

**Evaluación de productos de lluvia satelitales en la cuenca del río Garagoa mediante  
Google Earth Engine**

**Nathalia Andrea Pelaez Gonzalez**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Civil**

**Director**

**Luis Carlos Tiria Sandoval**

**Codirectores**

**Francisco Magaña Hernández**

**Carlos Fernando Arenas Jiménez**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**División de Ingenierías y Arquitectura**

**Ingeniería Civil**

**2024**

**Agradecimientos**

Agradecimiento especial a mis padres, porque se esforzaron para que yo llegara hasta acá. A mi mami, por las madrugadas a preparar mis desayunos, por decirme que soy capaz y llenarme de confianza. A mi papi, por salir todos los días a buscar los recursos para cumplir este sueño, por compartir sus conocimientos y vivencias conmigo. A mi hermano Jhonatan, por expresarme siempre lo orgulloso que se sentía de mí y a mi hermano Diego, por regalarme su compañía en cada una de las noches eternas de estudio.

Al ingeniero Carlos Arenas, por darme la oportunidad de aprender junto a él, de regalarme su tiempo y dedicación para que este trabajo de grado saliera adelante. Por último, agradezco al ingeniero Francisco Magaña, por brindar su tiempo y conocimientos, por su disposición y gran ayuda.

## Contenido

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                      | 12 |
| 1.1 Planteamiento del problema .....                    | 14 |
| 1.2 Justificación.....                                  | 15 |
| 1.3 Objetivos .....                                     | 17 |
| 1.3.1 Objetivo general .....                            | 17 |
| 1.3.2 Objetivos específicos.....                        | 17 |
| 2. Marco referencial .....                              | 18 |
| 2.1 Estado del arte .....                               | 18 |
| 2.1 Marco teórico .....                                 | 20 |
| 2.1.1 CHIRPS .....                                      | 20 |
| 2.1.2. PERSIANN-CDR .....                               | 21 |
| 2.1.3. Precipitación por estaciones pluviométricas..... | 21 |
| 2.1.4. Métodos de corrección de sesgo.....              | 22 |
| 2.1.5. Phytón en la hidrología.....                     | 24 |
| 2.2 Marco legal.....                                    | 24 |
| 3. Área de estudio y conjuntos de datos.....            | 25 |
| 3.1 Área de estudio.....                                | 25 |
| 3.1.1. Delimitación de la zona de estudio.....          | 26 |
| 3.2 Datos.....                                          | 27 |
| 4. Metodología .....                                    | 29 |
| 4.1 Análisis de datos de lluvia satelital .....         | 30 |
| 4.1.1. Estadísticas descriptivas .....                  | 30 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 4.1.2. Estadísticas categóricas ..... | 32 |
| 4.2. Resultados .....                 | 34 |
| 6. Conclusiones.....                  | 65 |
| Referencias.....                      | 68 |

**Lista de tablas**

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> <i>Municipios que conforman la cuenca del río Garagoa.</i> .....           | 26 |
| <b>Tabla 2.</b> <i>Estaciones pluviométricas con porcentaje de datos disponibles</i> ..... | 27 |
| <b>Tabla 3.</b> <i>Información de satélites de lluvia</i> .....                            | 28 |
| <b>Tabla 4.</b> <i>Métricas Coeficiente de Pearson de correlación</i> .....                | 31 |

**Lista de Figuras**

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> <i>Grafica distribución acumulado vs precipitación por mes.</i> .....                                                                            | 23 |
| <b>Figura 2.</b> <i>Delimitación de la cuenca del río Garagoa</i> .....                                                                                           | 27 |
| <b>Figura 3.</b> <i>Metodología.</i> .....                                                                                                                        | 29 |
| <b>Figura 4.</b> Diagramas de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.....                                                                     | 35 |
| <b>Figura 5.</b> Diagramas de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.....                                                                     | 36 |
| <b>Figura 6.</b> Diagramas de dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.....                                                                     | 37 |
| <b>Figura 7.</b> Diagramas de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.....                                                                     | 38 |
| <b>Figura 8.</b> Diagrama de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo. ....                                                                     | 39 |
| <b>Figura 9.</b> Diagramas de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.....                                                                     | 40 |
| <b>Figura 10.</b> Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.....                                                                  | 40 |
| <b>Figura 11.</b> Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.....                                                                  | 41 |
| <b>Figura 12.</b> Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.....                                                                  | 42 |
| <b>Figura 13.</b> Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.....                                                                  | 43 |
| <b>Figura 14.</b> Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.....                                                                  | 44 |
| <b>Figura 15.</b> Diagramas de caja y bigotes de estadísticas descriptivas para las estaciones Chirps y<br>Persiann-CDR. Antes de la corrección del sesgo.....    | 46 |
| <b>Figura 16.</b> Diagramas de caja y bigotes de estadísticas descriptivas para las estaciones Chirps y<br>Persiann-CDR. Después de la corrección del sesgo. .... | 47 |
| <b>Figura 17.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Panonia.</i> .....                                                                    | 50 |
| <b>Figura 18.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Macheta.</i> .....                                                                    | 51 |
| <b>Figura 19.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Esperanza.</i> .....                                                                  | 52 |
| <b>Figura 20.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Villa Pinzón.</i> .....                                                               | 52 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 21.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Villa Carmen.</i> .....              | 53  |
| <b>Figura 22.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Siachoque.</i> .....                 | 53  |
| <b>Figura 23.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Pila Finca.</i> .....                | 54  |
| <b>Figura 24.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en UPTC.</i> .....                      | 54  |
| <b>Figura 25.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Ventana Quemada.</i> .....           | 55  |
| <b>Figura 26.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Nuevo Colón.</i> .....               | 55  |
| <b>Figura 27.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Tibina.</i> .....                    | 56  |
| <b>Figura 28.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Turmeque.</i> .....                  | 56  |
| <b>Figura 29.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Umbita.</i> .....                    | 57  |
| <b>Figura 30.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Chinavita.</i> .....                 | 57  |
| <b>Figura 31.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Garagoa.</i> .....                   | 58  |
| <b>Figura 32.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Alto Muceno.</i> .....               | 58  |
| <b>Figura 33.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Pachavita.</i> .....                 | 59  |
| <b>Figura 34.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Santa Maria.</i> .....               | 59  |
| <b>Figura 35.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Almeida.</i> .....                   | 60  |
| <b>Figura 36.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Chivor.</i> .....                    | 60  |
| <b>Figura 37.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Guayata.</i> .....                   | 61  |
| <b>Figura 38.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Martota.</i> .....                   | 61  |
| <b>Figura 39.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Sutatenza.</i> .....                 | 62  |
| <b>Figura 40.</b> <i>Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Valle Grande.</i> .....              | 62  |
| <b>Figura 41.</b> Diagrama de dispersión: Resultado de la estación más desfavorable para el satélite CHIRPS..... | 62  |
| <b>Figura 42.</b> Quantile Mapping Panonia.....                                                                  | 642 |

### **Resumen**

En una zona como la cuenca del río Garagoa, la información disponible de precipitación mediante instrumentos pluviométricos es escasa, en promedio 2 de cada 20 estaciones cuentan con datos completos de precipitación diaria. Por lo anterior, realizar estudios hidrográficos en la cuenca es difícil e impreciso. Actualmente, las estimaciones de lluvia de productos satelitales proporcionan datos de precipitación en tiempo casi real, lo que da una ventaja al momento de representar correctamente la precipitación diaria en cuencas de topografía compleja. Es por esta razón que para el presente estudio se utilizaron dos bases de datos de precipitación satelital de alta resolución espaciotemporal: CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations), y PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Climate Data Record); estos productos satelitales fueron de gran importancia para complementar, corregir y/o sustituir la información pluviométrica presentada. El objetivo del presente trabajo fue realizar la evaluación de los productos de lluvia satelitales CHIRPS y PERSIANN-CDR sobre la cuenca del río Garagoa mediante Google Earth Engine. Para esto se emplearon datos de 24 pluviómetros dispuestos en la zona de estudio, de las cuales se obtuvieron los datos de precipitación diaria a partir del año siguiente a su instalación y se realizó un análisis estadístico descriptivo de precipitación diaria en el periodo de 1993 hasta el 2023. Finalmente se determinó la validez de los datos satelitales con los datos proporcionados por las estaciones pluviométricas.

**Palabras Clave:** Precipitación Satelital, Pluviómetros, Corrección de sesgo.

### **Abstract**

In an area like the Garagoa River basin, the available precipitation information through pluviometric instruments is scarce; on average, 2 out of every 20 stations have complete daily precipitation data. Due to the above, carrying out hydrographic studies in the basin is difficult and imprecise. Currently, rainfall estimates from satellite products provide near real-time precipitation data, giving an advantage in correctly representing daily precipitation in basins of complex topography. It is for this reason that for the present study two high spatiotemporal resolution satellite precipitation databases were used: CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations), and PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Climate Data Record); These satellite products were of great importance to complement, correct and/or replace the rainfall information presented. The objective of this work was to carry out the evaluation of the CHIRPS and PERSIANN-CDR satellite rainfall products over the Garagoa River basin using Google Earth Engine. For this, data from 24 rain gauges arranged in the study area were used, from which daily precipitation data were obtained from the year following their installation and a descriptive statistical analysis of daily precipitation was carried out in the period from 1993 to the 2023. Finally, the validity of the satellite data was determined with the data provided by the pluviometric stations.

**Keywords:** Satellite Precipitation, Rain Gauges, Bias Correction.

### **Glosario**

**Precipitación:** la precipitación es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Esto incluye básicamente: lluvia, nieve y granizo. (También rocío y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total)

**Imágenes satelitales:** son la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la tierra que luego es enviada de regreso a ésta y procesada convenientemente.

**Estaciones pluviométricas:** tienen como objetivo medir y brindar información sobre las diversas variables meteorológicas en la ciudad tales como: niveles de precipitación, temperatura y/o humedad. Además, proporciona información de la lluvia que cae en un determinado lapso de tiempo.

**Google Earth Engine:** herramienta de análisis espacial que permite monitorear, entre otras cosas, los datos de precipitación mediante imágenes satelitales que van desde la década de 1970 hasta la actualidad.

**CHIRPS:** grupo de Peligros Climáticos Precipitación Infrarroja con Datos de Estación (CHIRPS) es un conjunto de datos de precipitaciones de alta resolución cuasi-globales de 30+ años que incorpora imágenes satelitales con datos de estaciones in situ para crear series temporales de lluvia, cuenta con una cobertura espacial de casi todo el globo terrestre (50°N-50°S).

**PERSIANN-CDR:** producto de estimación de precipitación basado en satélites que proporciona más de tres décadas (desde 1983 hasta el presente) de estimaciones diarias de precipitación a una resolución espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ .

Quantile Mapping: el mapeo de cuantiles es una técnica poderosa para corregir sesgos en los modelos de proyección alineando las distribuciones de cuantiles observadas con las proyecciones del modelo.

### **Introducción**

La precipitación es un componente importante de los ciclos hidrológicos y energéticos, así como un parámetro de entrada clave para muchas aplicaciones en los campos de la hidrología, la climatología, la meteorología y la investigación del pronóstico del tiempo [1].

El avance tecnológico en la medición de la precipitación apunta cada día a obtener datos óptimos que posibiliten comprender mejor la variabilidad espacial y temporal de las lluvias para la modelación hidrológica de cuencas. Google Earth Engine es una herramienta de análisis espacial que permite monitorear, entre otras cosas, los datos de precipitación mediante imágenes satelitales que van desde la década de 1970 hasta la actualidad [2].

La Cuenca del Río Garagoa está localizada en el borde oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, su extremo superior hace parte del Altiplano Cundiboyacense. Forma parte de la Macrocuena del Río Orinoco, Zona hidrográfica del Río Meta, Subzona Hidrográfica del Río Bata. Los municipios que rodean la cuenca se ven beneficiados por su extensión en varias actividades de suma importancia que representan una generación significativa de ingresos como: cultivo de otros productos agrícolas, producción pecuaria y caza, y otras actividades. [3]

Para el cultivo de productos agrícolas, Machetá es el municipio en donde este sector tiene el porcentaje más alto de sus ingresos con un 53%, seguido de Villapinzón con un porcentaje del 49% de sus ingresos y Ventaquemada con un 45%; a su vez, los municipios para los que este renglón representa el menor porcentaje son Ramiriquí con un 4%, Tibaná y Nuevo Colón con un 6%. En términos de pecuaria y caza, Sutatenza es el municipio en donde mayor peso tiene este renglón con un 40%, seguido de Somondoco con 38%, mientras que Cucaita, Samacá y Tunja, no reportan porcentaje de ingreso para este sector. [3]

La importancia de los productos satelitales en vigencias reciente engloba todo el tema de reconocimiento de delimitación de la cuenca y propiedades importantes que tiene esta, en el POMCA se han establecido varios estudios en los cuales ha sido posible obtener la representación geología básica con fines de ordenación de la cuenca, obteniendo información importante sobre las estructuras que se pueden encontrar en esta, además, ha sido posible conocer propiedades hidrológicas de la cuenca. [3]

Los datos de precipitación presentes en la zona están dispuestos por estaciones meteorológicas, que, en su mayoría contienen datos incompletos o imprecisos. Es por esta razón que, se propone el uso de dos productos satelitales, CHIRPS y PERSIANN-CDR desde la plataforma de Google Earth Engine y validar los datos obtenidos con una serie de datos históricos de 24 estaciones meteorológicas que se distribuyen dentro de la zona de estudio.

Se espera que los resultados de este estudio contribuyan a mejorar la calidad de la información de precipitación en la región, lo que a su vez puede ser útil para la gestión del agua y la toma de decisiones en diferentes sectores.

## **1. Evaluación de productos de lluvia satelitales en la cuenca del río Garagoa mediante Google Earth Engine**

### **1.1 Planteamiento del problema**

En Colombia se han realizado diversos estudios donde se implementan productos satelitales; Lopez, Montoya, Caro & Díaz (2022) validaron la exactitud de CHIRPS para la región andina, encontrando que proporciona una buena cobertura espacio-temporal y es particularmente adecuado para áreas con pocos pluviómetros o que se enfrenten a diversos factores no climáticos; especialmente con temas asociados a la medición de la observación [4].

El departamento de Boyacá presenta una alta variabilidad territorial en la distribución de la precipitación. Al oriente ocurren las lluvias orográficas correspondientes a la vertiente oriental de la cordillera oriental, registrando valores en el rango de 2000 a más de 5000 mm de precipitación al año [3]. Es por esto, que las olas invernales que se presentan en el país azotan fuertemente los municipios que conforman la cuenca del río Garagoa, aumentando su caudal de manera considerable y poniendo en alerta hidrológica los municipios por los que atraviesa. Esto puede ser evidenciado por medio de información expedida por la Defensoría del Pueblo en Colombia en donde se reportan casos de varios municipios en los que se evidenciaron afectaciones presentes debido a las olas invernales, uno de los casos es el municipio de Garagoa, en el cual se presentan acumulaciones de lodo en la parte superior del cerro Mapacha, generando que las quebradas y fuentes de agua tienen riesgo constante a ser invadidas por el barro que se acumula en las montañas y por lo tanto pueden presentarse escenarios donde haya mucho riesgo a las comunidades asentadas. [5]

Otros casos relacionados con las olas invernales son los siguientes: en el municipio de Mongua, existen alertas constantes sobre la laguna que se encuentra cercana a una de sus veredas

la cual está cerca de desbordarse debido a las incesantes precipitaciones que se presentan en el sector; en Pajarito se ha alertado sobre el riesgo que existe en las crecientes del río Cusiana en especial por deslizamientos de tierra que producen bloqueos en las vías; en Paz del Río existen alertas por inundaciones constantes debido a las crecientes presentes en los ríos aledaños por las olas invernales. [5]

Los estudios hidrográficos, son claves para la realización de un modelo de alerta temprana que permita evitar pérdidas humanas; sin embargo, para esto, se requiere que la zona cuente con datos de precipitación completos y de calidad. En la actualidad alrededor de la cuenca del río Garagoa, existen aproximadamente 30 estaciones meteorológicas de las cuales menos del 10% de ellas cuentan con datos completos, es por esto que alternativas satelitales contribuirían en gran medida para obtener información veraz.

La necesidad de contar con datos de precipitación de calidad se enfatiza en el provecho que se le pueda sacar a futuro en diferentes aplicaciones hidrológicas como gestión de riesgos, control de las masas de aguas, balances hídricos, entre otros.

## **1.2 Justificación**

Para entender mejor el comportamiento de los sistemas hidrológicos y para desarrollar modelos precisos, se requieren datos de precipitación. Un conjunto de datos de precipitación a largo plazo, de alta calidad y resolución espacial, beneficiaría a las investigaciones hidrológicas, particularmente para las regiones que tienen registros de precipitación insuficientes. La necesidad de implementar estas tecnologías responde a que existe un número cada vez mayor de productos de lluvia basados en satélites disponibles en tiempo casi real a través de herramientas de análisis espaciales para ayudar a satisfacer las necesidades de los pronosticadores del tiempo y los

científicos del clima, así como una amplia gama de tomadores de decisiones, incluidos hidrólogos, agricultores, administradores de emergencias e industriales [6]. La principal ventaja que estos datos reflejan es que con el desarrollo de la tecnología de sensores de satélites y su aplicación, se puede obtener en tiempo casi-real una estimación de la lluvia a escala global, por lo que en regiones donde los registros de lluvia obtenidos por métodos convencionales y que tienen ciertas limitaciones, resulta ampliamente significativa [7].

De acuerdo con Diaz Prieto L. (2022), si bien el manejo de la información ha avanzado de forma significativa en los últimos años, la información meteorológica e hidrológica es muy limitada en el área de estudio, las estaciones que existen tienen una información muy reducida, por lo tanto, para mejorar la forma en la que se realizan los estudios en estas zonas es recomendable usar bancos de datos satelitales como CHIRPS, debido a que permite obtener información precisa y continua en términos de espacio-tiempo; los estudios realizados evidenciaron un alto coeficiente de correlación entre distintas metodologías incluyendo la ya mencionada, por lo tanto, es una opción sumamente adecuada para los climatólogos actuales y los que se encuentran en formación. [8]

Por otro lado, Brito, De Silva, Da Santos, Brasil Netto y Coelho en 2021, realizaron un estudio del Rio Pirañas en Brasil, en donde se basaron en dos conjuntos de lluvia estimados de forma satelital, en donde demostraron que según las investigaciones realizadas en esta zona Los datos de PERSIANN-CDR tuvieron una mayor efectividad que los datos de CHIRPS, sin embargo, los datos de CHIRPS aún tienen un rendimiento muy aceptable y acertado, representando un complemento importante para los datos de lluvia que se obtienen por medio de pluviómetros. [9]

El fin principal de este proyecto es completar los datos de precipitación para la cuenca del río Garagoa, implementando la metodología Quantile Mapping buscando así, una correlación con

los datos provenientes de estaciones pluviométricas y los productos satelitales CHIRPS y PERSIANN-CDR mediante Google Earth Engine, lo que es un proceso útil para analizar la distribución espacial y temporal de las lluvias en la zona de estudio, además, se puede proporcionar información valiosa para la gestión y planificación de recursos hídricos en la cuenca. Al contar con datos disponibles completos, se reducen los tiempos de trabajo en futuros proyectos sobre la cuenca, es por esto, que se espera que el resultado final contribuya en gran medida a investigadores en áreas como la hidrología, la meteorología y la climatología para la cuenca del río Garagoa.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Evaluar los productos de lluvia satelitales CHIRPS y PERSIANN-CDR sobre la cuenca del río Garagoa mediante Google Earth Engine para su uso en aplicaciones hidrológicas.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Recopilar la información de precipitación disponible en la cuenca del río Garagoa a partir de las estaciones climatológicas dispuestas para la conformación de una base de datos.

Determinar la disponibilidad y calidad de las series de datos de precipitación a partir del tratamiento de los datos históricos en la cuenca del río Garagoa.

Procesar los productos de precipitación CHIRPS y PERSIANN-CDR a nivel mensual sobre la zona de estudio mediante Google Earth Engine.

Analizar la capacidad de detección de la lluvia de los productos satelitales sobre la zona de estudio; y realizar la corrección del sesgo a partir del método Quantile Mapping.

