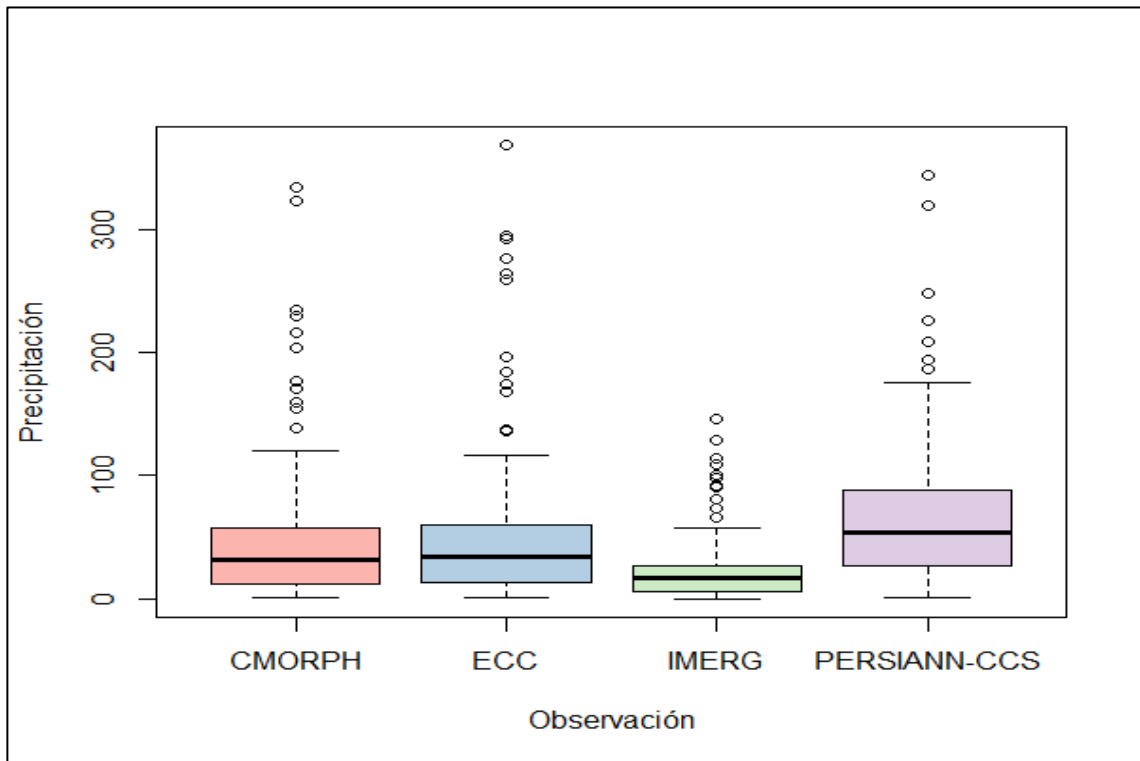


Figura 16. Caja y bigotes de los promedios mensuales de precipitación por observación

Tabla 5. Resultados RMSE, MAE, BIAS, correlaciones de Pearson y Spearman por observación para los promedios mensuales

	RMSE	MAE	BIAS	PEARSON	SPEARMAN
<i>CMORPH</i>	26.14	15.67	-2.36	0.91	0.87
<i>IMERG</i>	46.64	28.32	-27.40	0.93	0.93
<i>PERSIANN-CCS</i>	60.54	41.14	15.87	0.5	0.52

Con los resultados obtenidos de los PMO históricos, es necesario determinar los meses del año en los que se están presentando las diferencias en cuanto a la estimación de las precipitaciones. Y determinar la influencia que tienen los factores de la cuenca y de los propios productos al momento de estimar las precipitaciones. Por lo cual se realizó el análisis mes a mes, para observar el comportamiento de los productos de precipitación por satélite en cada mes del año.

3.2.1.2 Análisis por mes

En este análisis se obtuvieron resultados más detallados debido a que se analizaron mes a mes los resultados de las pruebas estadísticas. Comenzando con las correlaciones, la Tabla 6 expone los resultados obtenidos de las pruebas de Pearson y Spearman para los 12 meses del año para cada PPS.

Con los resultados de estas pruebas se encontró que los PMO mes a mes, dieron correlaciones de Pearson (CCP) más altas para CMORPH en 6 de los 12 meses del año con valores por arriba de 0.7. Mientras que IMERG mostró resultados menos favorables, donde solo obtuvo correlaciones por arriba de 0.7 en únicamente dos meses. Por otro lado, PERSIANN – CCS obtuvo valores por debajo de 0.5 para 6 meses, donde en el mes de julio se obtuvo un valor de -0.30, siendo esta la única correlación negativa para esta prueba.

Con respecto a las correlaciones de Spearman, obtuvimos un patrón similar donde CMORPH repite valores mayores a 0.7 para cuatro meses, sin embargo, obtuvo valores menores a 0.5 en cinco meses. IMERG, por el contrario, mostró correlaciones por arriba de 0.7 en tres meses, y menores a 0.5 en cuatro meses. Como se observa en la Tabla 6, PERSIANN – CCS, nuevamente mostró correlaciones por debajo de 0.5 en siete meses del año, obteniendo nuevamente valores negativos para el mes de julio.

Tabla 6. Resultados de correlaciones de Pearson y Spearman para los promedios mensuales por observación en cada mes del año

	PEARSON			SPEARMAN		
	CMORPH	IMERG	PERSIANN - CCS	CMORPH	IMERG	PERSIANN - CCS
Enero	0.45	0.15	0.29	0.41	0.20	0.34
Febrero	0.76	0.66	0.70	0.68	0.72	0.59
Marzo	0.61	0.44	0.13	0.61	0.41	0.09
Abril	0.80	0.65	0.69	0.83	0.65	0.71
Mayo	0.79	0.68	0.66	0.80	0.66	0.71
Junio	0.37	0.61	0.19	0.43	0.56	0.22
Julio	0.01	0.55	-0.30	0.10	0.55	-0.25
Agosto	0.12	0.38	0.04	0.12	0.38	0.04
Septiembre	0.46	0.72	0.50	0.46	0.72	0.50
Octubre	0.74	0.77	0.69	0.73	0.85	0.66
Noviembre	0.76	0.51	0.51	0.61	0.56	0.38
Diciembre	0.78	0.49	0.50	0.70	0.42	0.57

Analizando los resultados de las pruebas de RMSE, MAE y BIAS se identificó la varianza y estimación de los productos, los valores obtenidos de estas pruebas se exponen en la Tabla 7. Los resultados de manera general de sesgo o BIAS muestran una subestimación para los productos de CMORPH e IMERG, mientras que para PERSIANN – CSS presenta una sobreestimación.

Los resultados obtenidos con la información de CMORPH mostraron valores más cercanos a cero en todas las pruebas, sin embargo, estos aun así indican una subestimación para 10 meses del año según los BIAS. Los meses de mayo, junio, octubre y noviembre obtuvieron subestimaciones de hasta 12.8 mm, mientras que los meses de julio y agosto mostraron una sobreestimación de 7 mm. En el caso de los resultados de ambas pruebas de error, los valores sobrepasaron los 20 mm en los meses de junio a octubre para RMSE y en los meses de julio a septiembre para MAE. Los meses de julio a septiembre comparten resultados menos favorables para todas las pruebas, con excepción del BIAS del mes de septiembre el cual tiene un valor de 4.65 mm de subestimación. Los meses de verano o aquellos que presentan grandes volúmenes de precipitación suelen ser

los meses que presentan las menores correlaciones mientras que los meses de invierno o más secos tienden a presentar altas correlaciones con bajos RMSE (Liu et al., 2022). CMORPH tiende a tener buenas correlaciones en los meses donde se presenten los periodos largos de días consecutivos de precipitación o días secos, aunque tiende a subestimar los promedios alrededor de 3 o 4 milímetros (Hussein et al., 2021).

El producto IMERG, obtuvo BIAS negativos para todos los meses del año, con valores que van desde los -9.07 mm hasta los -91.8 mm. Los meses que obtuvieron los BIAS más altos fueron los meses de abril a octubre; esto expone una subestimación considerable durante los meses de verano, meses en los cuales se presentan la mayoría de las precipitaciones en la cuenca. Al igual que CMORPH, IMERG obtuvo valores por arriba de los 20 mm en las pruebas de error en los meses de junio a octubre. Con resultados superiores a los 90 mm en el mes de septiembre, mes el cual es que se presenta el mayor acumulado y promedios de precipitación. Teniendo en cuenta que los valores mensuales de precipitación varían entre los 10 mm y 160 mm, los resultados indican que para la mayoría de los meses IMERG no está estimando la mitad de las precipitaciones, presentando problemas durante la estación húmeda. A pesar de que previamente IMERG había mostrado sobreestimaciones de alrededor de 60 mm de precipitación en cuencas con topografías similares (Li et al., 2022), sus valores de error mostraban rangos de entre 87 y 100 mm que en algunos sitios de estudio significan valores bajos dada las características climáticas de la cuenca (Ramadhan et al., 2022), estos mismos rangos encontrados en este análisis no muestran un panorama alentador, dado que los valores de precipitación mensuales no superan en la mayoría de los meses los 50 milímetros.

PERSIANN – CCS obtuvo resultados de BIAS tanto positivos como negativos. Indicando tanto sobrestimaciones como subestimaciones, potencialmente relacionadas a la época del año. Las sobrestimaciones de este producto ocurren en los meses de diciembre a agosto con valores mayores a 25 mm a excepción

de junio con sobrestimación de 6 mm de precipitación. Mientras que las subestimaciones se identificaron en los meses de septiembre a noviembre con valores entre 7 y 60 milímetros. Las sobrestimaciones y subestimaciones encontradas para PERSIANN – CCS indican que se están presentando más precipitaciones o aumentando los valores al doble en la estación seca, mientras que no está captando en su totalidad las precipitaciones generadas durante la estación húmeda. Los resultados obtenidos de ambas pruebas de error superan los 20 mm en 11 meses del año. Los valores más altos registrados ocurrieron en los meses de septiembre con 82.01 y 61.39 mm para RMSE y MAE respectivamente. Debido al BIAS negativo para el de septiembre y sus ya mencionados resultados de error, podemos definir que está ocurriendo una alta dispersión y subestimación sistemática de los datos diarios individuales en cuanto a la estimación de la información en el mes con mayor presencia de precipitaciones. Anjum et al., (2022) encontró resultados muy similares en su análisis del uso de PERSIANN – CCS en Pakistán, donde el producto también presentó fluctuaciones en sus correlaciones y BIAS dependiendo de la época del año, sobrestimando los días secos de invierno y subestimando los días lluviosos en verano. El producto tiende a la sobrestimación de la precipitación con valores entre 80 y 140 mm, además de no obtener los mismos acumulados y promedios de precipitación mensuales que las estaciones climatológicas o pluviométricas (F. Baig et al., 2023).

Con este análisis podemos determinar que el producto que presenta el mejor comportamiento es CMORPH, aún y con la subestimación sus correlaciones y rangos de error presentan un buen panorama para su uso en la cuenta. IMERG presenta problemas de error y BIAS que no le permiten un comportamiento óptimo, mientras que PERSIANN – CCS presentó el peor comportamiento.

Tabla 7. Resultados de RMSE, MAE y BIAS de los PMO por mes

	RMSE			MAE			BIAS		
	CMORPH	IMERG	PERSIAN N - CCS	CMORPH	IMERG	PERSIAN N - CCS	CMORPH	IMERG	PERSIAN N - CCS
Enero	6.41	11.88	41.73	5.05	9.83	40.48	-0.69	-9.70	40.48
Febrero	6.08	13.86	35.94	4.91	12.02	35.19	-3.24	-11.96	35.19
Marzo	7.62	15.72	34.01	5.79	13.33	32.34	-2.86	-13.33	32.34
Abril	13.44	27.51	38.13	10.75	21.70	35.67	-2.63	-21.01	35.23
Mayo	17.23	37.22	32.76	13.28	31.60	29.96	-8.88	-31.60	27.73
Junio	25.56	39.20	24.82	19.43	34.16	20.93	-12.82	-34.16	6.53
Julio	35.59	45.71	41.68	30.38	38.32	37.72	7.68	-38.32	25.06
Agosto	28.93	31.19	47.55	23.70	23.30	41.83	7.31	-21.15	38.58
Septiembre	28.93	108.57	82.01	23.70	92.14	61.39	-4.65	-91.82	-58.29
Octubre	26.77	49.31	46.72	18.90	38.20	35.40	-10.29	-38.19	-34.58
Noviembre	12.23	19.51	12.05	9.90	16.82	9.91	-9.31	-16.51	-7.12
Diciembre	7.74	19.69	35.08	6.47	17.26	33.24	-3.89	-17.07	33.24

3.2.2 Comportamiento por estación

Debido a la complejidad de la cuenca de estudio, en la cual tenemos diferentes elevaciones y climas, es necesario identificar el comportamiento de las estimaciones por satélite en cada una de las zonas y analizar la influencia de estas características fisiográficas en los productos de precipitación por satélite.

Para realizar este análisis se utilizaron los acumulados mensuales por estación (AME) de cada uno de los meses del año. De esta forma se obtienen por mes las características regionales que influyen en las estimaciones por satélite. Además, se realizó de manera histórica con los 156 meses del año para cada estación.

En la Tabla 8. Correlación de Pearson y Spearman por estación con información de climas y elevaciones, se puede observar las correlaciones mensuales históricas obtenidas para cada estación y la información fisiográfica de estas. La tabla muestra que el producto IMERG obtuvo en sus resultados las mejores correlaciones y es el único producto que tiene correlaciones mayores a 0.85; y

estas se obtuvieron en las estaciones con elevaciones bajas y climas semicálidos.

CMORPH en sus resultados reporta correlaciones entre 0.4 y 0.8, con el 55% de las estaciones presentando correlaciones mayores a 0.75. Este producto obtuvo las correlaciones más altas en elevaciones entre los 200 y 500 m.s.n.m., con excepción de las estaciones 19033: Laguna de Sánchez, 19053: Rayones, y 19096: La Huastequita, que cuentan con elevaciones mayores a los 700 m.s.n.m.

Los resultados obtenidos en ambas pruebas de correlación para el producto PERSIANN – CCS varían entre 0.2 y 0.68, esto lo convierte nuevamente en el producto con las correlaciones más bajas registradas. Sin embargo, no es posible determinar que factor fisiográfico está influyendo, ya que no se comparte ni elevación ni clima en las correlaciones bajas o altas.

Tabla 8. Correlación de Pearson y Spearman por estación con información de climas y elevaciones

Clima	ID	Elevación m.s.n.m	Correlación Pearson			Correlación Spearman		
			CMO RPH	IMERG	PERSIANN - CCS	CMORP H	IMER G	PERSIANN - CCS
(A)C(w1) Semicálido subhúmedo	19169	200	0.81	0.88	0.58	0.73	0.79	0.52
(A)C(wo) Semicálido subhúmedo	19015	510	0.81	0.88	0.37	0.72	0.87	0.39
	19018	2,576	0.66	0.73	0.36	0.71	0.75	0.36
	19124	494	0.75	0.84	0.64	0.70	0.73	0.45
	19189	495	0.78	0.82	0.32	0.71	0.78	0.37
(A)C(wo) x' semicálido subhúmedo	19048	421	0.78	0.78	0.25	0.67	0.70	0.35
	19052	515	0.78	0.90	0.47	0.64	0.80	0.42
	19105	370	0.77	0.80	0.55	0.69	0.73	0.48
	19117	403	0.74	0.86	0.59	0.69	0.79	0.39
	19173	368	0.82	0.81	0.27	0.73	0.80	0.37
BS1(h')(x') Semiarido cálido	19039	230	0.84	0.90	0.48	0.75	0.82	0.51
BS1(h')w Semiarido cálido	19042	210	0.84	0.88	0.58	0.74	0.81	0.54
	19069	460	0.84	0.88	0.32	0.70	0.80	0.36
	19162	199	0.58	0.69	0.39	0.49	0.63	0.35
	19163	229	0.80	0.80	0.35	0.68	0.77	0.49
BS1h(x') Semiarido semicálido	5148	1740	0.59	0.56	0.35	0.56	0.57	0.36
BS1hw Semiarido semicálido	19004	430	0.74	0.76	0.54	0.72	0.87	0.39
	19123	1,043	0.74	0.76	0.54	0.59	0.75	0.42
BSo(h')(x') Árido cálido	19016	145	0.68	0.75	0.52	0.72	0.80	0.51
	19022	106	0.73	0.80	0.68	0.72	0.79	0.6
BSoh(x') Árido semicálido	19053	848	0.79	0.79	0.35	0.75	0.76	0.48
BSohw Árido semicálido	5170	1680	0.69	0.80	0.51	0.71	0.8	0.52
	19044	538	0.75	0.82	0.62	0.75	0.8	0.53
	19096	720	0.83	0.84	0.41	0.77	0.82	0.42
BWhw Muy árido semicálido	5048	1700	0.63	0.73	0.37	0.68	0.68	0.42
	19036	945	0.40	0.69	0.28	0.44	0.62	0.22
	19165	900	0.60	0.79	0.4	0.53	0.68	0.35
C(w1) Templado subhúmedo	19002	2193	0.6	0.81	0.41	0.67	0.80	0.47
	19033	1879	0.75	0.79	0.28	0.74	0.81	0.4
C(wo)x' Templado subhúmedo	19047	2331	0.63	0.58	0.35	0.68	0.7	0.42

Para identificar si las estaciones y las características mensuales influyen en la correlación de la información se utilizó el análisis mensual para cada estación dentro de la cuenca. En el Apéndice C. Tablas de información por estación se encuentran la Tabla 21 y Tabla 22 con las correlaciones de Pearson y Spearman de cada PPS para los doce meses del año y cada estación climatológica. A continuación, se presentan desde la Figura 17 hasta la Figura 25 las correlaciones por estación para los meses de enero, febrero, abril, julio, agosto y septiembre, ya que fueron los meses que presentaron las correlaciones más bajas o altas en el análisis por observación.

3.2.2.1 CMORPH

El producto CMORPH que había presentado los mejores resultados con respecto a las correlaciones en los mensuales por observación, comenzó a tener problemas al momento de analizar su comportamiento por ubicación de estación climatológica. En las figuras de la Figura 17 a la Figura 20 podemos observar los resultados de las dos pruebas de correlación, en estas figuras se visualiza que los meses con las correlaciones más bajas son los meses de enero y agosto.

La Figura 17 y Figura 18 muestran los valores para Pearson los cuales varían entre -0.20 a 0.80 para el mes de enero, de 0.40 a 0.97 en febrero, 0.08 a 0.80 en el mes de abril, 0.1 a 0.80 para julio, -0.4 a 0.9 en agosto, de 0.10 a 0.9 en septiembre. Todos los meses muestran tener diferencia de entre 0.40 hasta 1.3. Las zonas que presentan estas variaciones también cambian con los meses.

Analizando las correlaciones por zonas (ver Figura 13), los valores más bajos obtenidos en el mes de enero corresponden a la zona centro (estaciones Monterrey, Apodaca, La Boca, La Huastequita, Ejido Marín, Grutas De García, Chupaderos Del indio), montañosa (estaciones Los Ramones y Mimbres) y la estación Vista hermosa en la plana sur, ya que presentan correlaciones menores a 0.40.

Sin embargo, para el mes de agosto las zonas con las correlaciones más bajas son la zona árida (estación La Popa, La Rosa y Potreo Abrego), montañosa (estaciones Agua Blanca, El Pajonal, Laguna De Sánchez, Mimbres y Rayones,) y plana este (estaciones el Cuchillo, Montemorelos, Vistahermosa y Las Brisas) con valores desde -0.40 hasta los 0.30.

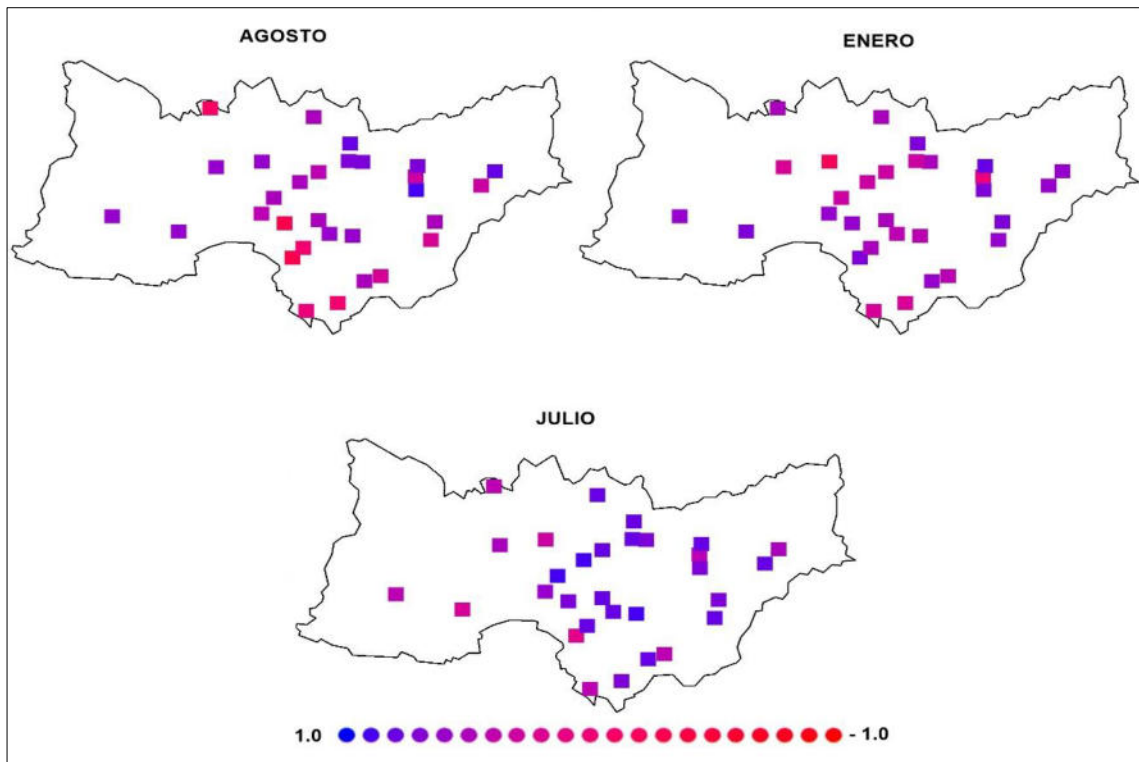


Figura 17. CMORPH: Correlación de Pearson por estación para los meses de agosto, enero y julio

Los meses de febrero y septiembre muestran ser los meses con los valores de correlación más alto. En el caso de febrero es el mes donde la variación de valores es menor ya que la mayoría estaciones cuentan con correlaciones por arriba de 0.7, con excepción de las estaciones Grutas de Garcia, La Popa y Chupaderos del indio, que presentan correlaciones de 0.39, 0.65 y 0.53 respectivamente. Estas bajas correlaciones se presentan en la zona árida de la cuenca.

Septiembre por su parte, a pesar de contar con altos valores de correlación también presenta mucha diferencia entre ellos, y solo 16 estaciones presentan

valores de correlación mayores a 0.7 Las zonas (ver Figura 13) que presentan este comportamiento son principalmente la zona centro (La Huastequita, Grutas de Garcia, El Cerrito, y La Boca), la zona montañosa (Mimbres y Laguna de Sánchez) y las estaciones Los Ramones, Las Enramadas, Montemorelos, y Las Brisas.

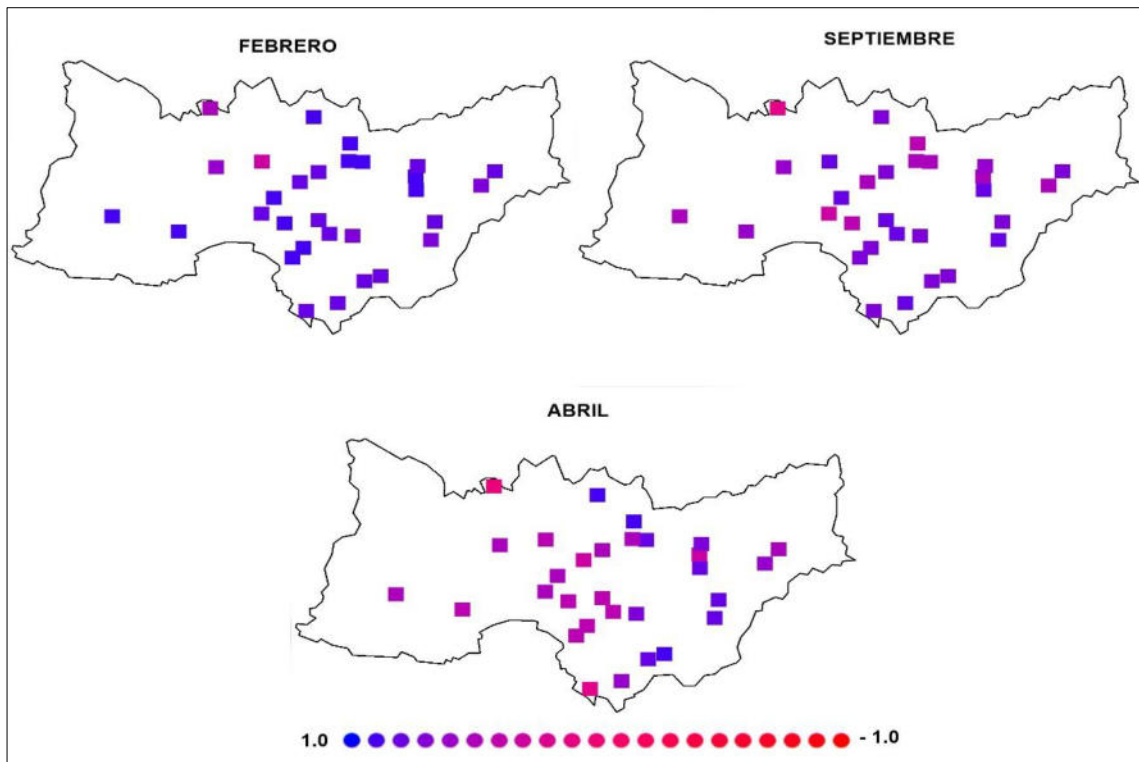


Figura 18. CMORPH: Correlación de Pearson por estación para los meses de febrero, septiembre y abril

En los resultados de las correlaciones de Spearman, se repitió el mismo patrón de comportamiento. Los meses de enero y agosto obtuvieron las correlaciones más bajas, mientras que febrero y septiembre las más altas.

Nuevamente agosto mostró que de manera general toda la cuenca presenta correlaciones bajas, siendo la zona montañosa la que presenta mayor conflicto, seguida de la zona plana sur. El valor más bajo fue -0.43 en la estación La Popa, pero las estaciones Montemorelos, Rayones, Mimbres, Laguna de Sánchez, el Pajonal, Apodaca, y Potrero de Abrego cuentan con valores que van desde los -

0.40 a 0.10; de manera general los valores de correlación en este mes no superan los 0.75.

En el mes de enero el valor más bajo obtenido fue -0.04 en la estación Apodaca, seguido de las estaciones Grutas de Garcia, Vista Hermosa, Ejido Marín y Rayones, con valores de -0.02, 0.26 y 0.27 respectivamente. Sin embargo, al igual que en el mes de agosto, no se obtuvieron correlaciones por arriba de 0.75. Los valores más bajo se presentaron en una misma franja que se puede apreciar en la Figura 17 aunque de manera general las zonas centro y sur de la cuenca son las que presentan las correlaciones más bajas.

A pesar de que en el análisis mensual por observación el mes de julio mostro una correlación de 0.10 (ver Tabla 6), al analizar los datos por estación, las correlaciones aumentaron. Si bien el valor más bajo registrado es de 0.15 en la estación Chupaderos del Indio, también se obtuvieron valores por encima de 0.75, con una correlación de 0.9 registrada en la estación El Cuchillo. De manera visual como se observa en la Figura 19 las zonas áridas y montañosas presentan la menor correlación, con el caso aislado de la estación Las Enramadas ubicada en la parte baja de cuenca con clima semicálido. Mientras que la zona central de la cuenca y cuenca baja presenta correlaciones entre 0.5 y 0.9.

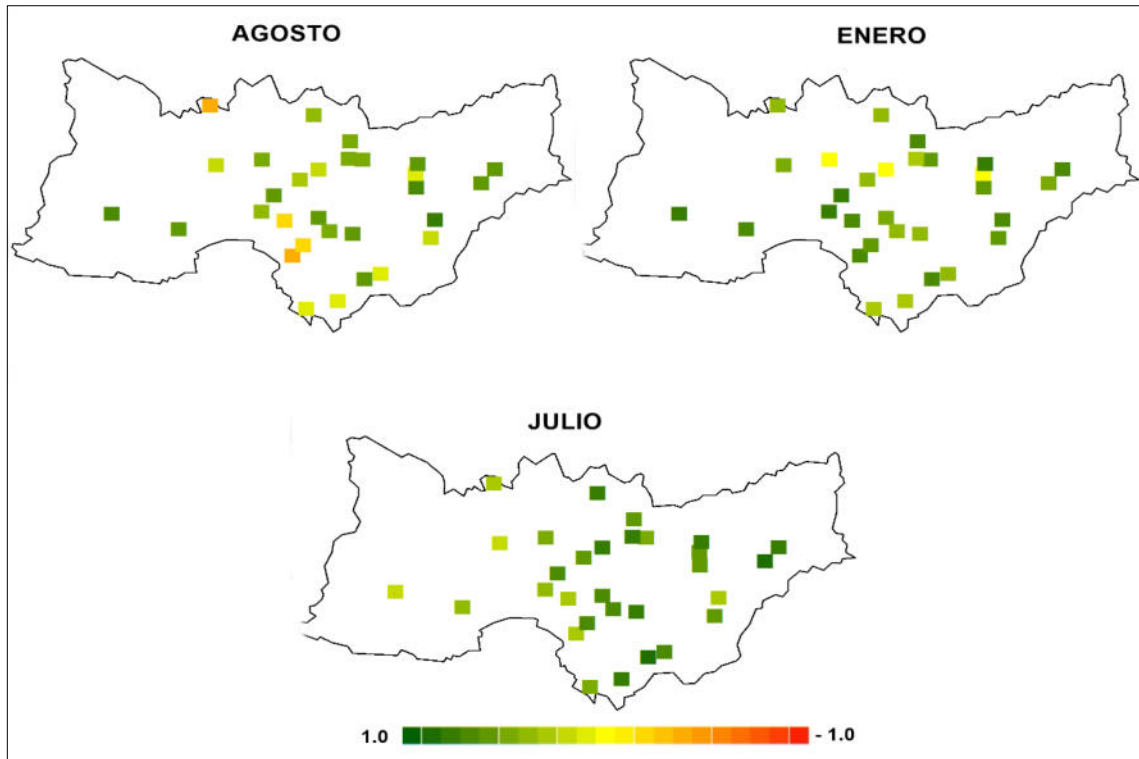


Figura 19. CMORPH: Correlaciones de Spearman por estación para agosto, enero y julio,

En el caso de los meses que presentaron las correlaciones más altas, febrero fue el mes que obtuvo los mejores resultados, con valores entre 0.5 y 0.92. Las estaciones que obtuvieron valores mayores a 0.9 fueron la Huastequita, Potrero de Abrego y Laguna de Sánchez. Mientras que la estación Monterrey fue la que obtuvo la correlación de 0.5, seguidas de las estaciones Higueras y Grutas de Garcia ambas con resultados de 0.6. Las correlaciones mayores a 0.8 se registraron en las zonas montañosas y la cuenca baja.

Septiembre nuevamente presentó correlaciones entre 0.2 y 0.94, presentando gran variabilidad dentro de la cuenca. Donde la zona plana sur de la cuenca junto con una parte de la zona montañosa presenta las correlaciones mayores a 0.7, con la estación Palomitos mostrando la mejor correlación de 0.92. Por su parte la zona árida de la cuenca nuevamente obtuvo los valores más bajos (menores a 0.4), siendo -0.05 la correlación más baja registrada en la estación La Popa.

El mes de abril obtuvo correlaciones desde 0.18 hasta 0.88. Sin embargo, en esta ocasión las correlaciones más altas no se registraron en una o dos zonas específicas, ya que las estaciones con valores mayores a 0.75 se ubican en distintas zonas y no concentradas. Sin embargo, los valores menores a 0.5 si se encuentran concentrados en la zona montañosa sur de la cuenca.

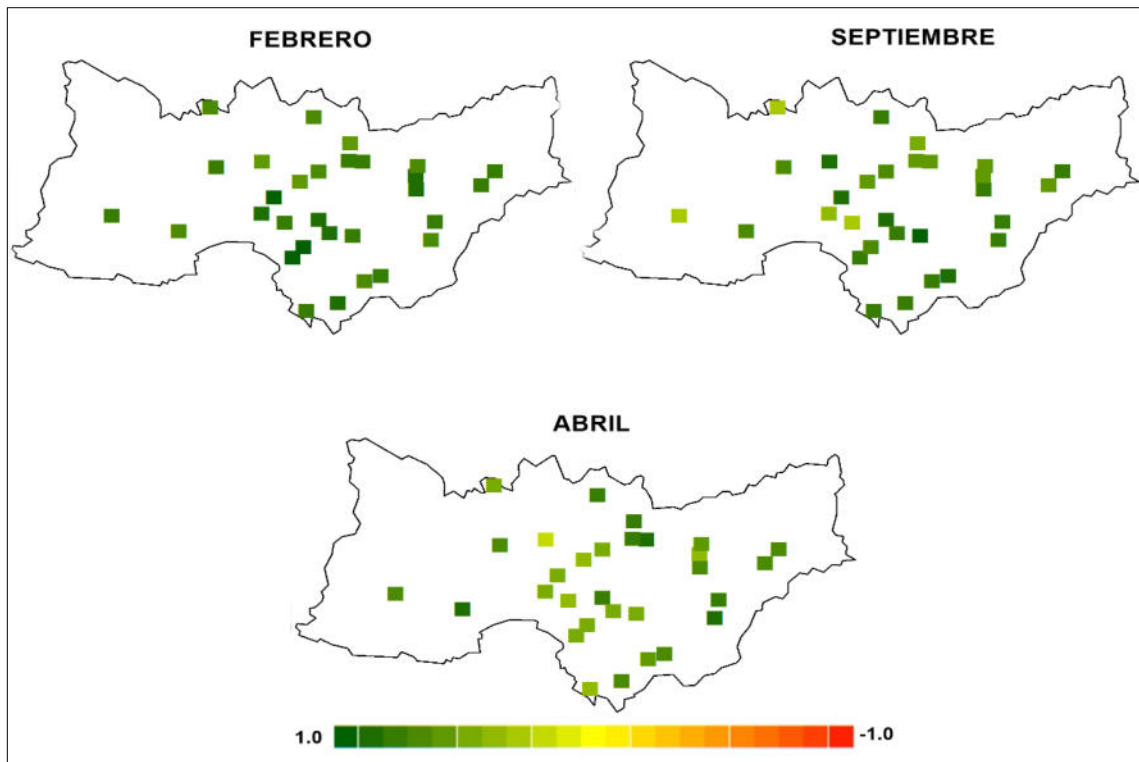


Figura 20. CMORPH: Correlaciones de Spearman por estación para los meses de febrero, septiembre y abril

De manera general en ambas pruebas de correlación se presentaron problemas en las zonas altas, las zonas planas y en las concentraciones urbanas. Se obtuvieron comportamientos interesantes, ya que en los meses de enero, febrero, abril y agosto los cuales presentan en promedio valores menores a 50 mm de lámina de precipitación, presentan comportamientos distintos. Por un lado, febrero y abril presentan correlaciones mayores a 0.70. Mientras que agosto y enero obtuvieron correlaciones bajas entre -0.50 y 0.20 en la mayoría de sus estaciones. Siguiendo esta línea de análisis, septiembre y julio son los meses con promedios de lámina de precipitación de 159.35 mm y 76.98 mm

respectivamente, lo que los convierte en los meses con mayor lamina de precipitación. Sin embargo, el comportamiento de las correlaciones para cada mes fue distinto. Septiembre obtuvo mejores correlaciones que Julio, aunque mayor variación de resultados, con unas zonas mejor correlacionadas que otras. Mientras que julio obtuvo correlaciones más bajas, pero más constantes en la cuenca.