## **2. Marco referencial**

### **2.1 Estado del arte**

A nivel mundial se han presentado diversas problemáticas relacionadas con el agua, en especial con las precipitaciones que se presentan masivamente en zonas de alto riesgo, por ello, en las últimas décadas se han generado una gran cantidad de estrategias enfocadas en mejorar la forma en la que se aprovecha este recurso vital para los seres vivos y garantizar la sostenibilidad, iniciando con la conferencia internacional sobre el agua y el medio ambiente celebrada en Dublín y siendo tema de conversación actual en reuniones de organizaciones de reconocimiento internacional como la ONU, e implementas varias metas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible para mejorar su gestión. [8]

Colombia se encuentra en el top 10 de países que cuentan con mayor disponibilidad de este recurso en términos internacionales, a lo cual desde la década del 70 se ha buscado zonificar las cuencas que hacen parte de este país con sus respectivas vertientes, a partir de dicha zonificación ha sido posible implementar planes de desarrollo u planes de ordenamiento territoriales para verificar un manejo adecuado de los recursos hídricos en beneficio de la flora y fauna del país, con un enfoque principal en mantener un equilibrio ambiental, social y económico a nivel nacional, por ello en vigencias recientes se han utilizado los datos satelitales con el propósito de verificar las condiciones en las que se encuentran las cuencas a nivel mundial, implementando metodologías que garanticen la precisión en los datos obtenidos. [8]

Los datos de precipitación basados en satélites están ganando interés científico debido a su ventaja en la producción de productos de alta resolución con cobertura casi global [10]. En el continente asiático, se presentan diversas aplicaciones para la precipitación satelital, Mab et al. (2019) en su artículo “Evaluation of Satellite Precipitation from Google Earth Engine in Tonle Sap

Basin, Cambodia” utilizó GEE como una herramienta integral para recuperar y analizar datos de precipitación para la cuenca de Tonle Sap. Los resultados mostraron las buenas correlaciones entre las precipitaciones de descarga manual y las de la plataforma GEE, con  $R$  superior a 0,9 [11]. Por otro lado, Mianabadi, A. (2023) utilizó estimaciones de lluvia basadas en los satélites MSWEB, CHIRPS, PERSIANN-CDR y PERSIANN-CCS-CDR para desarrollar curvas de intensidad-frecuencia (IF) en su artículo “Evaluation of long-term satellite-based precipitation products for developing intensity-frequency (IF) curves of daily precipitation” con el propósito de gestionar el riesgo de inundación [12]. Los resultados mostraron que en las regiones que no cuentan con datos para la corrección des sesgo, se pueden aplicar los CHIRPS con un error relativo de 0,85. En cuanto a la calibración de los datos de precipitación, Hisam Et al, 2023 con su artículo “Comprehensive evaluation of Satellite-Based and reanalysis precipitation products over the Mediterranean region in Turkey” Realizó una evaluación exhaustiva y comparativa de 193 estaciones meteorológicas terrestres de Turquía y 8 productos satelitales PERCIANN CCS, PDIR-Now, GSMaP MVK, PERSIANN CDR, CHIRPS, IMERG v6, GSMaP Gauge y ERA5. Teniendo como resultado que PERSIANN CDR, CHIRPS, IMERG v6, GSMaP Gauge y ERA5 pueden utilizarse como buenas fuentes de datos de precipitación y como complemento de las estaciones meteorológicas terrestres [1]. Sin embargo, Keikhosravi-Kiany,M., et al., 2022 “Reliability of satellite-based precipitation products in capturing extreme precipitation indices over Iran” demostró que los productos CHRIPS y PERSIANN-CDR muestran menos rendimiento en la generación precisa de muchos índices de precipitación extrema [13].

En el continente africano, Lekula et al, (2017) Destacó a los productos satelitales como una fuente valiosa de datos de precipitaciones diarias que brindan una buena cobertura de datos espacio-temporales, especialmente adecuada para áreas con pluviómetros limitados, como la

cuenca del Kalahari Central, con su artículo “Validation of satellite-based rainfall in Kalahari” [14].

Latinoamérica, implementa cada vez más estas nuevas tecnologías en la obtención de datos de precipitación. Rivera et al, 2018 en su artículo “Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina” Validó un conjunto de datos de precipitación CHIRPS en un periodo de 30 años sobre los Andes centrales de Argentina, adicional, trabajaron de la mano con 57 pluviómetros para evaluar el rendimiento de las estimaciones CHIRPS, indicando que los datos CHIRPS reproducen adecuadamente varias características de la precipitación a lo largo del área de estudio, logrando resultado de correlación de 0,86 para las estaciones ubicadas en la región con verano máximo y 0,82 sobre la región norte [15].

## **2.1 Marco teórico**

La precipitación se puede medir de tres maneras diferentes: pluviómetros, radares meteorológicos y productos satelitales. Las redes de pluviómetros terrestres son uno de los sensores más utilizados para medir la precipitación y de allí se logran obtener las observaciones históricas disponibles más largas, sin embargo, estas mediciones son dispersas e insuficientes para el desarrollo de un conjunto de datos confiable.

### **2.1.1 CHIRPS**

Grupo de Peligros Climáticos Precipitación Infrarroja con Datos de Estación (CHIRPS) es un conjunto de datos de precipitaciones de alta resolución cuasi-globales de 30+ años que incorpora imágenes satelitales con datos de estaciones in situ para crear series temporales de lluvia, cuenta con una cobertura espacial de casi todo el globo terrestre (50°N-50°S) [16].

El algoritmo:

1. Se basa en una climatología de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  que incorpora información satelital para representar ubicaciones escasamente calibradas.
2. Incorpora estimaciones de precipitación diarias, pentatales y mensuales desde el año 1981 con precisión de  $0.05^\circ$  basadas en Cold Cloud Duration.
3. Combina datos de la estación para producir un producto de información preliminar con una latencia de aproximadamente 2 días y un producto final con una latencia promedio de aproximadamente 3 semanas.
4. Utiliza un novedoso procedimiento de mezcla que incorpora la estructura de correlación espacial de las estimaciones de Cold Cloud Duration para asignar pesos de interpolación.

### **2.1.2. PERSIANN-CDR**

PERSIANN-CDR es un producto de estimación de precipitación basado en satélites que proporciona más de tres décadas (desde 1983 hasta el presente) de estimaciones diarias de precipitación a una resolución espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . Utiliza el archivo de temperatura de brillo infrarrojo de GridSat-B1, como la entrada del algoritmo PERSIANN. Luego, las estimaciones de lluvia del algoritmo PERSIANN corrigen el sesgo utilizando el producto mensual Global Precipitation Climatology Project (GPCP) a una resolución espacial de  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  [17]. Todas estas características hacen de PERSIANN-CDR un producto útil para estudios climáticos globales a una escala relevante para eventos climáticos extremos.

### **2.1.3. Precipitación por estaciones pluviométricas**

Las redes pluviométricas tienen gran importancia en la evaluación de los recursos hídricos disponibles, al permitir dimensionar cualquier tipo de infraestructura hidráulica [18]. El pluviómetro es el instrumento más frecuentemente utilizado para medir la precipitación líquida. Consiste en un colector situado por encima de un embudo que da paso a un depósito, donde el agua acumulada se almacenan entre períodos de observación. La medida de la precipitación recogida se realiza pasando el agua del colector a una probeta graduada. o bien se mide su nivel en el depósito directamente con una varilla graduada.

El viento es la principal fuente de alteración de las mediciones de la precipitación, es por esto por lo que se recomienda su instalación en lugares demasiado expuestos al viento y alejado de los edificios y de los árboles que podrían formar una pantalla [3].

#### ***2.1.4. Métodos de corrección de sesgo***

Existen diversos métodos estadísticos de corrección de sesgo para la precipitación, en el presente estudio se utilizará la metodología de Quantile Mapping (QM), sin embargo, se presentará también, otro modelo estadístico que permite mejorar el ajuste de las simulaciones de modelos climáticos.

**2.1.4.1. Quantile Mapping.** El mapeo cuantil (QM) está motivado por la necesidad de caracterizar sesgos sobre toda la distribución de la variable climática. Varios estudios han encontrado que QM supera a otros métodos más simples (es decir, desplazamiento o escala) para la temperatura y la precipitación para diferentes características estadísticas de interés (por ejemplo, desviación estándar, percentiles), también se ha demostrado que QM reduce la variación entre

diferentes modelos climáticos, reduciendo así una fuente bien reconocida de variabilidad de proyección [19].

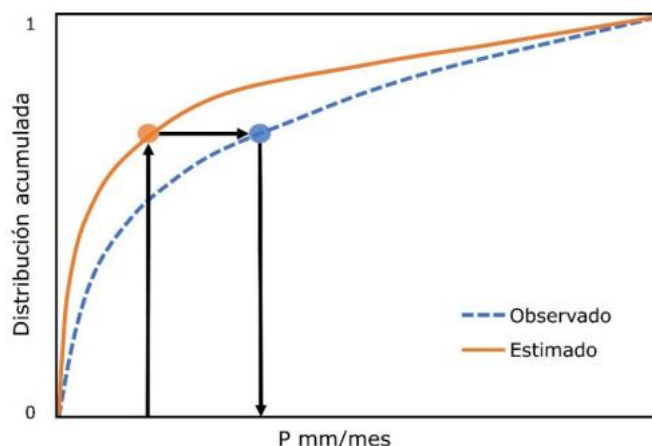
1. Se describe el enfoque general de QM.
2. Dejar  $x_{o,h}(t)$  denota la observación en el tiempo  $t$  durante el período histórico con función de distribución acumulativa definida como  $F_{o,h}(z) = P[x_{o,h}(t) \leq z]$ .

Específicamente  $F_{o,h}(z)$  da la probabilidad de que una temperatura histórica observada sea menor que  $Z$ .

3. Para un nivel cuantil  $\tau$ ,  $0 \leq \tau \leq 1$  el valor cuantil (también conocido como  $\tau$ -ésimo percentil) se obtiene por la FCD inversa:  $F_{o,h}^{-1}(\tau)$ .
4. Deje que  $x_{m,h}(t)$  y  $x_{m,p}(t)$  denotan, respectivamente, los datos del modelo climático durante los períodos históricos y futuros proyectados, con los correspondientes CDF  $F_{m,h}(z)$  y  $F_{m,p}(z)$ .
5. Dejar  $\hat{x}_{o,p}(t)$  Denota la observación futura estimada en el tiempo  $t$  durante el período de proyección. Esto se obtiene corrigiendo la simulación del modelo futuro a través de una función de transferencia.  $g(t)$  tal que  $\hat{x}_{o,p}(t) = g[x_{m,p}(t)]$ . Diferentes métodos de QM derivan  $g(t)$  mediante el uso de las CDF o funciones cuantiles de datos observados y modelo durante un período histórico superpuesto.

En la Figura 1 se muestra la representación gráfica del ajuste del Quantile Mapping. Se puede observar que, la línea naranja es el valor estimado (para el caso de la presente investigación, el valor estimado lo proporcionan los productos satelitales), la línea azul corresponde al valor observado a través de los pluviómetros y las flechas negras representan el cuantil de la distribución observada.

**Figura 1.** *Grafica distribución acumulado vs precipitación por mes.*



**Fuente:** Weijia, Q., Howard, C., (2021)

### 2.1.5. *Python en la hidrología*

Python es un lenguaje de programación simple y poderoso usado en una serie de campos como medicina, usuarios comunes, organizaciones y bancos. La simplicidad del uso y aprendizaje de Python es notable con respecto a otros lenguajes de programación y su poder se basa en la cantidad de herramientas disponibles para distintas áreas de estudio.

Actualmente, Python tiene distintos y variados paquetes en el campo de la Hidrología, que además se encuentran vinculados con herramientas GIS, matemáticas, estadística, etc. La aplicabilidad en Hidrología se basa en la preparación de datos para modelos hidrológicos, análisis estadísticos de parámetros hídricos, el análisis de resultados y la representación espacial de los componentes del medio físico [20].

## 2.2 Marco legal

En el año 1974 a nivel nacional se le dio un enfoque principal en priorizar el recurso hídrico de las cuencas en el país por medio del Decreto Ley 2811 del mismo año, expedido por el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente que tiene como

objetivo aprovechar de forma saludable este líquido vital para los seres vivos manteniendo las reservas necesarias en un estado óptimo y previniendo la escasez en sus principales fuentes. [3]

Posteriormente se expidió la Ley 99 de 1993 la cual implementa en el artículo 5 las funciones que se le delegan al Ministerio del Medio Ambiente de la Nación, en donde se hace énfasis en la importancia de implementar reglas y criterios necesario para aprovechar el uso sostenible de los recursos naturales renovables y por medio del artículo 10 de la Ley 388 de 1997 se establecieron las normativas relacionadas con los planes de ordenamiento territorial en los municipios y distritos. [3]

A partir del nuevo milenio se han establecido diversos decretos, leyes y lineamientos necesarios para ser considerados en la preservación de las cuencas hidrográficas como lo son: [3]

- El Decreto 1729 de 2002 reglamentó la Parte XIII, Título 2.
- El artículo 215 de la Ley 1450 de 2011.
- El parágrafo 1 del artículo 18 del Decreto 1640 de 2012.
- El Decreto 4819 de 2010.

En los anteriores se ha actualizado la información referente a la gestión de los recursos hídricos, siempre enfocándose en modernizar las tecnologías y metodologías actuales con el propósito de preservar los recursos del país, e incluyendo la información en los Planes de Ordenamiento Territorial locales y regionales.

### **3. Área de estudio y conjuntos de datos**

#### **3.1 Área de estudio**

El río Garagoa nace al suroriente del municipio de Samacá, en el páramo de Rabanal a una altura de 3450 msnm, desde su inicio toma el nombre de río Teatinos, que por la confluencia de

numerosas quebradas toma el nombre de Río Boyacá al cual drenan las aguas del río Juyasía a una altura de 2150 msnm, a partir de allí se conoce como río Jenesano y unos cuantos metros hacia aguas abajo, luego de recibir el aporte de varios cauces se denomina río Tibaná. En cercanías de las veredas Manta y Mangles, el río Tibaná en su unión con el río Turmequé toma el nombre de río Garagoa sobre una altura de 2000 msnm [3].

La cuenca del río Garagoa está dispuesta en 33 municipios entre los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, los cuales se describen en la **Tabla 1. Municipios que conforman la cuenca del río Garagoa.**

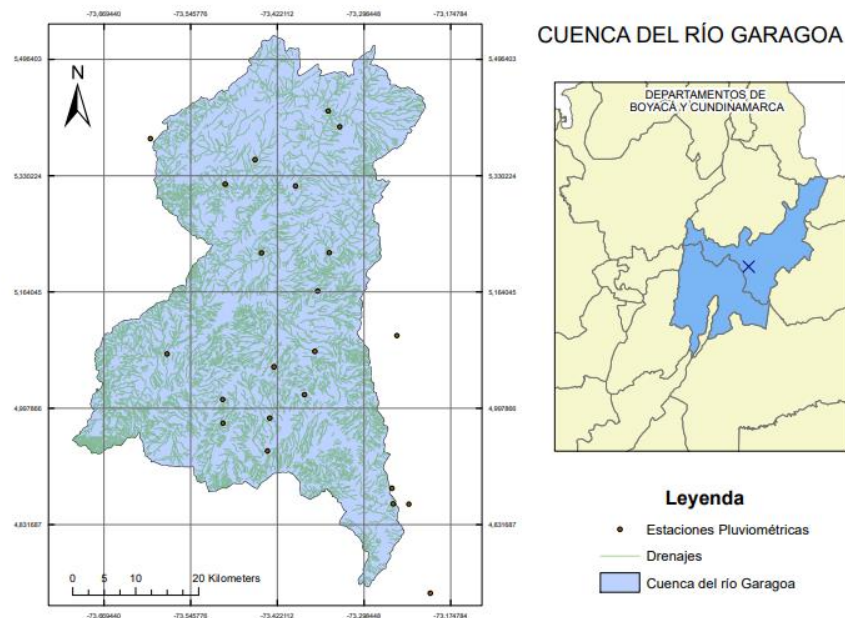
**Tabla 1. Municipios que conforman la cuenca del río Garagoa.**

| DEPARTAMENTO | PROVINCIA | MUNICIPIO                                                                      |
|--------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Cundinamarca | Almeida   | Chocontá, Machetá, Manta, Tibirita, Villapinzón                                |
|              | Centro    | Samacá, Cucauta, Siachoque, Soracá, Tunja, Ventaquemada                        |
| Boyacá       | Márquez   | Ciénaga, Jenesano, Nuevo Colón, Ramiriquí, Tibaná, Turmequé, Úmbita, Viracachá |
|              | Neira     | Chinavita, Garagoa, Macanal, Pachavita, Santa María                            |
|              | Oriente   | Almeida, Chivor, Guateque, Guayatá, La Capilla, Somondoco, Sutatenza, Tenza    |

**Adaptado de:** equipo profesional POMCA, 2018

### **3.1.1. Delimitación de la zona de estudio**

En la figura 2, se muestra la distribución de las estaciones pluviométricas dispuestas en el área de estudio. Como se puede observar, la cuenca del río Garagoa está dispuesta en el alto cundiboyacense y tiene un área aproximada de 446.7m<sup>2</sup>.

**Figura 2.** Delimitación de la cuenca del río Garagoa

Adaptado de: ArcGis Pro

### 3.2 Datos

Para el presente estudio se tomaron 24 estaciones pluviométricas distribuidas en toda la zona, de las que se tomaron datos diarios de treinta años, desde el 01/01/1993 al 31/12/2022. En la tabla 2 se presentan las estaciones pluviométricas, con sus respectivas coordenadas geográficas, fecha de instalación y porcentaje de datos disponibles.

**Tabla 2.** Estaciones pluviométricas con porcentaje de datos disponibles

| Nombre Estación                 | Latitud    | Longitud  | Altitud | Instalación | %de datos disponibles |
|---------------------------------|------------|-----------|---------|-------------|-----------------------|
| PANONIA [21200160]              | 5.05797222 | -73.73433 | 2800    | 1/1/1986    | 100%                  |
| MACHETA GRANJA AGROP [35070230] | 5.07511111 | -73.57942 | 1815    | 1/1/1980    | 94.78%                |
| ESPERANZA LA [35070480]         | 5.0100278  | -73.53944 | 1854    | 1/1/1983    | 95.16%                |
| VILLAPINZON GRANJA [21201640]   | 5.26375    | -73.59086 | 2745    | 1/1/1988    | 97.40%                |
| VILLA CARMEN [24015220]         | 5.5093889  | -73.49578 | 2600    | 1/1/1969    | 96.91%                |
| PILA LA FINCA [24030420]        | 5.5189167  | -73.31072 | 2873    | 1/1/1993    | 95.29%                |

|                                     |            |           |      |          |         |
|-------------------------------------|------------|-----------|------|----------|---------|
| <i>U P T C [24035130]</i>           | 5.5430775  | -73.36081 | 2690 | 1/1/1963 | 94.52%  |
| <i>VENTAQUEMADA [35070020]</i>      | 5.3830556  | -73.60289 | 2630 | 1/1/1959 | 92.97%  |
| <i>NUEVO COLON [35075010]</i>       | 5.35269444 | -73.45378 | 2438 | 1/1/1971 | 98.78%  |
| <i>TIBANA [35070040]</i>            | 5.3152778  | -73.39594 | 2115 | 1/1/1959 | 96.42%  |
| <i>TURMEQUE [35070030]</i>          | 5.31775    | -73.49636 | 2400 | 1/1/1958 | 94.52%  |
| <i>UMBITA [35070050]</i>            | 5.2191111  | -73.44456 | 2300 | 1/1/1957 | 97.44%  |
| <i>CHINAVITA [35070070]</i>         | 5.16486111 | -73.36425 | 1900 | 1/1/1956 | 97.67%  |
| <i>GARAGOA [35070080]</i>           | 5.07886111 | -73.36853 | 1700 | 1/1/1960 | 98.55%  |
| <i>ALTO MUCENO [35080110]</i>       | 5.00513889 | -73.25861 | 2250 | 1/1/1985 | 98.60%  |
| <i>PACHAVITA [35070210]</i>         | 5.13925    | -73.39564 | 2160 | 1/1/1977 | 94.17%  |
| <i>SANTA MARIA [35070180]</i>       | 4.8607778  | -73.25675 | 850  | 1/1/1958 | 91.32%  |
| <i>ALMEIDA [35070260]</i>           | 4.97083333 | -73.37986 | 1954 | 1/1/1960 | 96.93%  |
| <i>CHIVOR [35070190]</i>            | 4.88636111 | -73.36674 | 1850 | 1/1/1963 | 93.68%  |
| <i>GUAYATA LA GRANJA [35070110]</i> | 4.97608333 | -73.49931 | 1580 | 1/1/1972 | 100.00% |
| <i>MARTOTA [35070320]</i>           | 4.93647222 | -73.43608 | 2620 | 1/1/1997 | 90.05%  |
| <i>SUTATENZA [35075020]</i>         | 5.02227777 | -73.44917 | 1930 | 1/1/1970 | 89.66%  |
| <i>VALLE GRANDE [35070550]</i>      | 5.05661111 | -73.42692 | 1830 | 1/1/1985 | 95.10%  |

**Adaptado de:** IDEAM

Adicionalmente, los datos satelitales fueron obtenidos por medio de la plataforma de Google Earth Engine. En la tabla 3, se muestran las especificaciones de cada satélite utilizado en el presente estudio.