Es importante destacar que, a pesar de los milímetros de precipitación promedios, las características estacionales para los meses mencionados son distintas. Enero y febrero son meses de estación seca en invierno, abril es un mes de estación seca en primavera, mientras que julio, agosto y septiembre son meses de estación húmeda y verano. En específico, los meses de enero y agosto normalmente presentan las temperaturas más extremas del año (INEGI, 2021a, 2022b, 2022a, 2022c). Por lo que el análisis de las correlaciones con respecto a las características estacionales y climatológicas se vuelve complicada. Factores como la nubosidad, la inclinación del eje terrestre y las temperaturas son factores que podrían estar interviniendo al momento de las recuperaciones del algoritmo de CMORPH (Liu et al., 2022).

Otro factor para considerar es la elevación en la que se localizan las estaciones climatológicas. Como pudimos observar, las zonas montañosas son las que presentan las correlaciones más bajas en la mayoría de los meses. Dezfooli et al. (2018), reportan un comportamiento similar de CMORPH en su estudio, donde las correlaciones más bajas se localizan en las elevaciones más altas, al igual que la subestimación. Por otra parte, Wei et al. (2023) reportaron que CMORPH cuenta con mejores correlaciones en las estaciones secas invernales (temperaturas bajas); mientras que presenta problemas de correlación en los meses húmedos y lluviosos con temperaturas altas; similar a lo encontrado en la cuenca de estudio.

3.2.2.2 *IMERG*

Al analizar los resultados obtenidos para el producto *IMERG*, estos mostraron tener bajas correlaciones y errores altos, además de presentar una subestimación. En el caso de las pruebas de correlación de Pearson y Spearman mes a mes, obtuvimos resultados similares, donde el producto mantiene este comportamiento, sin embargo, no es general para toda la cuenca. Con los resultados por estación se pretendía determinar las zonas que presentan mayor conflicto, sin embargo, los resultados mostraron un panorama distinto.

Al igual que en el caso de *CMORPH* y *PERSIANN – CCS*, se analizaron todos los meses del año, pero el enfoque sigue los meses de enero, febrero, abril, julio, agosto y septiembre, ya que obtuvieron los valores más bajos y altos en ambas pruebas de correlación.

Comenzando con los meses que obtuvieron las correlaciones más bajas tenemos agosto con correlaciones de -0.26 a 0.93, seguido de enero con valores de 0.17 a 0.87 y por último julio con resultados entre 0.30 a 0.97 en la prueba de Pearson, mientras que para Spearman los valores fueron de -0.18 a 0.89 para agosto, 0.16 a 0.87 para enero y 0.28 a 0.94 para julio. Sin embargo, a pesar de que el rango de valores sea superior a los 0.75 no significa que muchas estaciones presenten correlaciones altas. Para agosto, 8 estaciones presentan correlaciones por encima de los 0.75, para enero y julio son 5 y 12 estaciones respectivamente. Las Figura 21 y Figura 22 muestran ambas correlaciones en la cuenca para los meses antes mencionados, de manera que se logran identificar las zonas y estaciones climatológicas con menor o mayor correlación.

Agosto y enero presentan las correlaciones más bajas con respecto al resto de los meses al igual que lo obtenido en *CMORPH*, además de que presentan las mismas zonas con correlaciones bajas. En el mes de agosto, la zona con mayor conflicto es la zona montañosa hacia el sur de la cuenca y la región árida, con las estaciones La Popa, Mimbres, Potrero de Abrego, El Pajonal y Laguna de Sánchez.

En el mes de enero las correlaciones más bajas se presentaron en la zona central y centro norte de la cuenca, en las estaciones Ejido Marín, Grutas de Garcia, Vista Hermosa, Mamulique y la Huastequita, las cuales obtuvieron resultados menores a 0.25.

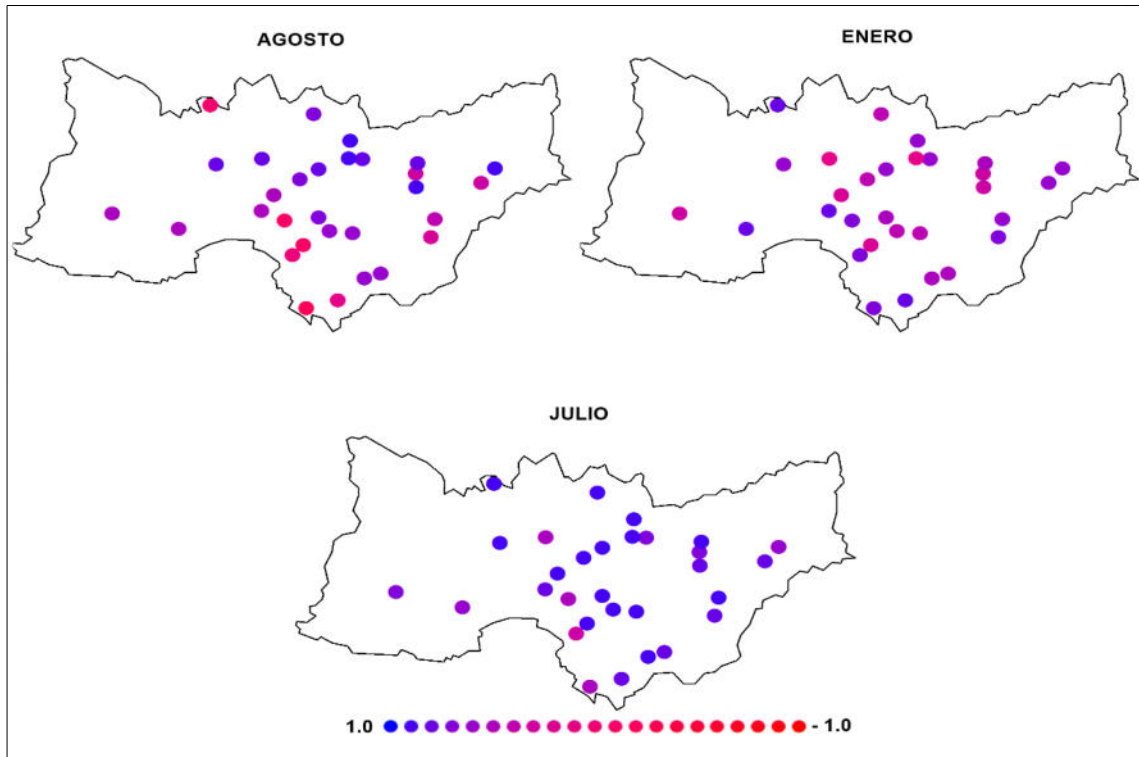


Figura 21. IMERG Correlaciones de Pearson por estación para los meses de agosto, enero y julio.

El mes de julio obtuvo resultados diferentes a los obtenidos en la correlación mensual histórica y por observación. Al obtener la correlación para cada estación, obtuvimos que el 80% y 40% de las estaciones para este mes obtuvieron correlaciones de Pearson y Spearman, respectivamente, por arriba de 0.75. Además, la única estación que presenta conflicto por debajo de 0.25 es la estación Potrero de Ábrego para ambas correlaciones. Por lo que se concluye que Julio es un mes con altas correlaciones a diferencia de lo resultados obtenidos de CMORPH.

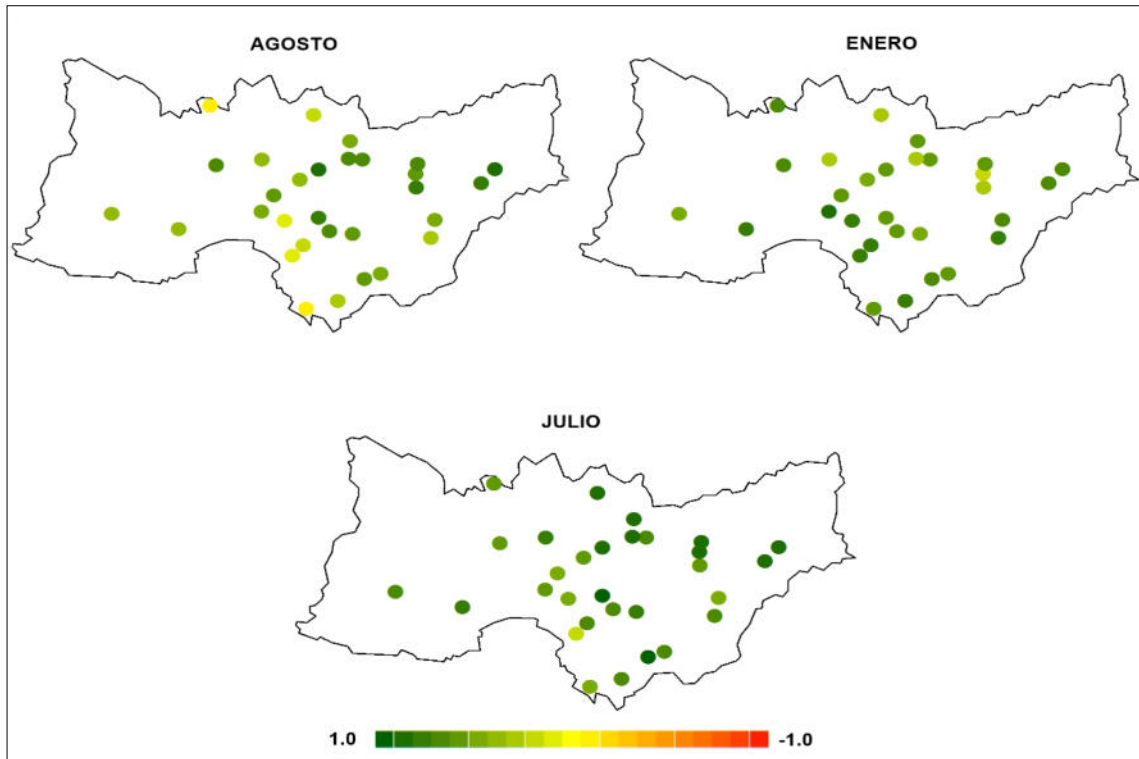


Figura 22. IMERG Correlaciones de Spearman por estación para los meses de agosto, enero y julio.

Abordando los meses que presentaron correlaciones altas, tenemos los meses de febrero, septiembre y abril. Con valores para la prueba de Pearson de 0.55 a 0.97 en febrero, 0.04 a 0.96 en abril y 0.52 a 0.96 en septiembre; mientras que para Spearman los resultados fueron 0.61 a 0.92 en febrero, 0.23 a 0.96 en abril, y 0.37 a 0.92 en septiembre. En la Figura 23, se puede observar el comportamiento de las estaciones para ambas correlaciones, y la distribución de estas. Nuevamente hay que tener en cuenta, tanto los valores como la cantidad de estaciones que presentan dichos valores. Febrero fue el mes con los mejores resultados, no solo en valores si no tambien en la variabilidad de estos.

En el mes de febrero se puede observar una buena correlación para todas las estaciones, a excepción de la estación 19123: Grutas de Garcia que obtuvo la correlación más baja. Mientras que la estación 19096: La huastequita fue la estación con la correlación más alta en ambas pruebas.

Septiembre mostró un gran rango de valores, sobre todo en la prueba de Spearman. Las estaciones La Rosa y El Cuchillo presentan las correlaciones más bajas, mientras que las estaciones El Pastor, Rayones, Los Ramones, Mamulique y Las Enramadas resultaron con las correlaciones más altas por encima de 0.9. Esto nos indica que no hay una zona en la que se concentren las correlaciones más altas; sin embargo, el 90% de las estaciones obtuvieron correlaciones de Pearson por arriba de 0.75 y el 60% para el caso de Spearman.

Los resultados del mes de abril mostraron que hay mayor rango de valores en los resultados de la prueba Pearson que en la prueba de Spearman. En ninguna de las pruebas coinciden las estaciones con los menores ni mayores valores, salvo por dos estaciones: Monterrey con las correlaciones más altas y La Popa con las correlaciones bajas. Sin embargo, de manera visual, podemos observar en la Figura 23 que la zona central de la cuenca presenta buenas correlaciones (0.8 0.99) en ambas pruebas.

De manera general, IMERG mejoró sus valores de correlación al momento de tratar los datos por estación. Sin embargo, su comportamiento no es consistente en la cuenca. Se observó que no hay zonas específicas en la cuenca que presente cierto tipo de comportamiento, como en el caso de CMORPH y PERSIANN – CCS, si no, que son casos especiales o en este caso estaciones climatológicas las que presentan distintos comportamientos. Incluso las estaciones no repiten comportamientos en los distintos meses de análisis, lo que vuelve demasiada específica la relación entre los valores observados por satélite y los medidos de manera convencional.

Algunas investigaciones previas (Duarte et al., 2022; Li et al., 2022; Ramadhan et al., 2022; Rincón-Avalos et al., 2022), mencionan que la elevación y topografía en la que se encuentran las estaciones tiene gran influencia al momento de realizar las correlaciones con IMERG; concluyen que a mayor elevación disminuye el coeficiente de correlación, ya sea que se utilicen los promedios mensuales o estacionales derivados de los datos diarios. Ramadhan et al., (2022)

obtuvieron correlaciones similares en su análisis mensual con correlaciones arriba de 0.7 en la mayoría de sus estaciones en estudio.

La versión IMERG – Final tiende a obtener mejores resultados al momento de realizar análisis mensuales y por estacionales que otras versiones del mismo producto (Maghsood et al., 2019). Sin embargo, se ha observado que las épocas secas con bajas temperaturas tienden a presentar mejores resultados que las épocas húmedas con precipitaciones extremas (F. Baig et al., 2022; Maghsood et al., 2019; Ramadhan et al., 2022).

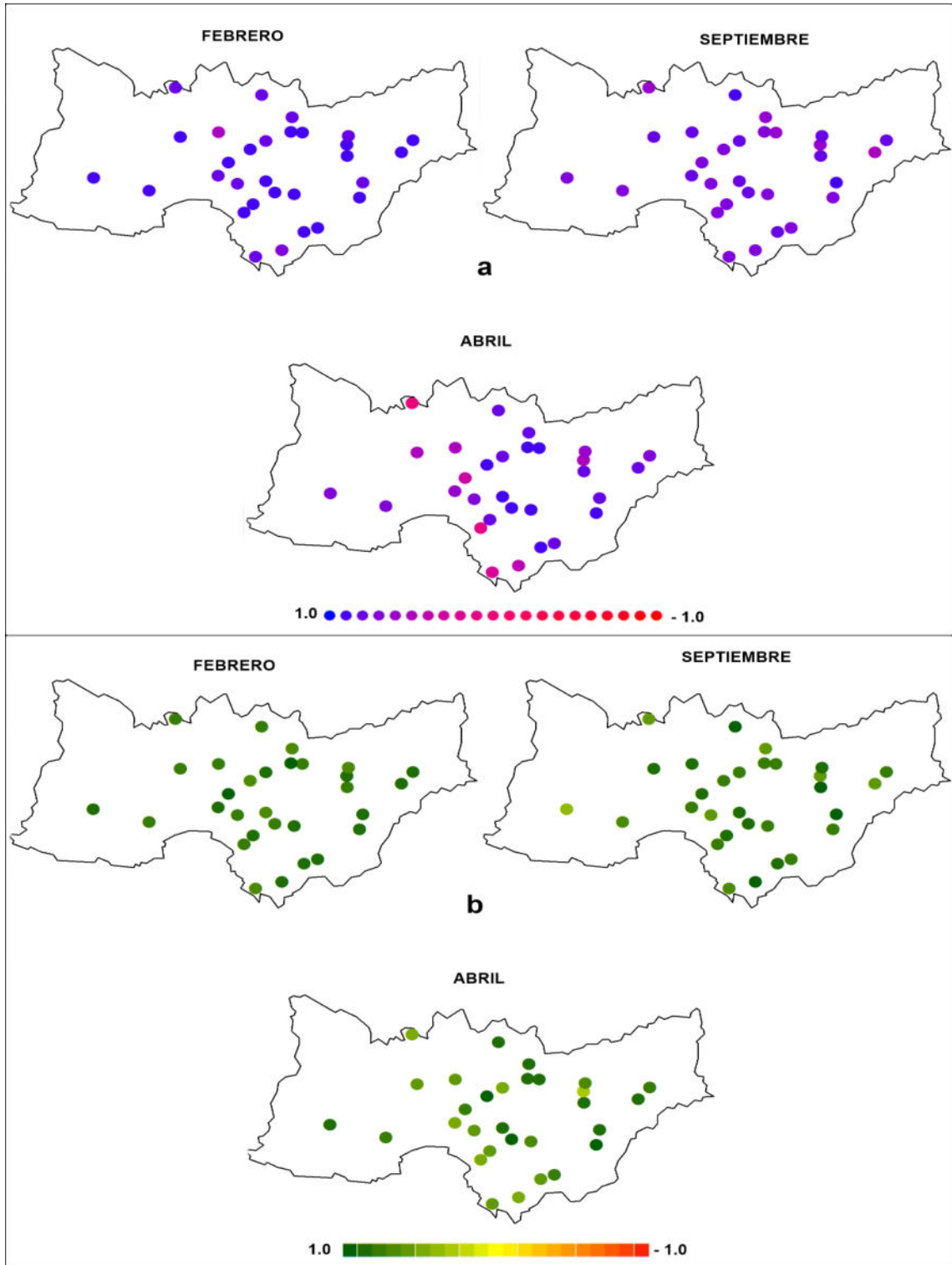


Figura 23. IMERG Correlaciones por estación para los meses de febrero, septiembre y abril. a) Correlaciones de Pearson. b) Correlaciones de Spearman

3.2.2.3 PERSIANN–CCS

El producto PERSIANN – CCS al igual que el resto de los productos había mostrado resultado de correlaciones bajas tanto en Pearson como en Spearman, en los meses de enero, febrero, abril, julio, agosto y septiembre. En el análisis mensual por observación PERSIANN – CCS obtuvo los resultados más bajos en comparación con el resto de los productos, y esto se repite en el análisis mensual por estación; donde a pesar de obtener correlaciones por arriba de 0.90 estas no son constantes en tiempo (meses) y espacio (ubicación en la cuenca). Por lo que es importante determinar qué condiciones están ocasionado estas bajas correlaciones.

El resumen de los resultados de las correlaciones se muestra en la Tabla 9. Rango de correlaciones de Pearson y Spearman para PERSIANN - CCS por mes; esta tabla presenta de menor a mayor las correlaciones obtenidas para los meses de análisis, como se puede observar las correlaciones tuvieron variaciones de valores muy significativas.

Mientras que los rangos de resultados de Spearman se mantienen muy similares a los obtenidos en la misma prueba para CMORPH e IMERG, los resultados de la prueba de Pearson muestran un cambio en cuanto a los meses, donde abril es el segundo mes menor correlacionado sumándose a los meses de agosto, enero y julio.

Tabla 9. Rango de correlaciones de Pearson y Spearman para PERSIANN - CCS por mes

MES	PEARSON		SPEARMAN		MES
	Menor	Mayor	Menor	Mayor	
AGOSTO	-0.43	0.8	-0.44	0.63	AGOSTO
ABRIL	-0.31	0.87	-0.15	0.73	ENERO
ENERO	-0.14	0.62	-0.02	0.87	JULIO
JULIO	-0.02	0.76	0.22	0.87	SEPTIEMBRE
SEPTIEMBRE	0.14	0.74	0.29	0.86	FEBRERO
FEBRERO	0.15	0.93	0.32	0.84	ABRIL

A continuación, se analizan los resultados mes por mes, para determinar las zonas y / o estaciones que presenten conflictos de correlación.

Los resultados de Pearson indicaron que agosto es el mes menos correlacionado con un 75% de estaciones con valores menores a 0.5. Las estaciones con mayor conflicto son Laguna de Sánchez, Mimbres, Rayones, Potrero de Ábrego, y El Pajonal en la zona montañosa sur de la cuenca; La Popa y Mamulique en la zona norte; Las Brisas, El Cuchillo, y Vista Hermosa en la cuenca baja (zona plana este) y Montemorelos al sur de la cuenca (zona plana sur) (ver Figura 24).

El mes de enero fue el tercer mes menos correlacionado, ya que como se observa en la Tabla 9, su valor más alto fue de 0.62, y el 95% de las estaciones cuentan con valores menores a 0.5. Las estaciones con las correlaciones más altas son Saltillo, Doctor González, Apodaca, Chupaderos del Indio, y El Cuchillo. Ninguna de estas estaciones comparte zona de ubicación ni elevaciones aproximadas, por lo que ambos se descartan como factores influyentes para este mes.

A diferencia de los otros dos productos analizados, PERSIANN – CCS mostró que abril posee correlaciones bajas (ver Tabla 9 y Figura 24), y resultó ser el segundo mes con las correlaciones más bajas. Sin embargo, a pesar de esto el 35% de las estaciones obtuvieron resultados superiores a 0.5 y el 10% superiores a 0.75. El 15% de las estaciones cuenta con correlaciones negativas, siendo la estación Vista Hermosa la correlación negativa más alta con -0.31, seguida de las estaciones Laguna de Sánchez y Garza González. En general toda la cuenca presenta bajas correlaciones por lo que no puede determinarse una zona específica que presente problemas.

El mes de julio de igual manera mostro correlaciones bajas en el 50% de las estaciones. Las menos correlacionadas son Potrero de Abrego, Grutas de García y La Rosa, todas localizadas en elevaciones superiores a los 1,000 m.s.n.m. y en la región árida de la cuenca. Por otra parte, las estaciones Vista Hermosa, Los Ramones y Doctor Gonzáles obtuvieron las correlaciones más altas de 0.75 y 0.76. Algo interesante es que las estaciones con mejores correlaciones en este mes son las que obtuvieron las correlaciones más bajas en meses anteriores como abril y agosto.

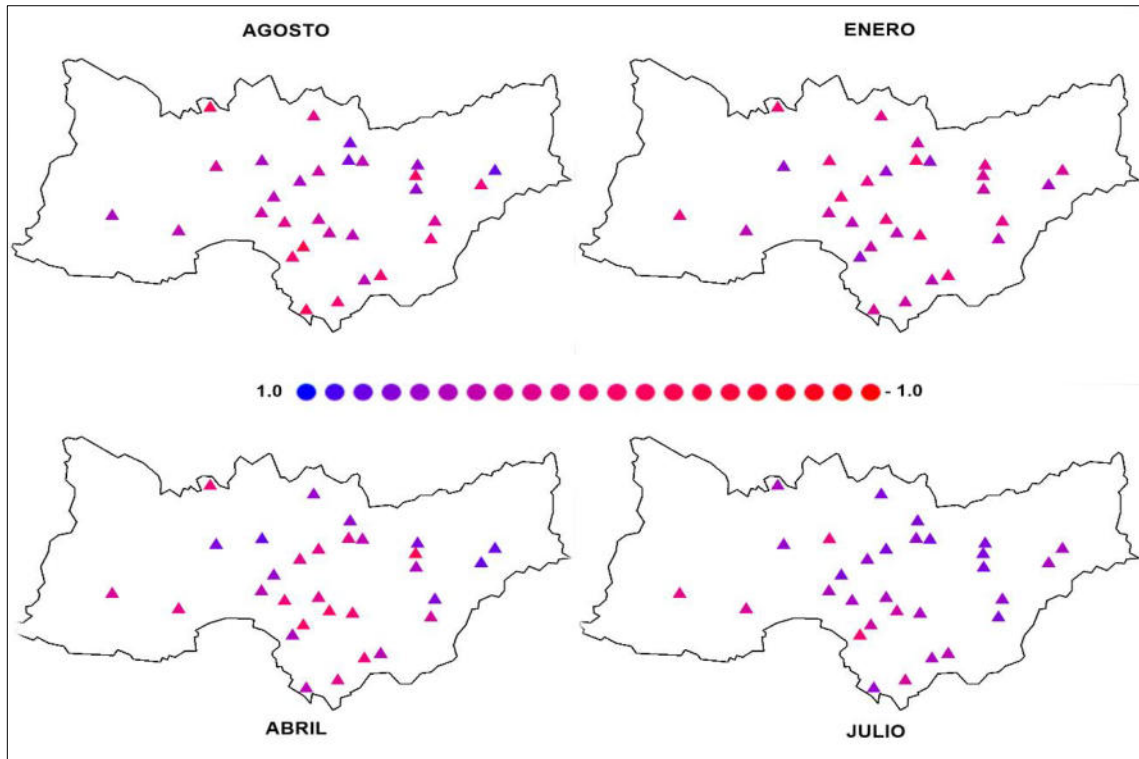


Figura 24. PERSIANN - CCS: correlaciones de Pearson por estación para los meses de agosto, enero, abril y julio.

Agosto en sus resultados de la prueba de Spearman obtuvo que el 80% de las estaciones cuentan con valores por debajo de 0.5. Sin embargo, el valor de correlación más alto no excede de 0.63, lo que lo vuelve el mes y producto menos correlacionado. Al observar la Figura 25, las zonas con los valores más bajos son la zona montañosa sur con las estaciones Launa de Sánchez, Mimbres y Potrero de Ábrego; La zona plana sur en las estaciones Montemorelos y La Boca, La zona plana este en las estaciones Las Brisas, Vista Hermosa, y Garza Gonzales. Algunas estaciones que presentan bajas correlaciones son La Popa y Apodaca.

El mes de enero en la prueba de Spearman presuntamente tiene mejores valores al tener correlaciones de hasta 0.73, sin embargo, solo el 10% de estaciones tiene valores por arriba de 0.5. Estas estaciones son El pastor, Potero de Ábrego y Doctor González, las cuales nuevamente no comporten características topográficas similares. Por otro lado, la estación que obtuvo la correlación más

baja de todo el análisis de estudio es la estación Palomitos con un valor de 0.0 y se localiza en la zona plana con a una elevación de 368 m.s.n.m. Le siguen con las correlaciones más bajas las estaciones Mamulique, La Popa, Las Enramadas y Vista Hermosa, estaciones que ya han presentado problemas en otros meses y en otros productos.

A pesar de que en el mes de julio se obtuvieron correlaciones por debajo de 0.5 en 75% de las estaciones, se obtuvieron correlaciones mayores a 0.80 en tres estaciones, siendo de los valores de correlación más altos obtenidos con este producto. Estas estaciones son: Los Ramones, General Bravo y Vista Hermosa. Mientras que las estaciones menos correlacionadas son Grutas de García y Potrero de Ábrego. Por lo que podemos concluir que la zona mejor correlacionada es la cuenca baja (zona plana este), y la zona menor correlacionada es la árida y montañosa (ver Figura 25).

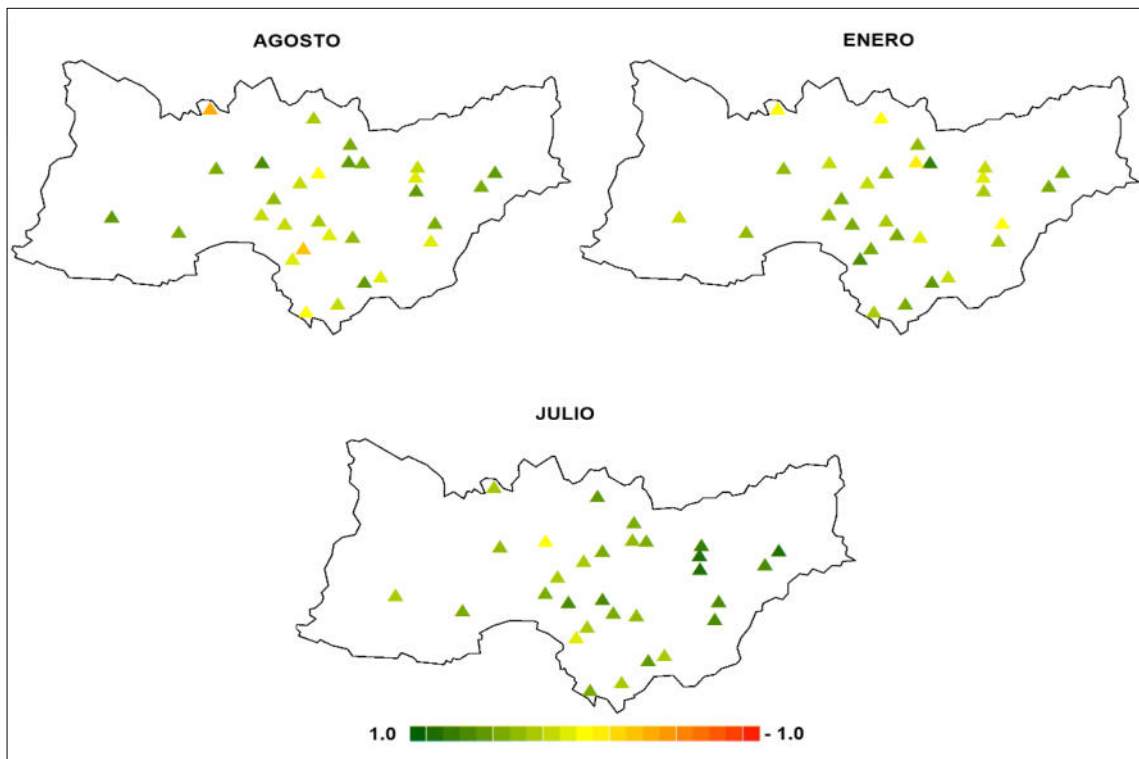


Figura 25. PERSIANN - CCS: correlaciones de Spearman por estación para los meses de agosto, enero y julio

Para los meses más correlacionados la Tabla 9. Rango de correlaciones de Pearson y Spearman para PERSIANN - CCS por mes, nos muestra a los meses de febrero y septiembre como los que obtuvieron los mejores resultados en ambas pruebas, mientras que abril únicamente obtuvo buenas correlaciones en la prueba de Spearman. Los resultados de ambas pruebas por estación se pueden observar en la Figura 26, para los meses antes mencionados.

Según los datos obtenidos para la prueba de Pearson para el mes de febrero, solamente tres estaciones cuentan con correlaciones menores a 0.5, estas estaciones son La Rosa, La Popa y Grutas de García con valores de 0.27, 0.20 y 0.15 respectivamente. Mientras que 15 estaciones obtuvieron resultados mayores a 0.75. Estas estaciones se localizan principalmente en la zona montañosa sur y la zona plana este. Estaciones como El Cuchillo, Vista Hermosa, Mimbres y Las Brisas, resultaron con las correlaciones más altas con valores mayores a 0.90, todas ubicadas en la zona plana este de la cuenca, perteneciente a la parte baja de la cuenca (ver Figura 26).

En el caso de los resultados de la prueba de Spearman, también para el mes de febrero, podemos observar en la Figura 26 b, que el comportamiento general se repite. La estación La Rosa, nuevamente obtuvo una correlación baja, esta vez de 0.29, un valor muy similar al obtenido en la prueba Pearson. Sin embargo, en la prueba de Spearman encontramos estaciones con valores entre 0.30 y 0.5. Además, solo cinco estaciones obtuvieron resultados mayores a 0.75, y ninguna estación obtuvo valores mayores a 0.90. Las estaciones con la mayor correlación según la prueba de Spearman fueron Montemorelos (0.77), El Pajonal (0.78), Garza González (0.80), Rayones (0.84) y Las Brisas (0.86); esta última siendo nuevamente la estación con la mejor correlación; aunque en este caso la zona mejor correlacionada es la zona montañosa sur y la zona plana sur. La zona norte y la zona árida muestran ser las menores correlacionadas, al igual que la zona central, por lo que los factores como la altura y el clima tienen influencia en la inferencia del producto.

En el mes de septiembre la prueba de Pearson arrojó valores que fueron menores con respecto a los obtenidos para IMERG y CMORPH. 16 estaciones obtuvieron resultados por debajo de 0.5, y ninguna estación obtuvo valores mayores a 0.75. La Popa, Montemorelos y Laguna de Sánchez, fueron las estaciones con los valores más bajos, y no comparten características geográficas ni elevaciones, sin embargo, los climas en los que se localizan son similares (ver Tabla 8 y Figura 26). Por otro lado, las estaciones que resultaron con valores mayores a 0.7 fueron Mamulique, Los Ramones, Las Enramadas y Grutas de Garcia, estas estaciones cuentan con climas similares pero sus elevaciones y posición geográfica son distintas entre sí.

En la prueba de Spearman las estaciones con los valores más bajos fueron La Popa, Saltillo y El Pajonal con 0.22, 0.28 y 0.29 respectivamente; comparten climas y elevaciones similares, pero posiciones geográficas distintas. En esta prueba si se obtuvieron correlaciones mayores a 0.75, en las estaciones Los Ramones, Las Enramadas y Grutas de Garcia con valores de 0.82, 0.87 y 0.87 respectivamente, y como se mencionó anteriormente únicamente tienen climas similares. Estas estaciones también fueron las mejor correlacionadas en la prueba de Pearson. En ambas pruebas como se puede observar en la Figura 26, el mes de septiembre no muestra qué zonas en específico tengan concentraciones de correlaciones altas o bajas, si no que los valores están dispersos por toda la cuenca.

Por último, tenemos las correlaciones del mes de abril únicamente para la prueba Spearman (ver Figura 26). Este mes, a diferencia de febrero y septiembre, si obtuvo correlaciones negativas. Las estaciones que mostraron este comportamiento son Vista Hermosa, Apodaca, El Pajonal, La Boca y Ejido Marín. Sin embargo, Palomitos, Laguna de Sánchez, Rayones, agua Blanca, Chupaderos del Indio y El Pastor son estaciones que obtuvieron valores por debajo de 0.20. Las estaciones menos correlacionadas no comparten características climáticas y/o geográficas, por lo que no se encuentran concentradas en una zona específica de la cuenca. Por otro lado, únicamente la

estación General Bravo obtuvo un valor alto de 0.84. De igual manera las estaciones que resultaron con valores mayores a 0.5, no se encuentran concentradas en una zona ni comparten características fisiográficas.

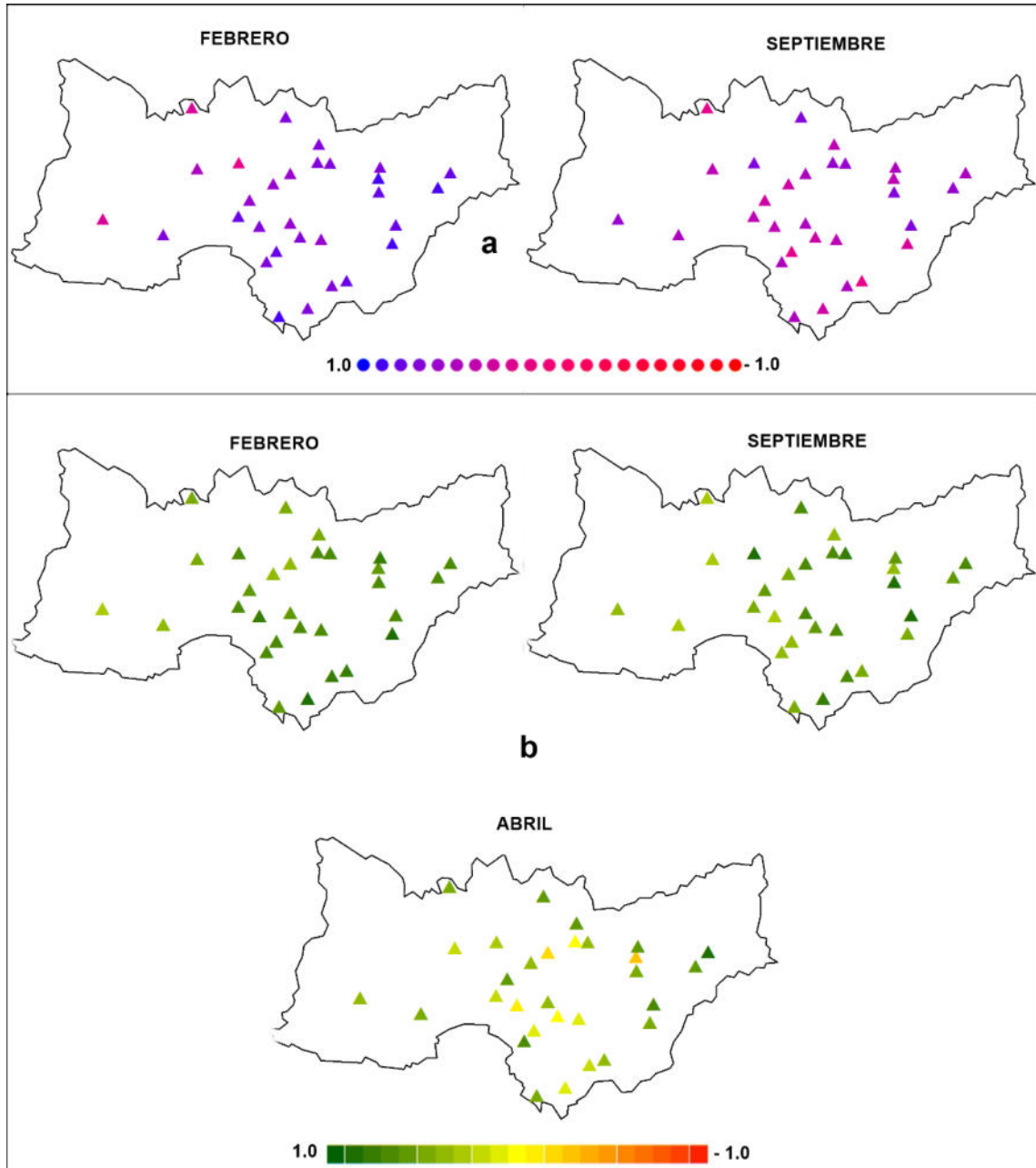


Figura 26. PERSIANN - CCS: Correlaciones por estación para los meses de febrero, septiembre y abril. a) Correlación de Pearson. b) Correlación de Spearman

Los resultados obtenidos con la información del producto PERSIANN – CCS, son consistentes al presentar en su mayoría bajas correlaciones tanto en las

estaciones como de manera general por observación. De acuerdo con lo antes mencionado, este producto no presenta zonas específicas que muestren algún tipo de correlación en concreto. Eso nos dice que tiene un comportamiento similar al de IMERG, el cual también no presentan patrones por zona, pero sí por casos aislados por estación.

En investigaciones anteriores, ya se habían encontrado comportamientos similares al momento de utilizar la información de PERSIANN – CCS y otros productos de la serie PERSIANN, la mayoría concuerda que al no tener algún tipo de calibración con mediciones terrenas es de esperarse que las correlaciones sean bajas y los errores sean altos (Varouchakis et al., 2021a). Hong et al., (2007) mencionan que la elevación de la ubicación de la estación convencional contribuye a la correlación con la información satelital, lo que vuelve débil la inferencia de información en periodos intensos y continuos de lluvia o en eventos extraordinarios. También se ha encontrado que este producto tiende a tener problemas de estimación y correlación en las zonas más bajas y planas, mientras que tiene mejores resultados en las zonas montañosas (Anjum et al., 2022), esto es el caso contrario a lo ocurrido en las estaciones aquí estudiadas, donde las zonas planas o con bajas elevaciones obtuvieron las correlaciones más altas, aunque esto no se generaliza para todos los meses y estaciones del año. Por su parte, F. Baig et al., (2022, 2023), han mencionado que PERSIANN – CCS, y otros productos de la misma familia, presentan mejores correlaciones en las zonas montañosas en regiones áridas con promedios de precipitación mensuales menores a los 100 mm de precipitación; esto es contrario a lo encontrado en este estudio, donde las estaciones ubicadas en la zona montañosa y en la zona árida obtuvieron correlaciones menores a 0.5; sin embargo, el comportamiento no es consistente, ya que estaciones en zonas planas y semicálidas obtuvieron también correlaciones bajas en los mismos meses que las estaciones de montaña y clima árido. Por lo que, de manera general, PERSIANN – CCS presenta problemas de correlación en toda la cuenca con correlaciones negativas en el mes de agosto siendo este el mes menos correlacionado.

3.3 Análisis Anual

El análisis anual se realizó con base en los resultados obtenidos de las distintas pruebas estadísticas elaboradas con la información de los promedios anuales por observación (PAO) y los acumulados anuales por estación (AAE). De esta forma se realizaron dos tipos análisis para identificar el comportamiento de los PPS a nivel cuenca y a nivel estación climatológica.

Con esto se generó un panorama general y puntal del comportamiento de los Productos de Precipitación por Satélite, de forma que se obtuvo cual producto funciona mejor según las zonas dentro de la cuenca, y a nivel general para toda el área de la cuenca de estudio.

De manera que el análisis anual se divide en el comportamiento por observación y comportamiento por estación, ambos se muestran a continuación.

3.3.1 Comportamiento por observación

Con la información anual fue posible observar el comportamiento de las observaciones satelitales de manera general. Como se observa en la Figura 27. Caja y bigotes de los promedios de precipitación anual por observación, los productos de precipitación mantienen el comportamiento mostrado en el análisis mensual. CMORPH presenta valores similares a las ECC, mientras que IMERG y PERSIANN – CCS están subestimando y sobreestimando la precipitación respectivamente.

Esto se observa más claro en la Tabla 10. Resultados de error, sesgo y correlaciones para los promedios anuales de precipitación por observación, que como su nombre lo indica, muestra los resultados obtenidos de las pruebas estadísticas RMSE, MAE, BIAS y las correlaciones de Pearson y Spearman de los promedios anuales de precipitación de cada una de las observaciones con respecto a las estaciones climatológicas.

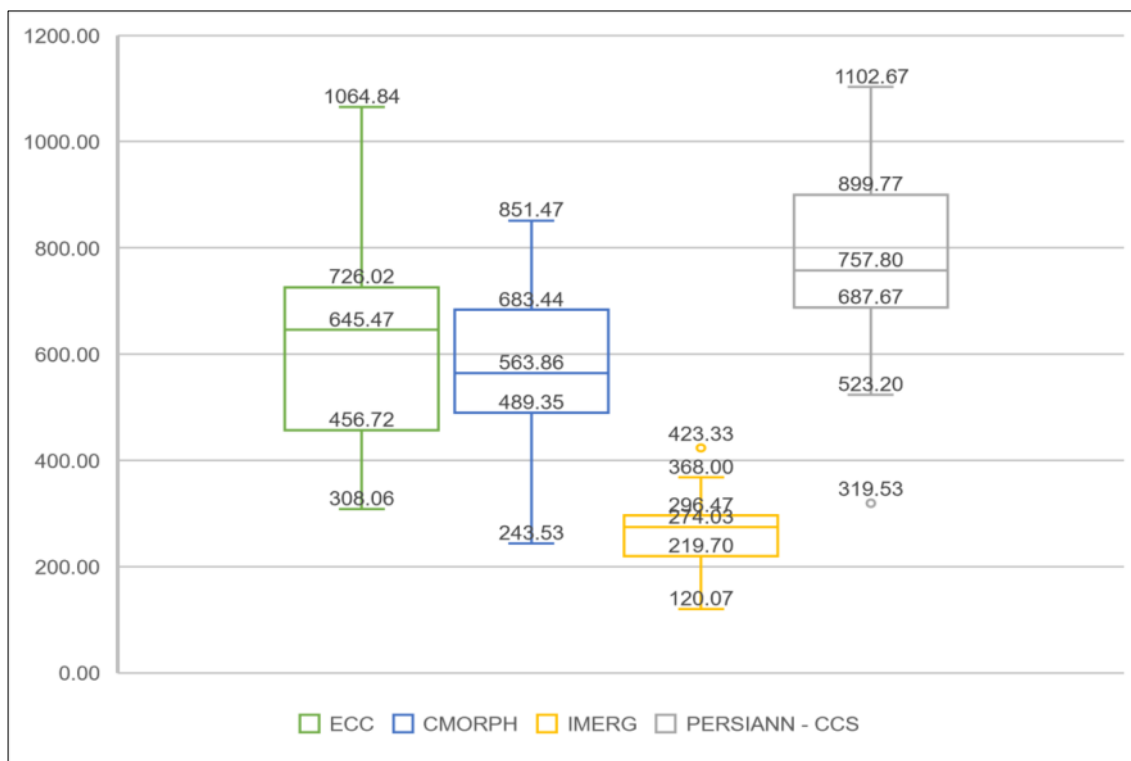


Figura 27. Caja y bigotes de los promedios de precipitación anual por observación

A diferencia de los resultados a escala mensual, los valores de RMSE, MAE y BIAS son más altos, esto se debe a que los valores anuales rondan entre los 200 y 1,100 mm, y el tamaño de la muestra para las pruebas fue de 13; por lo que se prevén que existan valores mayores a 100 mm dada la naturaleza de las pruebas, aun así, es preferible que los valores sean lo más cercanos a cero.

Tabla 10. Resultados de error, sesgo y correlaciones para los promedios anuales de precipitación por observación

	RMSE	MAE	BIAS	PEARSON	SPEARMAN
<i>CMORPH</i>	125.62	99.89	-80.92	0.88	0.87
<i>IMERG</i>	391.44	898.69	-382.38	0.91	0.93
<i>PERSIANN-CCS</i>	300.85	232.56	124.63	0.24	0.52

Como se observa en los resultados de la Tabla 10, CMORPH nuevamente obtuvo los mejores resultados de RMSE, MAE y BIAS con valores cercanos a cero, y

presentando los valores más bajos con respecto a los obtenidos para IMERG y PERSIANN – CCS. Estas pruebas nos permiten determinar los rangos de error, la capacidad de estimación y sesgo que tienen estos productos.

El producto IMERG muestra valores por de más de 200 mm de diferencia para todas las pruebas. Resultó con un BIAS de -382.38 mm lo cual indica una subestimación de la mitad del promedio anual de precipitación que se tiene en la cuenca. Los resultados de RMSE y MAE no dan un mejor panorama, ya que se obtuvieron valores de hasta -898.69 milímetros. Con respecto a los resultados obtenidos de las pruebas de correlación, IMERG obtuvo las correlaciones más altas con valores de 0.91 y 0.93 para Pearson y Spearman respectivamente. Sin embargo, estos resultados no mejoran el panorama de este producto, ya que los altos valores de correlación y los altos rangos de error nos indican una variación en la estimación de las precipitaciones, sumado a las subestimaciones del producto, esto lo vuelve poco confiable para su uso en esta cuenca. El comportamiento mostrado por IMERG no se había reportado antes en otros estudios, la mayoría reporta que este producto tiende a sobreestimar los promedios anuales con correlaciones entre 0.7 y 0.9 (Li et al., 2022; Ramadhan et al., 2022). Además, el producto IMERG-Final (versión utilizada en este estudio), ha presentado bajos valores de MAE y BIAS cercanos a cero utilizando promedios anuales (Maghsood et al., 2019). Por otro lado Duarte et al., (2022), obtuvieron comportamientos similares a los encontrados en este estudio, dónde el producto IMERG subestima las precipitaciones diarias en un 46% lo cual repercute al momento de utilizar estos datos para los promedios anuales; sin embargo, también comenta que en precipitaciones pequeñas el producto tiende a sobreestimar la precipitación.

En el caso de CMORPH por otro lado, se obtuvieron valores de correlación de 0.88 y 0.87 para Pearson y Spearman respectivamente, valores similares a los obtenidos en el análisis mensual. Además, los valores que obtuvo para el resto de las pruebas indican un comportamiento casi ideal. El resultado de BIAS, indica una subestimación de -80.92 mm, lo equivalente 15% del promedio anual.

Además, los valores obtenidos para las pruebas de error no superan los 130 mm de precipitación. Esto nos da un panorama alentador para este producto; que muestra tener una buena correlación y varianza en sus estimaciones a diferencia de los otros dos productos analizados. Este comportamiento de CMORPH ya se había reportado anteriormente; Wei et al. (2023), obtuvieron resultados muy similares en las pruebas de error, con valores muy cercanos a cero, sin embargo, los valores que obtuvo para correlación eran más bajos (alrededor de 0.4). Por otro lado, varios investigadores (Bruster-Flores et al., 2019; Dezfooli et al., 2018; Liu et al., 2022) han reportado que CMORPH muestra sobrestimaciones, rangos altos de error y altas correlaciones en los valores anuales derivados de sus acumulados diarios, sin embargo, aclaran que es necesario profundizar y regionalizar más las áreas de estudio para determinar comportamientos más específicos.

El producto PERSIANN – CCS nuevamente en el análisis general obtuvo resultados poco alentadores con correlaciones de entre 0.24 y 0.52, siendo estas las más bajas. Los resultados de BIAS indican sobrestimaciones de 120 mm, y rangos de error de más de 200 mm de precipitación. Los resultados obtenidos nos indican poca correlación entre los valores reales y estimados y una sobrestimación del 4% del acumulado anual de la cuenca. Esto muestra que PERSIANN – CCS está estimando precipitaciones en días donde en realidad no hubo precipitación e incluso elevando los valores de precipitación. El comportamiento mostrado por este producto no es nuevo, y se ha reportado en otras investigaciones (Anjum et al., 2022; F. Baig et al., 2023; Dezfooli et al., 2018; Varouchakis et al., 2021b), no solo para PERSIANN – CCS, sino para toda la familia de productos de PERSIANN. Baig et al (2023), encontraron resultados muy similares con respecto al comportamiento anual de PERSIANN – CCS, con sobreestimaciones entre los 80 mm – 140 mm, correlaciones por debajo de 0.50 y valores de RMSE no menores a 2 mm, y concluye que estos resultados se deben principalmente a la clasificación de nubes con la que funciona este producto.

3.3.2 Comportamiento por estación

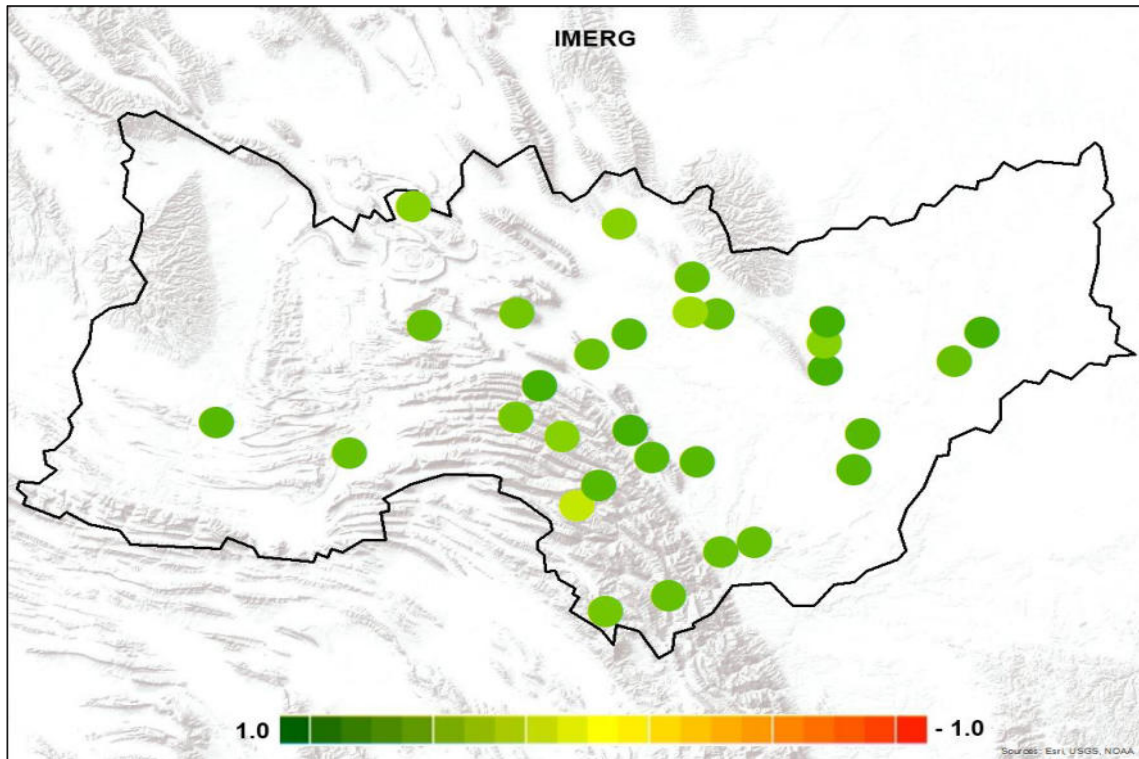
Con el fin de determinar el comportamiento de los productos de precipitación por satélite de manera anual en cada una de las zonas de la cuenca, fueron analizados los resultados de las pruebas MAE, RMSE, BIAS y correlaciones de Pearson y Spearman de los Acumulados Anuales por Estación (AAE). Con el fin de identificar qué características fisiográficas están influyendo en la inferencia de la precipitación dentro de la cuenca.

Dada la cantidad de resultados obtenidos, las tablas con los valores específicos de cada prueba para cada PPS se encuentran en el Apéndice C. Tablas de información por estación en la Tabla 23. Resultados de Correlación de Pearson, Spearman, RMSE, MAE, BIAS y promedio de precipitación anual por estación para cada observación, por lo que, a continuación, se sintetiza la información obtenida para su análisis.

3.3.2.1 Resultados para el producto IMERG

Como se ha observado a lo largo de esta investigación, el producto IMERG presenta las mejores correlaciones con respecto a la información de las estaciones climatológicas. Y este caso no fue la excepción, ya que el 70% de las estaciones obtuvieron correlaciones mayores a 0.75 y 7 con resultados mayores de 0.90. Como se puede observar en la Figura 28. Correlación anual de Pearson para

IMERG



, las zonas que muestran ser las más correlacionadas son la zona central con las estaciones Apodaca, Monterrey, El Cerrito, y La Huastequita; la zona plana sur en La Boca y Palomitos; y la zona plana este con Las Enramadas, Garza Gonzales, General Bravo y Los Ramones.

En el lado contrario, las correlaciones más bajas no se presentaron en zonas específicas, si no como aislados en ciertas estaciones, como ocurrió anteriormente en las correlaciones por mes. Las estaciones que presentaron una baja correlación son: Potrero de Abrego, Ejido Marín y Vista Hermosa, la primera para ambas correlaciones, y las siguientes para Spearman y Pearson respectivamente.

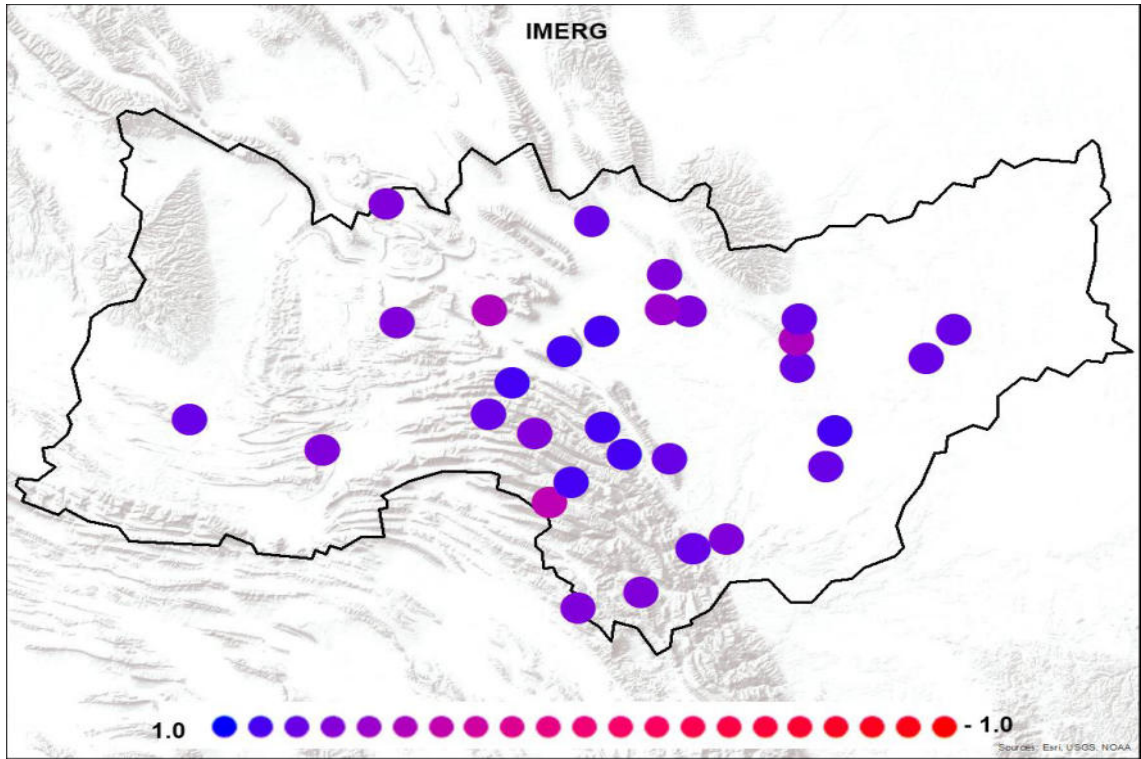


Figura 28. Correlación anual de Pearson para IMERG

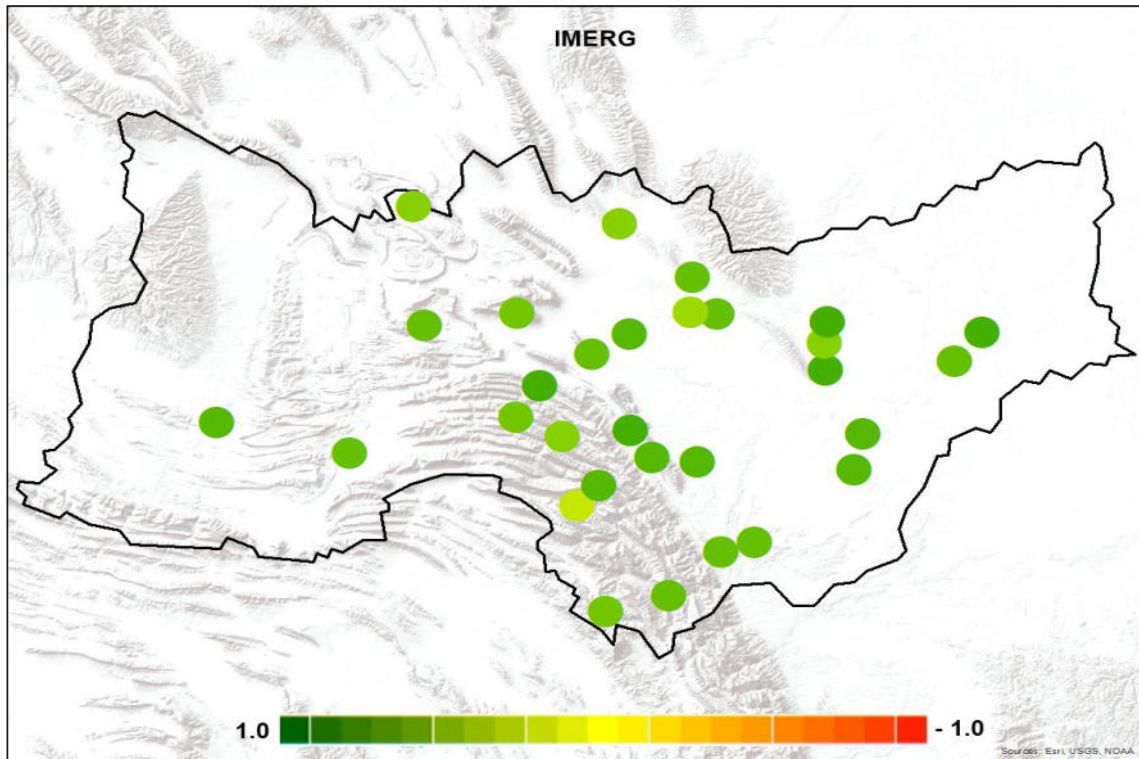


Figura 29. Correlación Anual de Pearson para IMERG

A pesar de que las zonas montañosas, áridas y norte no presentaron correlaciones excelentes si obtuvieron en su mayoría correlaciones arriba de 0.75, lo que nos dice que el producto a nivel anual se encuentra bien correlacionado y es potencialmente una buena alternativa. Sin embargo, es necesario analizar el resto de las pruebas para determinar la fiabilidad de este.

Para ello se analizó los BIAS de cada una de las estaciones, como se observa en la Figura 30, el 100% de las estaciones obtuvieron valores negativos, lo que nos indica una subestimación de la precipitación anual. El 90% de las estaciones presentan subestimaciones mayores a los 100 mm, y 7 estaciones presentan subestimaciones mayores a 500 milímetros. En específico las estaciones El pastor y La Boca obtuvieron subestimaciones de hasta 800 mm, estas estaciones cuentan con promedios anuales de 1,033 mm y 1,020 mm respectivamente; ambas estaciones se localizan en la zona plana sur en clima semicálido. Sin embargo, las estaciones en la zona montañosa también presentan

subestimaciones considerables. También podemos observar en la misma figura, que estaciones localizadas en la zona árida de la cuenca, obtuvieron los BIAS más bajos.

Se debe tener en cuenta los valores obtenidos de RMSE y MAE; ya que nos indican la variabilidad de los datos y pueden darnos un panorama más amplio al combinarlo con los resultados de correlación. Como podemos apreciar en

Tabla 11. Valores mínimos y máximos de RMSE y MAE para IMERG, los valores de error mínimos son de 100 mm de precipitación en los climas áridos, mientras que los valores más altos rondan los 800 mm en los semicálidos y semihúmedos, resultados muy similares que se aprecian en la prueba de BIAS.

Es importante recordar que el acumulado y promedio anual por estación climatológica varía y no es el mismo valor para cada una de ellas, se recomienda ver la Tabla 20. Promedio Mensual de Precipitación en milímetros por Estación Climatológica según cada observación. ubicada en el Apéndice C. Tablas de información por estación, para visualizar los valores por estación y los resultados de cada prueba.

La estación El Pastor continuamente ha presentado problemas a nivel anual en las diversas pruebas, por otro lado, la estación La Boca, ha presentado en las pruebas de error y sesgo, pero presentó buenas correlaciones. Esto nos indica un problema de variabilidad entre los datos, y una baja inferencia en las precipitaciones dados los altos valores de BIAS obtenidos en toda la cuenca, donde independientemente del promedio y cumulado anual por estación la inferencia ronda entre los 50 y 200 mm de precipitación.

Este espectro de resultado nos muestra que hay una posible variación sistemática de los datos inferidos. Esto quiere decir que los resultados muestran una tendencia sistemática a estar por debajo del valor real de precipitación, sin embargo, también muestran que existe una alta variabilidad en las mediciones de las estaciones o individualmente. Esto podría deberse a problemas dentro del

método de inferencia del algoritmo y/o a la influencia de factores externos como el clima, las elevaciones, y otras características fisiográficas.

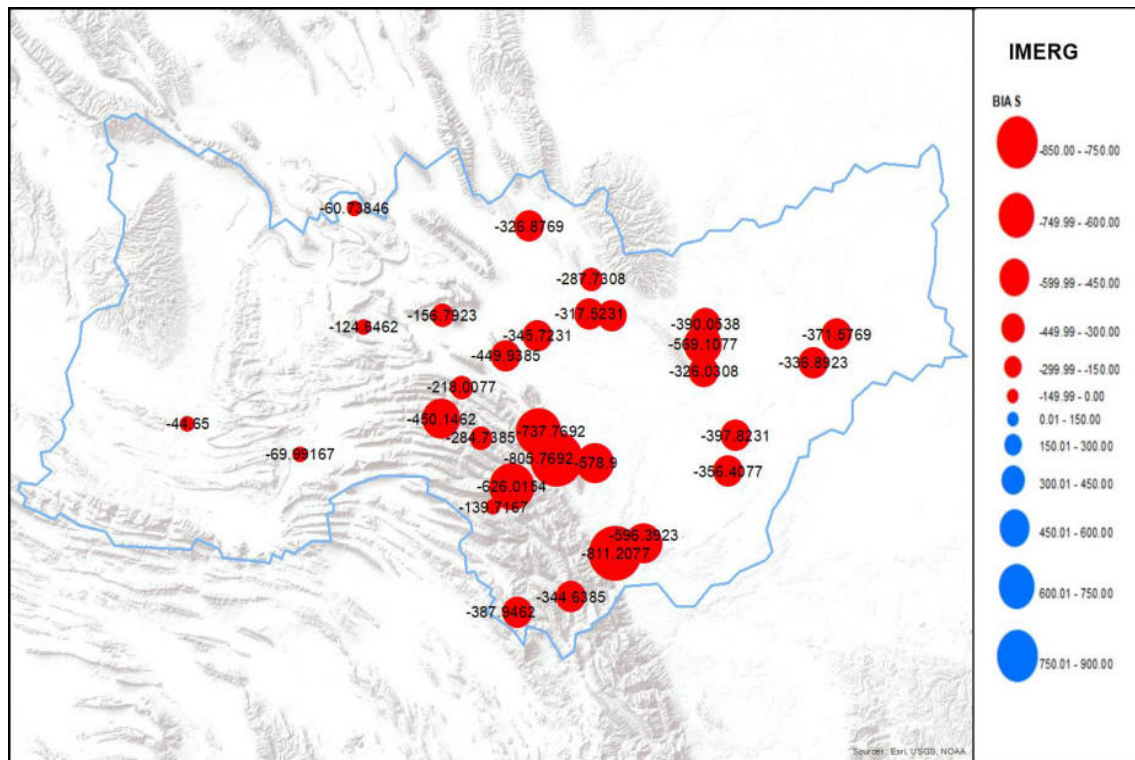


Figura 30. BIAS Anual por estación para IMERG

Tabla 11. Valores mínimos y máximos de RMSE y MAE para IMERG

ESTACIÓN	LA POPA	CHUPADEROS DEL INDI	LA ROSA	EL CERRITO	EL PASTOR	LA BOCA
RMSE	111.23	146.73	197.94	773.97	858.14	862.72
MAE	82.08	124.65	195.00	737.77	811.21	805.77

Este comportamiento ya se había detectado anteriormente, con valores de entre 100 y 200 mm de precipitación de error con resultados de correlación entre 0.7 y 0.9, lo que indicaba que el producto IMERG era una buena opción para su uso en zonas áridas (Liu et al., 2022). Sin embargo, en regiones con más de 1700 mm de precipitaciones por año de China y Singapur, IMERG ha mostrado excelentes resultados sin subestimaciones o sobrestimaciones considerables con correlaciones entre 0.60 y 0.90, con valores de RMSE menores a los 100 mm

(Tan & Duan, 2017). Retalis et al., (2020) realizaron un estudio en la Isla de Chipre, dónde no solo investigaron las correlaciones anuales IMERG, sino que también las relacionaron con la altura a la que se encuentran las estaciones pluviométricas. Encontraron que a menor elevación mayor es la sobreestimación, sin embargo, a mayor altura mayor es la subestimación; los rangos de error repiten este comportamiento, pero las correlaciones no se ven afectadas por la altura.

A pesar de que la cuenca Río Bravo – San Juan, comparte algunas características con los estudios antes mencionados (Liu et al., 2022; Tan & Duan, 2017), los resultados obtenidos en este estudio no son completamente similares. Por ejemplo, si bien existe una concordancia con Retalis et al., (2020) con respecto a la influencia de la elevación en el BIAS, RMSE y MAE, los resultados aquí obtenidos apuntan al lado contrario. Aunque, se obtuvieron resultados similares a los registrados por Liu et al., (2022), IMERG presenta valores que indican subestimaciones más de la mitad de los promedios y acumulados anuales dentro de la cuenta, lo que no vuelve apto al producto. Tan & Duan, (2017) mencionan que los buenos resultados obtenidos por IMERG para países asiáticos en específico con China, se deben a la calibración con pluviómetros que realiza el algoritmo, y que un buen rendimiento del producto recae directamente de la cantidad de pluviómetros o estaciones con los que cuentan las regiones o países.

3.3.2.2 Resultados anuales para CMORPH

Para obtener un panorama más amplio del funcionamiento del producto CMORPH en la cuenca Río Bravo – San Juan, se realizó un análisis con los resultados de las diferentes pruebas estadísticas realizadas con los acumulados anuales por estación. CMORPH ha mostrado ser el producto más cercano a las mediciones terrenas convencionales de manera general, tanto anual como mensual; así como mensualmente por estación. Aun así, es importante observar las áreas que podrían estar presentando conflictos de inferencia.

Comenzando con ambas pruebas de correlación se obtuvieron resultados favorables en la mayoría de las estaciones, con las excepciones de La Popa, Vista Hermosa, Chupaderos del Indio y Agua Blanca, quienes obtuvieron resultados menores a 0.5 en ambas pruebas. Esto indica que las todas las zonas a excepción de la zona centro y zona plana sur cuentan con al menos una estación con baja correlación (para referencia a las zonas ver Figura 13).