**Tabla 3.** *Información de satélites de lluvia*

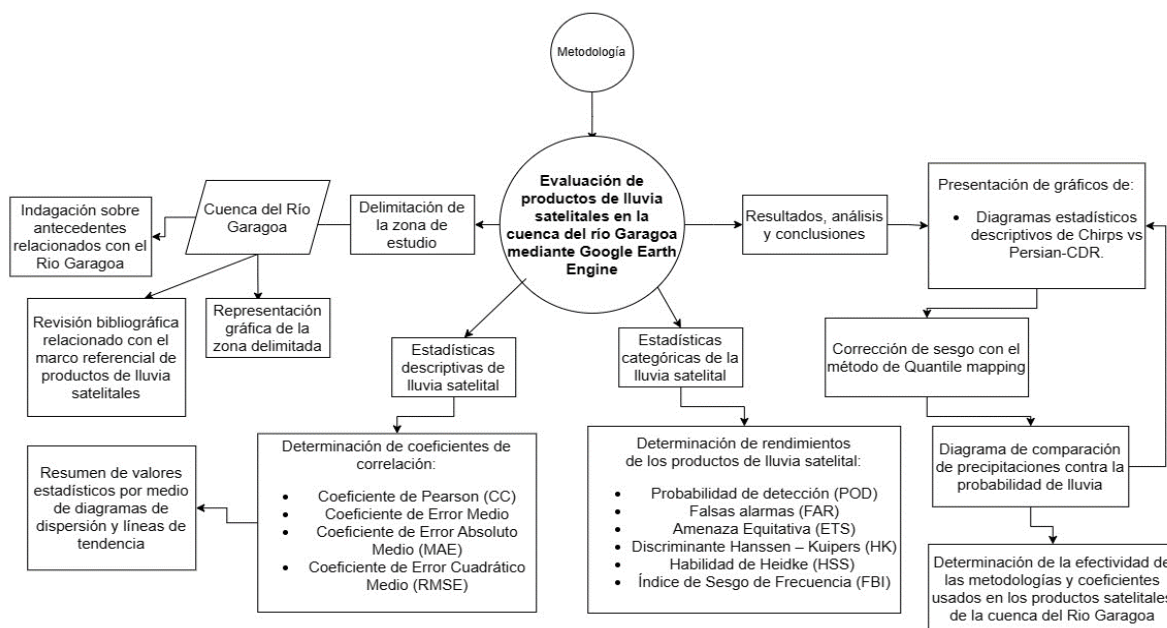
| <b>Producto satelital</b> | <b>Resolución Espacial</b> | <b>Resolución Temporal</b> | <b>Cobertura Espacial</b> |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| CHIRPS                    | 0.05°                      | 1 día                      | Cuasi global              |
| PERSIANN-CDR              | 0.25°                      | 1 día                      | Global                    |

**Adaptado de:** Google Earth Engine

#### 4. Metodología

El proyecto denominado “Evaluación de productos de lluvia satelital en la cuenca del río Garagoa mediante Google Earth Engine.” busca evaluar los productos de lluvia satelital CHIRPS y PERSIANN-CDR sobre la cuenca del río Garagoa mediante Google Earth Engine para su uso en aplicaciones hidrológicas. La investigación tiene un diseño no experimental debido a que no se alterará el objeto de estudio, sino al análisis del fenómeno. Esta investigación, de acuerdo con su objetivo es de tipo evaluativa. Se desarrollará dentro de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, sobre la cuenca del río Garagoa. Cuenta con un enfoque cualitativo, garantizando que los datos obtenidos sean de tipo numérico. En la figura 3 se presenta un diagrama de flujo donde se representan los procesos necesarios para la ejecución de la presente investigación.

**Figura 3. Metodología.**



**Fuente:** Elaboración propia.

En la presente investigación fue de suma importancia considerar los aportes realizados previamente por medio de investigaciones nacionales e internacionales sobre las precipitaciones y metodologías efectivas como: “Validación de las precipitaciones por satélite en el Kalahari”

realizado por Lekulaa, Lubczynskia, Shemangb y Verhoefa; “Validación del conjunto de datos de precipitación CHIRPS a lo largo de los Andes centrales de Argentina” elaborado por Rivera, Marianetti y Hinrichs; y el documento del cual se obtuvieron datos de más relevancia para las bases de esta investigación fue la “Actualización POMCA Río Garagoa” expedido por el Ministerio de Ambiente y Ministerio de Hacienda Nacional.

#### **4.1 Análisis de datos de lluvia satelital**

Se realizó la comparación de precipitaciones entre cada uno de los veinticuatro pluviómetros y cada uno de los productos satelitales de lluvia, aplicando métodos estadísticos descriptivos y categóricos para encontrar la calidad de los datos sin procesar.

##### **4.1.1. Estadísticas descriptivas**

Para analizar, resumir y presentar los datos de precipitación se utilizaron los métodos de correlación y coeficiente de Pearson (CC), error medio (ME), error absoluto (MAE) y error cuadrático medio (RMSE).

##### **4.1.1.1. Coeficiente de Pearson (CC)**

$$CC = \frac{(\overline{G.S} - \bar{G}.\bar{S})}{\sqrt{(\overline{G^2} - \bar{G}^2)(\overline{S^2} - \bar{S}^2)}}$$

Dónde: G es el dato obtenido del pluviómetro y S es el dato obtenido del satélite. Se mide en una escala de 0 a 1, tanto en dirección positiva como negativa.

En la tabla 4. Métricas Coeficiente de Pearson de Correlación, se expresa la manera correcta de leer los resultados de las estadísticas descriptivas implementadas.

**Tabla 4.** Métricas Coeficiente de Pearson de correlación.

| Valor de coeficiente de Pearson | Grado de correlación entre variables |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| CC = 0                          | Ninguna correlación                  |
| 0 < CC < 1                      | Correlación positiva                 |
| CC = -1                         | Correlación negativa perfecta        |
| -1 < CC < 0                     | Correlación negativa                 |

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.1.1.2. Error Medio (ME)

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)$$

Dónde: n es el número total de las parejas de datos, S es el dato obtenido del satélite y G es el dato obtenido del pluviómetro.

#### 4.1.1.3. Error Absoluto Medio (MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - G_i|$$

Dónde: n es el número total de las parejas de datos, S es el dato obtenido del satélite y G es el dato obtenido del pluviómetro.

#### 4.1.1.4. Error Cuadrático Medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}$$

Dónde: n es el número total de las parejas de datos, S es el dato obtenido del satélite y G es el dato obtenido del pluviómetro.

Estos valores estadísticos se resumieron en diagramas de dispersión utilizando línea de tendencia.

#### **4.1.2. Estadísticas categóricas**

Para evaluar el desempeño de los datos de precipitación, los rendimientos de los productos de lluvia satelital en la detección de lluvia se aplicaron los métodos de categóricos Probabilidad de detección (POD), Falsas alarmas (FAR), Amenaza equitativa (ETS), Discriminante de Hanssen – Kuipers (HK), Habilidad de Heidke (HSS) y el Índice de Sesgo de Frecuencia (FBI).

**4.1.2.1. Probabilidad de detección (POD).** Es la fracción en la que un algoritmo satelital estimó correctamente los eventos de lluvia medidos en el pluviómetro; va de 0 a 1 con un valor perfecto de 1 [11].

$$POD = \frac{A}{A + C}$$

Dónde: A es el número de aciertos y C es el número de errores.

**4.1.2.2. Falsas alarmas (FAR).** Es la fracción en la que el algoritmo satelital ha detectado eventos de lluvia, pero no hay observación en el pluviómetro; varía de 0 a 1 con un valor perfecto de 0 [11].

$$FAR = \frac{B}{A + B}$$

Dónde: B es el número de falsas alarmas y A es el número de aciertos.

**4.1.2.3.Amenaza Equitativa (ETS).** Mide la fracción de los eventos observados/estimados que son correctamente pronosticados, ajustados a la frecuencia de aciertos que se esperaría que ocurrieran; varía de -1/3 a 1, con un valor perfecto de 1 [12].

$$ETS = \frac{A - A_r}{A + B + C - A_r} ; A_r = \frac{(A + B)(A + C)}{N}$$

Dónde: A es el número de aciertos, B es el número de falsas alarmas, C es el número de errores y N es el número de parejas de datos.

**4.1.2.4.Discriminante Hanssen – Kuipers (HK).** Discrimina las estimaciones satelitales entre precipitación y eventos sin precipitación; varía de -1 a 1, con valor perfecto de 1 [12].

$$HK = \frac{A}{A + C} - \frac{B}{B + D}$$

Dónde: A es el número de aciertos, B es el número de falsas alarmas, C es el número de errores y D es el número de negativos correctos.

**4.1.2.5.Habilidad de Heidke (HSS).** Mide la precisión de las estimaciones que tienen en cuenta las coincidencias debido a probabilidad aleatoria. Un HSS < 0 indica que la probabilidad aleatoria es mejor que el producto satelital, un HSS = 0 significa que el producto no tiene habilidad y un HSS de 1 indica una estimación perfecta de la precipitación por el producto [12].

$$HSS = \frac{2(AD - BC)}{(A + C)(C + D) + (A + B)(B + D)}$$

Dónde: A es el número de aciertos, B es el número de falsas alarmas, C es el número de errores y D es el número de negativos correctos.

**4.1.2.6. Índice de Sesgo de Frecuencia (FBI).** Revela diferencias sistemáticas entre la frecuencia de los eventos de precipitación en las observaciones de los pluviómetros y estimaciones de precipitación basadas en productos de lluvia satelital. Un  $FBI < 1$  indica que hay una tendencia a subestimar y un  $FBI > 1$  indica que hay una tendencia a sobrestimar; valor perfecto de 1 [12].

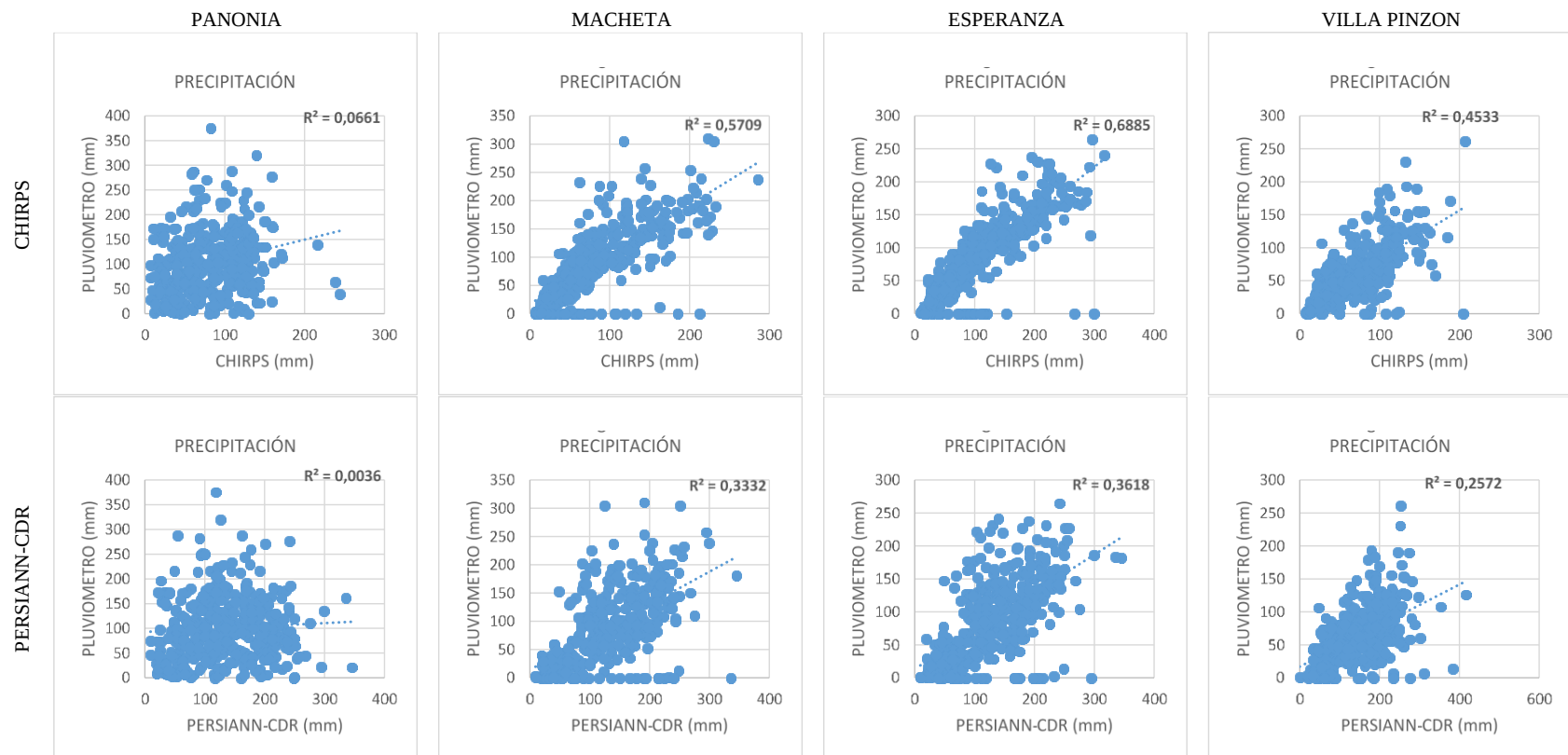
$$FBI = \frac{A + B}{A + C}$$

Dónde: A es el número de aciertos, B es el número de falsas alarmas y C es el número de errores.

## 4.2. Resultados

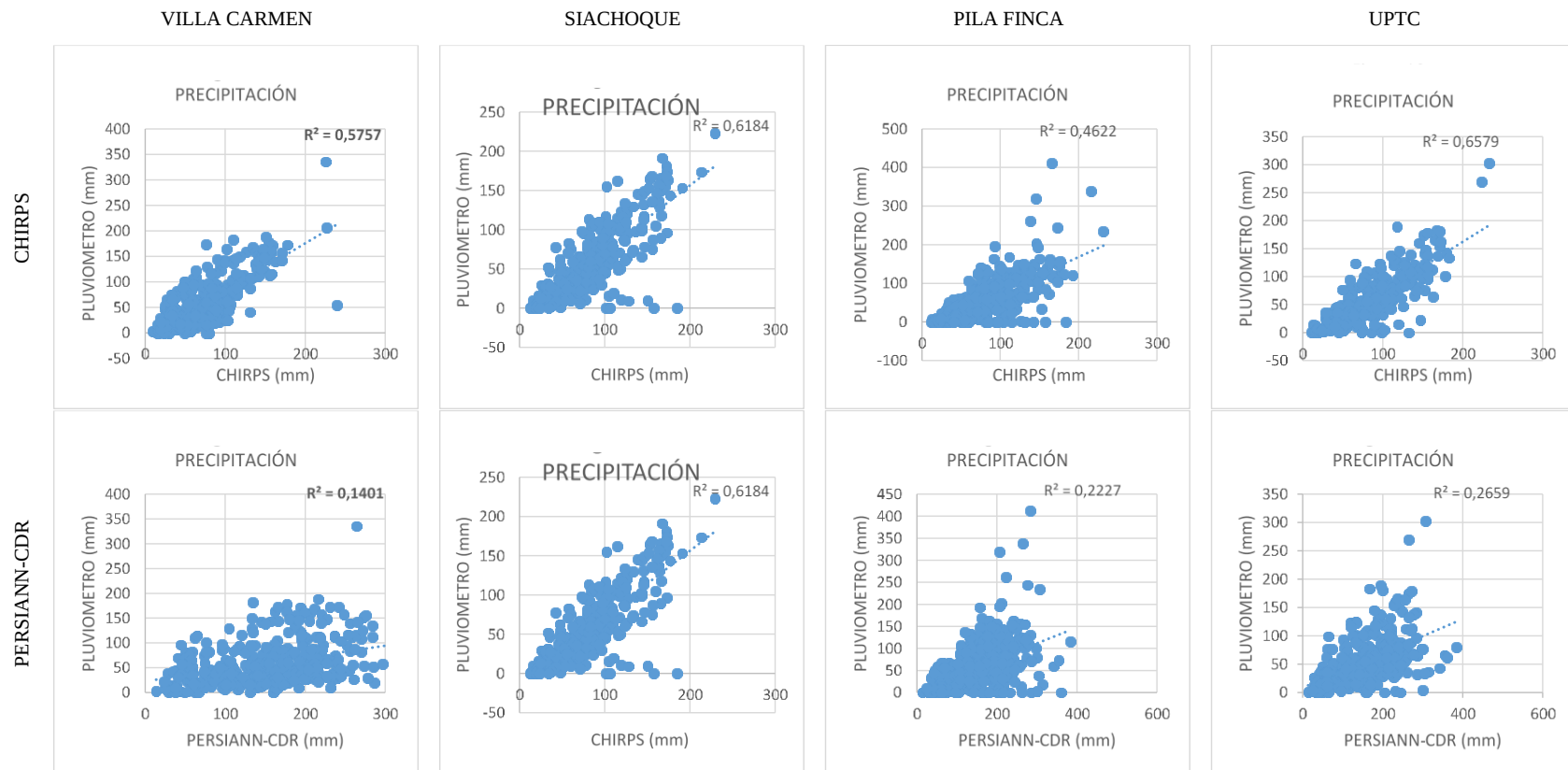
A continuación, se presentan las gráficas obtenidas por medio de los diagramas estadísticos descriptivos comparando los datos de dispersión obtenidos por medio de Chirps y Persiann-CDR en cada uno de los lugares cercanos a la cuenca evaluados.

De las gráficas presentadas en la figura 4 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los datos de precipitación que aporta el satélite CHIRPS tienen un mejor comportamiento con respecto a los datos de precipitación tomada por estaciones pluviométricas.

**Figura 4.** Diagramas de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.**Fuente:** Elaboración propia

De las gráficas presentadas en la figura 5 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los datos de precipitación que aporta el satélite CHIRPS tienen un mejor comportamiento con respecto a los datos de precipitación tomada por estaciones pluviométricas.

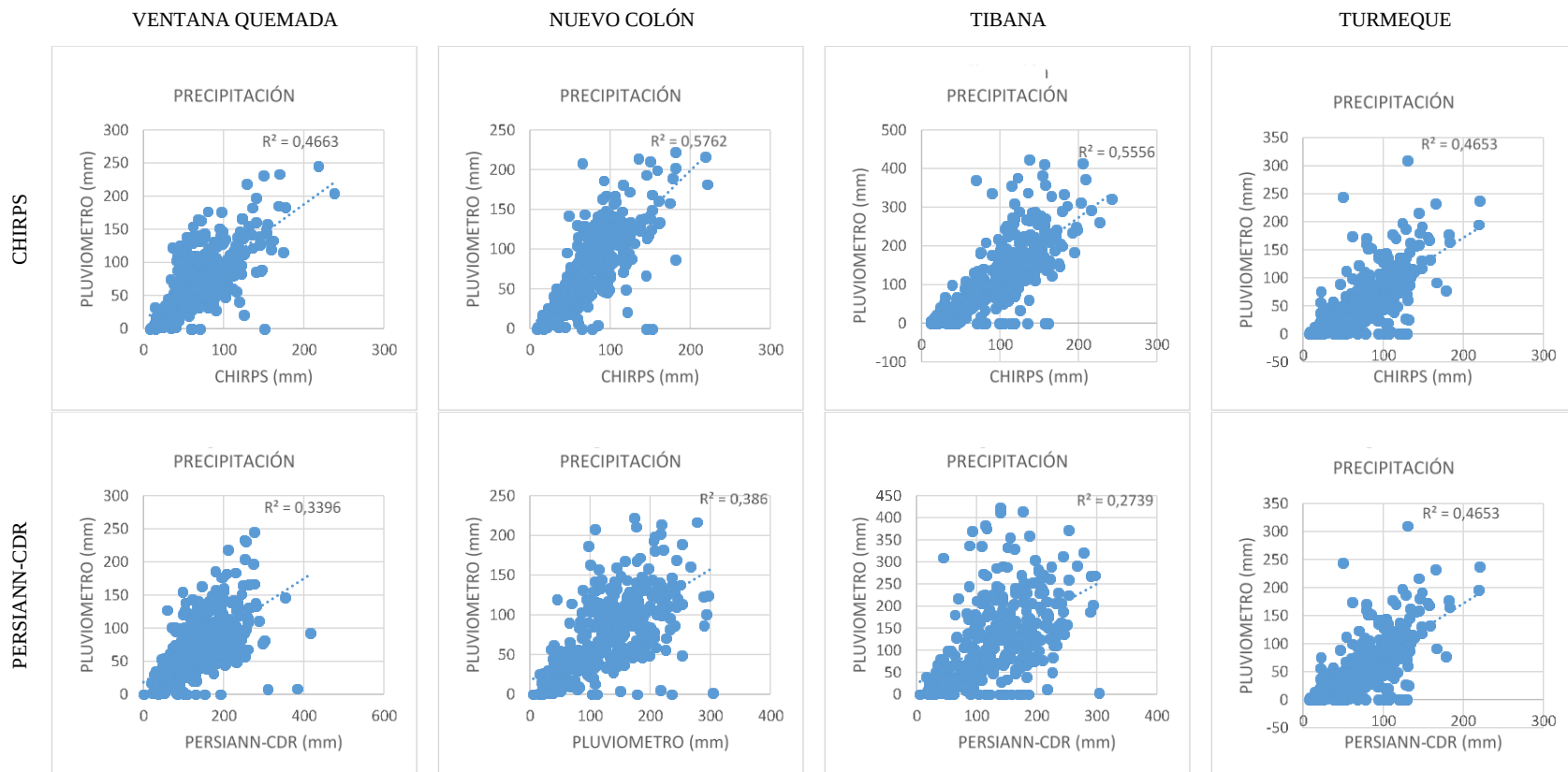
**Figura 5.** Diagramas de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración propia

De las gráficas presentadas en la figura 6 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los datos de precipitación que aporta el satélite CHIRPS tienen un mejor comportamiento con respecto a los datos de precipitación tomada por estaciones pluviométricas.