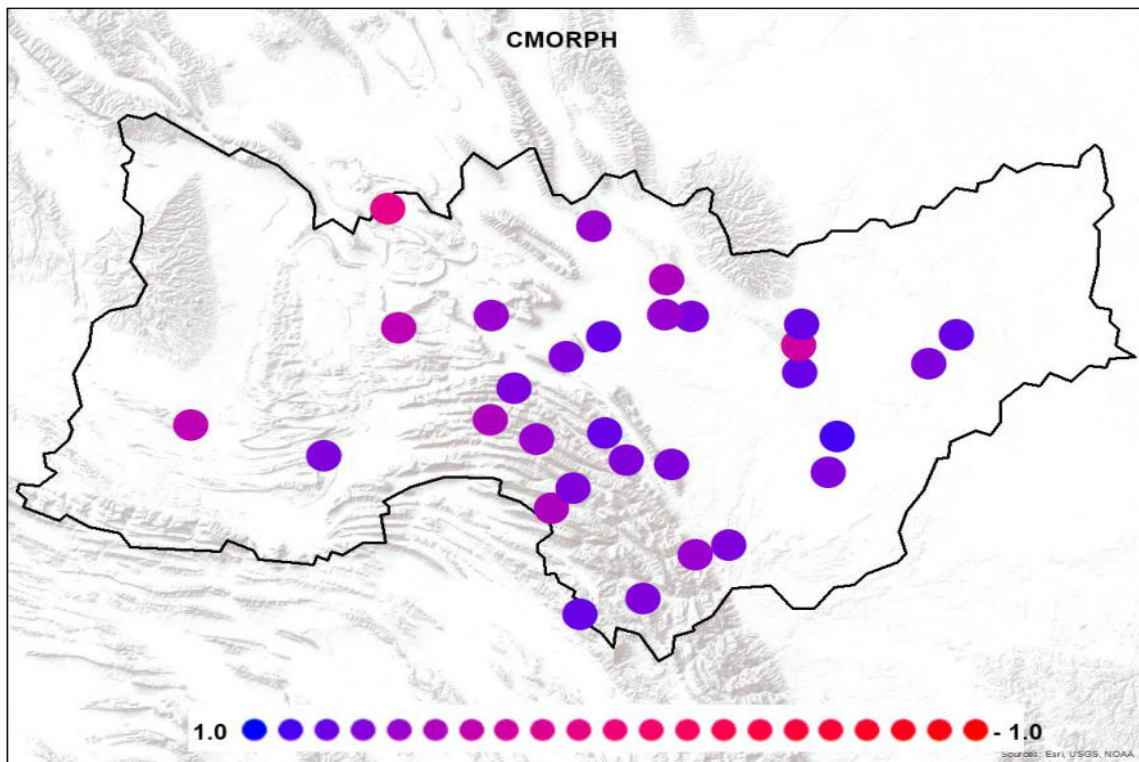


Figura 31. Correlación anual de Pearson por estación para CMORPH

De manera general entre el 35% y 40% de las estaciones obtuvieron correlaciones mayores a 0.75, principalmente en las estaciones de la zona plana este y zona central, con estaciones como Mimbres, Rayones, La Boca y Palomitos que muestran buenas correlaciones y se ubican en zonas como la zona montañosa y la zona plana sur, esto se expone en la Figura 31. Correlación anual de Pearson por estación para CMORPH” y Figura 32. Correlación Anual de Spearman por estación para CMORPH”.

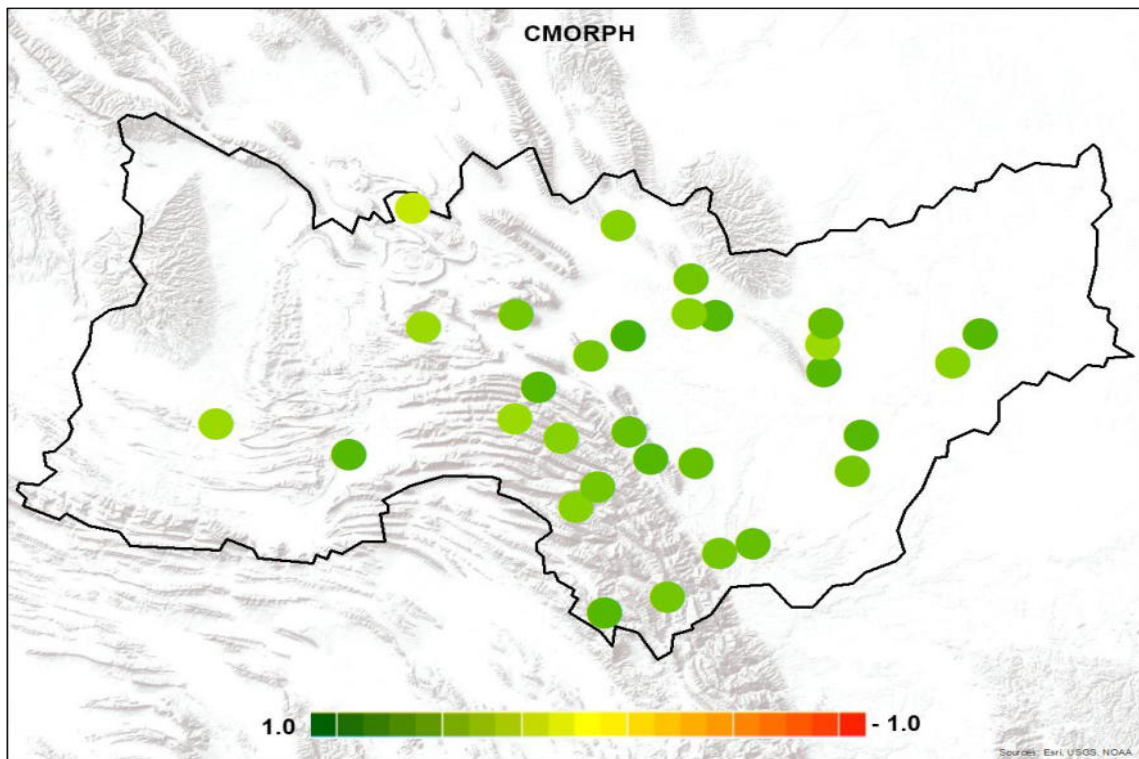


Figura 32. Correlación Anual de Spearman por estación para CMORPH

Los resultados obtenidos de la prueba BIAS se muestran en la Figura 33. BIAS anual por estación para CMORPH donde podemos observar que el producto está subestimando la precipitación en el 65% de la cuenca principalmente al centro cubriendo las zonas montañosas, centro, norte y plana sur. Aun y cuando la subestimación ocurre en más de la mitad de la cuenca está no supera los 500 mm de precipitación, sin embargo, estaciones como El Cerrito, La Boca, Laguna de Sánchez, Agua Blanca, El Pastor y Monterrey presentaron subestimaciones de más de 300 mm, lo cual indica que no se está captando más de la mitad de

las precipitaciones. Siete estaciones obtuvieron subestimaciones menores a los 100 mm, cinco de ellas se localizan en elevaciones entre los 190 y 720 m.s.n.m. con excepción de las estaciones El Pajonal y Grutas de Garcia quienes se localizan a elevaciones de más de 1,000 m.s.n.m. (Ver Tabla 8)

El 35% de las estaciones mostraron una sobreestimación de los acumulados anuales entre los 14 mm y 200 milímetros. Por otro lado, el resto de las estaciones obtuvieron subestimaciones entre los 0.4 hasta los 480 mm, la mayoría de las estaciones con este resultado cuentan con promedios anuales de precipitación mayores a los 700 milímetros. Aun así, estaciones como Saltillo, Rayones, General Bravo, Potrero de Abrego y La Rosa mostraron subestimaciones menores a 100 mm, todas ellas comparten climas semicálidos y áridos, elevaciones mayores a los 800 m.s.n.m. a excepción de la estación General Bravo (ver Tabla 8).

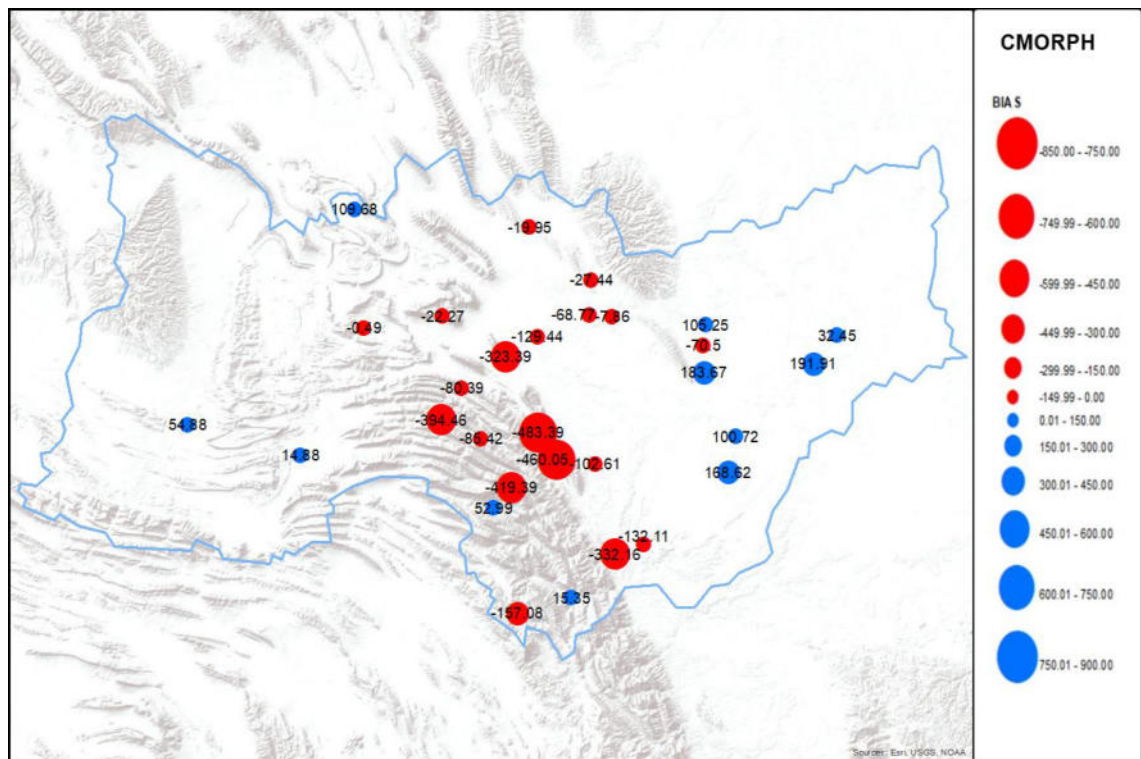


Figura 33. BIAS anual por estación para CMORPH

Es importante resaltar que estaciones como Doctor Gonzales y Chupaderos del Indio obtuvieron subestimaciones menores a los 10 mm; sin embargo, no poseen características fisiográficas similares en su ubicación. Por lo que podrían considerarse casos aislados.

Analizando los resultados de las pruebas de error, el rango en ambas pruebas es de entre 88 y 555 mm de precipitación por estación por año. La mitad de las estaciones obtuvieron resultados de error medio cuadrático menores a 200 mm/año, el resto de las estaciones fluctúa sus valores entre los 201 y 555 mm/año. En la Tabla 12. Resultados mínimos y máximos de RMSE y MAE anuales para CMORPH” podemos observar que los resultados de MAE fueron menores con respecto a los RMSE, esto quiere decir que los errores individuales en promedio están más cerca del cero en términos de valor absoluto que los errores al cuadrado. En otras palabras, el algoritmo de CMORPH tiende a cometer errores menores a los 100 mm, pero de manera frecuente. De forma general, la Zona Montañosa, Centro y Plana Sur presentan los valores más grandes de error, mientras que la Zona Plana Este presenta los errores más bajos.

Tabla 12. Resultados mínimos y máximos de RMSE y MAE anuales para CMORPH

ESTACIÓN	Mínimos			Máximos		
	CHUPADERO S DEL INDIOS	GENERAL BRAVO	GRUTAS DE GARCIA	EL CERRITO	LA BOCA	LAGUNA DE SÁNCHEZ
RMSE	114.32	116.39	121.59	522.34	529.23	555.31
MAE	88.58	95.04	86.97	483.39	460.05	419.39

Dezfooli et al., (2018) y Wei et al., (2023) mencionan en sus trabajos que CMORPH tiende a subestimar las precipitaciones a grandes elevaciones, tal y como ocurre en algunas de las estaciones en esta investigación. Por su parte Liu et al., (2022) encontraron resultados de RMSE, MAE y Correlación Pearson muy similares a los obtenidos en este estudio, también reportan que las regiones norte y sur de China son la que presentan subestimaciones mayores a nivel anual, ambas regiones son aparentemente planas sin aparente presencia de montañas

caso contrario a lo que ocurre en las estaciones de la cuenca Río Bravo – San Juan.

3.3.2.3 Resultados anuales para PERSIANN–CCS

A lo largo de esta investigación los resultados de las distintas pruebas y temporalidades han mostrado que el producto PERSIANN – CCS, no es el más óptimo. Principalmente ha presentado correlaciones bajas, rangos de error altos y sobreestimaciones considerables. Aun así, es importante seguir revisando la información y relacionarla, en este caso a los acumulados anuales por estación.

En la Figura 34. Correlación anual de Pearson por estación para PERSIANN – CCS” y en la Figura 35. Correlación anual de Spearman por estación para PERSIANN – CCS” podemos observar de forma espacial los resultados de ambas pruebas de correlación para este producto. A simple vista se expone que las correlaciones nuevamente fueron bajas. En el caso de la prueba de Pearson los resultados van desde los -0.08 hasta los 0.73, mientras que en Spearman los valores rondan entre los -0.22 y 0.66, de manera que no hay ninguna estación que obtuviera valores mayores a 0.75.

Al observar ambas figuras es apreciable que las zonas en mayor conflicto o que poseen las correlaciones más bajas son la zona montañosa, plana sur y norte. La estación La Boca fue la menos correlacionada con un resultado de 0.02 para Spearman, mientras que para la prueba de Pearson la estación menos correlacionada fue Laguna de Sánchez con -0.02; algunas otras estaciones que presentan correlaciones bajas son La Popa, Montemorelos, El pastor, y Agua Blanca.

Por otro lado, las correlaciones que pueden considerarse buenas (mayores a 0.5), se localizan principalmente en la Zona Plana Este según lo observado en las figuras 31 y 32. Sin embargo, al analizar los valores (ver Tabla 23), no se presenta un patrón tan claro, ya que los resultados por zonas no son los mismos en ambas pruebas, y la mayoría de las buenas correlaciones se pueden calificar como casos aislados como sucedió con el producto IMERG. Aun así, podemos

resaltar que las estaciones General Bravo, La Rosa, y Grutas de Garcia, presentan las correlaciones más altas en ambas pruebas por arriba de 0.60.

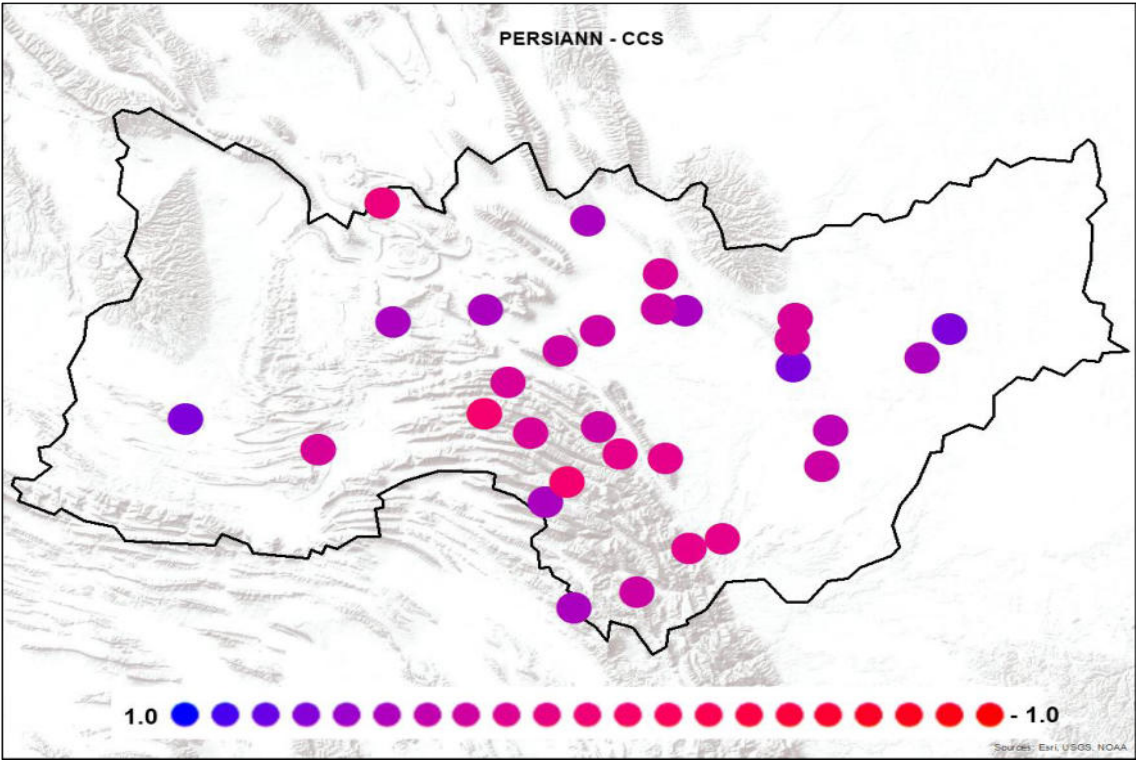


Figura 34. Correlación anual de Pearson por estación para PERSIANN – CCS

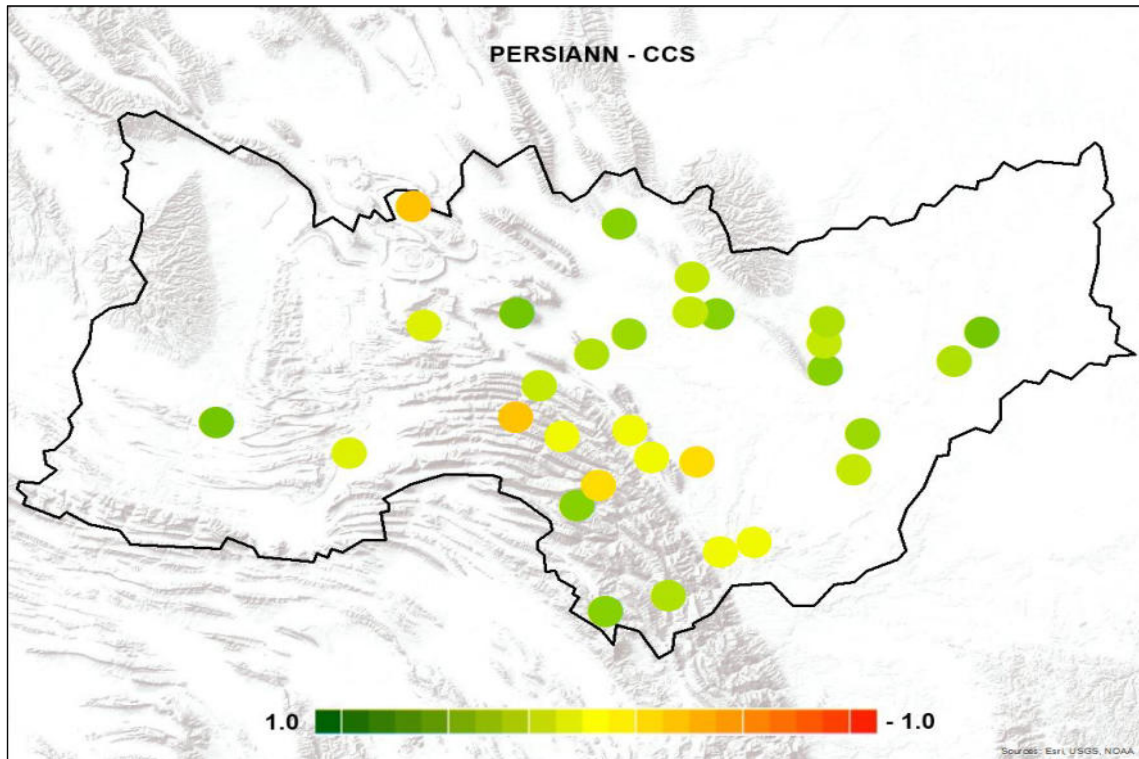


Figura 35. Correlación anual de Spearman por estación para PERSIANN – CCS

Al igual que el producto CMORPH, PERSIANN – CCS obtuvo ambos tipos de BIAS: subestimación y sobreestimación, este último en mayor medida. La Figura 36. BIAS anual por estación para PERSIANN – CCS presenta de manera espacial los resultados obtenidos para esta prueba, donde de manera general podemos observar que en el 75% de la cuenca el producto está sobreestimando la precipitación. La mayoría de estas sobreestimaciones varían sus valores entre 200 y 456 mm de precipitación.

Las zonas que están subestimando la precipitación en la cuenca son principalmente la Zona Montañosa y la Zona Plana Sur (para identificar las zonas ver Figura 13), con excepción de la estación El Cerrito ubicada en la Zona Centro. Las estaciones que obtuvieron los valores más bajos de BIAS son la estación Mimbres (-1.71 mm), Montemorelos (-10.23 mm) y Monterrey (15.26 mm), sin embargo, hay otras tres estaciones que obtuvieron resultados menores a 100 mm de precipitación.

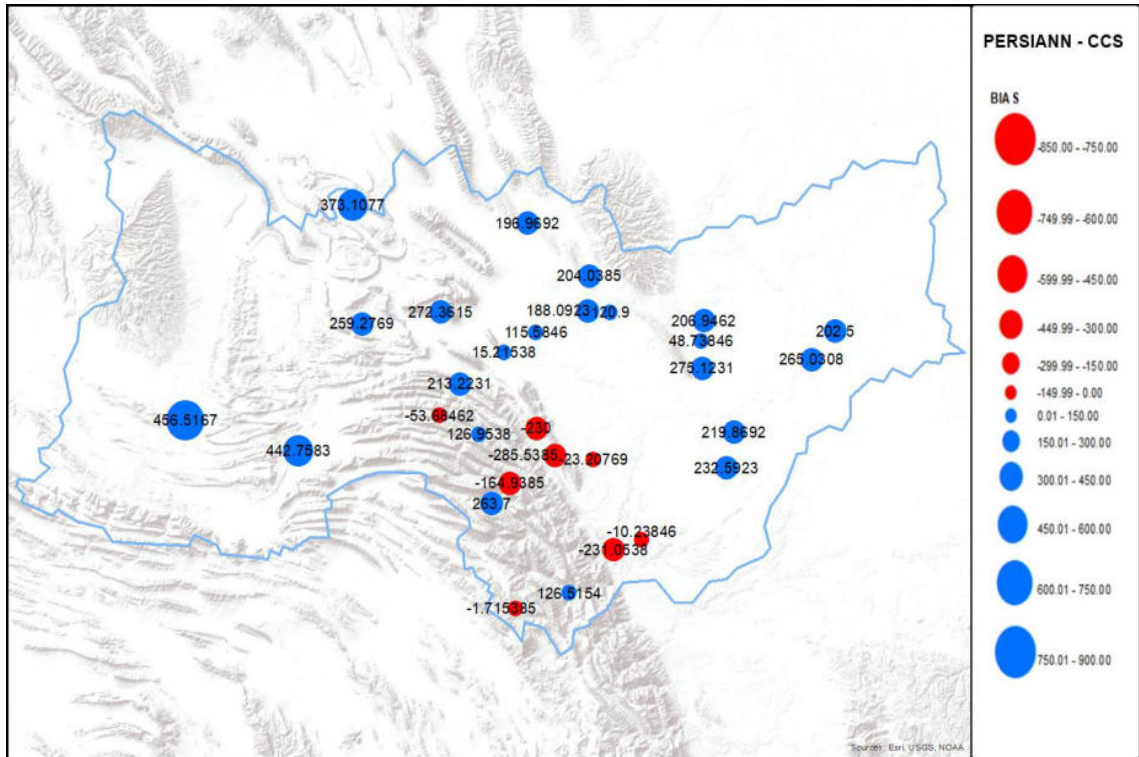


Figura 36. BIAS anual por estación para PERSIANN – CCS

Como últimos resultados para este producto, tenemos los correspondientes a las pruebas de RMSE Y MAE, en la *Tabla 13*. *Valores mínimos y máximos de RMSE y MAE para PERSIANN - CCS* se muestra una parte de los resultados obtenidos (ver *Tabla 23* para todos los resultados).

De manera general las zonas: Montañosa, Plana Sur y Árida, fueron las que obtuvieron errores mayores a los 400 mm/año, siendo la estación Saltillo la que presentó los valores más altos. Las estaciones que presentan los valores máximos (ver *Tabla 13*) comparten la característica de localizarse en elevaciones mayores a los 1,600 m.s.n.m., sin embargo, los climas en los que se encuentran son diferentes (ver *Tabla 8* y *Figura 2*).

Por otro lado, las estaciones que obtuvieron los errores más bajos con BIAS respecto a los obtenidos con el resto de las estaciones para este producto no comparten zona, elevaciones o clima, por lo que podrían considerarse casos aislados, ya

que las Zonas Centro, Montañosa y Plana Este, presentan en el resto de las estaciones errores de entre 300 y 400 mm/año.

Tabla 13. Valores mínimos y máximos de RMSE y MAE para PERSIANN - CCS

ESTACIÓN	Mínimos			Máximos		
	MIMBRES	DOCTOR GONZÁLEZ	MAMULIQUE	LA ROSA	POTRERO DE ABREGO	SALTILLO
RMSE	236.24	255.44	275.27	726.12	782.15	782.15
MAE	168.41	184.42	225.37	716.36	737.55	776.91

A diferencia del producto IMERG, PERSIANN – CCS, es consistente con sus resultados entre las correlaciones, rangos de error y sesgo. Al igual que con CMORPH, los resultados de MAE son menores que los de RMSE aunque la diferencia es mínima.

Anteriormente, PERSIANN – CCS y el grupo de productos de la familia PERSIANN ya han mostrado este tipo de comportamiento en otras regiones (Anjum et al., 2022; Hussein et al., 2021; Nadeem et al., 2022), principalmente otros investigadores comentan que PERSIANN presenta problemas en zonas húmedas, y de manera general todos reportan sobrestimaciones por parte de esta familia de productos (F. Baig et al., 2023; Dezfooli et al., 2018; Setti et al., 2023). Nadeem et al., (2022) también señalan que la elevación en la que se localizan las estaciones convencionales tiene influencia en la correlación que presenta el producto, donde a menor elevación mejor es la correlación. Algo similar ocurrió en este estudio con las correlaciones obtenidas, donde la zona montañosa mostró bajas correlaciones, aunque, las zonas planas también obtuvieron correlaciones bajas, sin embargo, estas se localizan en climas templados y subhúmedos, lo que explica la baja correlación como han comentado otros autores.

Como han comentado otros autores (F. Baig et al., 2022, 2023; Sadeghi et al., 2021; Zhang et al., 2020) el producto PERSIANN – CCS y la familia de productos PERSIANN, presentan un bajo rendimiento que no representa en su totalidad las

condiciones de precipitación reales. Por lo que, el problema con este producto se debe principalmente a la forma de recuperación y funcionamiento propio del producto, y de forma secundaria a las condiciones fisiográficas de las zonas de estudio con las que se relaciona (F. Baig et al., 2022, 2023; M. R. I. Baig et al., 2021).

Con esto podemos finalizar el análisis de este producto, el cual mostró resultados pocos favorables en las distintas pruebas estadísticas independientemente de la temporalidad. Los resultados de manera general muestran que PERSIANN – CCS tiene poca o débil correlación entre las estaciones convencionales, pero dado sus resultados de BIAS presenta una tendencia sistemática a sobreestimar los valores reales, que se agrava con los rangos de error que presenta debido a que exhiben una alta variabilidad entre las mediciones reales y las inferidas.

3.4 Tendencias de precipitación

Uno de los objetivos principales de este trabajo es determinar la tendencia que presenta la precipitación en la cuenca Río Bravo – San Juan, y el implemento de los Productos de Precipitación por Satélite para ello.

Con la información obtenida, se realizaron dos análisis de tendencia de manera general, uno utilizando únicamente la información de las Estaciones Climatológicas Convencionales dónde se obtuvo la tendencia real para toda la cuenca y para cada una de las estaciones; y un segundo análisis con la información obtenida de los PPS CMORPH e IMERG, productos que presentaron los mejores resultados en el análisis del comportamiento de la información satelital.

A continuación, se exponen y discuten los resultados obtenidos.

3.4.1 Tendencia detectada según las observaciones terrenas

Para determinar y analizar las tendencias de precipitación en la cuenca Río Bravo – San Juan, se optó por plantear distintos escenarios utilizando los diversos promedios y acumulados de las Estaciones Climatológicas Convencionales (ECC).

3.4.1.1 Tendencias anuales y mensuales

Se realizó la prueba Mann – Kendall con los promedios anuales de cada año, planteándose tres escenarios:

- A. Serie Completa: abarca todos los años sin excepciones por la cantidad de información disponible.
- B. Serie Base: rechaza únicamente al año 2007 debido a la cantidad de datos nulos que presenta.
- C. Serie incompleta: rechaza los años 2007 y 2014, debido a la falta de información en ambos años.

En la Tabla 14. Promedios anuales y tendencia Mann - Kendall para las EEC, se presentan los resultados de la prueba de Mann – Kendall para cada escenario propuesto. El escenario A obtuvo el mejor resultado de tendencia, obteniendo una tendencia creciente no significativa (ver Tabla 4. Significancia y tendencia para valores de Z con alfa al 95%), el escenario C obtuvo un resultado contrario, es decir una tendencia decreciente no significativa. Sin embargo, el escenario B se presenta como “sin tendencia”, debido a que los valores de S y Z son 0. Estos resultados son congruentes si tomamos en cuenta la naturaleza de la prueba y nuestra cantidad de datos, al igual que como se mencionó en el capítulo 2.5.1 Mann – Kendall, el nivel de significancia propuesto y con el que se evaluó Z es de Alpha al 95%. Por lo que si consideramos un Alpha distinto (90% u 85%) la tendencia y su significancia cambiarían considerablemente.

Tabla 14. Promedios anuales y tendencia Mann - Kendall para las EEC

PROMEDIO ANUAL CC			
AÑO	A	B	C
2005	714.99	714.99	714.99
2006	471.94	471.94	471.94
2007	367.14	-	-
2008	735.69	735.69	735.69
2009	433.01	433.01	433.01
2010	1064.84	1064.84	1064.84
2011	308.06	308.06	308.06
2012	441.49	441.49	441.49
2013	985.60	985.60	985.60
2014	638.04	638.04	-
2015	716.34	716.34	716.34
2016	674.01	674.01	674.01
2017	630.06	630.06	630.06
2018	645.47	645.47	645.47
S	7	0	-2
Z	0.32847	0	-0.0068573
P	0.74256	1	0.954533
<i>Tendencia</i>	+	S.T	-

Observando la Figura 37. Escenarios de promedios anuales para ECC, podemos analizar los resultados de la prueba; dónde en color verde claro se representa la serie completa, es decir el escenario A, aquí se observa que después del año

2014 en la cuenca se comienza poco a poco a aumentar los promedios de precipitación anual sin tener eventos extraordinarios. Por lo que, al omitir los años 2007 y 2014 en el escenario C, observamos que el año 2013 al contar con presencia de un huracán su promedio anual es mayor a los 600 mm, por lo que, al no presentarse eventos en años posteriores, aún y que los promedios anuales estén dentro del rango normal, tal parece que la precipitación va en descenso lo que da pie a que se revierta la tendencia al momento de realizar la prueba MK a este escenario.

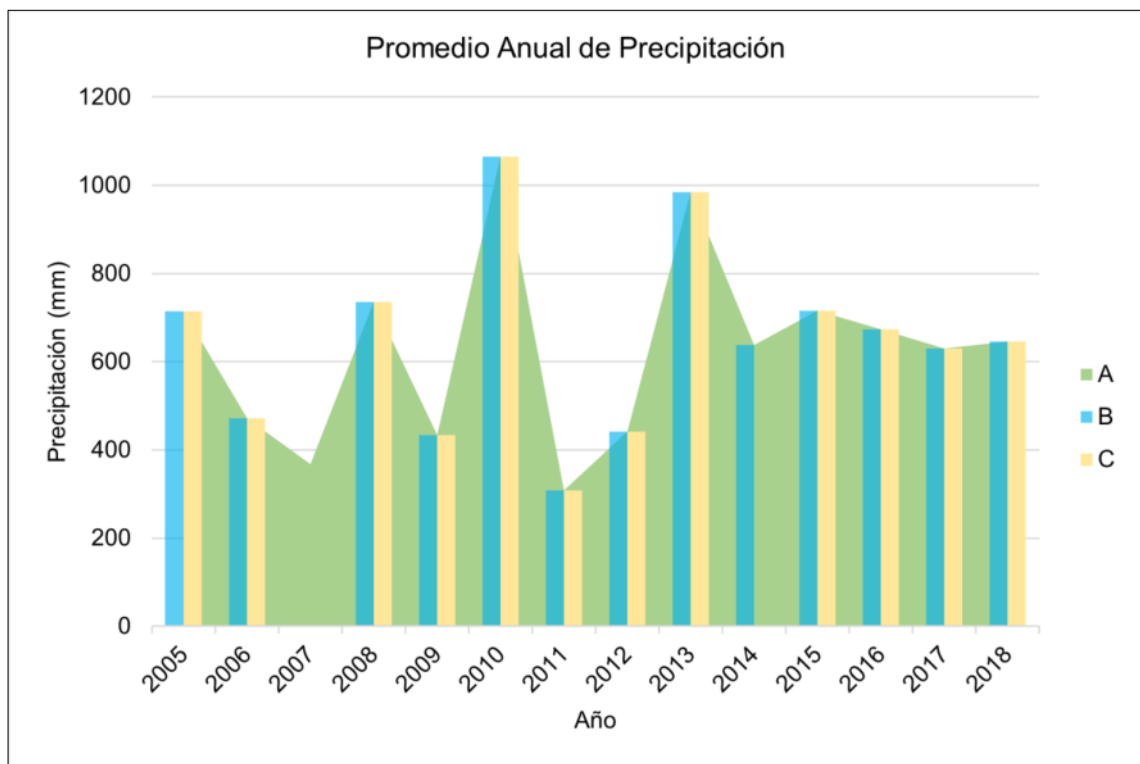


Figura 37. Escenarios de promedios anuales para ECC

En el caso del escenario B, la prueba MK determina a la serie como *sin tendencia*, lo que quiere decir que los valores de la serie no muestran una clara dirección o patrón a lo largo del tiempo o en el ordenamiento de los datos. Esto se aprecia en la Figura 37, donde si solo observamos las barras azules, los datos no parecen dirigirse o presentarnos un patrón de comportamiento claro a lo largo de los años.

Dados los resultados obtenidos, se optó por analizar también los promedios mensuales de las ECC, de manera histórica. Es decir que se analizaron dos series de datos en dos escenarios:

- D. Serie mensual completa: promedio por mes desde enero de 2005 hasta diciembre de 2018, en total 168 meses
- E. Serie mensual incompleta: promedio por mes omitiendo el año 2007, en total 156 meses.

La Figura 38. Promedios mensuales de precipitación, muestra la serie del escenario D; al observar la figura, no es posible definir a simple vista una tendencia como ocurría con los escenarios A, B y C, por lo que la prueba de Mann – Kendall es fundamental para determinar la tendencia que presenta la cuenca.

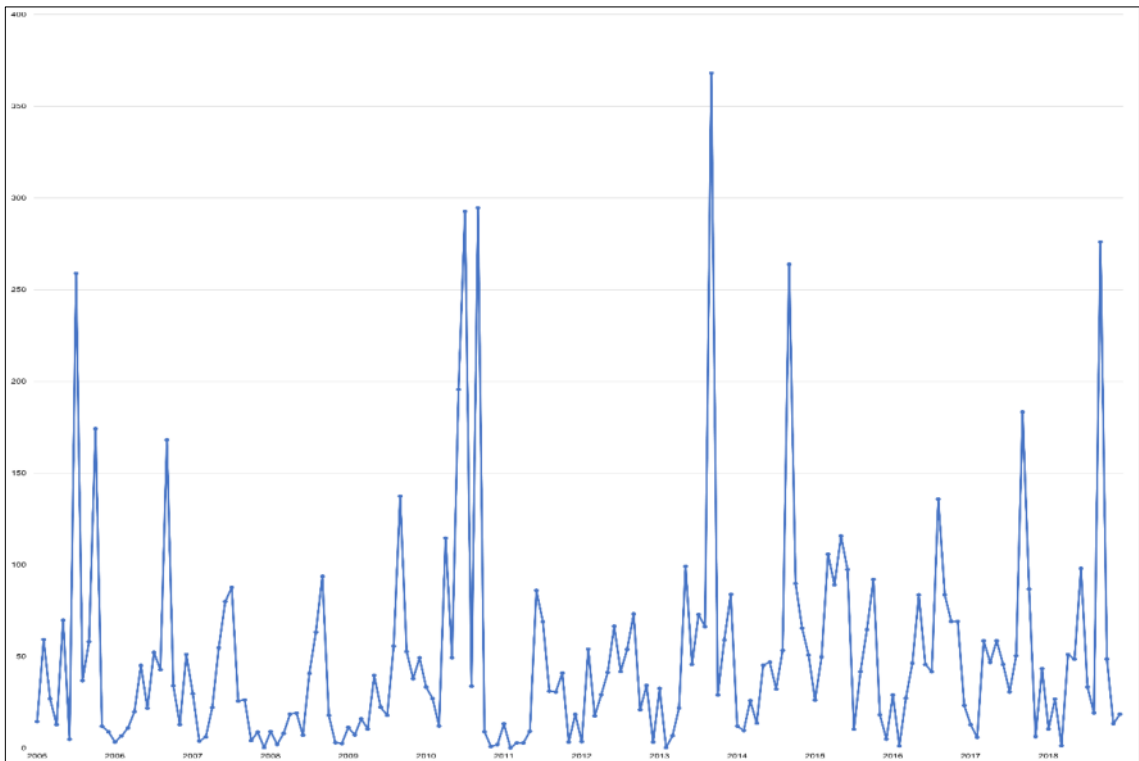


Figura 38. Promedios mensuales de precipitación

Los resultados de la prueba Mann – Kendall se presentan en la Tabla 15. Resultados de tendencia mensual por Man - Kendall, donde se observa que no hay diferencia significativa entre los resultados de cada escenario. Al observar

los resultados, podemos determinar que ambos escenarios obtuvieron una *tendencia creciente significativa*, debido a los valores de Z obtenidos y analizados bajo los criterios de la Tabla 4. Significancia y tendencia para valores de Z con alfa al 95%.

Tabla 15. Resultados de tendencia mensual por Man - Kendall

	S	Z	P	Tendencia
D	1866	2.55	0.01	+
E	1526	2.34	0.02	+

Si observamos detenidamente la Figura 38 podemos notar que los picos mayores a 50 mm de precipitación van aumentando con el tiempo; dado que el año 2007 no presenta picos que excedan este valor su ausencia en la serie en el escenario E no impacta de manera considerable, lo que indica que la tendencia es fuerte y persistente a lo largo del tiempo. Sin embargo, esto no ocurriría en un escenario donde se omitieran el 2007 y el 2014 (como en el escenario C), ya que si observamos nuevamente la Figura 38 hay 27 meses con promedios mayores a 50 mm de los cuales 7 son mayores a los 100 mm sin ocurrencia de eventos extraordinarios, lo cual afecta considerablemente a la tendencia y puede estar determinando el que sea significativa.

Con esto, podemos definir que la cuenca Río Bravo – San Juan presenta una tendencia anual creciente no significativa y una tendencia mensual creciente significativa para el periodo de estudio que abarca de 2005 a 2018.

3.4.1.2 Tendencias mensuales y anuales por estación.

Como se ha mencionado anteriormente, la cuenca en estudio posee diferentes condiciones fisiográficas y asentamientos humanos que afectan el comportamiento de las precipitaciones. Debido a esto, el análisis de las tendencias en la cuenca se realizó también a cada una de las estaciones climatológicas de manera mensual y anual.

Como se observó en la Figura 14. Acumulados Anuales de Precipitación por año y la Figura 10. Acumulados anuales por estación climatológica, los patrones de

precipitación han cambiado con el tiempo, y una forma de determinar hacia dónde va el cambio es implementando las pruebas de tendencia. En la Figura 39. Tendencia Mann - Kendall mensual por estación, podemos observar las tendencias encontradas en la cuenca. Todas las estaciones a excepción de la estación Agua Blanca exhiben una tendencia creciente, de las cuales 13 de ellas son crecientes significativa.

Las estaciones que exhiben una tendencia creciente significativa comparten una o varias características fisiográficas como el clima (semicálido), elevaciones (200 500 m.s.n.m.), o zona (montañosa, plana sur, plana este). Las estaciones Mimbres y Potrero de Abrego, obtuvieron los valores de Z más altos mayores 3.0.

La estación Agua blanca que es la única que presenta una tendencia decreciente no significativa; se localiza a 2,193 m.s.n.m. en clima templado y pertenece a la zona montañosa (ver Tabla 8 y Figura 13). Este resultado nos indica que la disminución de la precipitación con respecto al tiempo no es suficientemente fuerte para que sea significativo, y esto puede deberse a la variabilidad propia de los datos de precipitación. Es decir que las precipitaciones en la que se ubica esta estación están presentando variabilidad constante que apunta a la disminución de las precipitaciones con respecto al tiempo. Sin embargo, las estaciones más próximas a esta, presentaron tendencias crecientes igualmente no significativas, lo que nos indica lo contrario en el aspecto de la precipitación, pero lo mismo en cuanto a la variabilidad.

De manera que si analizamos los patrones de las tendencias presentadas en la Figura 39, podemos determinar que las Zonas Áridas, Norte, Centro, y parte de las zonas Plana Este y Plana Sur, presentan un alza en cuanto a los acumulados mensuales de precipitación, pero una variabilidad de eventos con respecto al tiempo. Esto puede deberse a distintos factores, por ejemplo, el aumento de las urbanizaciones en las zonas centro y plana sur. También, como se comentó anteriormente la Zona Árida mostró en la Figura 14. Acumulados Anuales de Precipitación por año, que se estaba volviendo más seca, si bien la prueba de

tendencia dice lo contrario, la variabilidad de los eventos influye considerablemente.

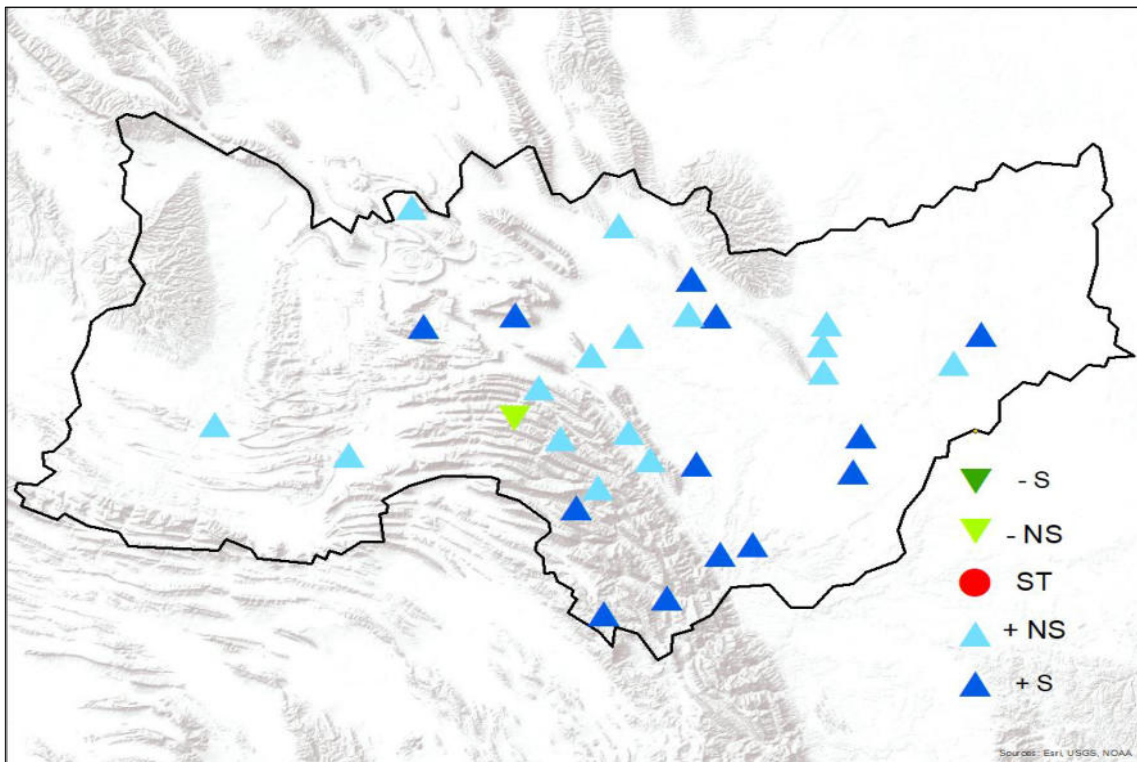


Figura 39. Tendencia Mann - Kendall mensual por estación (dónde ST es sin tendencia, S es significativo, NS es no significativo, los signos determinan si la tendencia es creciente (+) o decreciente (-))

Los resultados de la prueba Mann – Kendall de los AAE se muestran en la Figura 40, donde vemos un cambio considerable en los resultados con respecto a los obtenidos de manera mensual. A primera instancia observamos que dos estaciones no presentan tendencia (Los Ramones y Las Enramadas), a su vez es claro que ninguna tendencia en la cuenca es significativa, independientemente si son crecientes o decrecientes.

De 30 estaciones, 11 obtuvieron tendencias decrecientes y 17 tendencias crecientes. Esto revierte lo encontrado a nivel mensual, ya que 8 estaciones que habían mostrado tendencia creciente no significativa, en este análisis presentan tendencias decrecientes. Las estaciones que presentan una tendencia decreciente se localizan principalmente en las Zonas Montañosa, Plana Sur, y

Centro, y casos aislados en la Zona Árida en estación Saltillo y Plana Este en las estaciones Garza González y El Cuchillo.

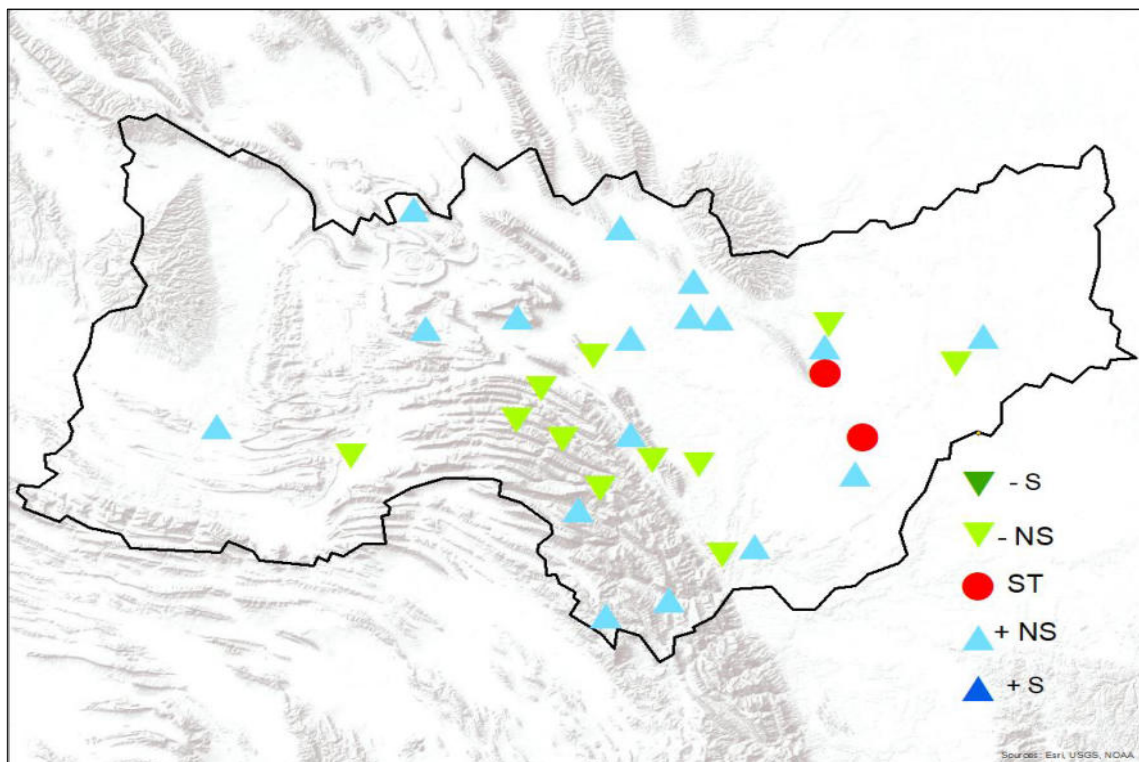


Figura 40. Tendencia Mann - Kendall anual por estación

El que ninguna tendencia sea significativa en este análisis retoma el problema de la variabilidad, si recordamos la Figura 10 y la Figura 37, ambas muestran como los acumulados y promedios de precipitación anuales no son consistentes. La fluctuación o variabilidad de los datos es notoria debido a los eventos extraordinarios presentes en la serie de tiempo. Otra causa para este resultado es la cantidad de datos en la serie de tiempo ($n=14$), si bien la prueba se recomienda para series mayores a 10 datos, es preferible contar con series más amplias. Por lo que, para tener un mejor panorama anual (por estación o cuenca) es preferible contar con una serie mayor, algunos autores recomiendan y utilizan series de 30 años de datos anuales o mensuales (Behzadi et al., 2020; Mallick et al., 2021; Mirdashtvan et al., 2020; Paul et al., 2017).

La tendencia encontrada en la cuenca es similar a la encontrada en otros estudios en México para otras cuencas y regiones dentro del territorio mexicano (García Ramírez et al., 2014; Martínez Austria & Irula Lutzow, 2016; Méndez González et al., 2008), así como con los reportes de CONAGUA (Comisión Nacional del Agua et al., 2022; Comisión Nacional del Agua & Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2021), quienes indican que las regiones al noroeste del país cuentan con tendencias crecientes de precipitación en un 2% (Núñez-González, 2020).

Estudios en regiones o cuencas semiáridas y/o montañosas como el de Mirdashtvan et al., (2020) quienes obtuvieron que las estaciones en su cuenca presentan tendencias no significativas (crecientes o decrecientes), resultados similares a los de este estudio, y afirman que no puede asociar estos resultados a un patrón fisiográfico específico. Por otro lado da Silva et al., (2015), comentan que las variaciones de 100 mm de precipitación son importantes en las regiones semiáridas donde esta variación puede repercutir en zonas de cosecha; además al obtener en una misma cuenca tendencias crecientes y decrecientes indica principalmente la presencia alternada de períodos lluviosos y secos en la región.

Es importante determinar si las tendencias encontradas están teniendo impacto, si es así, determinar el tipo de impacto (local o regional), y si no, prever el tipo de impacto que generarían (Rocha-Escalante et al., 2022).

Autores que han realizado diversas investigaciones sobre las tendencias de precipitación en México (Alvarez-Olguin & Escalante-Sandoval, 2017; Arriaga-Ramrez & Cavazos, 2010; Campos Aranda, 2015; Martínez Austria & Irula Lutzow, 2016; Méndez González et al., 2008; Mendoza Uribe, 2021; Ruiz-Alvarez et al., 2020), han encontrado que las tendencias fuera de ser crecientes o decrecientes, la mayoría presentan ser no significativas, lo que nos indica la presencia de variabilidad, es decir que los periodos de precipitaciones no han sido constantes lo suficiente para determinar si son significativas. Esto se encontrado tanto en periodos de estudio mayores a 30 años (series largas) (Campos Aranda, 2015; Martínez Austria & Irula Lutzow, 2016; Méndez González

et al., 2008; Mendoza Uribe, 2021) como en estudios con periodos cortos (menores a 30 años) (Morales-Velázquez et al., 2021), esta independencia entre la variabilidad y los periodos de estudio puede estar indicando que la variabilidad climática puede estar influenciada por el cambio climático.

3.4.2 El uso de PPS para detectar tendencias

Para cumplir con uno de los objetivos de esta investigación, se utilizaron los datos de dos productos de precipitación por satélite para determinar las tendencias y el funcionamiento de los productos de manera aplicada. Para ello, los productos elegidos fueron IMERG y CMORPH, debido a los resultados favorables obtenidos en las distintas pruebas y temporalidades.

Las pruebas de tendencia se generaron únicamente por observación en temporalidades anual y mensual, omitiendo el análisis por estación. De este modo tenemos resultados de una serie de 14 años y de una serie 168 meses.

Los resultados anuales se muestran en la *Tabla 16. Tendencia de Mann - Kendall anual por observación*, dónde CMORPH muestra una tendencia creciente significativa, resultado similar al obtenido por las ECC. Por otro lado, IMERG obtuvo que no hay una tendencia en la cuenca de estudio. Estos resultados son esperados dado los resultados de las pruebas anteriores, donde indican la subestimación de IMERG y el buen comportamiento de CMORPH, este último tiende a inferir con menor diferencia y mayor correlación los datos de precipitación por lo que es de esperarse que la tendencia de los datos sea muy parecida a la obtenida con los datos reales. Por otro lado, IMERG a pesar de estar bien correlacionado tiende a la subestimación, sumado a la variabilidad propia del algoritmo de recuperación es de esperar que ambos factores se fusionen para obtener el resultado de la *Tabla 16*.

Tabla 16. Tendencia de Mann - Kendall anual por observación

	S	Z	P	Tendencia
<i>ECC</i>	7	0.33	0.74	+
<i>CMORPH</i>	14	0.71	0.48	+
<i>IMERG</i>	1	0	1	S.T.

Analizando ahora los resultados de la tendencia mensual de la Tabla 17, podemos observar que ahora ambos productos muestran resultados un poco diferentes a los reales. Ambos PPS obtuvieron tendencias crecientes no significativas, a diferencia de las Estaciones Climatológicas Convencionales que muestran una tendencia creciente significativa. Esto nos dice que los datos por satélite están mostrando variabilidad en sus series, misma que se deriva directamente del comportamiento del producto y no propiamente de la precipitación.

Tabla 17. Tendencia Mann - Kendall mensual por observación

	S	Z	P	Tendencia
<i>ECC</i>	1866	2.55	0.01	+
<i>CMORPH</i>	606	0.82	0.40	+
<i>IMERG</i>	908	1.24	0.21	+

El uso de los Productos de Precipitación por Satélite ha ido aumentando con el tiempo con enfoques globales, continentales o regionales (Görner et al., 2012; Gunathilake et al., 2021; Hussein et al., 2021; Kazemzadeh et al., 2021; Morales-Acuña et al., 2021; Morales-Velázquez et al., 2021).

En su trabajo Hussein et al., (2021), utilizaron tanto IMERG como CMORPH para detectar tendencias e identificar el comportamiento de los PPS, en su caso el comportamiento de los productos fue contraria a lo encontrado en este trabajo; sin embargo, es notable que el producto que tenga mejor correlación y rangos bajos de error, aunque tienda al sesgo, es el producto que mejor comportamiento tendrá en la zona de estudio al momento de aplicarse.

Otros autores (Abdollahipour et al., 2021; Görner et al., 2012; Kimani et al., 2017; Tam et al., 2019) concluyen que, aunque las correlaciones sean buenas y existan

BIAS bajos, es necesario aplicar correcciones regionales que ayuden a reducir los errores sistemáticos como la identificación de eventos cortos pero intensos antes de utilizar los Productos de Precipitación por Satélite.

Debido al comportamiento mostrado en este análisis, se propone y recomienda utilizar el producto CMORPH como un complemento para análisis hidrológicos en la cuenca Río Bravo – San Juan.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se abordan las conclusiones generales y específicas de esta investigación abordando el alcance y cumplimiento de los objetivos e hipótesis planteados.

4.1 Conclusión General

En este trabajo se realizaron dos análisis importantes para la cuenca Río Bravo – San Juan. El primero orientado en la valoración de tres Productos de Precipitación Por Satélite y la determinación del óptimo para la cuenca. Y el segundo, enfocado en la determinación de la tendencia de precipitación en la cuenca con base en la información de climatología diaria de CONAGUA.

El primer análisis exploró el comportamiento sistemático de los datos de precipitación obtenidas por los PPS, en ello se encontró que dos de los tres productos propuestos: IMERG y CMORPH muestran correlación óptima con la información terrena, y el tercero, PERSIANN – CCS mostró bajo rendimiento que imposibilita su uso. De manera general, los PPS muestran ser un complemento aceptable para los estudios hidrológicos dentro de la región, pero requieren comprobación en análisis específicos para determinar su funcionalidad. De manera puntual, al comprobar la trabajabilidad de los productos planteados en este estudio en las pruebas de tendencia, se obtuvo que el producto CMORPH mostró un comportamiento similar al de las observaciones convencionales, lo que nos indica una buena funcionalidad de este producto para este tipo de análisis. Debido a esto, fue posible cumplir con los dos objetivos, la valoración del comportamiento de los productos y determinar el producto con mejor el rendimiento en la cuenca para su uso en estudios futuros; este producto es el: “Climate Prediction Center (CPC) Morphing Technique (MORPH): CMORPH” en su versión V1.0 0.25° daily”.

El análisis de las tendencias determinó que la cuenca cuenta con una tendencia creciente significativa de manera mensual, lo que indica que los acumulados mensuales están presentando un aumento de precipitación hasta el año 2018. De manera anual, la tendencia obtenida fue creciente no significativa, debido a la variabilidad de los acumulados anuales que deriva de los diversos eventos extraordinarios ocurridos a lo largo de la serie. La serie de tiempo abarca únicamente 14 años, por lo que la significancia de la tendencia podría cambiar al ampliar el rango de años del periodo de estudio. Así mismo, se detectaron las tendencias que presentan las estaciones climatológicas, este análisis mostro que el 57% de la cuenca presenta una tendencia creciente no significativa. De manera espacial, esta tendencia está presente en la mayoría de la cuenca exceptuando las zonas montañosa y centro, dadas las condiciones hidrográficas de la cuenca, es de suma importancia ahondar en el comportamiento de las precipitaciones en la zona montañosa donde ocurre mayormente la recarga de la cuenca.

Con esto se confirma la hipótesis planteada, los Productos de Precipitación Por Satélite basados en sensores remotos son un complemento adecuado para su aplicación en pruebas de tendencia y en posibles estudios posteriores de carácter hidrológico dentro de los límites de la cuenca Río Bravo – San Juan.

4.2 Conclusiones de los Productos de Precipitación Por Satélite

Derivado del análisis de resultados para cada uno de los productos evaluados se concluye lo siguiente:

La obtención de la información de precipitación no presentó problemas, cada uno de los productos son de acceso gratuito y sencillos de obtener. La recuperación de la información de precipitación se complica en función del tipo de archivo seleccionado; dado que CMORPH fue el producto con mejor rendimiento, se recomienda el uso de archivos binarios y su obtención mediante códigos de extracción utilizando un software de programación (ejemplos). Sin embargo, de

encontrar una forma de obtener mediante SIGs la información en formato NetCDF, es posible que se aplique el mismo método de extracción por coordenadas y píxeles utilizado para PERSIANN – CCS e IMERG.

El producto PERSIANN – CCS en su presentación de acumulado diario, obtuvo el rendimiento más bajo, presentando sobrestimaciones y errores altos con bajas correlaciones en las diversas temporalidades y zonas dentro de la cuenca. Si bien durante los análisis por estación hubo estaciones con buenos resultados estos no fueron consistentes, por lo que en conjunto esto se traduce a problemas de variabilidad, baja asociación a las observaciones terrestres y aumento en los valores captados. Este comportamiento se deriva de problemas sistemáticos del producto y el sistema de recuperación del algoritmo, y no de un problema regional dada la ocurrencia de resultados similares en otras regiones del mundo y en productos de la familia PERSIANN.

El producto IMERG en versión “Final daily 0.1°” presenta buenas correlaciones con los datos terrenos, sin embargo, sus resultados de error y sesgo muestran subestimaciones considerables en cada una de las temporalidades analizadas, lo que demuestra una subestimación de los valores reales con variabilidad sistemática en las mediciones individuales del producto. Principalmente, IMERG mostró debilidad en la captura de precipitaciones en los meses secos, donde las precipitaciones son de corta duración y esporádicas. Sin embargo, a pesar de contar con altas correlaciones para los meses con alta presencia de precipitaciones, las subestimaciones en estos meses fueron considerables. Por lo que el funcionamiento en la región de este producto no fue óptimo.

Por último, el producto CMORPH V1.0 0.25° daily, a pesar de presentar problemas de trabajabilidad con los archivos NetCDF, el formato binario obtuvo excelente trabajabilidad para la obtención puntal de los datos de precipitación. En sus resultados obtuvo los mejores rendimientos de manera temporal y espacial. A pesar de no mostrar correlaciones excelentes (mayores a 0.9), el producto está suficientemente bien correlacionado. Además, sus rangos de error fueron los resultados más bajos encontrados en todas temporalidades. Aunque

en algunos casos el producto mostró subestimaciones o sobreestimaciones, estas fueron bajas y no perjudiciales de manera significativa; y se encontró que están relacionadas a factores fisiográficos que pueden disminuir mediante la calibración y validación en la modelación hidrológica. Por lo tanto, se considera que este es el producto ideal para utilizarse dentro de la cuenca Río Bravo – San Juan.

Con el análisis realizado a la información por satélite se llegaron a las siguientes conclusiones puntuales referente a su rendimiento en la cuenca de estudio:

1. Los archivos NetCDF presentan problemas de trabajabilidad en QGIS y ArcGIS por lo que se recomienda utilizar otros archivos o utilizar otros programas de manejo SIG.
2. La correlación entre las observaciones no determina en su totalidad el comportamiento de los productos por lo que es necesario apoyarse de otras pruebas como error, sesgo, variabilidad, homogeneidad entre otras.
3. La sensibilidad de la recuperación de información de los algoritmos de cada producto tiene gran influencia, por lo que aquellos que captan precipitaciones menores al milímetro o a un decimal, obtendrán una mejor correlación.
4. El desfase de horas entre los productos de precipitación y las estaciones climatológicas genera problemas de variabilidad que se ven reflejados en las pruebas de error y sesgo.
5. El producto IMERG “Final V6 Daily 0.1°”, no presenta de manera general buen rendimiento dentro de la cuenca, por lo que se descarta como producto complementario principal, aunque con posibilidad de mejora en versiones futuras.
6. El producto PERSIANN – CCS queda descartado como un producto de precipitación por satélite viable para utilizarse en proyectos futuros dentro de la cuenca Río Bravo – San Juan.
7. Debido al buen rendimiento del producto CMORPH V1.0 0.25° daily, este se propone como complemento de información de precipitación para

estudios hidrológicos dentro de los límites de la cuenca Río Bravo – San Juan.

4.3 Conclusiones de la Tendencia de Precipitación

De acuerdo con los resultados obtenidos con respecto al análisis de tendencia, podemos concluir lo siguiente:

Se encontraron dos tendencias en la cuenca de estudio, ambas tendencias son crecientes, sin embargo, una es significativa (mensual) y otra no significativa (anual). Esto significa que de manera mensual la precipitación va aumentando hasta el año 2018, sin variabilidad o cambios abruptos. Sin embargo, de manera anual, el que la tendencia sea no significativa hasta el año 2018 nos indica que hay eventos de variabilidad en los datos, esto asociado los eventos extraordinarios y los años de sequía.

De manera espacial las tendencias en la cuenca son en su mayoría crecientes un 57% de manera anual y un 99% de manera mensual. El análisis anual mostró que las zonas más susceptibles son las zonas Centro y Montañosa debido a las tendencias decrecientes. Esto nos indica que la precipitación en estas zonas está fluctuando y mostrando variabilidad, esto puede asociarse al incremento de las zonas urbanas en la zona Centro, la cual ha ido expandiéndose hacia la zona Plana Sur que puede empezar a presentar tendencias decrecientes en los próximos años. Es de suma importancia determinar qué factores están afectando a las precipitaciones de la zona Montañosa, principalmente esta zona puede estar siendo afectada por el cambio climático, pero es necesario un estudio específico que lo determine.

Por lo que se puede concluir que la cuenca Río Bravo – San Juan, posee una tendencia creciente mayormente no significativa, con riesgos de presentar una tendencia decreciente en los próximos años debido a patrones encontrados en la cuenca.

Con el análisis realizado a la información de precipitación se llegaron a las siguientes conclusiones puntuales referente a las tendencias encontradas en la cuenca de estudio:

1. La zona montañosa y la zona centro de la cuenca presentan una tendencia decreciente no significativa y se consideran zonas de suma importancia y en riesgo.
2. Las zonas vulnerables que se encuentran con tendencias decrecientes “no significativas” deben de estudiarse a fondo, dado que pueden cambiar en los próximos años proyectándose hacia una tendencia decreciente significativa.
3. Al encontrar que las tendencias son “no significativas”, nos indica que hay una variabilidad en los datos de acumulados o promedios.
4. Los resultados concuerdan con otros estudios de la misma índole en regiones similares en el territorio nacional.
5. La zona alrededor de la presa “El Cuchillo” mostró ser sin tendencia, lo que indica que no hay información suficiente que ayude a detectar el patrón del comportamiento de la serie.

4.4 Limitaciones, Recomendaciones y Futuras Áreas de Estudio

El presente trabajo evaluó de forma estadística y sistemática el comportamiento de tres productos de precipitación por satélite en distintos formatos y resoluciones bajo un mismo tipo de acumulado de precipitación; así como, únicamente se exploró su rendimiento en una prueba de tendencia de Mann – Kendall. A su vez, se realizó con la misma prueba, el análisis de tendencia para cuenca Río Bravo – San Juan de forma temporal y espacial.

Las limitaciones de este estudio están asociadas a los años de estudio evaluados, debido a que se seleccionaron los años con información de acceso libre disponibles para los productos IMERG, CMORPH y PERSIANN – CCS y para los datos de climatología diaria que proporciona el organismo CONAGUA. Debido a esto se recomienda ampliar los años de estudio, sobre todo con el producto CMORPH, y solicitar al organismo CONAGUA la información

climatológica para los años posteriores al año 2018 mediante el proceso adecuado.

Siguiendo con esta misma línea, la limitante de los acumulados diarios en zonas horarias diferentes entre los PPS y las estaciones climatológicas mostró tener afectaciones en las pruebas realizadas. Por lo que se recomienda analizar los productos con acumulados menores a un día para determinar el tamaño de la afectación de las diferencias horarias.

Otra de las limitaciones fue que las tendencias únicamente fueron obtenidas mediante una sola prueba o un solo tipo de análisis, por lo que es necesario complementarlo con otras pruebas para tener un panorama más claro. Se recomienda que se utilicen pruebas como la Pendiente de Sen o los análisis de Índice Estandarizado de Precipitación que ayudan a determinar condiciones específicas de la precipitación y sus tendencias en la cuenca.