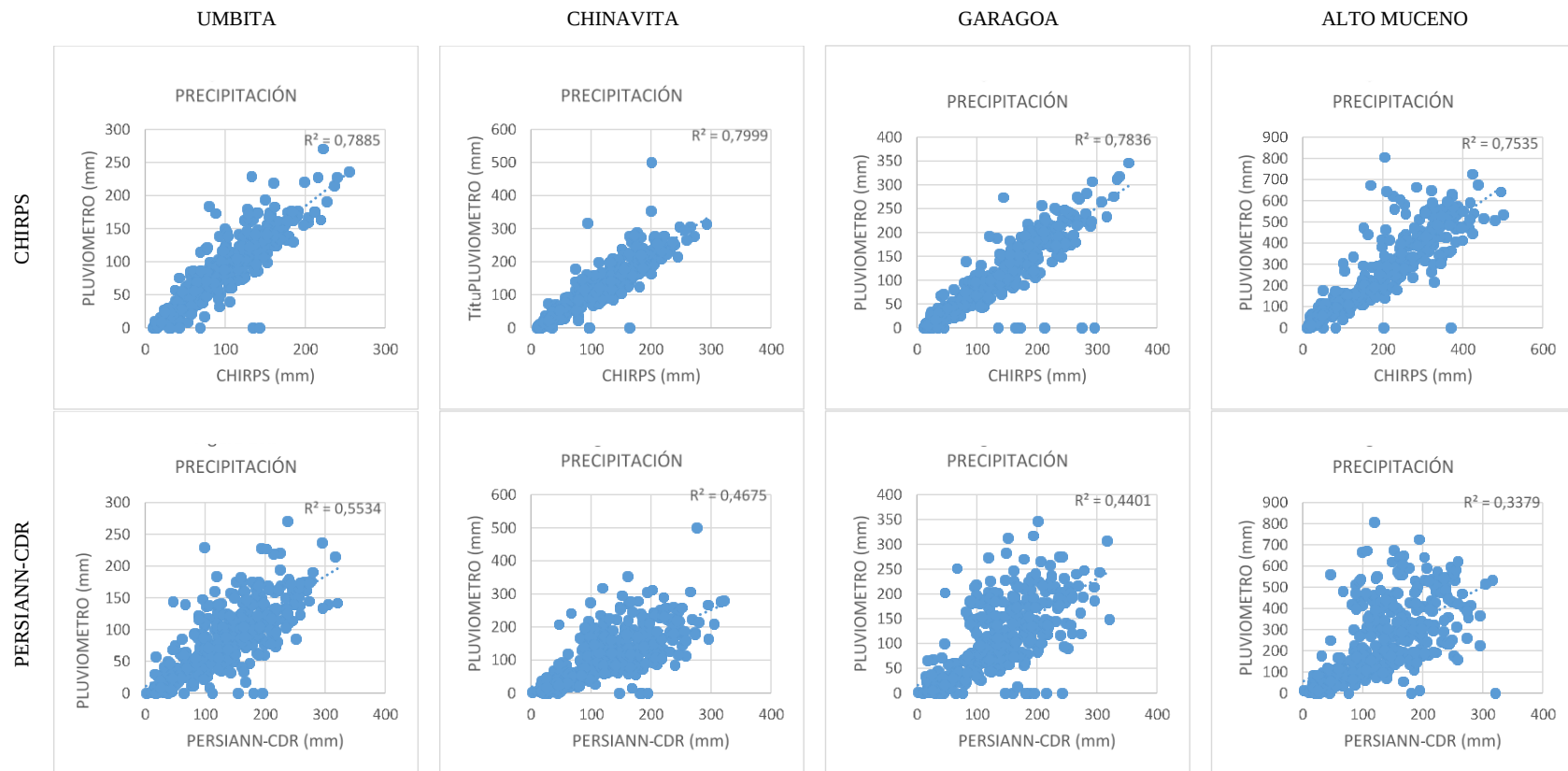
**Figura 6.** Diagramas de dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración Propia

De las gráficas presentadas en la figura 7 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los coeficientes de correlación para CHIRPS empiezan a mostrar un comportamiento positivo llegando a un  $R=0.79$  para la estación pluviométrica de Chinavita.

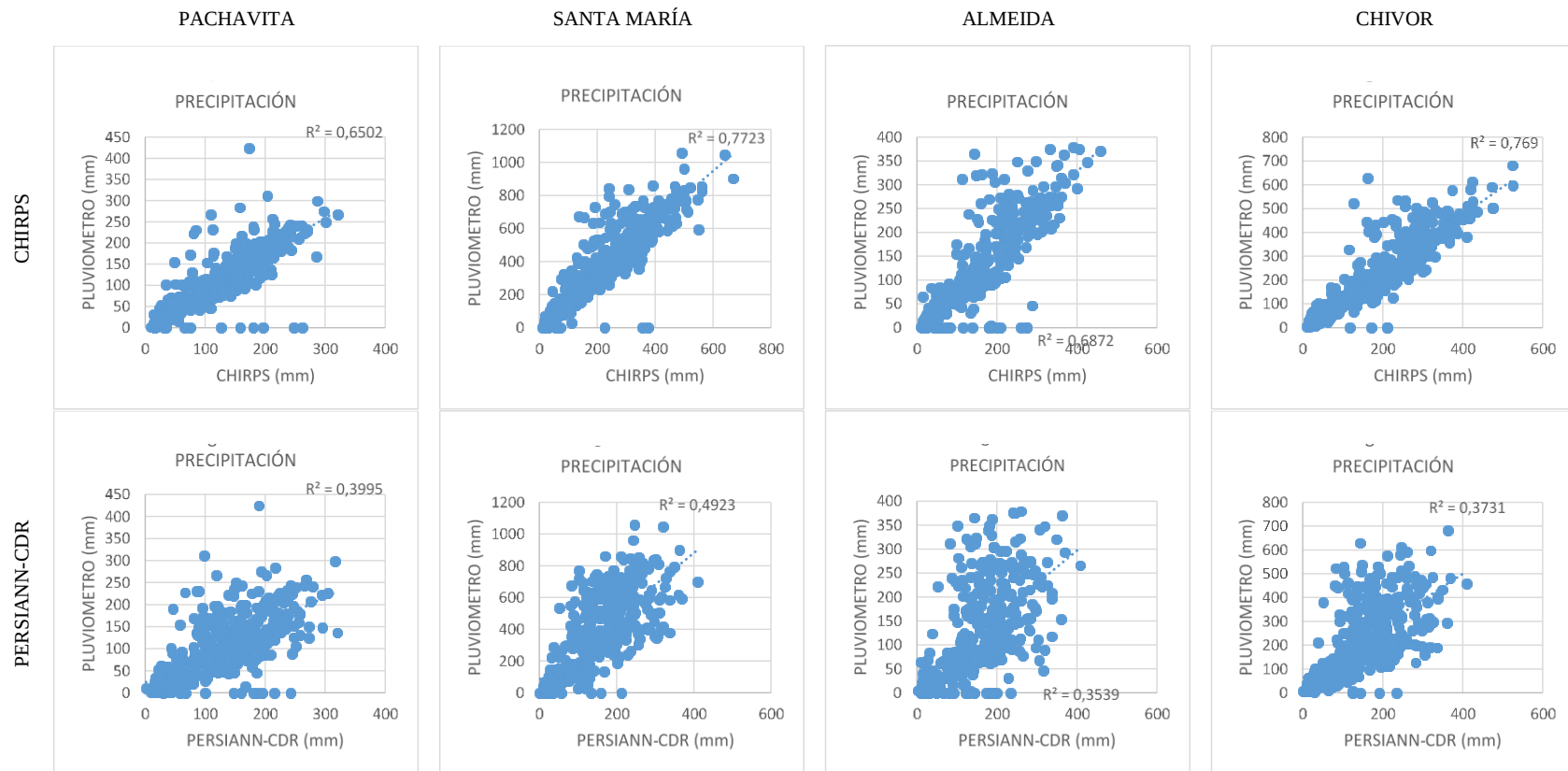
**Figura 7.** Diagramas de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración propia

De las gráficas presentadas en la figura 8 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los datos de precipitación que aporta el satélite CHIRPS tienen un mejor comportamiento con respecto a los datos de precipitación tomada por estaciones pluviométricas.

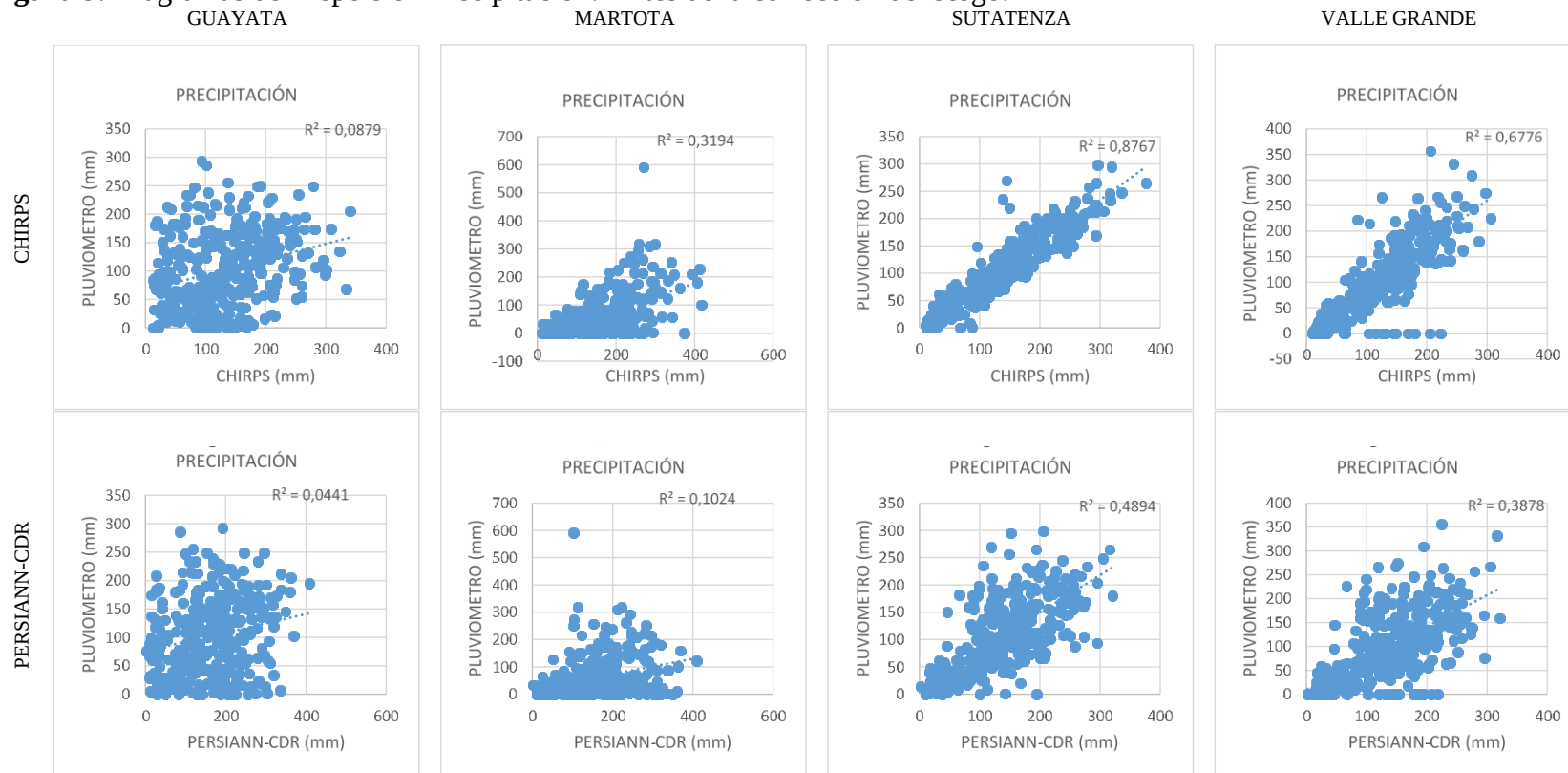
**Figura 8.** Diagrama de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración propia

De las gráficas presentadas en la figura 9 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los coeficientes de correlación para CHIRPS empiezan a mostrar un comportamiento positivo llegando a un  $R=0.87$  para la estación pluviométrica de Sutatenza.

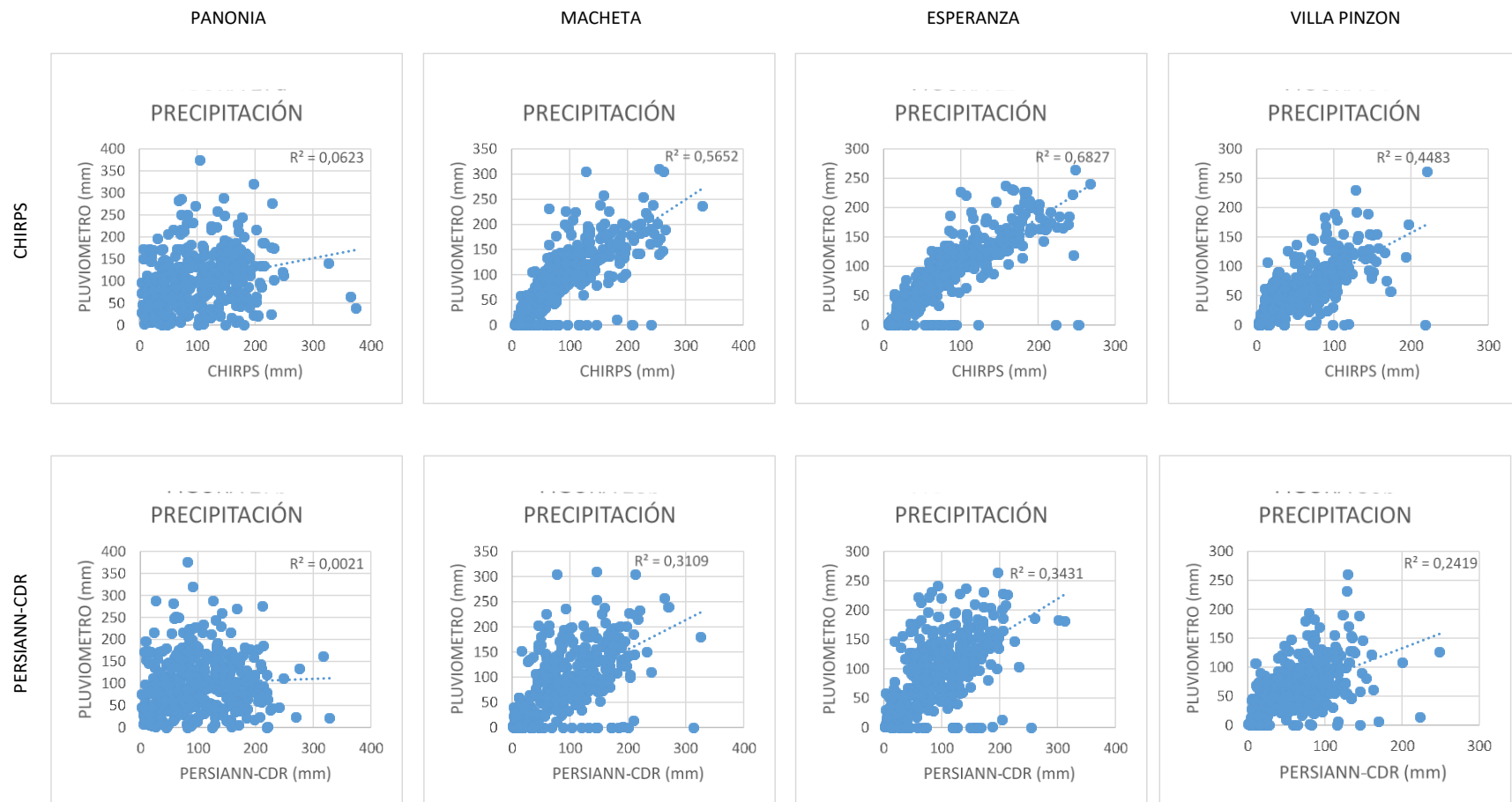
**Figura 9.** Diagramas de Dispersión Precipitación: Antes de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración propia

De las gráficas presentadas en la figura 10 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los datos de precipitación que aporta el satélite CHIRPS tienen un mejor comportamiento con respecto a los datos de precipitación tomada por estaciones pluviométricas.

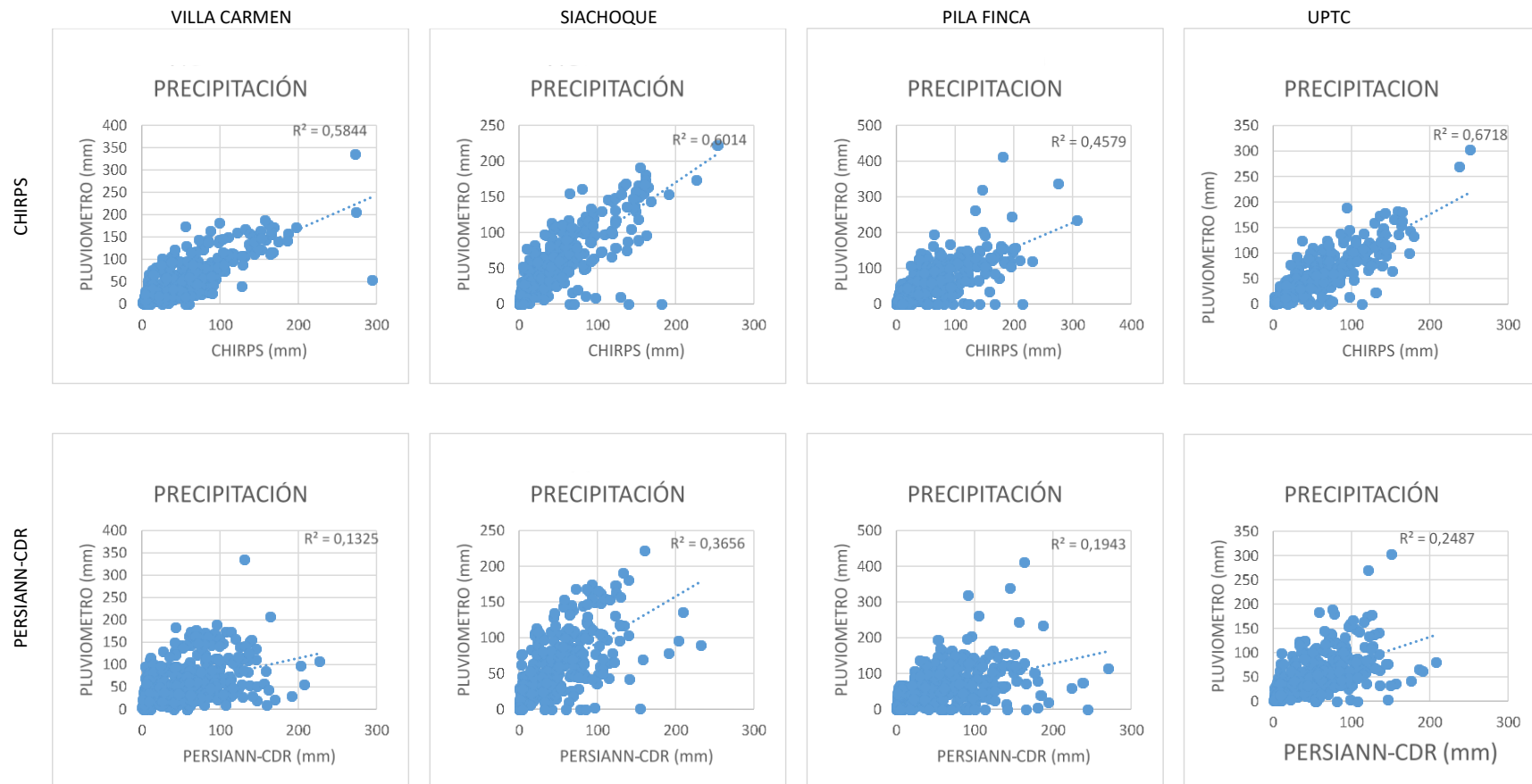
**Figura 10.** Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración propia

De las gráficas presentadas en la figura 11 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los datos de precipitación que aporta el satélite CHIRPS tienen un mejor comportamiento con respecto a los datos de precipitación tomada por estaciones pluviométricas.