Este estudio pretende ser un punto de partida hacia el uso y análisis de los Productos de Precipitación por Satélite en la región. Por lo que sería ideal poner a prueba los productos en otro tipo de análisis hidrológicos como modelaciones, proyección de curvas Intensidad, Duración y Frecuencia, hidrogramas y hietogramas, así como el rendimiento específico de los PPS en eventos extraordinarios. Esto no solo con el fin de poner a prueba el rendimiento de los productos si no también para encontrar el complemento ideal para la información terrena que ayude a comprender mejor el estado en él se encuentran nuestros recursos hídricos y como proyectarlos al futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdollahipour, A., Ahmadi, H., & Aminnejad, B. (2021). Evaluating the hydrological utility of satellite-based rainfall products using neural network models over the ghare ghieh river basin, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 3018–3044. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.050>
- Ahmad, I., Tang, D., Wang, T., Wang, M., & Wagan, B. (2015). *Precipitation Trends over Time Using Mann-Kendall and Spearman's rho Tests in Swat River Basin, Pakistan*. <https://doi.org/10.1155/2015/431860>
- Alsumaiti, T. S., Hussein, K., Ghebreyesus, D. T., & Sharif, H. O. (2020). Performance of the CMORPH and GPM IMERG Products over the United Arab Emirates. *Remote Sensing*, 12(9), 1426. <https://doi.org/10.3390/rs12091426>
- Alvarez-Olguin, G., & Escalante-Sandoval, C. (2017). Modes of Variability of Annual and Seasonal Rainfall in Mexico. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 144–157. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12488>
- Anjum, M. N., Irfan, M., Waseem, M., Leta, M. K., Niazi, U. M., Rahman, S. U., Ghanim, A., Mukhtar, M. A., & Nadeem, M. U. (2022). Assessment of PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR, SM2RAIN-ASCAT, and CHIRPS-2.0 Rainfall Products over a Semi-Arid Subtropical Climatic Region. *Water (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/w14020147>
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *FUNDAMENTOS DE HIDROLOGIA DE SUPERFICIE* (1era ed., Vol. 1). Editorial Limusa.
- Arriaga-Ramrez, S., & Cavazos, T. (2010). Regional trends of daily precipitation indices in northwest Mexico and southwest United States. *Journal of*

- Baig, F., Abrar, M., Chen, H., & Sherif, M. (2022). Rainfall Consistency, Variability, and Concentration over the UAE: Satellite Precipitation Products vs. Rain Gauge Observations. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 5827, 14(22)*, 5827. <https://doi.org/10.3390/RS14225827>
- Baig, F., Abrar, M., Chen, H., & Sherif, M. (2023). Evaluation of Precipitation Estimates from Remote Sensing and Artificial Neural Network Based Products (PERSIANN) Family in an Arid Region. *Remote Sensing*, 15(4), 1078. <https://doi.org/10.3390/rs15041078>
- Baig, M. R. I., Shahfahad, Naikoo, M. W., Ansari, A. H., Ahmad, S., & Rahman, A. (2021). Spatio-temporal analysis of precipitation pattern and trend using standardized precipitation index and Mann–Kendall test in coastal Andhra Pradesh. *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01262-w>
- Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dee, D., Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Pappenberger, F., de Rosnay, P., Stockdale, T., & Vitart, F. (2015). ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 389–407. <https://doi.org/10.5194/hess-19-389-2015>
- Beck, H. E., Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., van Dijk, A. I. J. M., Weedon, G. P., Brocca, L., Pappenberger, F., Huffman, G. J., & Wood, E. F. (2017). Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6201–6217. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6201-2017>
- Behzadi, F., Wasti, A., Haque Rahat, S., Tracy, J. N., & Ray, P. A. (2020). Analysis of the climate change signal in Mexico City given disagreeing data sources

and scattered projections. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2019.100662>

Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Soci, C., Villaume, S., Bidlot, J. R., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., & Thépaut, J. N. (2021). The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186–4227. <https://doi.org/10.1002/QJ.4174>

Benavides, H. (2022, February 12). La sequía, esa vieja conocida de Nuevo León... *MILENIO*. <https://www.milenio.com/politica/la-sequia-esa-vieja-conocida-de-nuevo-leon>

Bian, G., Wang, G., Chen, J., Zhang, J., & Song, M. (2021). Spatial and seasonal variations of hydrological responses to climate and land-use changes in a highly urbanized basin of Southeastern China. *Hydrology Research*, 52(2), 506–522. <https://doi.org/10.2166/nh.2021.087>

Bruster-Flores, J. L., Ortiz-Gómez, R., Ferriño-Fierro, A. L., Guerra-Cobián, V. H., Burgos-Flores, D., & Lizárraga-Mendiola, L. G. (2019). Evaluation of precipitation estimates CMORPH-CRT on regions of Mexico with different climates. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081722>

Campos Aranda, F. D. (2015). Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(3), 355–368. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.008>

CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations | Climate Hazards Center - UC Santa Barbara. (n.d.). Retrieved June 18, 2023, from <https://chc.ucsb.edu/data/chirps>

- CNA, SMN, CG, GMC, & SMAA. (2020). Climatología Diaria. In *Información Estadística Climatológica: BASE DE DATOS CLIMATOLOGICA*. CONAGUA-DGE. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Diarios/>
- Comisión Nacional del Agua (CNA), & CONABIO. (1998). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad [15,813] - CONABIO*. Cuencas Hidrológicas (CNA). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Comisión Nacional del Agua, & Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2021). *Reporte del Clima en México: Reporte Anual 2020*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2020.pdf>
- Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional, & Secretaría del Medio Ambiente. (2022). *Reporte del Clima en México: Reporte Anual 2021*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reportes-del-clima-en-mexico>
- da Silva, R. M., Santos, C. A. G., Moreira, M., Corte-Real, J., Silva, V. C. L., & Medeiros, I. C. (2015). Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen’s slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. *Natural Hazards*, 77(2), 1205–1221. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1644-7>
- Degefu, M. A., Bewket, W., & Amha, Y. (2022). Evaluating performance of 20 global and quasi-global precipitation products in representing drought events in Ethiopia I: Visual and correlation analysis. *Weather and Climate Extremes*, 35, 100416. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100416>
- Del Valle, U., Castro, C., & Carvajal Escobar, L. M.; (2010). ANÁLISIS DE TENDENCIA Y HOMOGENEIDAD DE SERIES CLIMATOLÓGICAS. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, (9), 15–25. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116434002>

- Dezfooli, D., Abdollahi, B., Hosseini-Moghari, S. M., & Ebrahimi, K. (2018). A comparison between high-resolution satellite precipitation estimates and gauge measured data: Case study of gorganrood basin, Iran. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 67(3), 236–251. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.062>
- Dinku, T., Funk, C., Peterson, P., Maidment, R., Tadesse, T., Gadain, H., & Ceccato, P. (2018). Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 292–312. <https://doi.org/10.1002/qj.3244>
- Duan, Z., Liu, J., Tuo, Y., Chiogna, G., & Disse, M. (2016). Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. *Science of The Total Environment*, 573, 1536–1553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.213>
- Duarte, L. V., Formiga, K. T. M., & Costa, V. A. F. (2022). Analysis of the IMERG-GPM Precipitation Product Analysis in Brazilian Midwestern Basins Considering Different Time and Spatial Scales. *Water* 2022, Vol. 14, Page 2472, 14(16), 2472. <https://doi.org/10.3390/W14162472>
- Esparza - Hernandez, L. G., Valdés - Lozano, C. G. S., Cantú - Martínez, P. C., & de la Mora, G. (2014). HISTORIA DE LAS CRISIS DEL AGUA EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY (AMM), PREVIA A LA LLEGADA DE LAS GRANDES REPRESAS (1597-1955). *Ciencia UANL*, 17(67), 37–51. <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=1716>
- García Ramírez, E. I., Aguiar García, P., & Toledo Ramírez, V. M. (2014). Estudio retrospectivo para mostrar la tendencia de la precipitación pluvial en la región.... *Ateliê Geográfico -Goiânia-GO*, 8(3), 06–21. <http://www.revistas.ufg.br/index.php/atelie>

- GES DISC Dataset: TRMM (TMPA) Precipitation L3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree V7 (TRMM_3B42_Daily 7)*. (n.d.). Retrieved June 18, 2023, from https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_Daily_7/summary
- Görner, C., Kronenberg, R., & Bernhofer, C. (2012). Applicability of satellite-based rainfall algorithms for estimating flood-related rainfall events in the mid-latitudes. Part II: Temporal integration. *Journal of Flood Risk Management*, 5(2), 175–186. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2012.01138.x>
- Guerra Cobián, V. H. (2015). *Construcción de curvas de Intensidad-Duración-Período de retorno a partir de lluvias máximas*. Facultad de Ingeniería Civil, UANL.
- Gunathilake, M. B., Zamri, M. N. M., Alagiyawanna, T. P., Samarasinghe, J. T., Baddewela, P. K., Babel, M. S., Jha, M. K., & Rathnayake, U. S. (2021). Hydrologic Utility of Satellite-Based and Gauge-Based Gridded Precipitation Products in the Huai Bang Sai Watershed of Northeastern Thailand. *Hydrology* 2021, Vol. 8, Page 165, 8(4), 165. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY8040165>
- Haan, C. T. (1979). *Statistical Methods in Hydrology* (2nd ed.). The Iowa State University Press Ames.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). *Past 4 - the Past of the Future* (4.12). Natural History Museum – University of Oslo. <https://www.nhm.uio.no/english/research/resources/past/>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/QJ.3803>

- Hong, Y., Gochis, D., Cheng, J., Hsu, K., & Sorooshian, S. (2007). Evaluation of PERSIANN-CCS Rainfall Measurement Using the NAME Event Rain Gauge Network. *Journal of Hydrometeorology*, 8(3), 469–482. <https://doi.org/10.1175/JHM574.1>
- Hong, Y., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., & Gao, X. (2004). Precipitation Estimation from Remotely Sensed Imagery Using an Artificial Neural Network Cloud Classification System. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY*, 43, 1834–1852.
- Hu, M., Sayama, T., Try, S., Takara, K., & Tanaka, K. (2019). Trend Analysis of Hydroclimatic Variables in the Kamo River Basin, Japan. *Water 2019, Vol. 11, Page 1782, 11(9)*, 1782. <https://doi.org/10.3390/W11091782>
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2010). The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*, 3–22. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., & Tan, J. (2020). *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation*. <https://gpm.nasa.gov/resources/documents/IMERG-V06-Technical-Documentation>
- Huffman, G. J., Stocker, E. F., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Tan, J., & NASA. (2019). Final IMERG 24-hour Precipitation Estimate on Global 0.1 x 0.1 Degree Grid Stored in the GeoTIFF Format V06. In *Precipitation Processing System (PPS)* (pp. 2005–2018). Precipitation Processing System (PPS). <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/06>
- Hussein, K. A., Alsumaiti, T. S., Ghebreyesus, D. T., Sharif, H. O., & Abdalati, W. (2021). High-Resolution Spatiotemporal Trend Analysis of Precipitation Using Satellite-Based Products over the United Arab Emirates. *Water 2021, Vol. 13, Page 2376, 13(17)*, 2376. <https://doi.org/10.3390/W13172376>

INEGI. (2021a). CLIMAS. In *Datos del mapa raster de climas (1950-200)*. INEGI.
www.cuentame.inegi.org.mx

INEGI. (2021b). *Diccionario de datos de climas*. www.inegi.org.mx

INEGI. (2022a). *Coahuila de Zaragoza: Clima*. Cuéntame INEGI.
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/coah/territorio/clima.aspx?tema=me&e=05>

INEGI. (2022b). *Nuevo León: Clima*. Cuéntame INEGI.
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nl/territorio/clima.aspx?tema=me&e=19>

INEGI. (2022c). *Tamaulipas: Clima*. Cuéntame Inegi.
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tam/territorio/clima.aspx?tema=me&e=28>

INEGI. (2023). *Censo de Población y Vivienda (2020)*. <https://censo2020.mx>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2019, July). *La importancia de la medición del agua de lluvia | Instituto Mexicano de Tecnología del Agua | Gobierno | gov.mx*. <https://www.gob.mx/imta/articulos/la-importancia-de-la-medicion-del-agua-de-lluvia>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Instituto Nacional de Ecología (INE), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Priego, A. G., Insunza, E., Luna, N., & Pérez, J. L. (2017). *Cuencas Hidrográficas de México, 2007, escala 1:250000*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>

John W. Eaton, David Bateman, Søren Hauberg, & Rik Wehbring. (2019). *GNU Octave (7.2.0)*. <https://octave.org/>

- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., & Xie, P. (2004). *CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution*.
- Júnior, J. B. C., & Lucena, R. L. (2019). ANALYSIS OF PRECIPITATIONS BY NON-PARAMETRIC TESTS OF MANN-KENDALL AND KRUSKAL-WALLIS. *Mercator*, 19(1), 1–14. <https://doi.org/10.4215/RM2020.E19001>
- Jurgiel, B. (2020). *Point sampling tool — QGIS Python Plugins Repository (0.5.3)*. borysiasty. <https://plugins.qgis.org/plugins/pointsamplingtool/>
- Kazemzadeh, M., Hashemi, H., Jamali, S., Uvo, C. B., Berndtsson, R., & Huffman, G. J. (2021). Linear and Nonlinear Trend Analyzes in Global Satellite-Based Precipitation, 1998–2017. *Earth's Future*, 9(4). <https://doi.org/10.1029/2020EF001835>
- Kelly, O. (2022). *The IMERG multi-satellite precipitation estimates reformatted as 2-byte GeoTIFF files for display in a Geographic Information System (GIS)*. <http://www.hdfgroup.org/HDF5/>
- Kendall, M. G. (1957). Rank Correlation Methods. *Biometrika*, 44(1/2), 298. <https://doi.org/10.2307/2333282>
- Kimani, M., Hoedjes, J., & Su, Z. (2017). An Assessment of Satellite-Derived Rainfall Products Relative to Ground Observations over East Africa. *Remote Sensing*, 9(5), 430. <https://doi.org/10.3390/rs9050430>
- Lauren, C., Macdonald, A., Turner, K. W., & Mcdonald, I. (2021). Rainfall trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test in West Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 893. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012006>
- Le Coz, C., & van de Giesen, N. (2020). Comparison of Rainfall Products over Sub-Saharan Africa. *Journal of Hydrometeorology*, 21(4), 553–596. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0256.1>

- Li, Y. ;, Pang, B. ;, Ren, M. ;, Shi, S. ;, Peng, D. ;, Zhu, Z. ;, Zuo, D., Li, Y., Pang, B., Ren, M., Shi, S., Peng, D., Zhu, Z., & Zuo, D. (2022). Evaluation of Performance of Three Satellite-Derived Precipitation Products in Capturing Extreme Precipitation Events over Beijing, China. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 2698, 14(11)*, 2698. <https://doi.org/10.3390/RS14112698>
- Li, Y., Zhang, Q., Tao, H., & Yao, J. (2021). Integrated model projections of climate change impacts on water-level dynamics in the large Poyang Lake (China). *Hydrology Research, 52(1)*, 43–60. <https://doi.org/10.2166/NH.2019.064>
- Liu, Z., Di, Z., Qin, P., Zhang, S., & Ma, Q. (2022). Evaluation of Six Satellite Precipitation Products over the Chinese Mainland. *Remote Sensing, 14(24)*, 6277. <https://doi.org/10.3390/rs14246277>
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general: principios y aplicaciones* (1era ed.). Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- Luegue Tamargo, J. L. (2011, June 2). *ACUERDO POR EL QUE SE DA A CONOCER EL RESULTADO DE LOS ESTUDIOS TECNICOS DE LA REGION HIDROLOGICA NUMERO 24 BRAVO-CONCHOS*. Diario Oficial de La Federación, Secretaría de Gobernación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5192916&fecha=02/06/2011#gsc.tab=0
- Maghsood, F. F., Hashemi, H., Hosseini, S. H., & Berndtsson, R. (2019). Ground Validation of GPM IMERG Precipitation Products over Iran. *Remote Sensing, 12(1)*, 48. <https://doi.org/10.3390/rs12010048>
- Maidment, D. R. (1993). *Hanbook of Hydrology* (1st ed.). McGraw Hill.
- Maidment, R. I., Grimes, D., Allan, R. P., Tarnavsky, E., Stringer, M., Hewison, T., Roebeling, R., & Black, E. (2014). The 30 year TAMSAT African Rainfall Climatology And Time series (TARCAT) data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(18)*. <https://doi.org/10.1002/2014JD021927>

- Mallick, J., Talukdar, S., Alsubih, M., Salam, R., Ahmed, M., Kahla, N. Ben, & Shamimuzzaman, M. (2021). Analysing the trend of rainfall in Asir region of Saudi Arabia using the family of Mann-Kendall tests, innovative trend analysis, and detrended fluctuation analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(1–2), 823–841. <https://doi.org/10.1007/S00704-020-03448-1/FIGURES/3>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Martínez Austria, P. F., & Irula Lutzow, F. (2016). *TENDENCIAS DE PRECIPITACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RIO CONCHOS, MÉXICO*. 8(2), 79–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2016-v8-2-08>
- Martínez-Austria, P. F., & Díaz-Jiménez, D. (2018). Tendencias de la precipitación y su relación con el Índice Oceánico El Niño. El caso de la Región Mixteca, México. *Ingeniería Del Agua*, 22(1), 1. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.7779>
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México El cambio climático. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III(1), 5–20. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531976001>
- Méndez González, J., De Jesús Nívar Cháidez, J., & Ontiveros, V. G. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 65, 38–55. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56906504>
- Mendoza Uribe, I. (2021). Identification of changes in the rainfall regime in Chihuahua's state (México). *Cuadernos de Investigación Geográfica*. <https://doi.org/10.18172/cig.5049>

- Mirdashtvan, M., Najafinejad, A., Malekian, A., & Sa'doddin, A. (2020). Regional analysis of trend and non-stationarity of hydro-climatic time series in the Southern Alborz Region, Iran. *International Journal of Climatology*, 40(4), 1979–1991. <https://doi.org/10.1002/JOC.6313>
- Morales-Acuña, E., Linero-Cueto, J. R., & Canales, F. A. (2021). Assessment of Precipitation Variability and Trends Based on Satellite Estimations for a Heterogeneous Colombian Region. *Hydrology 2021*, Vol. 8, Page 128, 8(3), 128. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY8030128>
- Morales-Velázquez, M. I., Herrera, G. del S., Aparicio, J., Rafieeiniasab, A., Lobato-Sánchez, R., Morales-Velázquez, M. I., Herrera, G. del S., Aparicio, J., Rafieeiniasab, A., & Lobato-Sánchez, R. (2021). Evaluating reanalysis and satellite-based precipitation at regional scale: A case study in southern Mexico. *Atmósfera*, 34(2), 189–206. <https://doi.org/10.20937/ATM.52789>
- Nadeem, M. U., Ghanim, A. A. J., Anjum, M. N., Shangguan, D., Rasool, G., Irfan, M., Niazi, U. M., & Hassan, S. (2022). Multiscale Ground Validation of Satellite and Reanalysis Precipitation Products over Diverse Climatic and Topographic Conditions. *Remote Sensing*, 14(18), 4680. <https://doi.org/10.3390/rs14184680>
- NASA. (2023). *IMERG: Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM | NASA Global Precipitation Measurement Mission*. <https://gpm.nasa.gov/data/imerg>
- NASA, & Kelley, O. (2022). *IMERG GeoTIFF + Worldfile Documentation | NASA Global Precipitation Measurement Mission*. <https://gpm.nasa.gov/resources/documents/imerg-geotiff-worldfile-documentation>
- Navidi, W. (2006). Correlación y Regresion lineal simple. In *Estadística para Ingenieros y Científicos* (1era ed., pp. 475–500). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES.

- Nguyen, P., Shearer, E. J., Tran, H., Ombadi, M., Hayatbini, N., Palacios, T., Huynh, P., Braithwaite, D., Updegraff, G., Hsu, K., Kuligowski, B., Logan, W. S., & Sorooshian, S. (2019). The CHRS data portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Scientific Data*, 6. <https://doi.org/10.1038/SDATA.2018.296>
- NOAA Office for Coastal Management. (2023). *HISTORICAL HURRICANE TRACKS*. <https://coast.noaa.gov/hurricanes/#map=4/32/-80>
- Núñez-González, G. (2020). Analysis of the trends in precipitation and precipitation concentration in some climatological stations of Mexico from 1960 to 2010. *Natural Hazards*, 104(2), 1747–1761. <https://doi.org/10.1007/S11069-020-04244-W/FIGURES/6>
- Paul, A., Bhowmik, R., Chowdary, V. M., Dutta, D., Sreedhar, U., & Ravi Sankar, H. (2017). Trend analysis of time series rainfall data using robust statistics. *Journal of Water and Climate Change*, 8(4), 691–700. <https://doi.org/10.2166/wcc.2017.141>
- QGIS Association. (2022). *QGIS.org* (3.22.3). QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Rahman, M. A., Yunsheng, L., & Sultana, N. (2017). Analysis and prediction of rainfall trends over Bangladesh using Mann–Kendall, Spearman’s rho tests and ARIMA model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129(4), 409–424. <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0479-4>
- Ramadhan, R., Yusnaini, H., Marzuki, M., Muharsyah, R., Suryanto, W., Sholihun, S., Vonnisa, M., Harmadi, H., Ningsih, A. P., Battaglia, A., Hashiguchi, H., & Tokay, A. (2022). Evaluation of GPM IMERG Performance Using Gauge Data over Indonesian Maritime Continent at Different Time Scales. *Remote Sensing* 2022, Vol. 14, Page 1172, 14(5), 1172. <https://doi.org/10.3390/RS14051172>

- Retalis, A., Katsanos, D., Tymvios, F., & Michaelides, S. (2020). Comparison of GPM IMERG and TRMM 3B43 Products over Cyprus. *Remote Sensing*, 12(19), 3212. <https://doi.org/10.3390/rs12193212>
- Rincón-Avalos, P., Khouakhi, A., Mendoza-Cano, O., López-De la Cruz, J., & Paredes-Bonilla, K. M. (2022). Evaluation of satellite precipitation products over Mexico using Google Earth Engine. *Journal of Hydroinformatics*, 24(4), 711–729. <https://doi.org/10.2166/HYDRO.2022.122>
- Rocha-Escalante, H., Jaimes-Arredondo, A., Cardona-Benavides, A., Rodríguez-Cuevas, C., Giácoman-Vallejos, G., Aceves-de Alba, J., García-Arreola, M. E., & Cisneros-Almazán, R. (2022). Rainfall and temperature trends in the Altiplano Potosino region, Mexico (1975-2015). *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 13(4), 75–126. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-04-02>
- RStudio Team. (2021). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio.
- Ruiz-Alvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Ontiveros-Capurata, R. E., & dos Santos, C. A. C. (2020). Observed trends in daily extreme precipitation indices in Aguascalientes, Mexico. *Meteorological Applications*, 27(1). <https://doi.org/10.1002/met.1838>
- Sa'adi, Z., Shahid, S., Ismail, T., Chung, E. S., & Wang, X. J. (2019). Trends analysis of rainfall and rainfall extremes in Sarawak, Malaysia using modified Mann–Kendall test. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(3), 263–277. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0564-3>
- Sadeghi, M., Nguyen, P., Naeini, M. R., Hsu, K., Braithwaite, D., & Sorooshian, S. (2021). PERSIANN-CCS-CDR, a 3-hourly 0.04° global precipitation climate data record for heavy precipitation studies. *Scientific Data*, 8(1), 157. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00940-9>

- Sahlaoui, Z., & Mordane, S. (2019). Radar rainfall estimation in Morocco: Quality control and gauge adjustment. *Hydrology*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/hydrology6020041>
- Sánchez Carrión, J. J. (1999). *Manual de análisis estadísticos de los datos* (2da ed.). Alianza Editorial.
- Sánchez San Román, F. J. (2017). *Hidrología superficial y subterránea* [Book]. F. Javier Sánchez San Román.
- Saouabe, T., Ait Naceur, K., Mahdi, E., Khalki, E., Hadri, A., & Saidi, M. E. (2022). GPM-IMERG product: a new way to assess the climate change impact on water resources in a Moroccan semi-arid basin. *Journal of Water and Climate Change*, 13, 2559. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.403>
- Servicio Meteorológico Nacional. (n.d.). Retrieved May 3, 2023, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Setti, S., Yumnam, K., Rathinasamy, M., & Agarwal, A. (2023). Assessment of satellite precipitation products at different time scales over a cyclone prone coastal river basin in India. *Journal of Water and Climate Change*, 14(1), 38–65. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.166>
- Sistema Meteorológico Nacional, & CONAGUA. (n.d.). *Información Estadística Climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Solomon, S. (Atmospheric chemist), Intergovernmental Panel on Climate Change., & Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I. (2007). *Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Soroosh Sorooshian, Kuolin Hsu, Dan Braithwaite, Hamed Ashouri, & NOAA. (2014). PERSIANN-Cloud Classification System:0.04° x 0.04° or 4km x 4km;

Version 1; DAILY; Satellite precipitation data in GeoTiff format. In *UCI CHRS's DataPortal* (pp. 2005–2018). <https://chrsdata.eng.uci.edu>

Tadesse, K. E., Melesse, A. M., Abebe, A., Lakew, H. B., & Paron, P. (2022). Evaluation of Global Precipitation Products over Wabi Shebelle River Basin, Ethiopia. *Hydrology* 2022, Vol. 9, Page 66, 9(5), 66. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY9050066>

Tam, T. H., Abd Rahman, M. Z., Harun, S., Hanapi, M. N., & Kaoje, I. U. (2019). Application of satellite rainfall products for flood inundation modelling in Kelantan River Basin, Malaysia. *Hydrology*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY6040095>

TAMSAT | www.tamsat.org.uk. (n.d.). <http://www.tamsat.org.uk/>

Tan, M., & Duan, Z. (2017). Assessment of GPM and TRMM Precipitation Products over Singapore. *Remote Sensing*, 9(7), 720. <https://doi.org/10.3390/rs9070720>

The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) | NASA Global Precipitation Measurement Mission. (n.d.). Retrieved June 18, 2023, from <https://gpm.nasa.gov/missions/trmm>

Usman, M., Nichol, J. E., Ibrahim, A. T., & Buba, L. F. (2018). A spatio-temporal analysis of trends in rainfall from long term satellite rainfall products in the Sudano Sahelian zone of Nigeria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260–261, 273–286. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.016>

Varouchakis, E. A., Hristopulos, D. T., Karatzas, G. P., Perez, G. A. C., & Diaz, V. (2021a). Spatiotemporal geostatistical analysis of precipitation combining ground and satellite observations. *Hydrology Research*, 52(3), 804–820. <https://doi.org/10.2166/NH.2021.160>

Varouchakis, E. A., Hristopulos, D. T., Karatzas, G. P., Perez, G. A. C., & Diaz, V. (2021b). Spatiotemporal geostatistical analysis of precipitation combining

- ground and satellite observations. *Hydrology Research*, 52(3), 804–820. <https://doi.org/10.2166/nh.2021.160>
- Wang, Z., Chen, J., Lai, C., Zhong, R., Chen, X., & Yu, H. (2018). Hydrologic assessment of the TMPA 3B42-V7 product in a typical alpine and gorge region: The Lancang River basin, China. *Hydrology Research*, 49(6), 2002–2015. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.024>
- Wei, X., Yu, Y., Li, B., & Liu, Z. (2023). Representativeness of Two Global Gridded Precipitation Data Sets in the Intensity of Surface Short-Term Precipitation over China. *Remote Sensing*, 15(7), 1856. <https://doi.org/10.3390/rs15071856>
- Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Our services - Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)*. (n.d.). Retrieved September 16, 2022, from <https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html>
- Xiang Soo, E. Z., Wan Jaafar, W. Z., Lai, S. H., Othman, F., Elshafie, A., Islam, T., Srivastava, P., & Othman Hadi, H. S. (2020). Evaluation of bias-adjusted satellite precipitation estimations for extreme flood events in Langat river basin, Malaysia. *Hydrology Research*, 51(1), 105–126. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.071>
- Xie, P., Joyce, R., Wu, S., Yoo, H., & NOAA. (2017). NOAA Climate Data Record (CDR) of CPC Morphing Technique (CMORPH) High Resolution Global Precipitation Estimates, V1.0 Daily data (0.25 degree resolution). In *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory*. NOAA . <https://doi.org/https://doi.org/10.5065/0EFN-KZ90>.
- Xie, P., Joyce, R., Wu, S., Yoo, S.-H., Yarosh, Y., Sun, F., Lin, R., & NOAA CDR Program. (2019). *NOAA Climate Data Record (CDR) of CPC Morphing Technique (CMORPH) High Resolution Global Precipitation Estimates*,

Version 1[dayli]. NOAA National Centers for Environmental Information.
<https://doi.org/https://doi.org/10.25921/w9va-q159>

Zhang, L., Xin, Z., & Zhou, H. (2020). Assessment of TMPA 3B42V7 and PERSIANN-CDR in Driving Hydrological Modeling in a Semi-Humid Watershed in Northeastern China. *Remote Sensing*, 12(19), 3133.
<https://doi.org/10.3390/rs12193133>

APÉNDICES

Apéndice A. Códigos para extracción de información satelital

Apéndice A.1. Código para extracción de información de CMORPH en GNU Octave (version 7.1.0)

```
"est=csvread('coordenadas_estaciones.csv');

for be=1:rows(est)

estpix(be,:)=est(be,1),floor((60-est(be,3))/0.25),floor((360+est(be,2))/0.25)];

end

cF=pwd;

ass=dir;

for ba=3:numel(ass)

as(ba-2,:)=ass(ba).name;

end

ca=1;

for b1=1:size(as,1)

at=dir([cF,'\',as(b1,:),'\*.bz2']);

for b2=1:size(at,1)

a(ca,:)=as(b1,:),'\',at(b2,:).name];

ca=ca+1;

end

end

j=1;

tic
```

```

for b=1:size(a,1);

file=[' ',cF,'\',a(b,:)," "];

filepath=[cF,'\',a(b,1:2)];

system(['"C:\Program Files (x86)\GnuWin32\bin\bzip2.exe" -d -k',file]);

filename=a(b,4:end-4);

cd(filepath);

fid=fopen(filename,'r');

DT=datenum(str2num(filename(33:36)),str2num(filename(37:38)),str2num(filename(39:40)),0,0,0);

Rain=flipud(transpose(fread(fid, [1440,480], 'real*4')));

DT=datenum(str2num(filename(33:36)),str2num(filename(37:38)),str2num(filename(39:40)),0,0,0);

for be=1:rows(estpix)

T(j,1)=DT;

T(j,1+be)=Rain(estpix(be,2),estpix(be,3));

end

fclose(fid);

delete(filename)

j=j+1;

end

cd(cF);

save('-binary',['C',filename(33:36),'.mat'], 'T')

toc "

```

Apéndice A.2. Código para el renombre de capas de QGIS utilizando la Consola de Phyton.

Obtención del listado de capas del Proyecto::

```
from qgis.core import QgsProject

layerList = QgsProject.instance().layerTreeRoot().findLayers()

for layer in layerList:

    print(layer.name())
```

Renombre en excel:

```
"project.mapLayersByName("&A2&")[0].setName("&B2&")"
```

Renombre en la consola PQGIS:

```
from qgis.core import QgsProject

project = QgsProject.instance()

project.mapLayersByName('OLD_NAME')[0].setName('NEW_NAME')
```

Apéndice B. Códigos para pruebas estadísticas en RStudio version 4.2.0

Apéndice B.1. Código para las pruebas MAE y RMSE

Para la aplicación de las pruebas de error MAE y RMSE a los por promedios (mensual, estacional y anual) por observación y a los acumulados (mensuales y anuales) por estación fue aplicado el siguiente código en la consola de RStudio.

```
"library(readxl)

library(Metrics)
```

```

observacion_anual <- read_excel("observacion_anual")

View(observacion_anual)

actual <- (observacion_anual$medido)

predicted <- (observacion_anual$spp1)

rmaseC <- rmse(actual,predicted)

print(ramseC)

maeC <- mae(actual,predicted)

print(maeC)"

```

Este proceso se repite n veces según la cantidad de estaciones y observaciones que se analicen.

Apéndice B.2. Código para las pruebas Mann – Kendal

Para la aplicación de la prueba Mann – Kendall a los por promedios (diario, mensual y anual) por observación y a los acumulados (mensuales y anuales) por estación fue aplicado el siguiente código en la consola de RStudio.

```

library(readxl)

AME <- read_excel("AME"

View(AAE)

vectorEstacion1 <- AME$Estacion1 <- repetir n veces

library(trend)

result <-mk.test(vectorEstacion1) <- repetir n veces

print(result) <- repetir n veces"

```

Este proceso se repite n veces según la cantidad de estaciones y observaciones que se analicen.

Apéndice B.3. Código para la prueba BIAS

Para la obtención de los BIAS de los promedios (diario, mensual y anual) por observación fue aplicado el siguiente código en la consola de RStudio.

```
“library(readxl)

pao <- read_excel("pao")

View(pao)

observed <- pao$real

predicted <- pao$SPP1

difference <- predicted - observed

mean_difference <- mean(difference)

t_test <- t.test(difference, mu = 0)

print(t_test)”
```

Este proceso se repite n veces según la cantidad de estaciones y observaciones que se analicen.

Apéndice B.4. Código para la generación de correlaciones

Para aplicar las correlaciones de Pearson y Spearman a los promedios (mensual y anual) por observación y a los acumulados (mensuales y anuales) por estación fue aplicado el siguiente código en la consola de RStudio.

```
library(readxl)  
  
mes <- read_excel("mes")  
  
View(mes)  
  
attach(mes)  
  
library(Hmisc)  
  
set1<-c("Estacion real", "Estacion cmorph", "Estacion imerg", "persiann")  
  
mesestacion1<-mes[set1] <- repetir n veces  
  
matrixa <-rcorr(as.matrix(mesestacion1)) <- repetir n veces  
  
print(matrixa) <- repetir n veces  
  
matrixa <-rcorr(as.matrix(mesestacion1), type="spearman") <- repetir n veces  
  
print(matrixa) <- repetir n veces"
```

Este proceso se repite n veces según la cantidad de estaciones y observaciones que se analicen.

Apéndice C. Tablas de información por estación

En este apéndice se agregan las tablas con la información complete de promedios, acumulados y resultados de las pruebas de correlación de Pearson y Spearman, BIAS, Error Medio Absoluto y Error Medio Cuadrático para las 30 estaciones climatológicas convencionales y todos los tipos de observaciones.

Tabla 18. Acumulado Anual de Lámina de Precipitación en milímetros de 2005 a 2012 por Estación y observación

Estación	2005	2006	2008	2009	2010	2011	2012
5048	435.60	116.20	482.50	250.00	482.70	112.50	175.80
CMORPH	354.23	291.37	342.05	279.29	375.78	121.13	240.48
IMERG	245.00	195.00	237.00	181.00	334.00	127.00	177.00
PERSIANN - CCS	710.00	670.00	676.00	619.00	651.00	410.00	882.00
5148	376.50	219.20	221.00	381.50	333.70	141.40	247.50
CMORPH	468.92	451.68	499.97	393.88	732.20	263.66	396.20
IMERG	318.00	298.00	313.00	257.00	461.00	173.00	242.00
PERSIANN - CCS	711.00	874.00	643.00	551.00	570.00	331.00	853.00
5170	268.00	161.20	281.00	221.00	338.00	27.00	41.00
CMORPH	288.18	266.70	180.17	349.36	401.62	123.24	263.70
IMERG	172.00	145.00	176.00	167.00	282.00	68.00	120.00
PERSIANN - CCS	726.00	594.00	648.00	705.00	688.00	351.00	641.00
19002	749.00	662.50	736.40	764.00	1438.50	328.50	578.50
CMORPH	284.39	214.93	304.70	256.14	413.38	72.90	237.35
IMERG	253.00	232.00	227.00	201.00	420.00	136.00	193.00
PERSIANN - CCS	596.00	646.00	454.00	556.00	593.00	270.00	633.00
19004	676.00	554.00	575.90	381.60	1190.20	353.40	312.70
CMORPH	544.19	449.24	469.09	527.68	732.48	164.05	289.13
IMERG	267.00	267.00	300.00	221.00	472.00	142.00	191.00
PERSIANN - CCS	630.00	900.00	569.00	500.00	787.00	285.00	702.00
19015	1010.40	762.10	1230.30	624.30	1737.10	542.10	818.30
CMORPH	539.88	411.14	501.32	445.49	931.03	265.53	310.51
IMERG	288.00	264.00	305.00	229.00	504.00	127.00	200.00
PERSIANN - CCS	686.00	907.00	710.00	482.00	820.00	253.00	938.00
19016	787.70	696.50	602.10	305.50	782.10	221.90	512.60
CMORPH	860.59	873.60	925.07	516.14	1106.97	282.91	508.46
IMERG	262.00	306.00	349.00	197.00	393.00	112.00	201.00
PERSIANN - CCS	751.00	1330.00	1124.00	395.00	693.00	370.00	733.00
19018	592.60	447.90	723.00	551.80	1075.60	281.00	405.00
CMORPH	468.92	451.68	499.97	393.88	732.20	263.66	396.20
IMERG	307.00	288.00	300.00	254.00	460.00	163.00	239.00
PERSIANN - CCS	625.00	847.00	612.00	604.00	601.00	277.00	633.00
19022	366.30	632.60	891.10	330.70	844.00	263.70	407.70
CMORPH	579.20	646.88	827.98	474.90	905.85	290.36	319.86
IMERG	236.00	273.00	328.00	195.00	370.00	100.00	176.00
PERSIANN - CCS	693.00	1193.00	963.00	432.00	685.00	346.00	651.00
19033	1452.60	591.80	776.00	787.00	1912.80	390.40	572.90
CMORPH	468.92	451.68	499.97	393.88	732.20	263.66	396.20
IMERG	324.00	275.00	316.00	231.00	467.00	152.00	242.00
PERSIANN - CCS	642.00	796.00	666.00	495.00	617.00	306.00	899.00
19036	246.00	168.00	240.00	49.00	553.80	66.00	227.00
CMORPH	269.77	304.23	340.90	339.97	343.42	166.55	248.96
IMERG	161.00	152.00	176.00	130.00	254.00	63.00	131.00
PERSIANN - CCS	663.00	792.00	369.00	622.00	583.00	215.00	567.00
19039	857.50	649.60	897.10	403.50	1221.00	266.00	469.50
CMORPH	865.84	779.04	823.04	593.00	1289.31	326.85	420.61
IMERG	320.00	309.00	363.00	225.00	496.00	123.00	224.00
PERSIANN - CCS	842.00	1187.00	1173.00	536.00	814.00	467.00	937.00
19042	706.00	633.50	785.30	298.10	826.70	192.30	446.00
CMORPH	865.84	779.04	823.04	593.00	1289.31	326.85	420.61
IMERG	304.00	295.00	352.00	230.00	472.00	123.00	208.00
PERSIANN - CCS	768.00	1253.00	1010.00	425.00	733.00	381.00	803.00
19044	443.30	449.10	503.80	445.60	870.70	226.80	387.40
CMORPH	618.19	455.31	459.71	493.99	734.96	190.10	323.25
IMERG	233.00	210.00	231.00	176.00	390.00	68.00	158.00
PERSIANN - CCS	757.00	934.00	500.00	648.00	762.00	267.00	655.00
19047	390.50	559.00	611.50	26.20	1046.10	251.00	714.30
CMORPH	471.09	430.08	359.90	332.11	609.33	286.73	427.67

IMERG	259.00	220.00	250.00	177.00	402.00	122.00	196.00
PERSIANN - CCS	507.00	672.00	561.00	527.00	549.00	230.00	736.00
19048	1195.10	215.00	919.20	858.80	1779.00	436.50	527.80
CMORPH	747.71	670.10	760.70	584.41	1208.97	446.45	706.82
IMERG	350.00	270.00	358.00	213.00	449.00	180.00	262.00
PERSIANN - CCS	837	1057	933	539	804	385	949
19052	831.90	687.60	632.20	463.00	1502.70	175.40	463.20
CMORPH	386.44	291.14	342.14	320.89	578.53	112.31	256.73
IMERG	248.00	222.00	251.00	177.00	423.00	135.00	162.00
PERSIANN - CCS	655.00	823.00	500.00	488.00	759.00	246.00	512.00
19053	686.50	305.00	535.40	244.00	731.40	350.00	583.00
CMORPH	577.02	575.62	562.42	529.85	886.12	332.07	539.85
IMERG	296.00	230.00	325.00	198.00	429.00	124.00	183.00
PERSIANN - CCS	731.00	897.00	610.00	493.00	642.00	298.00	752.00
19069	1396.70	775.60	1313.70	666.70	2084.10	637.70	799.20
CMORPH	600.68	565.76	589.15	468.13	947.93	368.16	471.56
IMERG	293.00	258.00	315.00	218.00	480.00	133.00	214.00
PERSIANN - CCS	741.00	964.00	764.00	455.00	775.00	294.00	913.00
19096	506.00	295.00	483.00	176.00	1035.80	224.00	287.70
CMORPH	386.44	291.14	342.14	320.89	578.53	112.31	256.73
IMERG	242.00	211.00	232.00	166.00	408.00	103.00	176.00
PERSIANN - CCS	619.00	780.00	432.00	535.00	721.00	201.00	602.00
19105	653.00	604.10	739.80	414.80	925.60	454.30	409.50
CMORPH	680.23	641.77	773.76	567.19	1104.29	226.82	400.34
IMERG	292.00	261.00	306.00	197.00	446.00	108.00	164.00
PERSIANN - CCS	722.00	1041.00	746.00	490.00	748.00	300.00	720.00
19117	488.10	474.60	745.60	470.20	796.40	491.10	177.80
CMORPH	544.19	449.24	469.09	527.68	732.48	164.05	289.13
IMERG	273.00	255.00	286.00	186.00	448.00	113.00	164.00
PERSIANN - CCS	738.00	1006.00	659.00	536.00	650.00	279.00	693.00
19123	290.70	251.20	379.70	131.00	327.80	196.90	206.50
CMORPH	315.74	268.24	306.10	294.78	353.68	81.31	189.68
IMERG	220.00	176.00	198.00	145.00	321.00	68.00	129.00
PERSIANN - CCS	595.00	696.00	380.00	564.00	664.00	223.00	573.00
19124	409.50	253.00	931.50	354.60	920.70	324.50	208.50
CMORPH	544.19	449.24	469.09	527.68	732.48	164.05	289.13
IMERG	260.00	239.00	282.00	171.00	454.00	109.00	140.00
PERSIANN - CCS	729.00	1051.00	634.00	551.00	678.00	266.00	633.00
19162	1106.70	388.50	1000.90	607.80	996.10	665.90	552.70
CMORPH	744.78	727.75	848.40	628.28	1522.01	246.60	471.08
IMERG	289.00	280.00	353.00	219.00	453.00	109.00	183.00
PERSIANN - CCS	782.00	1217.00	950.00	474.00	694.00	410.00	804.00
19163	846.40	236.80	1081.90	455.40	1221.40	253.60	547.30
CMORPH	854.25	878.14	812.28	669.72	1265.21	453.28	657.08
IMERG	363.00	324.00	423.00	225.00	510.00	126.00	231.00
PERSIANN - CCS	935.00	1178.00	1220.00	500.00	795.00	429.00	847.00
19165	201.40	259.90	286.10	204.80	487.70	114.10	296.80
CMORPH	255.69	258.74	260.64	361.93	303.60	113.88	166.22
IMERG	189.00	150.00	196.00	139.00	304.00	47.00	122.00
PERSIANN - CCS	627.00	588.00	373.00	599.00	509.00	178.00	570.00
19169	673.10	641.80	1119.90	553.70	1157.20	255.00	495.20
CMORPH	744.78	727.75	848.40	628.28	1522.01	246.60	471.08
IMERG	305.00	278.00	356.00	208.00	445.00	115.00	162.00
PERSIANN - CCS	869.00	1086.00	890.00	437.00	770.00	412.00	868.00
19173	1167.00	719.50	1056.80	624.60	1543.90	385.50	598.00
CMORPH	837.70	684.14	715.95	558.65	1269.36	383.32	688.50
IMERG	323.00	273.00	356.00	213.00	499.00	150.00	234.00
PERSIANN - CCS	780.00	968.00	792.00	411.00	767.00	509.00	1046.00
19189	1639.60	747.40	1288.10	945.20	1782.30	613.30	775.40
CMORPH	747.71	670.10	760.70	584.41	1208.97	446.45	706.82
IMERG	329.00	254.00	338.00	212.00	454.00	183.00	237.00
PERSIANN - CCS	899.00	1064.00	758.00	527.00	702.00	397.00	989.00

Tabla 19. Acumulado Anual de Lámina de Precipitación en milímetros de 2013 a 2018 por estación y observación

Estación	2013	2014	2015	2016	2017	2018
5048	299.30	0.00	421.80	274.40	248.40	365.70
CMORPH	313.06	335.82	591.99	342.05	256.21	385.32
IMERG	287.00	275.00	287.00	289.00	191.00	270
PERSIANN - CCS	862.00	665.00	1081.00	840.00	912.00	948
5148	984.80	0.00	1045.20	503.60	492.90	519.30
CMORPH	626.77	702.06	650.81	499.97	416.44	472.60
IMERG	464.00	391.00	300.00	297.00	276.00	258.00
PERSIANN - CCS	951.00	811.00	899.00	793.00	644.00	1067.00
5170	219.00	0.00	313.00	392.40	163.20	321.00
CMORPH	268.81	342.36	444.08	180.17	295.97	392.73
IMERG	225.00	228.00	250.00	217.00	160.00	252.00
PERSIANN - CCS	766.00	517.00	944.00	843.00	801.00	976.00
19002	920.50	861.50	667.50	603.00	487.50	463.50
CMORPH	466.43	357.91	495.16	304.70	409.11	315.88
IMERG	343.00	330.00	272.00	315.00	228.00	259.00
PERSIANN - CCS	662.00	653.00	948.00	746.00	798.00	1008.00
19004	1085.30	596.40	810.30	533.30	727.30	593.00
CMORPH	696.93	585.15	722.09	469.09	528.10	529.51
IMERG	422.00	329.00	347.00	313.00	331.00	293.00
PERSIANN - CCS	795.00	630.00	983.00	860.00	950.00	1301.00
19015	1366.50	1271.40	987.10	1156.10	1030.10	826.20
CMORPH	776.69	623.33	796.79	501.32	459.62	515.33
IMERG	418.00	319.00	285.00	314.00	248.00	270.00
PERSIANN - CCS	839.00	728.00	1046.00	976.00	897.00	1090.00
19016	802.50	698.80	704.80	920.00	498.30	478.80
CMORPH	984.05	716.01	932.57	925.07	892.52	982.49
IMERG	361.00	290.00	335.00	317.00	262.00	247.00
PERSIANN - CCS	878.00	737.00	1275.00	1090.00	1063.00	1018.00
19018	963.00	508.00	588.20	380.00	533.00	636.50
CMORPH	626.77	702.06	650.81	499.97	416.44	472.60
IMERG	441.00	360.00	286.00	355.00	250.00	281.00
PERSIANN - CCS	857.00	698.00	1038.00	845.00	727.00	972.00
19022	757.20	641.60	949.10	888.00	631.60	574.90
CMORPH	742.23	685.27	768.25	827.98	827.81	703.82
IMERG	308.00	275.00	309.00	291.00	245.00	242.00
PERSIANN - CCS	800.00	616.00	1369.00	1105.00	1017.00	941.00
19033	1619.40	1151.40	705.90	773.90	581.80	711.30
CMORPH	626.77	702.06	650.81	499.97	416.44	472.60
IMERG	445.00	343.00	294.00	300.00	237.00	263.00
PERSIANN - CCS	917.00	733.00	1015.00	774.00	676.00	1347.00
19036	379.00	293.00	204.00	214.30	249.50	216.00
CMORPH	313.84	397.36	597.66	340.90	394.72	473.18
IMERG	231.00	188.00	217.00	259.00	160.00	194.00
PERSIANN - CCS	553.00	589.00	948.00	651.00	702.00	702.00
19039	830.80	629.60	724.10	632.00	702.00	848.00
CMORPH	987.13	763.24	961.34	823.04	919.07	888.60
IMERG	390.00	284.00	325.00	329.00	265.00	306.00
PERSIANN - CCS	1046.00	773.00	1291.00	844.00	824.00	1255.00
19042	831.00	601.00	782.50	624.10	696.50	629.40
CMORPH	987.13	763.24	961.34	823.04	919.07	888.60
IMERG	389.00	280.00	319.00	297.00	257.00	288.00
PERSIANN - CCS	1097.00	679.00	1294.00	957.00	1033.00	1196.00
19044	865.10	530.30	443.40	564.90	704.10	685.90
CMORPH	632.53	710.21	648.30	459.71	574.13	560.63
IMERG	301.00	220.00	228.00	252.00	208.00	196.00

PERSIANN - CCS	793.00	678.00	942.00	687.00	961.00	1097.00
19047	952.40	932.00	844.80	613.40	673.90	683.20
CMORPH	600.42	647.61	713.24	359.90	517.74	500.46
IMERG	371.00	316.00	237.00	249.00	224.00	232.00
PERSIANN - CCS	816.00	613.00	763.00	668.00	691.00	943.00
19048	1322.60	766.20	1196.50	926.00	878.10	847.30
CMORPH	1155.06	966.17	763.24	760.70	716.77	663.53
IMERG	415.00	344.00	341.00	381.00	270.00	282.00
PERSIANN - CCS	1033	883	1582	746	762	1225
19052	957.90	730.10	650.00	688.60	736.70	586.90
CMORPH	561.27	425.48	597.47	342.14	317.94	369.61
IMERG	376.00	263.00	278.00	286.00	212.00	224.00
PERSIANN - CCS	779.00	673.00	875.00	981.00	852.00	1161.00
19053	1152.00	939.50	742.50	805.00	507.00	499.00
CMORPH	969.67	847.40	714.15	562.42	581.41	601.80
IMERG	398.00	347.00	277.00	283.00	245.00	265.00
PERSIANN - CCS	893.00	754.00	1066.00	769.00	744.00	1076.00
19069	1393.90	1346.90	991.50	974.90	926.70	979.40
CMORPH	977.51	946.35	761.20	589.15	468.16	552.60
IMERG	433.00	341.00	295.00	312.00	244.00	276.00
PERSIANN - CCS	893.00	798.00	1117.00	903.00	844.00	1114.00
19096	685.30	671.60	409.70	432.30	363.60	377.10
CMORPH	561.27	425.48	597.47	342.14	317.94	369.61
IMERG	345.00	272.00	251.00	282.00	200.00	225.00
PERSIANN - CCS	723.00	658.00	950.00	761.00	703.00	1034.00
19105	822.60	577.70	992.80	670.10	1001.30	589.70
CMORPH	814.61	635.80	799.32	773.76	728.66	606.56
IMERG	371.00	266.00	310.00	307.00	249.00	251.00
PERSIANN - CCS	1020.00	562.00	1138.00	765.00	936.00	1239.00
19117	710.40	520.50	712.50	489.10	807.90	716.60
CMORPH	696.93	585.15	722.09	469.09	528.10	529.51
IMERG	374.00	263.00	312.00	297.00	241.00	261.00
PERSIANN - CCS	830.00	586.00	1054.00	796.00	998.00	1221.00
19123	522.10	240.80	510.60	630.00	412.00	541.00
CMORPH	559.94	346.96	487.21	306.10	456.79	384.28
IMERG	281.00	216.00	216.00	244.00	175.00	213.00
PERSIANN - CCS	693.00	504.00	864.00	578.00	701.00	1146.00
19124	653.20	586.00	507.00	492.00	651.50	771.50
CMORPH	696.93	585.15	722.09	469.09	528.10	529.51
IMERG	371.00	248.00	272.00	284.00	245.00	248.00
PERSIANN - CCS	808.00	602.00	941.00	718.00	970.00	1135.00
19162	1203.30	799.50	670.10	975.00	925.90	1194.00
CMORPH	789.93	798.48	898.33	848.40	914.14	731.76
IMERG	390.00	260.00	295.00	338.00	266.00	253.00
PERSIANN - CCS	1040.00	666.00	1290.00	896.00	1109.00	1388.00
19163	914.40	576.40	659.10	618.80	700.10	837.70
CMORPH	1186.19	836.18	890.18	812.28	884.38	942.13
IMERG	438.00	341.00	370.00	326.00	328.00	311.00
PERSIANN - CCS	1039.00	807.00	1334.00	906.00	837.00	1146.00
19165	363.00	288.30	495.80	498.10	231.90	337.50
CMORPH	467.72	369.47	521.13	260.64	356.05	363.33
IMERG	251.00	222.00	228.00	225.00	176.00	196.00
PERSIANN - CCS	671.00	575.00	905.00	543.00	613.00	685.00
19169	765.60	550.50	736.10	642.90	611.50	599.20
CMORPH	789.93	798.48	898.33	848.40	914.14	731.76
IMERG	375.00	283.00	308.00	325.00	301.00	270.00
PERSIANN - CCS	1003.00	673.00	1296.00	822.00	1145.00	1221.00
19173	929.50	910.50	845.30	994.50	885.30	849.30
CMORPH	1187.25	861.52	857.55	715.95	705.96	709.89
IMERG	432.00	285.00	296.00	370.00	267.00	286.00
PERSIANN - CCS	955.00	722.00	1287.00	961.00	895.00	1115.00
19189	1339.50	921.80	1179.10	1309.50	842.20	1085.30

CMORPH	1155.06	966.17	763.24	760.70	716.77	663.53
IMERG	394.00	344.00	313.00	336.00	263.00	266.00
PERSIANN - CCS	963.00	853.00	1401.00	860.00	739.00	1313.00

Tabla 20. Promedio Mensual de Precipitación en milímetros por Estación Climatológica según cada observación.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
SALTILLO (DGE)												
OBSERVADO	10.80	9.80	9.33	18.72	34.61	34.47	54.62	24.18	59.07	20.81	2.09	5.78
CMORPH	9.80	8.07	13.42	17.56	23.91	32.28	65.84	50.19	63.25	26.86	8.07	11.20
IMERG	7.21	5.79	9.36	11.79	20.21	25.14	43.71	38.71	52.07	13.79	6.36	7.79
PERSIANN - CCS	60.36	57.50	55.93	55.43	75.36	61.21	119.29	111.64	72.14	18.71	16.14	70.57
POTRERO DE ABREGO												
OBSERVADO	31.38	21.39	38.58	15.57	44.22	39.21	50.95	49.68	80.77	37.95	18.36	11.55
CMORPH	14.10	12.96	21.04	31.47	43.41	45.01	78.85	68.15	120.56	38.59	12.12	17.94
IMERG	8.50	8.57	11.50	19.00	30.57	29.79	49.07	41.93	68.93	23.36	7.93	10.93
PERSIANN - CCS	48.57	50.43	58.86	88.79	90.14	56.71	79.36	94.36	80.86	25.14	21.00	48.50
LA ROSA												
OBSERVADO	6.46	6.92	11.85	7.49	20.08	27.62	41.48	30.08	34.62	11.17	5.46	7.43
CMORPH	9.07	6.33	10.82	10.00	22.73	34.84	59.78	41.86	61.81	21.52	7.46	11.58
IMERG	6.07	4.93	10.14	8.50	14.14	19.07	33.50	31.21	39.43	11.29	5.86	6.93
PERSIANN - CCS	60.14	46.07	55.29	48.29	58.64	64.29	109.79	111.64	57.64	23.57	15.50	63.36
AGUA BLANCA												
OBSERVADO	15.19	18.81	35.15	16.46	51.04	90.04	122.19	89.31	161.00	34.19	21.85	21.88
CMORPH	8.91	7.53	11.49	21.57	27.39	21.52	48.97	34.96	77.53	29.46	9.75	15.63
IMERG	6.29	5.64	11.21	13.36	22.14	26.43	45.64	36.86	61.64	15.14	6.93	9.14
PERSIANN - CCS	55.00	46.64	53.86	61.36	75.50	45.86	88.79	84.93	69.64	22.43	11.21	45.79
APODACA												
OBSERVADO	15.08	22.27	25.80	49.08	38.17	58.93	59.78	32.46	191.92	62.04	23.24	37.38
CMORPH	15.19	12.93	19.16	35.47	43.44	34.10	78.47	51.88	139.72	44.12	18.26	23.52
IMERG	11.50	8.64	14.43	15.43	22.64	27.00	38.57	29.79	77.71	24.43	13.71	13.71
PERSIANN - CCS	53.21	49.50	50.07	60.29	70.29	59.07	99.86	88.79	126.86	24.00	14.29	72.43
EL CERRITO												
OBSERVADO	15.09	18.25	33.73	42.05	60.22	97.03	127.59	94.99	299.35	129.79	35.02	34.01
CMORPH	19.13	13.59	23.67	36.46	42.44	42.97	73.75	46.72	141.82	52.15	23.38	24.58
IMERG	6.93	6.64	11.86	16.36	24.07	27.29	40.14	33.50	78.50	23.14	9.43	9.64
PERSIANN - CCS	61.36	52.86	58.07	70.36	81.79	61.79	96.64	94.07	105.14	26.64	17.64	72.79
EL CUCHILLO												
OBSERVADO	15.48	18.40	19.07	62.89	70.52	56.15	71.26	42.65	141.69	32.01	26.47	32.69
CMORPH	17.34	23.28	24.48	47.47	65.01	74.44	118.76	87.03	250.69	58.17	17.38	30.77
IMERG	8.50	8.57	11.29	18.07	27.71	27.07	33.79	26.86	74.93	17.79	11.71	13.07
PERSIANN - CCS	60.71	64.36	68.71	88.64	105.64	82.64	103.57	109.71	128.43	22.21	15.71	61.57
EL PAJONAL												
OBSERVADO	7.66	12.54	26.61	10.69	38.22	84.55	93.97	55.55	137.25	53.38	20.31	21.02
CMORPH	14.10	12.96	21.04	31.47	43.41	45.01	78.85	68.15	120.56	38.59	12.12	17.94
IMERG	6.57	6.64	13.14	16.43	28.14	30.36	48.36	42.71	72.57	21.79	8.21	10.21
PERSIANN - CCS	54.57	40.64	59.00	69.93	89.07	50.93	88.00	90.43	76.29	22.86	21.57	45.00
GENERAL BRAVO (DGE)												
OBSERVADO	21.95	20.20	18.83	65.96	88.82	52.92	53.59	49.77	126.27	40.73	20.38	35.19
CMORPH	13.12	21.31	20.86	38.71	66.27	53.85	93.99	79.63	191.51	42.89	12.08	29.48
IMERG	6.21	9.07	10.07	16.93	26.00	24.43	35.14	24.21	66.43	15.86	10.43	12.64
PERSIANN - CCS	57.64	56.50	62.21	91.36	102.43	84.86	100.71	96.86	113.21	22.79	16.93	56.50
LAGUNA DE SÁNCHEZ												
OBSERVADO	24.60	21.36	31.25	42.32	72.71	98.60	130.95	108.76	242.09	68.44	28.88	25.42
CMORPH	14.10	12.96	21.04	31.47	43.41	45.01	78.85	68.15	120.56	38.59	12.12	17.94
IMERG	6.93	7.64	11.79	17.86	29.71	28.79	46.00	39.36	70.36	22.14	8.29	9.93
PERSIANN - CCS	46.64	50.21	61.00	83.64	86.36	56.43	79.36	91.93	103.14	21.86	16.36	56.21

LA POPA												
OBSERVADO	7.85	6.15	11.31	15.30	23.00	21.23	39.84	15.12	45.35	14.81	12.08	17.02
CMORPH	11.83	9.10	15.07	19.30	32.08	31.04	64.94	41.26	76.23	22.15	9.86	15.50
IMERG	5.64	3.93	8.36	7.93	17.00	15.79	32.21	21.57	39.29	9.29	7.36	8.50
PERSIANN - CCS	48.29	44.71	58.93	50.07	84.57	47.07	105.29	65.79	55.79	14.29	12.64	44.36
LAS ENRAMADAS												
OBSERVADO	14.24	19.51	23.15	52.88	63.00	67.31	77.92	43.81	186.50	53.38	31.19	35.01
CMORPH	19.75	22.16	25.87	48.10	59.11	73.37	115.19	76.81	254.19	65.08	16.43	29.60
IMERG	6.36	7.36	13.36	21.21	29.57	33.00	39.21	32.36	79.79	21.57	9.71	11.50
PERSIANN - CCS	69.79	63.14	67.36	87.07	96.29	90.07	114.36	118.57	122.86	23.79	24.50	72.86
LOS RAMONES												
OBSERVADO	9.98	17.90	19.36	38.81	62.32	75.48	62.93	28.50	163.58	49.72	35.15	23.39
CMORPH	19.75	22.16	25.87	48.10	59.11	73.37	115.19	76.81	254.19	65.08	16.43	29.60
IMERG	5.57	6.71	12.07	18.64	26.43	31.21	38.50	32.07	78.00	21.57	9.29	11.86
PERSIANN - CCS	62.79	57.29	59.79	73.00	99.21	92.71	117.50	102.00	135.64	30.50	16.79	71.14
MAMULIQUE												
OBSERVADO	14.66	12.89	16.47	24.74	63.80	57.05	64.48	64.72	129.57	32.95	19.05	29.22
CMORPH	14.75	15.15	20.21	33.42	48.21	42.18	86.56	58.49	137.95	31.36	16.41	28.68
IMERG	5.29	5.50	9.29	11.57	18.79	22.14	31.71	24.71	59.79	12.50	7.93	10.00
PERSIANN - CCS	42.50	52.21	51.14	63.14	77.79	70.07	109.29	88.71	114.29	11.14	15.86	60.14
MIMBRES												
OBSERVADO	20.22	23.04	32.67	23.79	56.91	66.73	76.54	93.50	112.88	54.58	22.15	34.04
CMORPH	16.26	18.98	20.82	33.71	40.52	51.07	72.58	52.38	85.92	44.18	16.59	23.42
IMERG	7.50	8.07	8.93	18.57	26.07	27.21	37.64	25.93	54.64	20.57	7.79	8.71
PERSIANN - CCS	39.07	44.57	47.57	78.29	74.00	62.64	85.43	66.93	60.79	20.57	21.36	38.29
MONTEMORELOS												
OBSERVADO	25.72	34.67	34.91	58.48	100.05	82.65	83.22	43.66	215.82	114.74	44.03	37.65
CMORPH	18.16	23.83	30.46	42.75	61.42	68.65	96.54	70.85	227.00	81.46	24.07	27.67
IMERG	6.21	7.36	11.21	19.29	31.57	32.50	43.57	37.64	76.79	27.07	11.43	10.36
PERSIANN - CCS	75.00	72.64	53.21	92.21	87.86	78.14	108.64	95.79	109.36	28.71	27.29	75.07
MONTERREY (OBS)												
OBSERVADO	18.92	19.69	25.09	43.81	49.09	52.74	80.85	33.87	202.08	57.65	29.80	27.84
CMORPH	10.50	9.64	16.98	26.38	34.48	28.98	57.57	34.10	89.75	37.42	11.10	18.08
IMERG	9.07	6.21	11.93	13.21	20.36	23.64	35.29	27.21	63.71	18.57	8.79	10.64
PERSIANN - CCS	57.14	48.71	50.00	65.57	72.71	53.14	91.71	89.79	98.29	22.29	19.57	53.64
RAYONES												
OBSERVADO	14.38	23.08	27.58	26.08	50.92	61.80	80.23	57.69	139.65	66.38	25.04	24.62
CMORPH	21.20	21.35	29.29	35.97	56.05	65.48	83.72	68.42	147.87	58.47	19.26	23.88
IMERG	7.36	8.29	10.71	19.07	28.36	27.79	40.64	30.71	65.00	22.14	9.00	9.21
PERSIANN - CCS	46.14	60.36	52.50	80.64	82.64	75.00	90.43	76.21	78.00	34.21	22.50	53.79
LA BOCA												
OBSERVADO	20.70	29.12	34.85	43.15	69.33	93.70	143.35	92.62	312.14	109.71	44.22	42.86
CMORPH	26.79	21.28	29.53	37.23	50.80	50.89	77.37	57.63	158.39	61.73	27.24	33.08
IMERG	6.21	6.79	10.93	17.43	25.64	28.29	42.07	37.07	76.79	22.50	8.07	9.50
PERSIANN - CCS	63.86	55.64	58.86	73.93	92.29	61.29	94.14	99.43	100.57	27.36	23.36	66.71
LA HUASTEQUITA												
OBSERVADO	5.85	7.82	14.86	14.25	22.18	44.22	84.11	35.60	142.98	37.12	12.82	15.51
CMORPH	10.50	9.64	16.98	26.38	34.48	28.98	57.57	34.10	89.75	37.42	11.10	18.08
IMERG	6.50	5.93	10.64	12.29	20.00	24.29	37.07	26.86	60.93	16.93	7.07	8.50
PERSIANN - CCS	51.43	46.43	65.57	54.71	73.71	48.71	92.64	79.29	76.29	23.57	16.79	44.36
DOCTOR GONZÁLEZ												
OBSERVADO	21.08	21.52	25.76	36.97	55.49	56.84	70.46	27.99	190.53	61.97	27.93	40.75
CMORPH	19.42	17.35	23.24	40.16	54.53	50.74	105.53	70.12	190.44	46.36	22.36	28.09
IMERG	6.50	7.29	12.29	15.29	21.64	28.93	35.86	29.50	73.43	20.36	8.57	11.29
PERSIANN - CCS	65.36	57.86	46.71	68.71	82.57	79.07	110.21	81.79	130.93	19.21	14.64	65.71
EJIDO MARÍN												
OBSERVADO	15.49	18.72	19.42	28.87	48.16	48.00	52.42	46.32	165.47	51.40	20.28	36.49
CMORPH	15.19	12.93	19.16	35.47	43.44	34.10	78.47	51.88	139.72	44.12	18.26	23.52
IMERG	7.00	7.57	11.93	15.64	20.71	27.00	35.21	28.36	71.86	21.07	9.00	10.71
PERSIANN - CCS	57.21	49.71	51.57	64.71	76.71	76.43	107.50	86.50	124.57	20.93	14.93	65.50
GRUTAS DE GARCIA												

<i>OBSERVADO</i>	4.65	4.08	13.81	14.07	19.82	41.45	44.82	43.87	102.12	29.24	11.45	8.56
<i>CMORPH</i>	9.97	7.34	12.05	20.13	31.82	18.88	55.90	33.84	86.41	22.90	12.19	16.50
<i>IMERG</i>	6.00	5.00	8.43	8.93	16.21	19.14	30.50	21.86	52.21	11.93	7.64	9.43
<i>PERSIANN - CCS</i>	45.93	43.29	44.71	54.71	65.71	42.21	100.07	69.07	83.64	18.64	20.71	46.50
HIGUERAS (DGE)												
<i>OBSERVADO</i>	13.50	15.19	14.27	33.58	36.08	50.08	84.67	58.05	153.08	27.67	18.06	21.38
<i>CMORPH</i>	15.19	12.93	19.16	35.47	43.44	34.10	78.47	51.88	139.72	44.12	18.26	23.52
<i>IMERG</i>	6.71	6.07	10.64	15.64	20.64	25.36	35.79	27.79	67.21	18.57	8.57	11.50
<i>PERSIANN - CCS</i>	47.64	42.21	44.36	66.14	78.36	67.14	124.14	87.07	122.93	17.93	14.21	60.71
VISTA HERMOSA												
<i>OBSERVADO</i>	25.06	24.75	30.20	86.20	75.32	87.34	71.03	77.92	177.12	91.18	30.18	27.24
<i>CMORPH</i>	20.17	20.05	26.23	47.14	59.14	63.77	128.46	81.08	227.19	56.72	15.72	30.24
<i>IMERG</i>	5.71	6.64	10.71	17.71	24.07	29.07	37.64	32.79	77.86	21.00	9.64	11.64
<i>PERSIANN - CCS</i>	58.29	55.79	64.79	79.57	97.00	90.29	124.79	95.71	151.71	25.57	14.64	68.79
LAS BRISAS												
<i>OBSERVADO</i>	17.52	21.52	23.38	59.92	62.90	55.77	68.31	57.99	153.92	55.23	28.14	29.58
<i>CMORPH</i>	15.99	22.59	28.62	48.15	69.17	78.26	110.74	85.37	275.66	75.03	20.07	30.57
<i>IMERG</i>	8.21	10.07	13.43	24.00	34.86	33.43	41.57	35.57	87.79	24.79	9.50	11.50
<i>PERSIANN - CCS</i>	76.86	60.00	69.93	92.00	93.79	90.29	112.79	109.71	124.14	21.43	23.43	61.21
CHUPADEROS DEL INDIO												
<i>OBSERVADO</i>	11.26	9.22	10.92	9.41	27.72	28.94	38.44	18.14	69.15	23.37	31.89	21.84
<i>CMORPH</i>	9.81	5.53	12.77	15.21	28.44	23.64	62.11	31.28	78.03	22.09	9.86	13.21
<i>IMERG</i>	5.50	4.43	8.21	9.50	15.57	17.86	30.43	22.29	44.21	12.29	7.21	9.29
<i>PERSIANN - CCS</i>	43.57	41.79	50.21	60.50	60.14	44.79	89.64	56.79	60.00	17.79	13.57	47.14
GARZA GONZALES												
<i>OBSERVADO</i>	14.94	19.75	31.17	50.96	74.66	46.68	84.20	29.96	176.22	43.76	20.50	32.06
<i>CMORPH</i>	20.17	20.05	26.23	47.14	59.14	63.77	128.46	81.08	227.19	56.72	15.72	30.24
<i>IMERG</i>	6.07	6.71	11.43	16.86	26.43	30.50	37.36	30.93	80.50	20.43	9.43	10.86
<i>PERSIANN - CCS</i>	59.29	60.43	62.14	78.14	101.93	89.00	120.29	93.36	142.50	20.93	15.64	66.86
PALOMITOS (GE)												
<i>OBSERVADO</i>	24.80	32.63	32.66	51.28	88.07	56.72	78.30	52.96	216.41	111.66	47.60	39.17
<i>CMORPH</i>	26.05	21.83	30.31	42.16	58.59	64.52	91.76	67.53	240.17	77.64	23.59	32.72
<i>IMERG</i>	5.93	7.07	11.57	19.07	27.14	30.14	40.86	33.86	81.00	26.50	11.57	9.79
<i>PERSIANN - CCS</i>	73.29	60.21	63.36	77.86	85.14	67.93	98.86	100.43	105.57	30.36	20.57	88.64
EL PASTOR												
<i>OBSERVADO</i>	30.65	35.76	40.02	61.88	105.88	93.68	116.86	73.52	251.71	153.97	46.89	44.42
<i>CMORPH</i>	18.16	23.83	30.46	42.75	61.42	68.65	96.54	70.85	227.00	81.46	24.07	27.67
<i>IMERG</i>	6.21	8.93	11.43	19.71	28.93	30.50	42.79	34.57	72.36	26.86	8.79	10.14
<i>PERSIANN - CCS</i>	68.00	90.93	56.64	83.57	87.50	73.93	98.07	93.50	100.50	34.29	27.57	74.14

Tabla 21. Correlación de Pearson Mensual por Estación

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SALTILLO (DGE)												
<i>CMORPH</i>	0.73	0.97	0.86	0.49	0.85	0.68	0.29	0.60	0.66	0.82	0.20	0.29
<i>IMERG</i>	0.86	0.93	0.84	0.75	0.67	0.60	0.62	0.57	0.76	0.89	-0.12	0.31
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.48	0.7	0.46	0.12	0.51	0.31	0.22	0.44	0.51	0.68	-0.08	0.33
POTRERO DE ABREGO												
<i>CMORPH</i>	0.70	0.93	0.98	0.40	0.81	0.16	0.19	-0.35	0.79	0.59	0.71	0.20
<i>IMERG</i>	0.74	0.95	0.73	0.15	0.76	0.33	0.34	0.06	0.77	0.20	0.90	0.34
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.62	0.74	0.09	0.54	0.76	0.19	-0.02	-0.08	0.52	0.78	0.32	0.11
LA ROSA												
<i>CMORPH</i>	0.66	0.95	0.53	0.51	0.38	0.36	0.49	0.66	0.55	0.94	0.19	0.78
<i>IMERG</i>	0.31	0.94	0.72	0.74	0.89	0.67	0.76	0.54	0.73	0.96	0.82	0.49
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.07	0.27	0.75	0.22	0.24	0.63	0.12	0.56	0.66	0.93	0.45	0.06
AGUA BLANCA												
<i>CMORPH</i>	0.61	0.87	0.91	0.56	0.29	0.25	0.69	0.49	0.38	0.53	0.99	0.82
<i>IMERG</i>	0.85	0.87	0.78	0.69	0.75	0.56	0.88	0.58	0.80	0.77	0.65	0.77