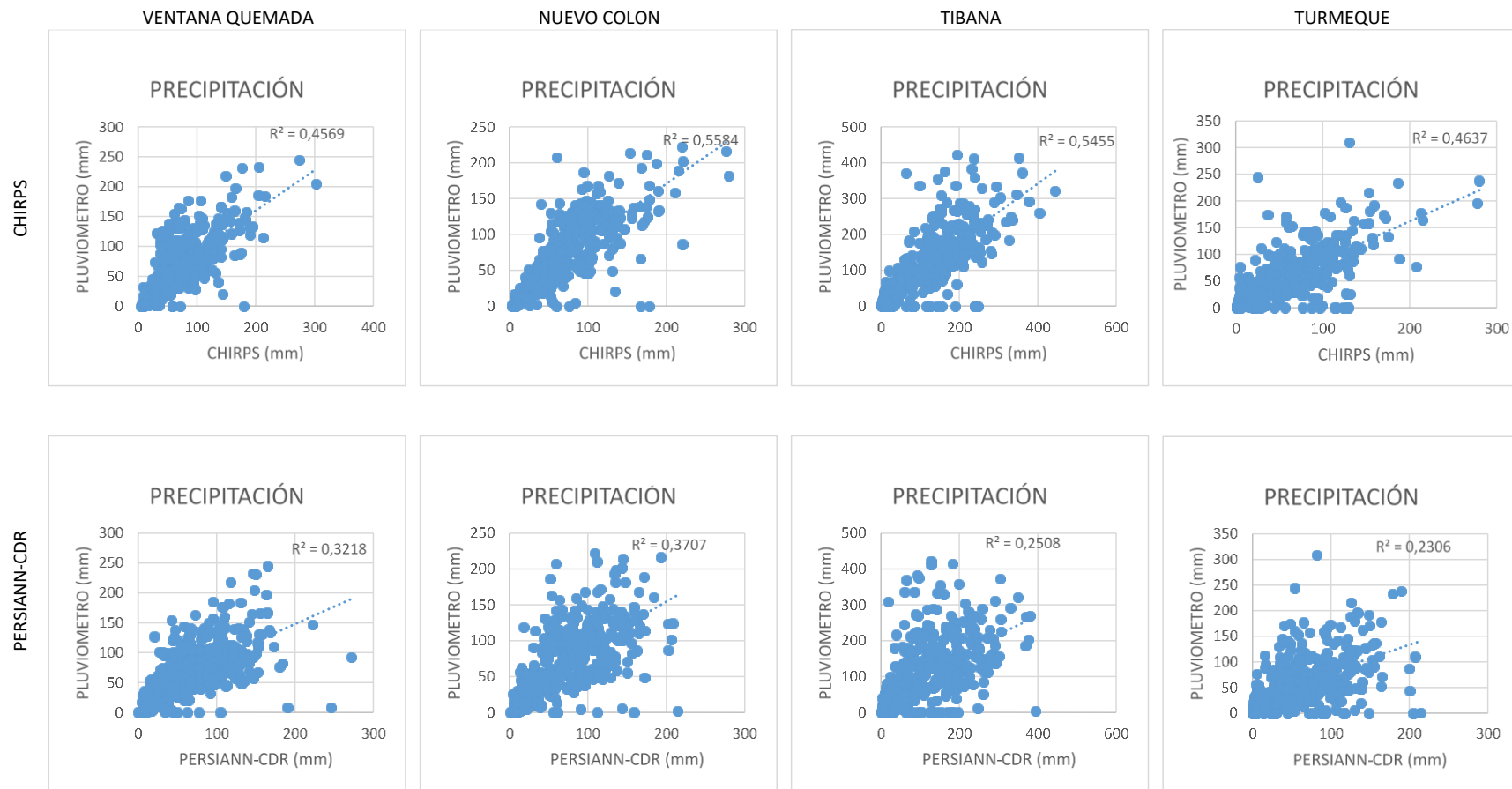
**Figura 11.** Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración Propia

De las gráficas presentadas en la figura 12 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los datos de precipitación que aporta el satélite CHIRPS tienen un mejor comportamiento con respecto a los datos de precipitación tomada por estaciones pluviométricas.

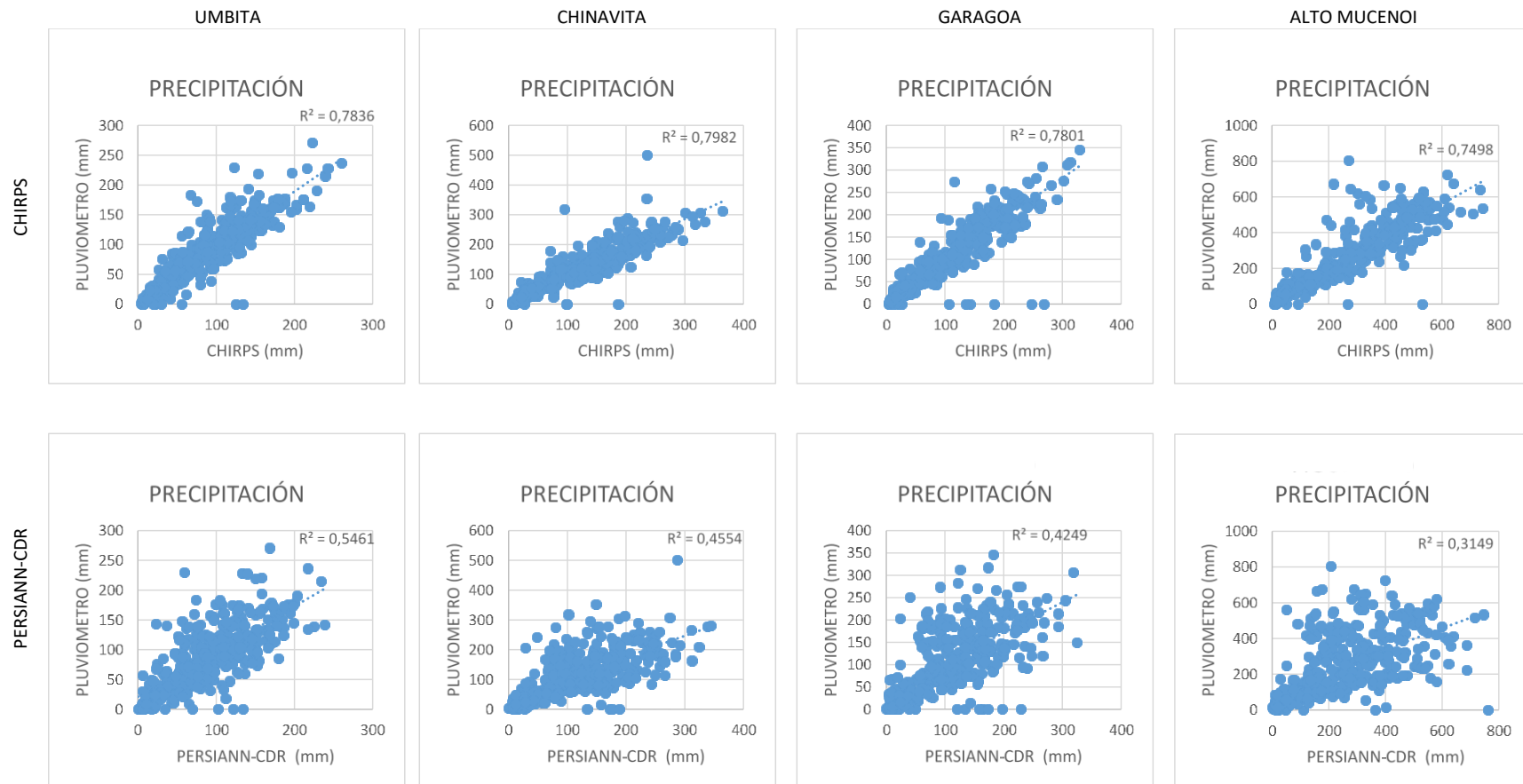
**Figura 12.** Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración Propia

De las gráficas presentadas en la figura 13 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los coeficientes de correlación para CHIRPS empiezan a mostrar un comportamiento positivo llegando a un  $R=0.79$  para la estación pluviométrica de Chinavita.

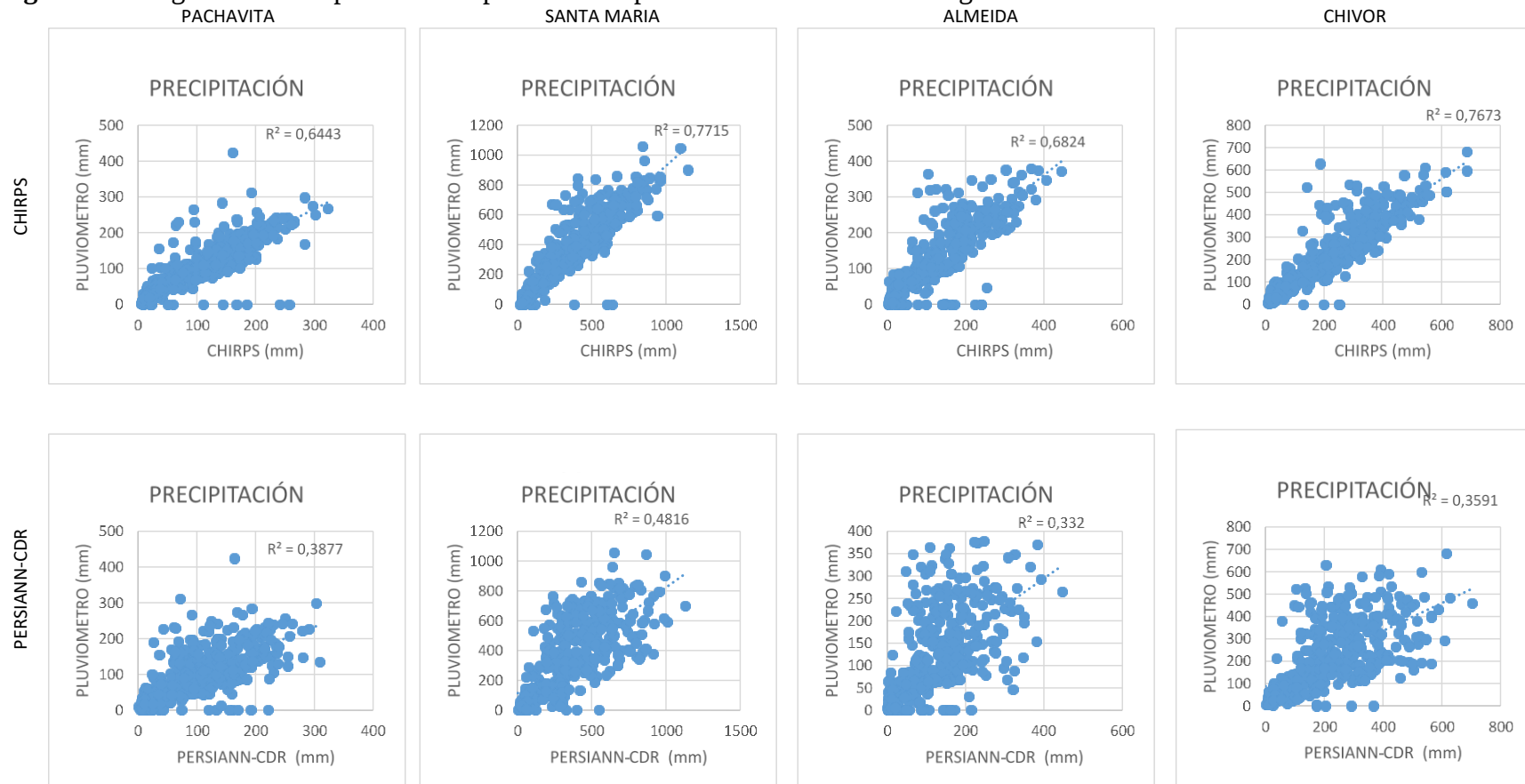
**Figura 13.** Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración Propia.

De las gráficas presentadas en la figura 14 se puede observar que se obtienen coeficientes de correlación bajos, sin embargo, los datos de precipitación que aporta el satélite CHIRPS tienen un mejor comportamiento con respecto a los datos de precipitación tomada por estaciones pluviométricas.

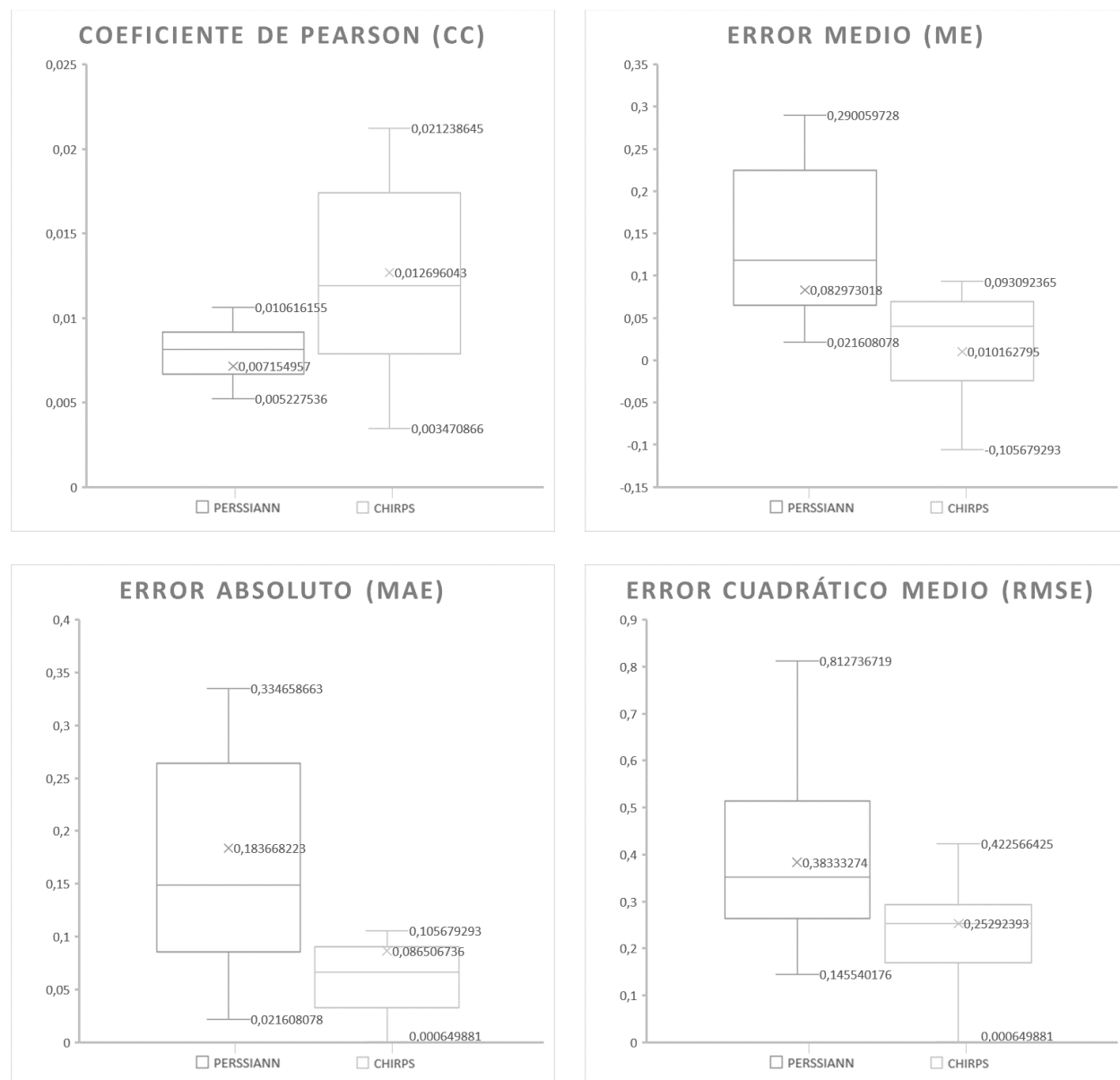
**Figura 14.** Diagramas de Dispersión Precipitación: Después de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración Propia.

Las estadísticas descriptivas tal como se presentan en Figura 15 se utilizaron para evaluar más a fondo el rendimiento de la precipitación diaria de las estaciones Chirps y Persiann-CDR, antes y después de la corrección del sesgo.

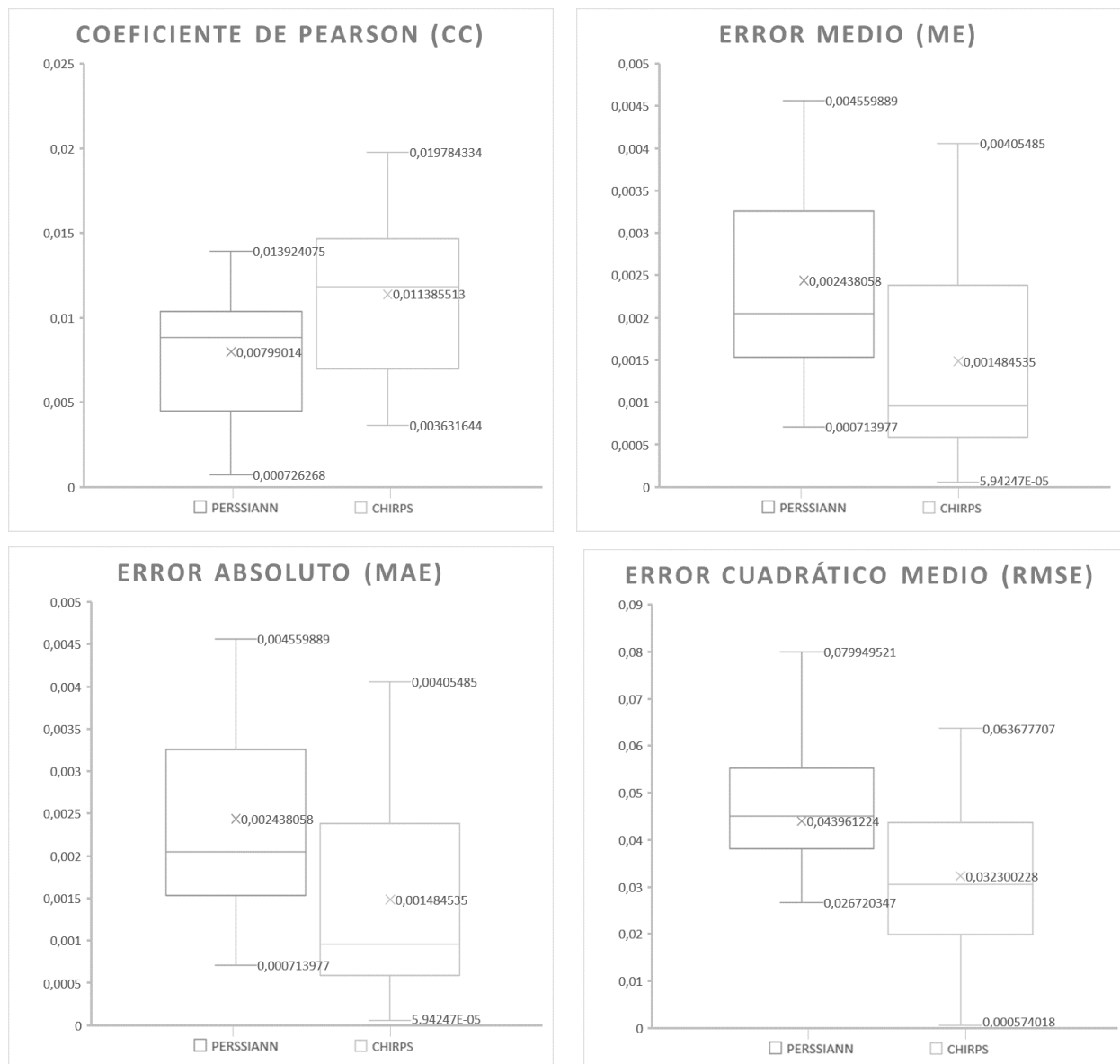
**Figura 15.** Diagramas de caja y bigotes de estadísticas descriptivas para las estaciones Chirps y Persiann-CDR. Antes de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración propia

Según las gráficas presentadas en la figura 16, en promedio se presenta un coeficiente de Pearson (CC) de 0.007 para el satélite PERSIANN-CDR y de 0.013 para el satélite CHIRPS. Estos valores nos muestran que no existe una relación lineal entre los datos de lluvia satelital y los datos de lluvia pluviométricos.

**Figura 106.** Diagramas de caja y bigotes de estadísticas descriptivas para las estaciones Chirps y Persiann-CDR. Después de la corrección del sesgo.



**Fuente:** Elaboración propia

Según las gráficas presentadas en la figura 16, en promedio se presenta un coeficiente de Pearson (CC) de 0.008 para el satélite PERSIANN-CDR y de 0.011 para el satélite CHIRPS. Estos valores nos muestran que no existe una relación lineal entre los datos de lluvia satelital y los datos de lluvia pluviométricos.

Por otra parte las estadísticas categoricas para se midieron para antes y despues de la corrección del sesgo en las 2 estaciones. Los resultados se presentan en la Tabla 5. Estadísticas categoricas estación Chirps.

**Tabla 5.** *Estadísticas categoricas estación Chirps*

|                 | ANTES DE CORRECCION<br>DEL SESGO   |                                           | DESPUES DE CORRECCION DEL<br>SESGO |                                           |
|-----------------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|
|                 | Probabilidad de<br>detección (POD) | Índice de Sesgo<br>de Frecuencia<br>(FBI) | Probabilidad de<br>detección (POD) | Índice de Sesgo<br>de Frecuencia<br>(FBI) |
| PANONIA         | 97,50%                             | 1,02564103                                | 97,48%                             | 1,01709402                                |
| MACHETA         | 89,72%                             | 1,11455108                                | 89,72%                             | 1,11455108                                |
| ESPERANZA       | 90,00%                             | 1,11111111                                | 90,00%                             | 1,11111111                                |
| VILLA PINZON    | 93,06%                             | 1,07462687                                | 95,16%                             | 1,04776119                                |
| VILLA CARMEN    | 96,39%                             | 1,03746398                                | 97,98%                             | 0,99711816                                |
| SIACHOQUE       | 77,22%                             | 1,29496403                                | 80,19%                             | 1,1618705                                 |
| PILA LA FINCA   | 87,74%                             | 1,13968254                                | 91,77%                             | 1,04126984                                |
| UPTC            | 94,71%                             | 1,05588235                                | 96,81%                             | 1,01470588                                |
| VENTANA QUEMADA | 95,26%                             | 1,0497076                                 | 95,53%                             | 1,04678363                                |
| NUEVO COLÓN     | 95,28%                             | 1,04956268                                | 96,35%                             | 1,03790087                                |
| TIBANA          | 91,92%                             | 1,08787879                                | 93,64%                             | 1,04848485                                |
| TURMEQUE        | 89,42%                             | 1,11838006                                | 93,31%                             | 1,02492212                                |
| UMBITA          | 95,28%                             | 1,04956268                                | 95,54%                             | 1,04664723                                |
| CHINAVITA       | 96,67%                             | 1,03448276                                | 96,67%                             | 1,03448276                                |
| GARAGOA         | 94,72%                             | 1,05571848                                | 95,25%                             | 1,04985337                                |
| ALTO MUCENO     | 98,05%                             | 1,01988636                                | 98,05%                             | 1,01988636                                |
| PACHAVITA       | 95,28%                             | 1,04956268                                | 95,54%                             | 1,04664723                                |
| SANTA MARIA     | 97,22%                             | 1,02857143                                | 97,22%                             | 1,02857143                                |
| ALMEIDA         | 91,11%                             | 1,09756098                                | 92,86%                             | 1,06707317                                |
| CHIVOR          | 98,61%                             | 1,01408451                                | 98,61%                             | 1,01408451                                |
| GUAYATA         | 95,56%                             | 1,04651163                                | 95,56%                             | 1,04651163                                |
| MARTOTA         | 63,66%                             | 1,57079646                                | 71,48%                             | 1,16371681                                |
| SUTATENZA       | 96,10%                             | 1,04057971                                | 96,37%                             | 1,03768116                                |

|                     |        |            |        |            |
|---------------------|--------|------------|--------|------------|
| <b>VALLE GRANDE</b> | 90,53% | 1,10461538 | 93,06% | 1,06461538 |
|---------------------|--------|------------|--------|------------|

**Fuente:** Elaboración propia

Según los datos presentados anteriormente, se puede observar que para todas las estaciones la fracción de ocurrencias de precipitación que fueron detectadas correctamente fue favorable, siendo 63.66% la detección más baja antes de la corrección del sesgo para la estación de Martota, sin embargo, después de aplicar el método de quantile mapping, el porcentaje de detección asendió a 71.48%.

Además, en la tabla 6. Estadísticas categóricas estación Persiann-CDR, se evidencia que el satélite CHIRPS tiene una tendencia a subestimar los eventos de precipitación.

**Tabla 6.** *Estadísticas categóricas estación Persiann-CDR*

|                        | <b>ANTES DE CORRECCION<br/>DEL SESGO</b> |                                           | <b>DESPUES DE CORRECCION<br/>DEL SESGO</b> |                                           |
|------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                        | Probabilidad de<br>detección (POD)       | Índice de Sesgo<br>de Frecuencia<br>(FBI) | Probabilidad de<br>detección (POD)         | Índice de Sesgo<br>de Frecuencia<br>(FBI) |
| <b>PANONIA</b>         | 97,50%                                   | 1,02564103                                | 97,49%                                     | 1,01994302                                |
| <b>MACHETA</b>         | 89,72%                                   | 1,11455108                                | 91,12%                                     | 1,08049536                                |
| <b>ESPERANZA</b>       | 90,00%                                   | 1,11111111                                | 90,88%                                     | 1,08333333                                |
| <b>VILLA PINZON</b>    | 93,31%                                   | 1,07164179                                | 94,59%                                     | 1,04776119                                |
| <b>VILLA CARMEN</b>    | 96,39%                                   | 1,03746398                                | 97,92%                                     | 0,97118156                                |
| <b>SIACHOQUE</b>       | 77,22%                                   | 1,29496403                                | 80,33%                                     | 1,0971223                                 |
| <b>PILA LA FINCA</b>   | 87,74%                                   | 1,13968254                                | 91,61%                                     | 0,98412698                                |
| <b>UPTC</b>            | 94,71%                                   | 1,05588235                                | 97,01%                                     | 0,98529412                                |
| <b>VENTANA QUEMADA</b> | 95,53%                                   | 1,04678363                                | 95,79%                                     | 1,04093567                                |
| <b>NUEVO COLÓN</b>     | 95,28%                                   | 1,04956268                                | 95,80%                                     | 1,04081633                                |
| <b>TIBANA</b>          | 91,92%                                   | 1,08787879                                | 93,35%                                     | 1,04848485                                |
| <b>TURMEQUE</b>        | 89,42%                                   | 1,11838006                                | 92,35%                                     | 1,01869159                                |
| <b>UMBITA</b>          | 95,54%                                   | 1,04664723                                | 95,80%                                     | 1,04081633                                |
| <b>CHINAVITA</b>       | 96,94%                                   | 1,0316092                                 | 96,93%                                     | 1,02873563                                |
| <b>GARAGOA</b>         | 94,99%                                   | 1,05278592                                | 95,20%                                     | 1,03812317                                |

|                     |        |            |        |            |
|---------------------|--------|------------|--------|------------|
| <b>ALTO MUCENO</b>  | 98,04% | 1,01704545 | 98,04% | 1,01704545 |
| <b>PACHAVITA</b>    | 95,26% | 1,04664723 | 95,52% | 1,04081633 |
| <b>SANTA MARIA</b>  | 97,49% | 1,02571429 | 97,49% | 1,02571429 |
| <b>ALMEIDA</b>      | 91,36% | 1,0945122  | 92,96% | 1,03963415 |
| <b>CHIVOR</b>       | 98,61% | 1,01126761 | 98,61% | 1,01126761 |
| <b>GUAYATA</b>      | 95,54% | 1,04360465 | 95,43% | 1,01744186 |
| <b>MARTOTA</b>      | 63,56% | 1,56637168 | 71,48% | 1,19469027 |
| <b>SUTATENZA</b>    | 96,09% | 1,03768116 | 96,34% | 1,02898551 |
| <b>VALLE GRANDE</b> | 90,78% | 1,10153846 | 92,15% | 1,05846154 |

**Fuente:** Elaboración propia

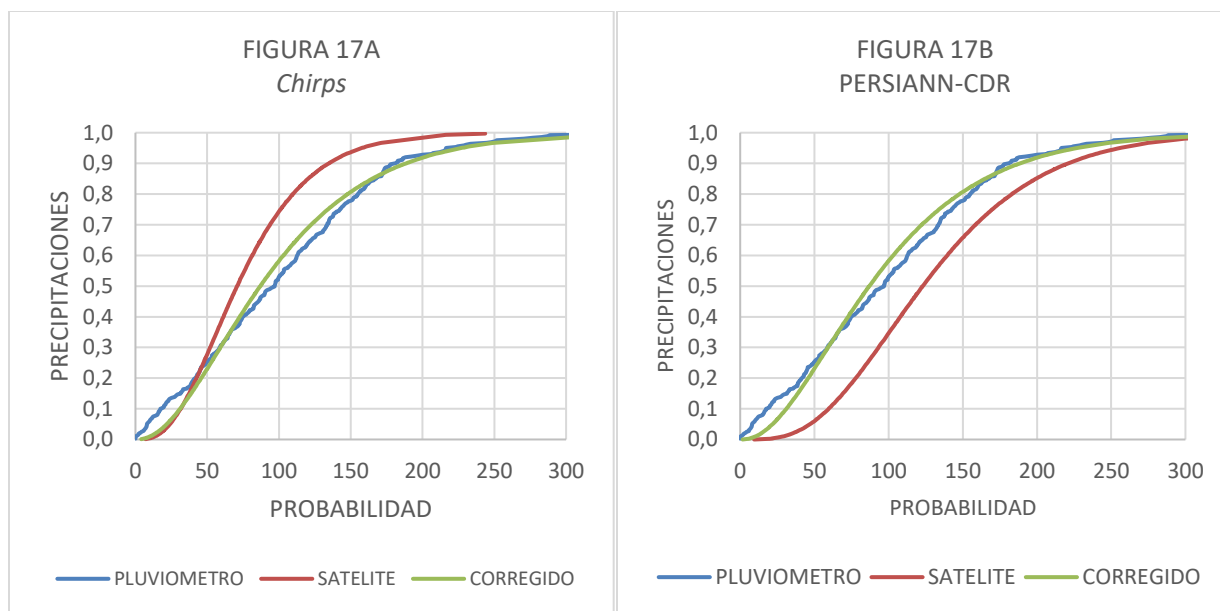
Según los datos presentados anteriormente, se puede observar que para todas las estaciones la fracción de ocurrencias de precipitación que fueron detectadas correctamente fue favorable, siendo 63.56% la detección más baja antes de la corrección del sesgo para la estación de Martota, sin embargo, después de aplicar el método de quantile mapping, el porcentaje de detección asendió a 71.48%.

Además se evidencia que el satélite PERSIANN-CDR tiene una tendencia a subestimar los eventos de precipitación.

Posteriormente, se realizó la comparación de precipitaciones contra la probabilidad de lluvia, a través de los datos entregados por 3 elementos, el Pluviómetro, los Satelitales y los datos corregidos a través de métodos estadísticos descriptivos y categóricos. A partir de este análisis se obtuvieron las gráficas mostradas a continuación.

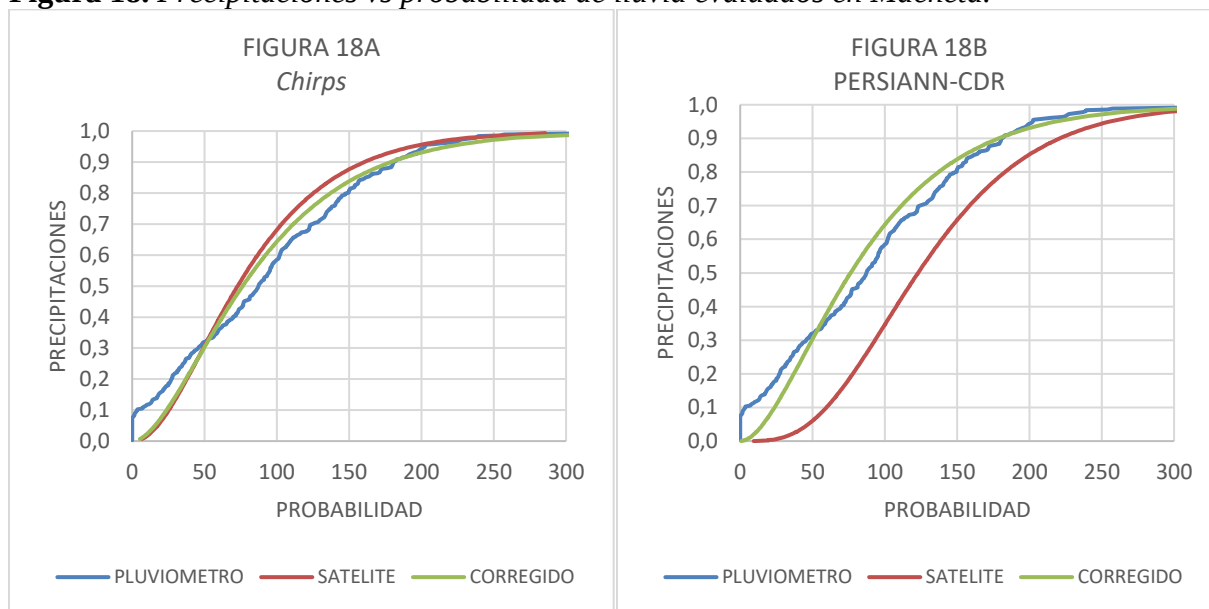
En la figura 17 se presentan los resultados para la estación Panonia, se evidencia que, si bien los resultados son similares entre sí, los datos corregidos se asimilarán más a lo obtenido en el pluviómetro.

**Figura 17.** *Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Panonia.*



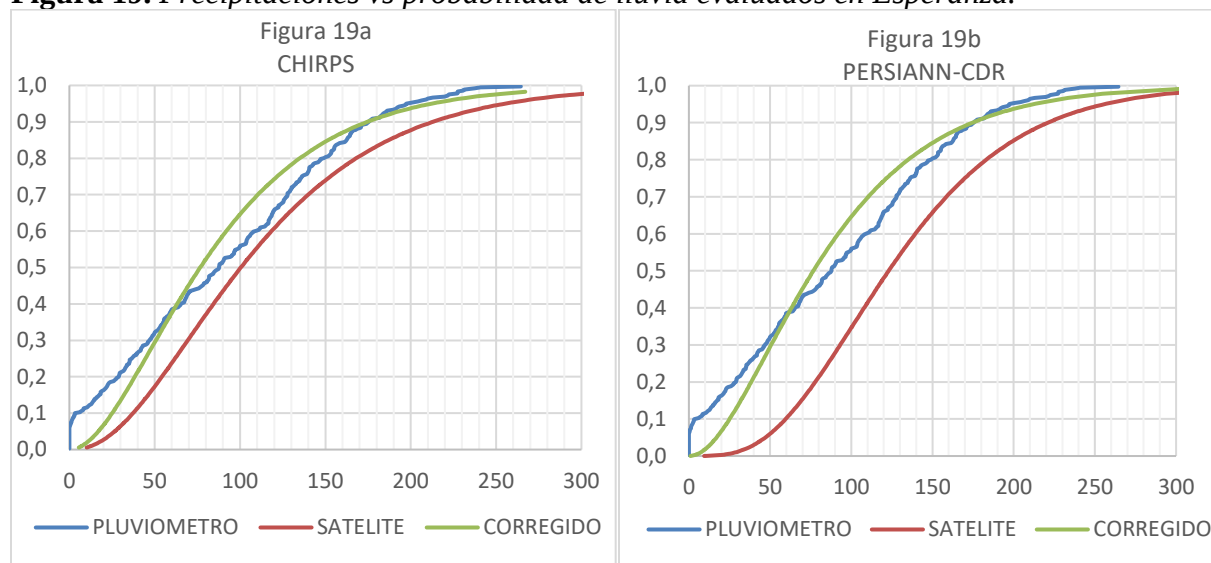
En la figura 18 se presentan los resultados para la estación Macheta y se evidencia que, si bien los resultados son similares entre sí, los datos corregidos se asimilaran más a lo obtenido en el pluviómetro.

**Figura 18.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Macheta.



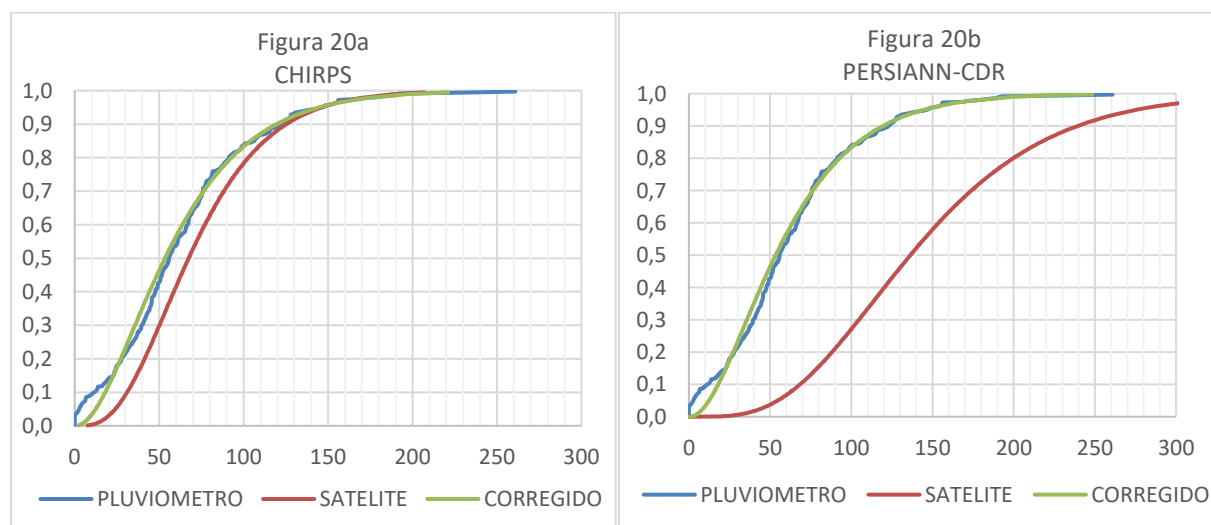
En la figura 19 se presentan los resultados para la estación Esperanza y se evidencia que, si bien los resultados son similares entre sí, los datos corregidos se asimilan más a lo obtenido en el pluviómetro.

**Figura 19.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Esperanza.



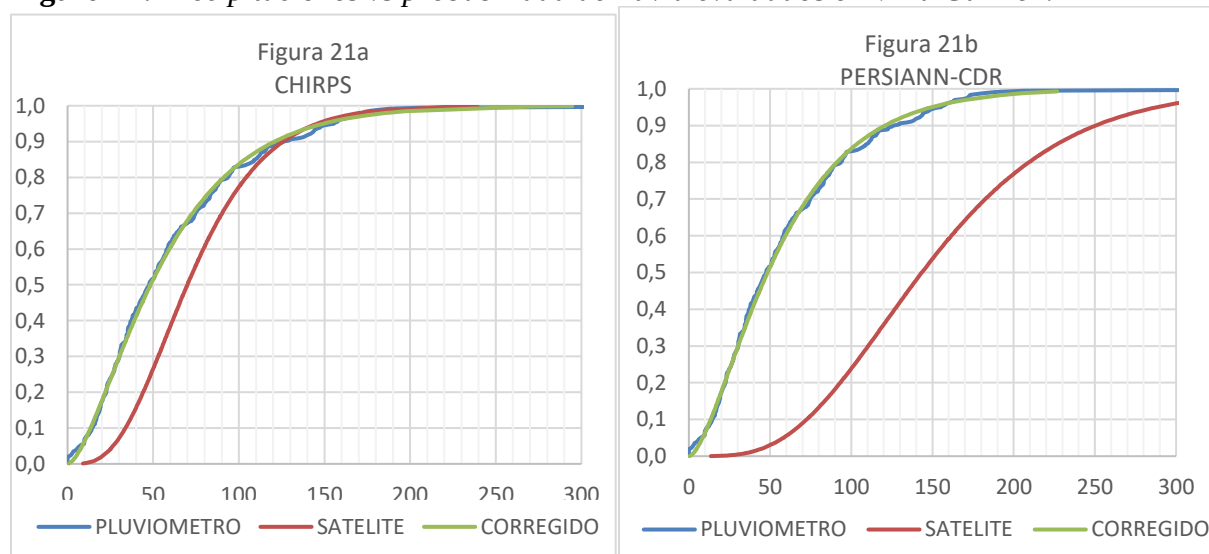
En la figura 20 se presentan los resultados para la estación Villa Pinzón y se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta

**Figura 20.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Villa Pinzón.



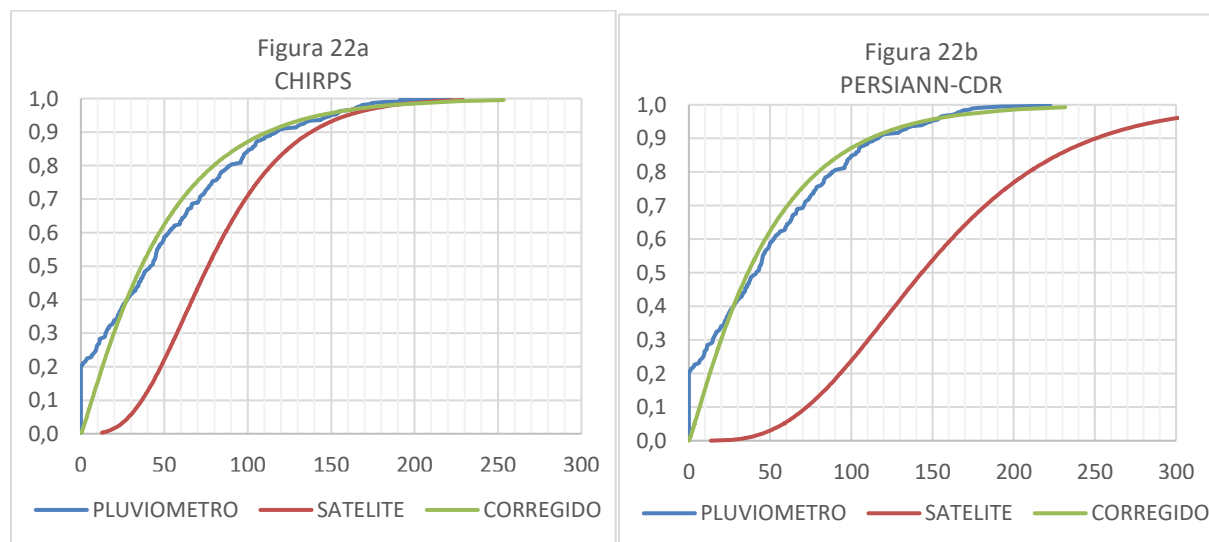
En la figura 21 se presentan los resultados para la estación Villa Carmen y se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 21.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Villa Carmen.