<i>PERSIANN - CCS</i>	0.37	0.81	0.70	0.45	0.11	0.37	0.52	0.38	0.42	0.59	0.38	0.01
APODACA												
<i>CMORPH</i>	0.38	0.81	0.94	0.59	0.58	0.87	0.85	0.44	0.71	0.44	0.56	0.69
<i>IMERG</i>	0.66	0.86	0.97	0.83	0.90	0.81	0.92	0.86	0.80	0.90	0.62	0.69
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.60	0.61	0.81	0.13	0.62	0.61	0.7	0.30	0.54	0.19	0.50	-0.09
EL CERRITO												
<i>CMORPH</i>	0.51	0.85	0.93	0.41	0.62	0.68	0.88	0.54	0.86	0.19	0.57	0.81
<i>IMERG</i>	0.54	0.94	0.94	0.96	0.80	0.54	0.95	0.72	0.83	0.69	0.93	0.80
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.09	0.62	0.21	0.13	0.72	0.33	0.53	0.30	0.50	-0.19	0.48	-0.09
EL CUCHILLO												
<i>CMORPH</i>	0.65	0.77	0.60	0.65	0.79	0.32	0.86	0.39	0.53	0.55	0.62	0.77
<i>IMERG</i>	0.68	0.92	0.83	0.86	0.84	0.51	0.83	0.31	0.52	0.83	0.56	0.93
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.57	0.90	0.69	0.83	0.68	0.52	0.59	0.06	0.68	0.59	0.09	0.07
EL PAJONAL												
<i>CMORPH</i>	0.68	0.95	0.99	0.47	0.88	0.57	0.71	-0.34	0.44	0.12	0.83	0.79
<i>IMERG</i>	0.71	0.85	0.69	0.74	0.75	0.57	0.58	-0.18	0.70	0.26	0.93	0.88
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.47	0.78	0.42	0.04	0.67	0.44	0.51	0.12	0.45	0.12	0.86	0.09
GENERAL BRAVO (DGE)												
<i>CMORPH</i>	0.63	0.88	0.42	0.58	0.84	0.82	0.54	0.87	0.74	0.35	0.87	0.67
<i>IMERG</i>	0.62	0.96	0.72	0.77	0.86	0.69	0.64	0.91	0.87	0.67	0.78	0.90
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.26	0.84	0.79	0.86	0.84	0.66	0.57	0.80	0.56	0.76	-0.12	0.14
LAGUNA DE SÁNCHEZ												
<i>CMORPH</i>	0.55	0.98	0.82	0.40	0.35	0.48	0.88	-0.09	0.76	0.20	0.74	0.76
<i>IMERG</i>	0.25	0.92	0.73	0.83	0.46	0.71	0.95	-0.13	0.76	0.57	0.62	0.84
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.32	0.84	0.60	-0.20	0.06	0.49	0.38	-0.43	0.18	0.09	0.65	0.21
LA POPA												
<i>CMORPH</i>	0.54	0.53	0.76	0.08	0.50	0.09	0.40	-0.11	0.16	0.47	0.70	0.61
<i>IMERG</i>	0.81	0.87	0.93	0.04	0.72	0.56	0.92	-0.10	0.63	0.51	0.81	0.84
<i>PERSIANN - CCS</i>	-0.03	0.20	0.59	0.04	0.27	0.40	0.52	-0.28	0.14	0.57	0.20	0.34
LAS ENRAMADAS												
<i>CMORPH</i>	0.77	0.80	0.86	0.83	0.64	0.69	0.79	0.50	0.77	0.91	0.59	0.83
<i>IMERG</i>	0.63	0.83	0.65	0.82	0.65	0.89	0.90	0.41	0.96	0.86	0.89	.92
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.15	0.87	0.49	0.71	0.48	0.74	0.66	0.26	0.74	0.27	0.48	-0.13
LOS RAMONES												
<i>CMORPH</i>	0.75	0.96	0.89	0.82	0.59	0.91	0.77	0.92	0.83	0.81	0.44	0.55
<i>IMERG</i>	0.35	0.94	0.75	0.81	0.64	0.95	0.89	0.90	0.89	0.89	0.85	0.66
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.34	0.80	0.31	0.57	0.51	0.78	0.75	0.65	0.74	0.37	0.41	0.40
MAMULIQUE												
<i>CMORPH</i>	0.51	0.97	0.91	0.92	0.16	0.71	0.86	0.51	0.75	0.46	0.81	0.71
<i>IMERG</i>	0.48	0.83	0.85	0.81	0.09	0.75	0.94	0.72	0.90	0.75	0.83	0.93
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.17	0.78	0.56	0.69	0.34	0.90	0.70	0.18	0.70	0.17	0.57	0.26
MIMBRES												
<i>CMORPH</i>	0.28	0.84	0.87	0.17	0.64	0.64	0.49	0.02	0.70	0.80	0.62	0.69
<i>IMERG</i>	0.74	0.88	0.85	0.23	0.55	0.44	0.56	-0.26	0.76	0.71	0.89	0.77
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.21	0.91	0.73	0.47	0.55	0.39	0.63	-0.25	0.57	0.78	0.45	0.24
MONTEMORELOS												
<i>CMORPH</i>	0.42	0.84	0.83	0.92	0.50	0.69	0.46	0.28	0.77	0.73	0.53	0.85
<i>IMERG</i>	0.58	0.90	0.75	0.89	0.73	0.72	0.85	0.62	0.75	0.74	0.79	0.82
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.01	0.83	0.68	0.41	0.40	0.62	0.40	-0.09	0.18	0.45	0.30	-0.15
MONTERREY (OBS)												
<i>CMORPH</i>	0.30	0.83	0.88	0.38	0.63	0.58	0.92	0.54	0.58	0.34	0.49	0.92
<i>IMERG</i>	0.45	0.92	0.91	0.96	0.86	0.82	0.97	0.78	0.79	0.82	0.90	0.94
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.13	0.63	0.38	0.15	0.42	0.66	0.66	0.54	0.37	-0.09	0.51	0.36
RAYONES												
<i>CMORPH</i>	0.27	0.87	0.90	0.62	0.75	0.37	0.77	-0.09	0.86	0.49	0.26	0.81
<i>IMERG</i>	0.87	0.78	0.84	0.49	0.59	0.73	0.81	0.14	0.78	0.82	0.60	0.68
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.32	0.73	0.70	0.16	0.45	0.43	0.21	-0.03	0.35	0.67	0.46	0.16
LA BOCA												
<i>CMORPH</i>	0.49	0.81	0.88	0.47	0.59	0.52	0.87	0.62	0.84	0.61	0.41	0.69
<i>IMERG</i>	0.48	0.93	0.89	0.90	0.74	0.63	0.96	0.65	0.88	0.40	0.88	0.73
<i>PERSIANN - CCS</i>	0.48	0.75	0.32	-0.13	0.72	0.48	0.36	0.37	0.36	-0.32	0.33	-0.46

LA HUASTEQUITA												
CMORPH	0.32	0.94	0.89	0.58	0.82	0.46	0.92	0.50	0.80	0.36	0.91	0.91
IMERG	0.20	0.97	0.83	0.34	0.72	0.35	0.95	0.50	0.77	0.49	0.93	0.97
PERSIANN - CCS	0.06	0.69	0.79	0.65	0.15	0.15	0.72	0.47	0.33	0.15	0.65	0.44
DOCTOR GONZÁLEZ												
CMORPH	0.53	0.94	0.98	0.84	0.74	0.46	0.78	0.78	0.57	0.82	0.51	0.73
IMERG	0.64	0.91	0.89	0.94	0.72	0.59	0.78	0.81	0.64	0.85	0.77	0.93
PERSIANN - CCS	0.60	0.70	0.74	0.44	0.76	0.06	0.76	0.47	0.61	0.58	0.48	0.51
EJIDO MARÍN												
CMORPH	0.35	0.93	0.90	0.59	0.77	0.71	0.86	0.74	0.53	0.20	0.45	0.80
IMERG	0.17	0.96	0.92	0.92	0.71	0.80	0.91	0.91	0.73	0.76	0.72	0.85
PERSIANN - CCS	-0.14	0.73	0.59	0.18	0.91	0.52	0.60	0.76	0.61	0.13	0.48	0.23
GRUTAS DE GARCIA												
CMORPH	-0.24	0.39	0.89	0.45	0.52	0.23	0.34	0.60	0.87	0.50	0.25	0.76
IMERG	0.17	0.55	0.96	0.50	0.54	0.65	0.56	0.80	0.80	0.59	0.67	0.61
PERSIANN - CCS	0.02	0.15	0.80	0.87	0.5	0.59	0.05	0.59	0.70	-0.02	0.55	0.00
HIGUERAS (DGE)												
CMORPH	0.77	0.97	0.91	0.92	0.70	0.87	0.87	0.80	0.49	0.33	0.47	0.58
IMERG	0.68	0.83	0.95	0.81	0.53	0.79	0.92	0.93	0.62	0.33	0.73	0.64
PERSIANN - CCS	0.33	0.78	0.56	0.69	0.41	0.73	0.74	0.73	0.48	0.08	0.66	0.15
VISTA HERMOSA												
CMORPH	0.05	0.92	0.35	0.37	-0.29	0.50	0.47	0.35	0.52	0.73	0.63	0.34
IMERG	0.33	0.90	0.54	0.56	0.15	0.39	0.79	0.32	0.66	0.79	0.72	0.64
PERSIANN - CCS	0.21	0.90	0.29	-0.31	-0.07	0.50	0.75	-0.19	0.46	0.26	0.52	0.42
LAS BRISAS												
CMORPH	0.67	0.78	0.73	0.83	0.42	0.65	0.80	0.26	0.84	0.86	0.53	0.60
IMERG	0.75	0.97	0.63	0.92	0.61	0.68	0.89	0.23	0.74	0.79	0.82	0.74
PERSIANN - CCS	0.42	0.93	0.85	0.24	0.42	0.50	0.72	0.04	0.27	0.06	0.40	-0.02
CHUPADEROS DEL INDIIO												
CMORPH	0.26	0.65	0.84	0.55	0.40	0.00	0.55	0.61	0.63	0.41	0.49	0.76
IMERG	0.61	0.92	0.88	0.52	0.68	0.51	0.93	0.85	0.80	0.38	0.77	0.77
PERSIANN - CCS	0.60	0.57	0.90	0.73	0.67	0.15	0.62	0.24	0.42	0.09	0.32	0.33
GARZA GONZALES												
CMORPH	0.89	0.88	0.76	0.78	0.31	0.82	0.84	0.76	0.68	0.68	0.84	0.71
IMERG	0.54	0.80	0.77	0.67	0.58	0.84	0.92	0.88	0.89	0.72	0.79	0.93
PERSIANN - CCS	0.18	0.78	0.36	0.75	0.32	0.67	0.73	0.69	0.50	0.48	0.45	0.04
PALOMITOS (GE)												
CMORPH	0.43	0.75	0.87	0.71	0.34	0.81	0.93	0.63	0.78	0.87	0.03	0.88
IMERG	0.45	0.93	0.83	0.90	0.61	0.68	0.94	0.68	0.76	0.83	0.89	0.91
PERSIANN - CCS	0.05	0.68	0.13	-0.08	0.55	0.47	0.51	0.47	0.42	-0.13	0.20	-0.19
EL PASTOR												
CMORPH	0.61	0.80	0.69	0.84	0.53	0.68	0.88	0.51	0.78	0.64	0.44	0.61
IMERG	0.56	0.92	0.63	0.90	0.82	0.71	0.94	0.63	0.84	0.67	0.83	0.64
PERSIANN - CCS	0.42	0.73	0.47	0.07	0.04	0.40	0.53	0.43	0.59	0.08	0.40	-0.10

Tabla 22. Correlación de Spearman Mensual por Estación

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SALTILLO (DGE)												
CMORPH	0.68	0.68	0.81	0.82	0.68	0.73	0.37	0.57	0.61	0.60	0.39	0.34
IMERG	0.71	0.71	0.50	0.74	0.75	0.65	0.78	0.39	0.66	0.65	0.27	0.27
PERSIANN - CCS	0.34	0.34	0.43	0.49	0.36	0.26	0.46	0.45	0.28	0.74	-0.13	0.07
POTRERO DE ABREGO												
CMORPH	0.66	0.91	0.67	0.46	0.71	0.21	0.24	-0.43	0.71	0.54	0.55	0.27
IMERG	0.77	0.80	0.71	0.47	0.81	0.34	0.12	0.01	0.73	0.26	0.74	0.46
PERSIANN - CCS	0.66	0.66	0.23	0.70	0.41	0.22	0.05	0.00	0.33	0.82	0.64	0.17
LA ROSA												
CMORPH	0.74	0.72	0.55	0.64	0.27	0.64	0.18	0.70	0.24	0.83	0.41	0.53

IMERG	0.50	0.83	0.85	0.86	0.90	0.72	0.63	0.37	0.37	0.85	0.71	0.49
PERSIANN - CCS	0.18	0.29	0.64	0.38	0.25	0.61	0.25	0.54	0.33	0.69	0.47	-0.08
AGUA BLANCA												
CMORPH	0.72	0.88	0.51	0.46	0.37	0.44	0.36	0.40	0.34	0.50	0.71	0.67
IMERG	0.87	0.82	0.70	0.48	0.79	0.74	0.53	0.48	0.74	0.60	0.48	0.49
PERSIANN - CCS	0.40	0.69	0.65	0.14	0.24	0.45	0.47	0.16	0.47	0.47	0.55	0.18
APODACA												
CMORPH	-0.04	0.65	0.82	0.49	0.14	0.85	0.73	0.13	0.68	0.58	0.65	0.58
IMERG	0.52	0.87	0.91	0.50	0.82	0.76	0.86	0.89	0.80	0.87	0.63	0.68
PERSIANN - CCS	0.32	0.40	0.65	-0.25	0.28	0.62	0.42	-0.06	0.63	0.40	0.76	0.08
EL CERRITO												
CMORPH	0.44	0.82	0.59	0.77	0.29	0.56	0.67	0.55	0.82	0.17	0.43	0.62
IMERG	0.58	0.67	0.74	0.87	0.92	0.48	0.94	0.76	0.82	0.70	0.87	0.90
PERSIANN - CCS	0.21	0.53	0.19	0.32	0.60	0.50	0.63	0.26	0.65	-0.05	0.56	0.01
EL CUCHILLO												
CMORPH	0.47	0.79	0.53	0.63	0.78	0.58	0.90	0.60	0.53	0.63	0.55	0.68
IMERG	0.65	0.88	0.84	0.84	0.82	0.59	0.87	0.72	0.57	0.84	0.68	0.81
PERSIANN - CCS	0.47	0.69	0.72	0.55	0.58	0.57	0.61	0.42	0.54	0.64	0.37	0.16
EL PAJONAL												
CMORPH	0.69	0.79	0.91	0.34	0.79	0.53	0.25	-0.25	0.24	0.40	0.79	0.77
IMERG	0.76	0.79	0.60	0.53	0.77	0.70	0.41	0.04	0.57	0.27	0.73	0.89
PERSIANN - CCS	0.47	0.78	0.32	-0.18	0.25	.40.	0.69	0.16	0.29	0.31	0.82	0.22
GENERAL BRAVO (DGE)												
CMORPH	0.61	0.73	0.48	0.63	0.45	0.65	0.75	0.59	0.71	0.47	0.54	0.72
IMERG	0.63	0.88	0.82	0.79	0.77	0.66	0.83	0.81	0.80	0.74	0.70	0.84
PERSIANN - CCS	0.41	0.62	0.69	0.84	0.55	0.73	0.81	0.59	0.66	0.69	-0.09	0.38
LAGUNA DE SÁNCHEZ												
CMORPH	0.57	0.92	0.62	0.50	0.46	0.35	0.61	-0.27	0.65	0.27	0.86	0.64
IMERG	0.77	0.90	0.67	0.58	0.64	0.55	0.67	0.20	0.85	0.71	0.81	0.88
PERSIANN - CCS	0.42	0.62	0.61	0.07	0.05	0.52	0.27	-0.32	0.37	0.19	0.72	0.22
LA POPA												
CMORPH	0.40	0.67	0.26	0.46	0.18	0.37	0.30	-0.46	0.24	-0.05	0.54	0.61
IMERG	0.63	0.77	0.60	0.43	0.50	0.80	0.57	-0.18	0.57	0.20	0.60	0.80
PERSIANN - CCS	-0.03	0.47	0.40	0.41	-0.04	0.70	0.29	-0.44	0.22	-0.07	0.35	0.36
LAS ENRAMADAS												
CMORPH	0.63	0.79	0.62	0.80	0.65	0.78	0.24	0.71	0.73	0.46	0.76	0.75
IMERG	0.61	0.83	0.63	0.90	0.70	0.85	0.50	0.45	0.92	0.72	0.87	0.81
PERSIANN - CCS	-0.02	0.63	0.41	0.70	0.63	0.76	0.63	0.42	0.87	0.62	0.60	0.05
LOS RAMONES												
CMORPH	0.51	0.81	0.59	0.66	0.58	0.80	0.55	0.65	0.72	0.57	0.69	0.54
IMERG	0.29	0.78	0.71	0.87	0.70	0.83	0.60	0.74	0.92	0.78	0.81	0.72
PERSIANN - CCS	0.30	0.70	0.47	0.50	0.59	0.78	0.87	0.52	0.82	0.61	0.49	0.23
MAMULIQUE												
CMORPH	0.33	0.65	0.74	0.72	0.24	0.77	0.78	0.31	0.78	0.27	0.62	0.71
IMERG	0.23	0.71	0.84	0.87	0.36	0.81	0.82	0.13	0.92	0.46	0.85	0.87
PERSIANN - CCS	-0.04	0.48	0.58	0.53	0.48	0.65	0.60	0.29	0.70	0.15	0.78	0.34
MIMBRES												
CMORPH	0.30	0.72	0.73	0.32	0.55	0.61	0.46	0.09	0.73	0.59	0.61	0.75
IMERG	0.57	0.69	0.78	0.54	0.46	0.52	0.49	-0.12	0.63	0.71	0.67	0.83
PERSIANN - CCS	0.22	0.60	0.78	0.44	0.51	0.29	0.44	-0.05	0.42	0.56	0.62	0.12
MONTEMORELOS												
CMORPH	0.39	0.74	0.58	0.68	0.30	0.81	0.66	0.00	0.84	0.70	0.59	0.82
IMERG	0.57	0.88	0.48	0.76	0.69	0.84	0.67	0.44	0.77	0.71	0.62	0.84
PERSIANN - CCS	0.13	0.77	0.61	0.35	-0.07	0.71	0.28	0.07	0.43	0.59	0.58	0.15
MONTERREY (OBS)												
CMORPH	0.35	0.56	0.65	0.40	0.56	0.55	0.51	0.30	0.55	0.41	0.66	0.74
IMERG	0.42	0.61	0.84	0.91	0.87	0.75	0.52	0.35	0.72	0.80	0.75	0.91
PERSIANN - CCS	0.16	0.39	0.50	0.33	0.28	0.88	0.27	0.19	0.49	21.00	0.76	0.40
RAYONES												
CMORPH	0.27	0.84	0.74	0.62	0.84	0.47	0.78	0.01	0.77	0.67	0.53	0.58
IMERG	0.77	0.85	0.88	0.43	0.63	0.79	0.68	0.27	0.91	0.86	0.69	0.46

PERSIANN - CCS	0.50	0.84	0.85	0.08	0.39	0.53	0.29	0.18	0.71	0.65	0.53	0.05
LA BOCA												
CMORPH	0.37	0.89	0.57	0.47	0.39	0.42	0.66	0.42	0.77	0.50	0.25	0.59
IMERG	0.56	0.78	0.62	0.92	0.73	0.55	0.68	0.66	0.84	0.37	0.81	0.75
PERSIANN - CCS	0.42	0.69	0.28	-0.10	0.48	0.44	0.49	0.07	0.56	0.01	0.65	-0.37
LA HUASTEQUITA												
CMORPH	0.74	0.91	0.53	0.49	0.60	0.40	0.61	0.53	0.86	0.43	0.76	0.71
IMERG	0.59	0.92	0.74	0.75	0.53	0.52	0.48	0.59	0.87	0.34	0.86	0.91
PERSIANN - CCS	0.44	0.57	0.70	0.51	0.26	0.24	0.21	0.38	0.54	0.01	0.55	0.35
DOCTOR GONZÁLEZ												
CMORPH	0.54	0.72	0.74	0.81	0.57	0.48	0.41	0.42	0.57	0.59	0.67	0.75
IMERG	0.59	0.79	0.82	0.86	0.61	0.43	0.66	0.66	0.72	0.52	0.82	0.87
PERSIANN - CCS	0.73	0.62	0.67	0.34	0.45	0.32	0.45	0.47	0.74	0.62	0.71	0.56
EJIDO MARÍN												
CMORPH	0.26	0.72	0.72	0.72	0.56	0.53	0.71	0.44	0.57	0.41	0.65	0.76
IMERG	0.21	0.91	0.83	0.81	0.51	0.61	0.88	0.70	0.75	0.80	0.83	0.78
PERSIANN - CCS	-0.15	0.68	0.62	-0.07	0.73	0.48	0.32	0.55	0.61	-0.02	0.42	0.33
GRUTAS DE GARCIA												
CMORPH	-0.02	0.60	0.53	0.18	0.26	0.23	0.42	0.43	0.81	0.25	0.61	0.83
IMERG	0.30	0.74	0.85	0.54	0.58	0.62	0.78	0.36	0.88	0.56	0.67	0.70
PERSIANN - CCS	0.11	0.64	0.64	0.23	0.37	0.49	-0.02	0.63	0.87	0.04	0.49	0.02
HIGUERAS (DGE)												
CMORPH	0.61	0.60	0.82	0.72	0.60	0.78	0.59	0.44	0.47	0.41	0.75	0.36
IMERG	0.55	0.69	0.98	0.87	0.39	0.70	0.84	0.48	0.51	0.44	0.73	0.57
PERSIANN - CCS	0.31	0.43	0.76	0.53	0.44	0.64	0.48	0.44	0.33	-0.13	0.76	0.10
VISTA HERMOSA												
CMORPH	-0.02	0.82	0.11	0.36	-0.05	0.53	0.57	0.09	0.55	0.25	0.72	0.01
IMERG	0.16	0.81	0.44	0.23	0.28	0.54	0.86	0.55	0.56	0.55	0.81	0.37
PERSIANN - CCS	0.01	0.56	0.19	-0.32	0.38	0.40	0.81	0.07	0.37	0.32	0.55	0.45
LAS BRISAS												
CMORPH	0.55	0.67	0.59	0.88	0.37	0.83	0.52	0.15	0.78	0.42	0.51	0.60
IMERG	0.73	0.85	0.83	0.92	0.50	0.87	0.63	0.29	0.74	0.47	0.85	0.71
PERSIANN - CCS	0.23	0.86	0.83	0.47	0.38	0.82	0.69	0.00	0.46	0.27	0.61	0.27
CHUPADEROS DEL INDIO												
CMORPH	0.44	0.77	0.38	0.65	0.36	0.20	0.15	0.15	0.69	0.42	0.66	0.72
IMERG	0.67	0.78	0.67	0.51	0.58	0.53	0.58	0.66	0.86	0.53	0.93	0.82
PERSIANN - CCS	0.37	0.45	0.56	0.16	0.50	0.33	0.38	0.50	0.30	0.12	0.57	0.25
GARZA GONZALES												
CMORPH	0.72	0.70	0.76	0.56	0.44	0.74	0.76	0.53	0.55	0.62	0.82	0.55
IMERG	0.55	0.70	0.91	0.63	0.65	0.87	0.83	0.63	0.84	0.85	0.79	0.82
PERSIANN - CCS	0.17	0.80	0.69	0.54	0.48	0.65	0.71	0.13	0.53	0.48	0.43	0.02
PALOMITOS (GE)												
CMORPH	0.40	0.75	0.55	0.44	0.40	0.81	0.74	0.51	0.94	0.61	0.11	0.68
IMERG	0.41	0.81	0.55	0.64	0.71	0.79	0.72	0.58	0.80	0.77	0.87	0.94
PERSIANN - CCS	0.00	0.65	0.13	0.02	0.48	0.77	0.35	0.35	0.64	0.21	0.41	-0.09
EL PASTOR												
CMORPH	0.62	0.65	0.64	0.53	0.38	0.77	0.88	0.54	0.72	0.71	0.52	0.49
IMERG	0.68	0.89	0.62	0.54	0.82	0.82	0.94	0.55	0.90	0.83	0.80	0.62
PERSIANN - CCS	0.51	0.74	0.37	0.16	0.27	0.54	0.53	0.54	0.64	0.49	0.69	0.24

Tabla 23. Resultados de Correlación de Pearson, Spearman, RMSE, MAE, BIAS y promedio de precipitación anual por estación para cada observación

	PEARSON	SPEARMAN	RMSE	MAE	BIAS	PROMEDIO
	Anual	Anual	mm	mm	mm	mm / año
SALTILLO (DGE)						281.92
CMORPH	0.70	0.82	340.98	325.74	14.88	325.29
IMERG	0.75	0.72	244.83	241.36	-69.99	238.08

PERSIANN - CCS	0.27	0.17	782.15	776.91	442.76	763.54
POTRERO DE ABREGO						420.51
CMORPH	0.59	0.50	522.39	514.05	52.99	505.78
IMERG	0.43	0.29	321.55	312.00	-139.72	311.38
PERSIANN - CCS	0.55	0.59	769.66	737.55	263.70	746.00
LA ROSA						211.22
CMORPH	0.41	0.43	305.80	294.75	54.88	292.08
IMERG	0.86	0.87	197.94	195.00	-44.65	189.38
PERSIANN - CCS	0.71	0.65	726.12	716.36	456.52	707.69
AGUA BLANCA						712.38
CMORPH	0.50	0.44	455.69	394.46	-394.46	317.92
IMERG	0.81	0.61	495.78	450.15	-450.15	262.23
PERSIANN - CCS	-0.08	-0.21	336.30	258.76	-53.68	658.69
APODACA						645.34
CMORPH	0.83	0.91	198.76	151.91	-129.44	515.90
IMERG	0.94	0.89	387.16	345.72	-345.72	299.62
PERSIANN - CCS	0.34	0.43	307.29	240.94	115.58	760.92
EL CERRITO						1027.85
CMORPH	0.81	0.76	522.34	483.39	-483.39	544.46
IMERG	0.93	0.92	773.97	737.77	-737.77	290.08
PERSIANN - CCS	0.31	0.07	397.39	320.35	-230.00	797.85
EL CUCHILLO						616.28
CMORPH	0.74	0.53	246.34	192.55	191.91	808.19
IMERG	0.82	0.75	365.56	336.89	-336.89	279.38
PERSIANN - CCS	0.53	0.35	365.04	284.38	265.03	881.31
EL PAJONAL						591.20
CMORPH	0.68	0.56	179.27	143.95	-85.42	505.78
IMERG	0.79	0.54	326.76	284.74	-284.74	306.46
PERSIANN - CCS	0.20	0.08	286.72	233.97	126.95	718.15
GENERAL BRAVO (DGE)						629.12
CMORPH	0.87	0.83	116.39	95.04	32.45	661.57
IMERG	0.89	0.93	406.63	371.58	-371.58	257.54
PERSIANN - CCS	0.73	0.66	282.29	230.90	202.50	831.62
LAGUNA DE SÁNCHEZ						925.17
CMORPH	0.72	0.66	555.31	419.39	-419.39	505.78
IMERG	0.91	0.82	728.45	626.02	-626.02	299.15
PERSIANN - CCS	-0.02	-0.14	538.21	406.38	-164.94	760.23
LA POPA						238.89
CMORPH	0.14	0.24	184.43	152.07	109.68	348.57
IMERG	0.71	0.52	111.23	82.08	-60.74	178.15
PERSIANN - CCS	0.08	-0.22	425.17	373.11	373.11	612.00
LAS ENRAMADAS						702.36
CMORPH	0.92	0.80	139.46	119.64	100.72	803.09
IMERG	0.94	0.80	427.69	397.82	-397.82	304.54
PERSIANN - CCS	0.48	0.46	330.62	284.87	219.87	922.23
LOS RAMONES						619.42
CMORPH	0.88	0.87	216.06	187.58	183.67	803.09
IMERG	0.88	0.92	349.26	326.03	-326.03	293.38
PERSIANN - CCS	0.70	0.53	340.77	289.54	275.12	894.54
MAMULIQUE						547.72
CMORPH	0.69	0.56	133.27	114.46	-19.95	527.77
IMERG	0.82	0.59	351.08	326.88	-326.88	220.85
PERSIANN - CCS	0.52	0.52	275.27	225.37	196.97	744.69
MIMBRES						638.33
CMORPH	0.80	0.81	247.81	222.04	-157.08	481.25
IMERG	0.78	0.66	448.20	411.15	-387.95	250.38
PERSIANN - CCS	0.53	0.56	236.24	168.41	-1.72	636.62
MONTEMORELOS						912.93
CMORPH	0.74	0.74	304.79	261.96	-132.11	780.82
IMERG	0.78	0.79	683.59	604.85	-596.39	316.54
PERSIANN - CCS	0.18	0.05	438.97	342.08	-10.24	902.69

MONTERREY (OBS)							700.48
	CMORPH	0.76	0.62	387.91	323.39	-323.39	377.08
	IMERG	0.91	0.74	504.38	449.94	-449.94	250.54
	PERSIANN - CCS	0.39	0.37	296.45	213.49	15.22	715.69
RAYONES							621.56
	CMORPH	0.79	0.65	154.74	125.49	15.35	636.91
	IMERG	0.74	0.74	396.05	344.64	-344.64	276.92
	PERSIANN - CCS	0.38	0.33	284.98	222.19	126.52	748.08
LA BOCA							1099.00
	CMORPH	0.78	0.89	529.23	460.05	-460.05	638.95
	IMERG	0.90	0.87	862.72	805.77	-805.77	293.23
	PERSIANN - CCS	0.16	0.02	500.41	372.05	-285.54	813.46
LA HUASTEQUITA							457.47
	CMORPH	0.73	0.80	175.23	131.56	-80.39	377.08
	IMERG	0.92	0.93	268.08	218.01	-218.01	239.46
	PERSIANN - CCS	0.21	0.26	342.63	275.13	213.22	670.69
DOCTOR GONZÁLEZ							681.18
	CMORPH	0.77	0.88	134.89	101.48	-7.86	673.32
	IMERG	0.71	0.70	436.22	409.79	-409.79	271.38
	PERSIANN - CCS	0.53	0.59	255.44	184.42	120.90	802.08
EJIDO MARÍN							584.68
	CMORPH	0.63	0.51	158.15	114.80	-68.77	515.90
	IMERG	0.63	0.47	346.05	317.52	-317.52	267.15
	PERSIANN - CCS	0.37	0.24	304.89	256.57	188.09	772.77
GRUTAS DE GARCIA							356.95
	CMORPH	0.63	0.69	121.59	86.97	-22.27	334.68
	IMERG	0.56	0.62	200.92	158.95	-156.79	200.15
	PERSIANN - CCS	0.54	0.62	328.35	280.36	272.36	629.31
HIGUERAS (DGE)							543.35
	CMORPH	0.55	0.60	194.26	157.21	-27.44	515.90
	IMERG	0.72	0.72	337.26	287.73	-287.73	255.62
	PERSIANN - CCS	0.20	0.26	351.45	296.15	204.04	747.38
VISTA HERMOSA							852.80
	CMORPH	0.38	0.42	301.48	241.86	-70.50	782.30
	IMERG	0.54	0.57	608.47	569.11	-569.11	283.69
	PERSIANN - CCS	0.21	0.24	344.00	270.77	48.74	901.54
LAS BRISAS							688.41
	CMORPH	0.72	0.62	257.34	210.10	168.62	857.02
	IMERG	0.82	0.82	413.10	369.82	-356.41	332.00
	PERSIANN - CCS	0.34	0.28	386.07	298.19	232.59	921.00
CHUPADEROS DEL INDIO							312.72
	CMORPH	0.48	0.49	114.32	88.58	-0.49	312.23
	IMERG	0.79	0.78	146.73	124.65	-124.65	188.08
	PERSIANN - CCS	0.50	0.18	296.57	259.28	259.28	572.00
GARZA GONZALES							677.05
	CMORPH	0.82	0.71	189.20	152.02	105.25	782.30
	IMERG	0.87	0.93	422.63	390.05	-390.05	287.00
	PERSIANN - CCS	0.28	0.38	362.04	319.84	206.95	884.00
PALOMITOS (GE)							885.36
	CMORPH	0.79	0.78	198.45	158.07	-102.61	782.75
	IMERG	0.89	0.87	612.82	578.90	-578.90	306.46
	PERSIANN - CCS	0.14	-0.11	333.96	263.61	-23.21	862.15
EL PASTOR							1112.98
	CMORPH	0.66	0.69	418.31	338.99	-332.16	780.82
	IMERG	0.84	0.79	858.14	811.21	-811.21	301.77
	PERSIANN - CCS	0.12	0.06	466.11	381.79	-231.05	881.92

Tabla 24. Resultados de la Prueba Mann - Kendall mensuales y anuales por Estación

ESTACIÓN		MK Mensual			MK Anual		
ID	NOMBRE	Z	S	P	Z	S	P
5048	SALTILLO (DGE)	0.885	507.000	0.376	-0.069	-2.000	0.945
5148	POTRERO DE ABREGO	3.766	2149.000	0.000	1.852	28.000	0.064
5170	LA ROSA	0.356	202.000	0.722	0.754	12.000	0.451
19002	AGUA BLANCA	-0.276	-181.000	0.782	-1.281	-22.000	0.200
19004	APODACA	1.444	942.000	0.149	0.061	2.000	0.951
19015	EL CERRITO	1.604	988.000	0.109	0.183	4.000	0.855
19016	EL CUCHILLO	1.788	1167.000	0.074	-0.183	-4.000	0.855
19018	EL PAJONAL	0.930	601.000	0.352	-0.183	-4.000	0.855
19022	GENERAL BRAVO (DGE)	2.633	1718.000	0.008	0.549	10.000	0.583
19033	LAGUNA DE Sánchez	0.108	69.000	0.914	-0.671	-12.000	0.502
19036	LA POPA	1.722	1067.000	0.085	0.183	4.000	0.855
19039	LAS ENRAMADAS	1.990	1299.000	0.047	0.000	0.000	1.000
19042	LOS RAMONES	1.889	1232.000	0.059	0.000	0.000	1.000
19044	MAMULIQUE	1.206	780.000	0.228	1.281	22.000	0.200
19047	MIMBRES	3.852	2503.000	0.000	1.159	20.000	0.246
19048	MONTEMORELOS	2.984	1947.000	0.003	0.061	2.000	0.951
19052	MONTERREY (OBS)	1.101	719.000	0.271	-0.061	-2.000	0.951
19053	RAYONES	2.557	1657.000	0.011	0.793	14.000	0.428
19069	LA BOCA	0.903	590.000	0.366	-0.305	-6.000	0.760
19096	LA HUASTEQUITA	1.596	1039.000	0.111	-0.061	-2.000	0.951
19105	DOCTOR GONZÁLEZ	2.284	1490.000	0.022	0.793	14.000	0.428
19117	EJIDO MARÍN	1.485	970.000	0.138	1.281	22.000	0.200
19123	GRUTAS DE GARCIA	2.587	1649.000	0.010	1.891	32.000	0.059
19124	HIGUERAS (DGE)	2.282	1418.000	0.022	0.671	12.000	0.502
19162	VISTA HERMOSA	1.595	1040.000	0.111	0.671	12.000	0.502
19163	LAS BRISAS	2.314	1511.000	0.021	0.671	12.000	0.502
19165	CHUPADEROS DEL INDIO	2.490	1587.000	0.013	1.769	30.000	0.077
19169	GARZA GONZALES	1.181	771.000	0.238	-0.671	-12.000	0.502
19173	PALOMITOS (GE)	1.980	1293.000	0.048	-0.427	-8.000	0.669
19189	EL PASTOR	2.123	1386.000	0.034	-0.183	-4.000	0.855