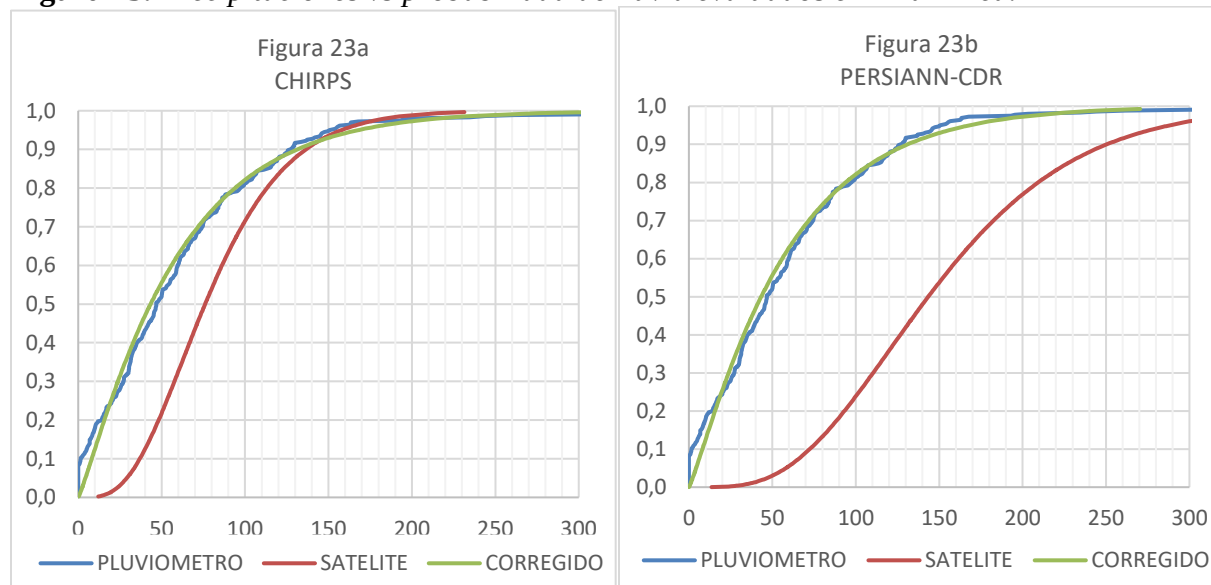
En la figura 22 se presentan los resultados para la estación Siachoque y se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 22.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Siachoque.



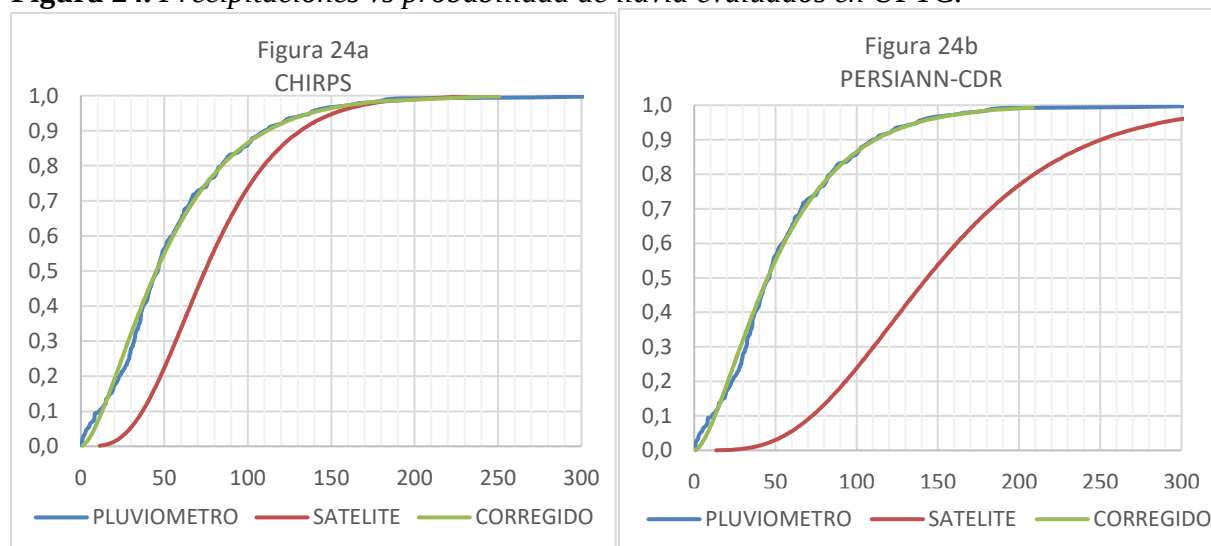
En la figura 23 se presentan los resultados para la estación Pila Finca y se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 23.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Pila Finca.



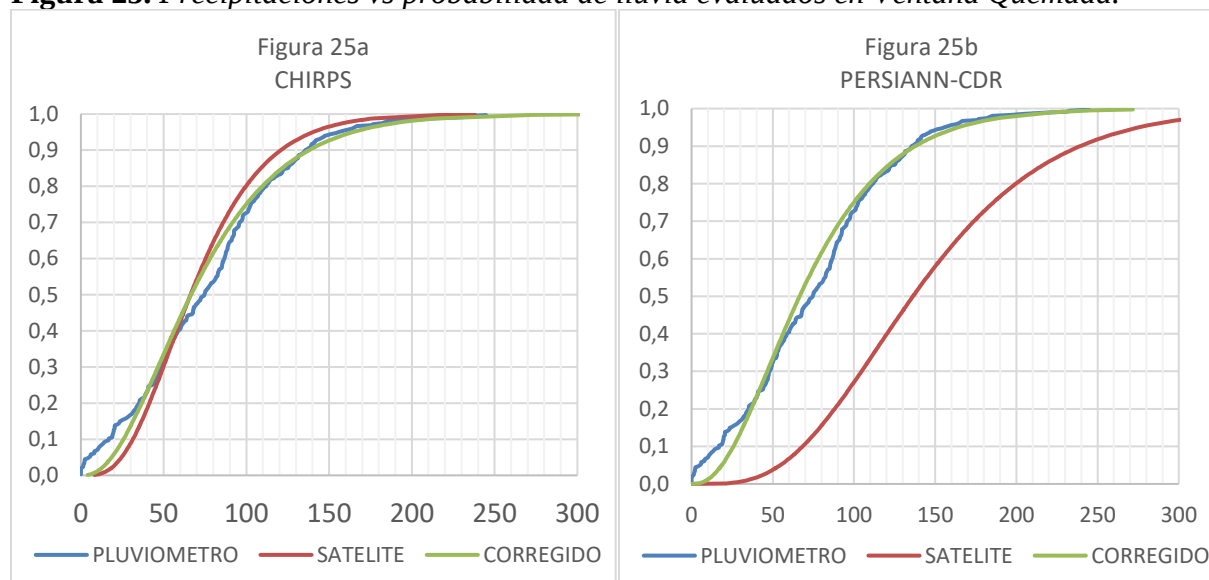
En la figura 24 se presentan los resultados para la estación UPTC y se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 24.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en UPTC.



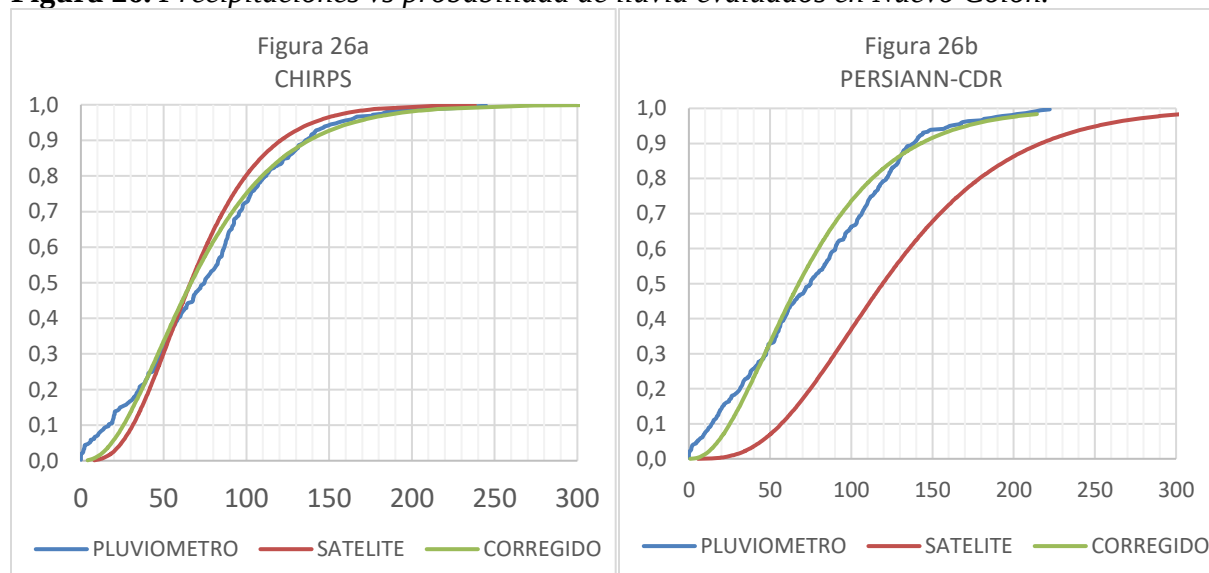
En la figura 25 se presentan los resultados para la estación Ventana Quemada y se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 25.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Ventana Quemada.



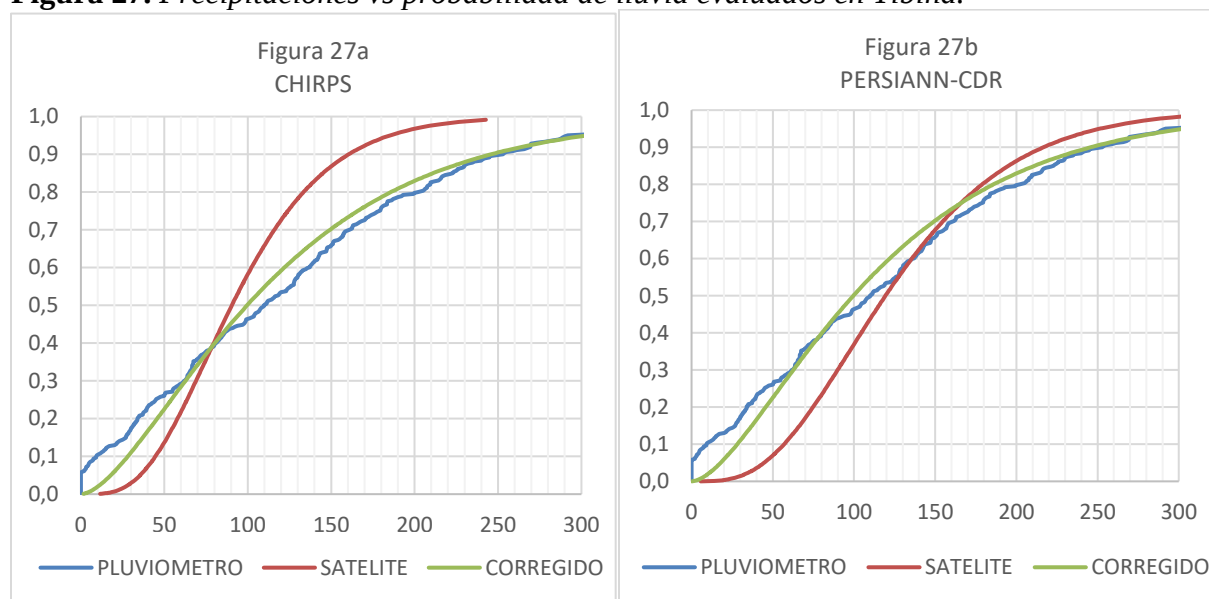
En la figura 26 se presentan los resultados para la estación Nuevo Colón y se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 26.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Nuevo Colón.



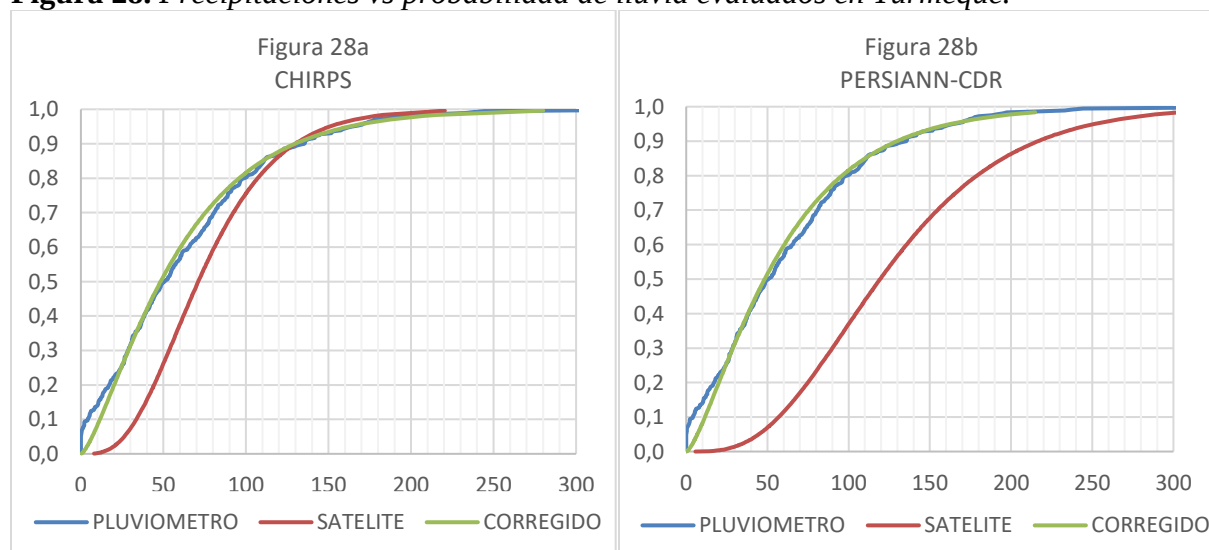
En la figura 27 se presentan los resultados para la estación Tibina y se evidencia que, si bien los resultados son similares entre sí, los datos corregidos se asimilan más a lo obtenido en el pluviómetro.

**Figura 27.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Tibina.



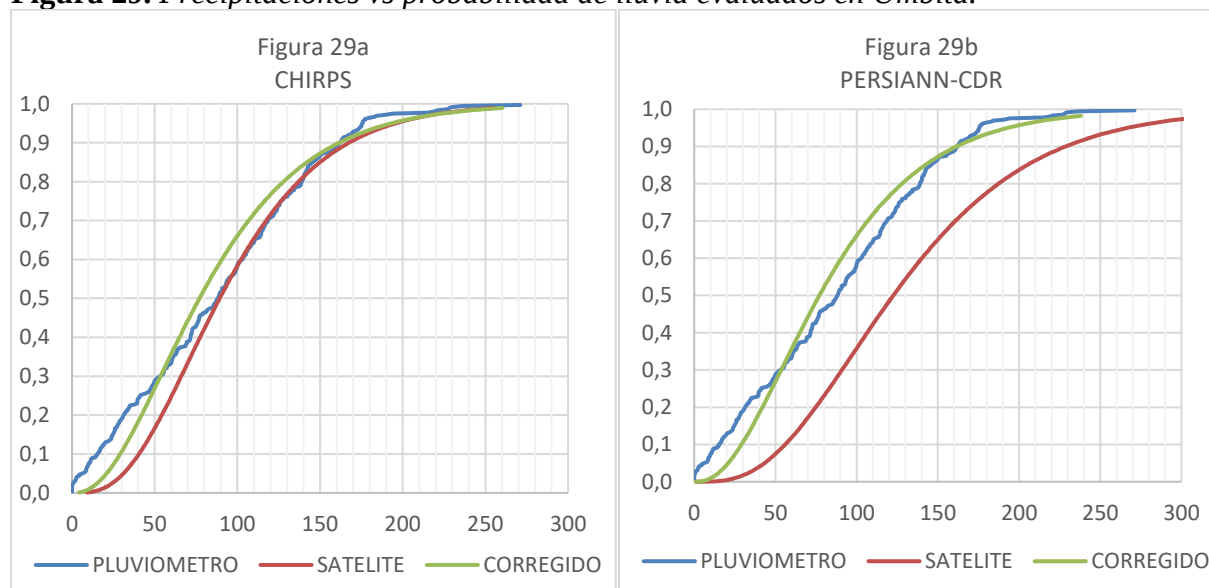
En la figura 28 se presentan los resultados para la estación Turmeque y se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 28.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Turmeque.



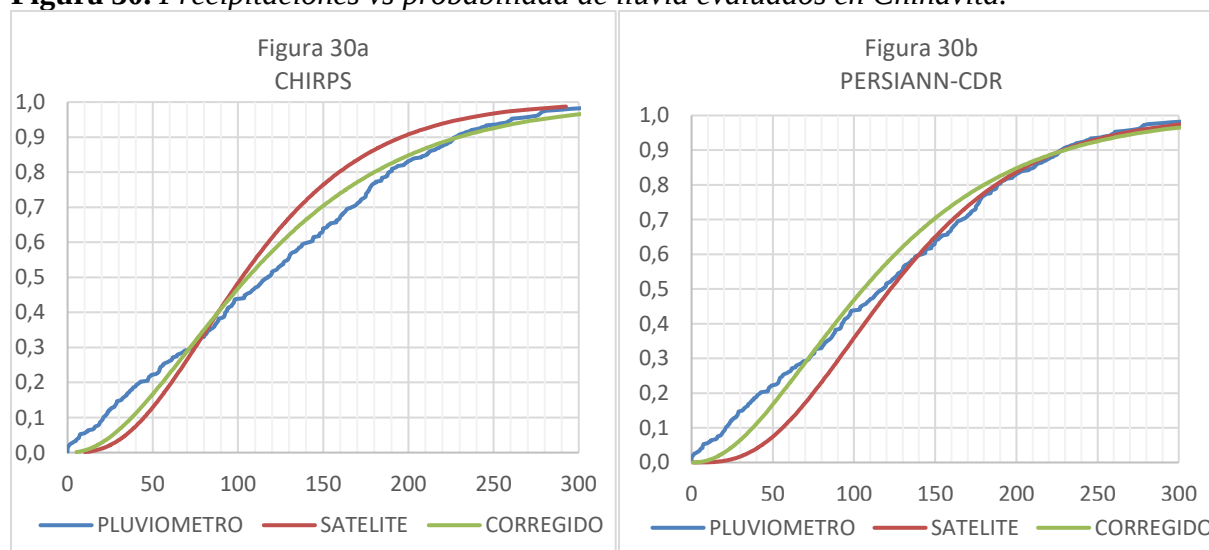
En la figura 29 se presentan los resultados para la estación Umbita y se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 29.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Umbita.



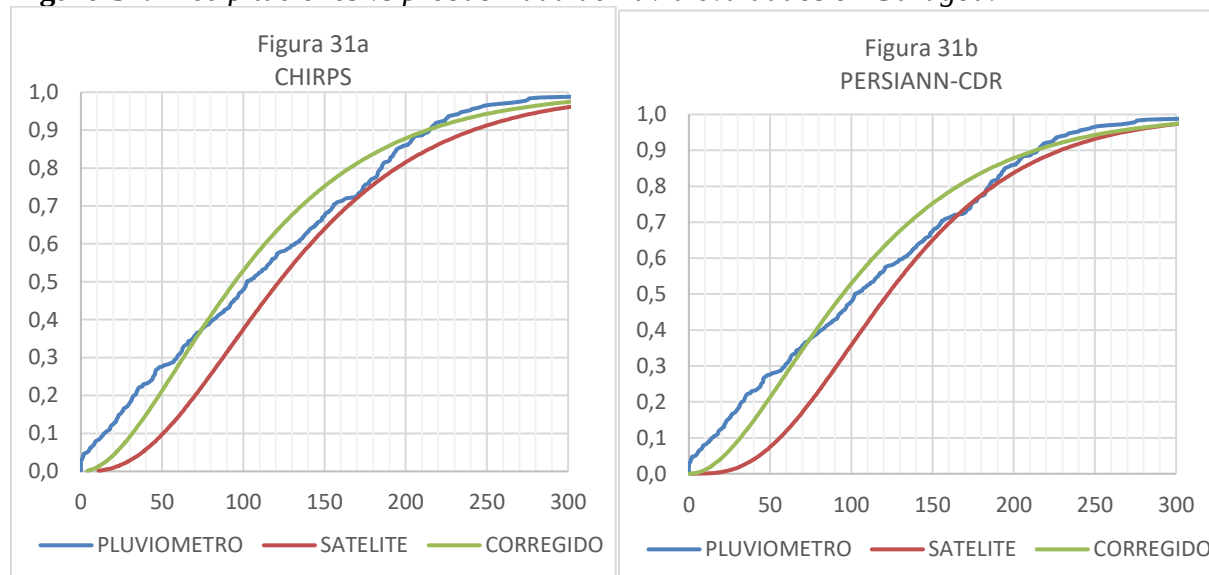
En la figura 30 se presentan los resultados para la estación Chinavita y se evidencia que, los gráficos son similares entre sí y los datos del corregido se encuentran en un punto intermedio entre el pluviómetro y los datos del satélite.

**Figura 30.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Chinavita.



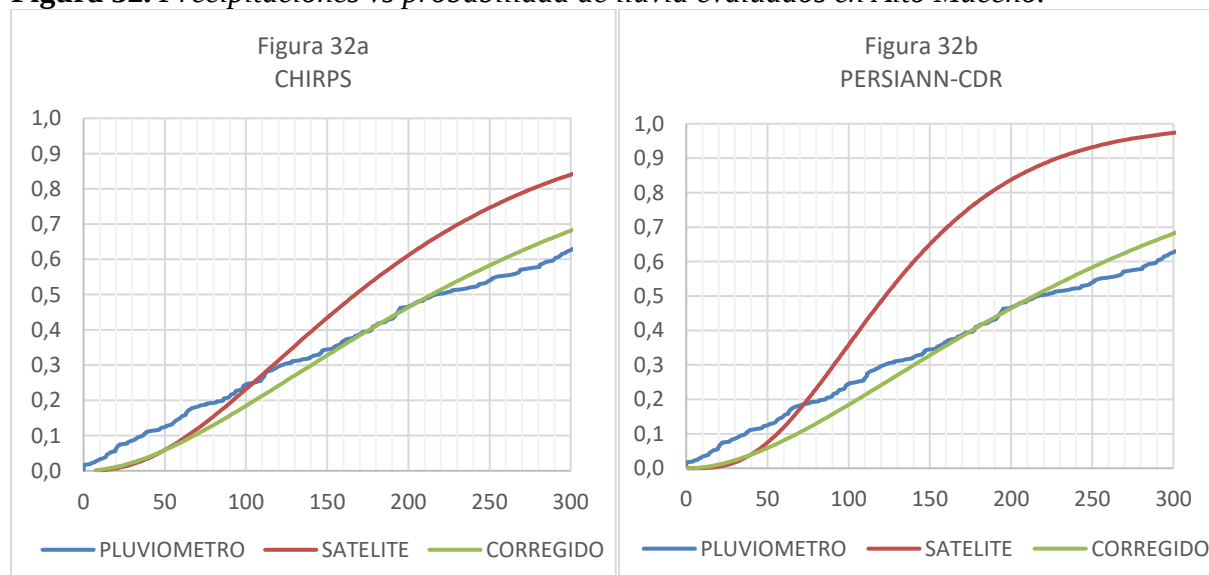
En la figura 31 se presentan los resultados para la estación Garagoa y se evidencia que, los gráficos son similares entre sí y los datos del corregido se encuentran en un punto intermedio entre el pluviómetro y los datos del satélite.

**Figura 31.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Garagoa.



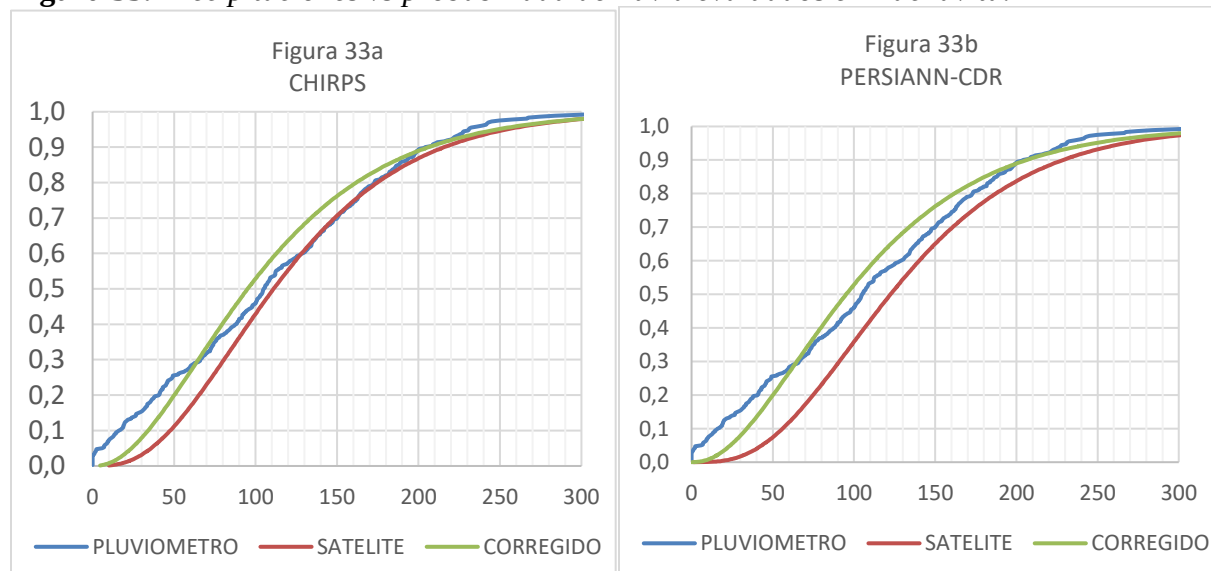
En la figura 32 se presentan los resultados para la estación Alto Muceno, se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 32.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Alto Muceno.



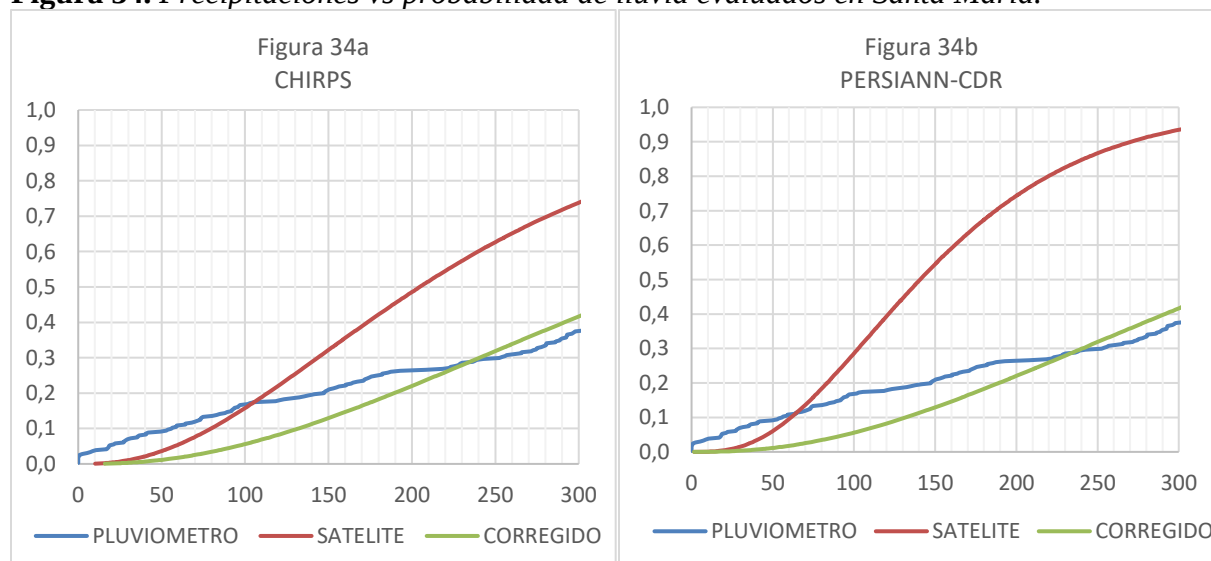
En la figura 33 se presentan los resultados para la estación Pachavita, se evidencia que, los gráficos son similares entre sí y los datos del corregido se encuentran en un punto intermedio entre el pluviómetro y los datos del satélite.

**Figura 33.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Pachavita.



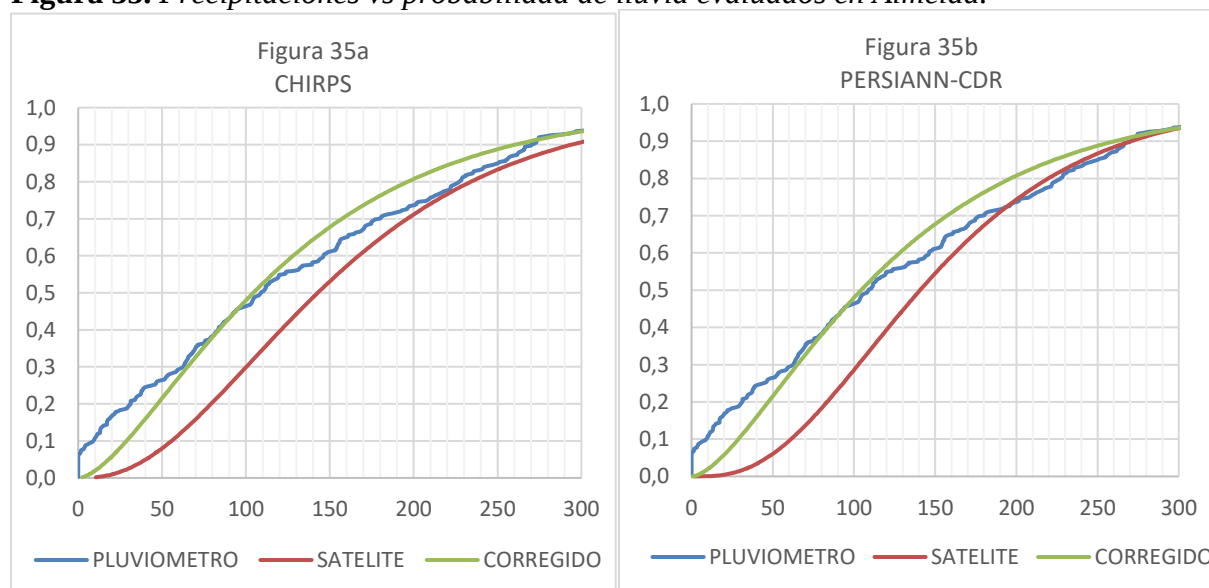
En la figura 34 se presentan los resultados para la estación Santa María, se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 34.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Santa Maria.



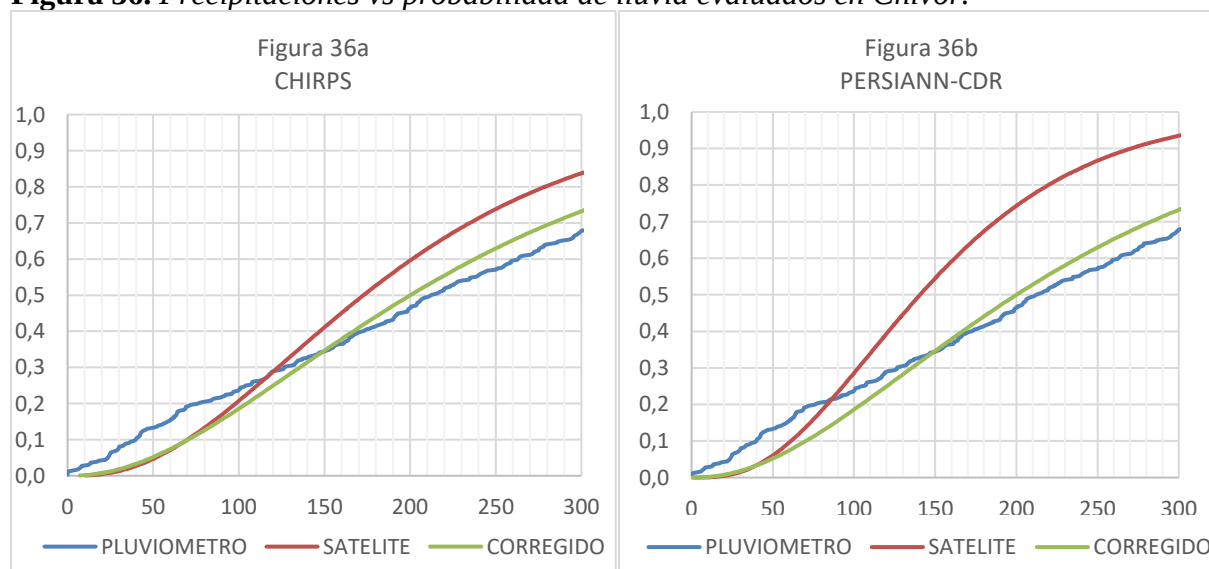
En la figura 35 se presentan los resultados para la estación Almeida, se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 35.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Almeida.



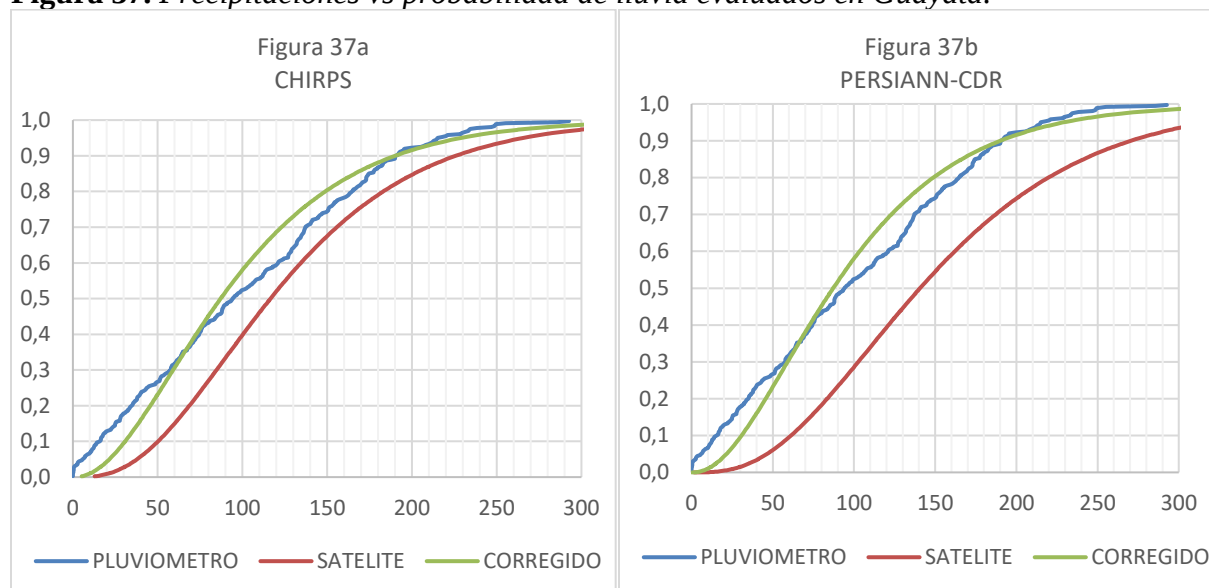
En la figura 36 se presentan los resultados para la estación Chivor, se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 36.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Chivor.



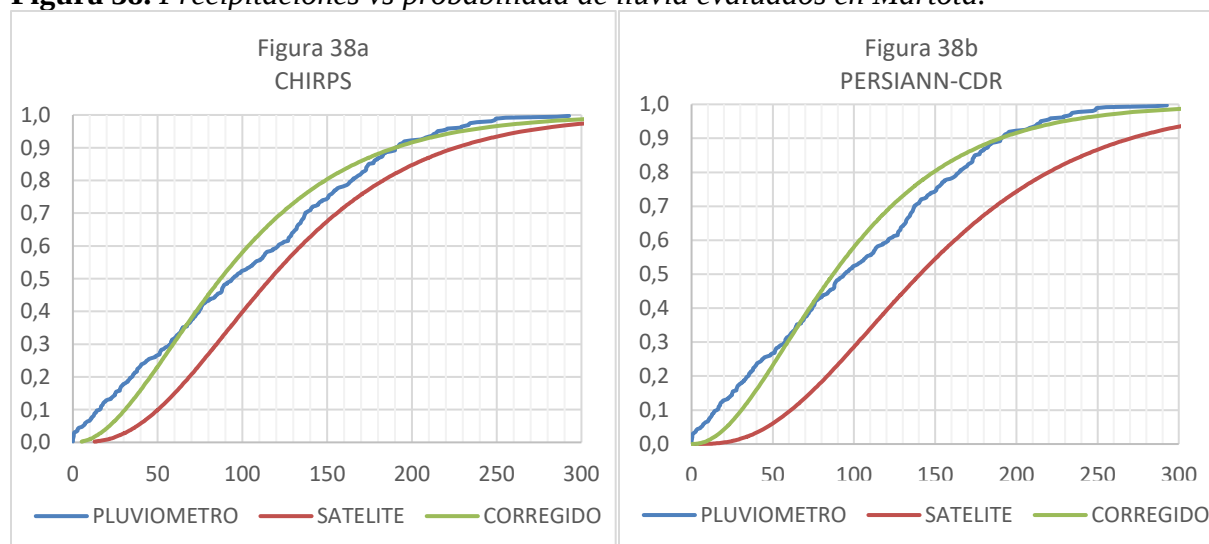
En la figura 37 se presentan los resultados para la estación Guayata, se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 37.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Guayata.



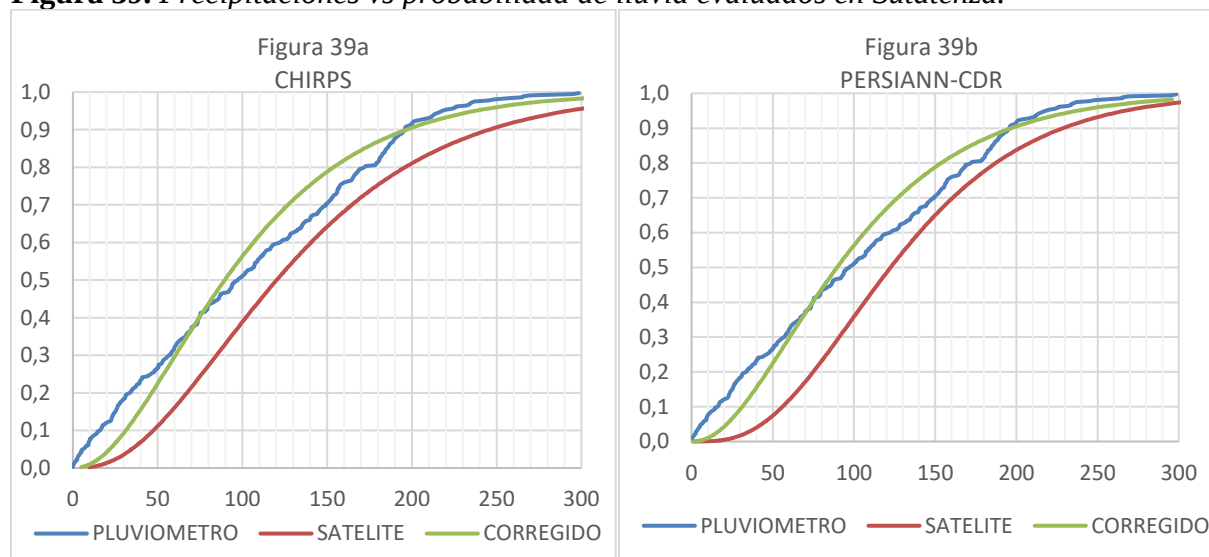
En la figura 38 se presentan los resultados para la estación Martota, se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 38.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Martota.



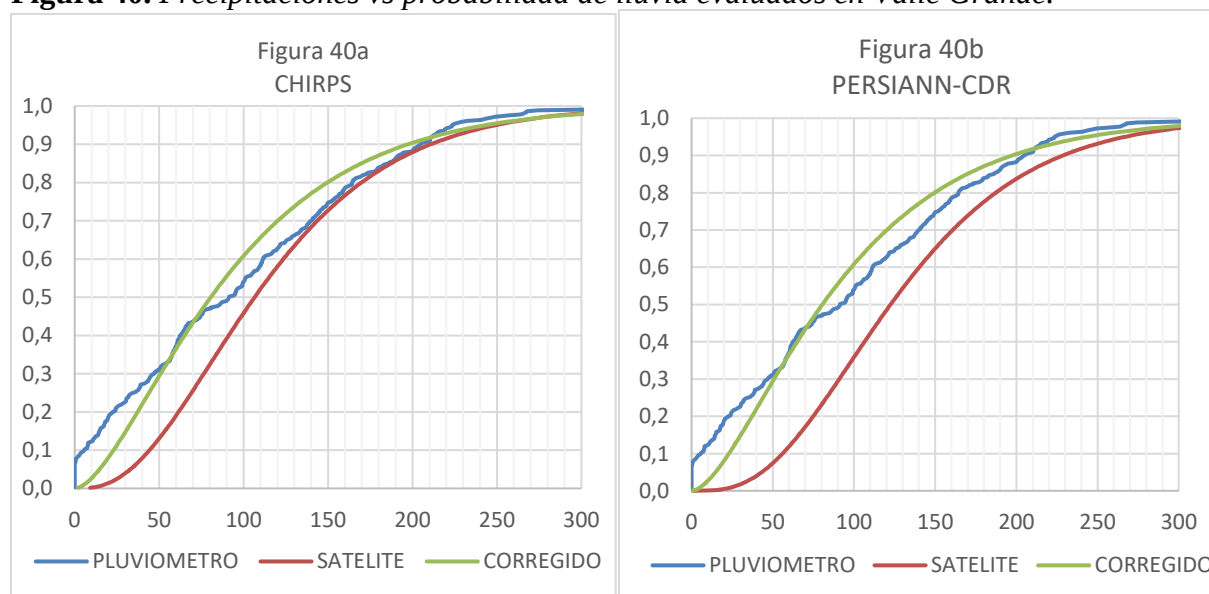
En la figura 39 se presentan los resultados para la estación Sutatenza, se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 39.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Sutatenza.



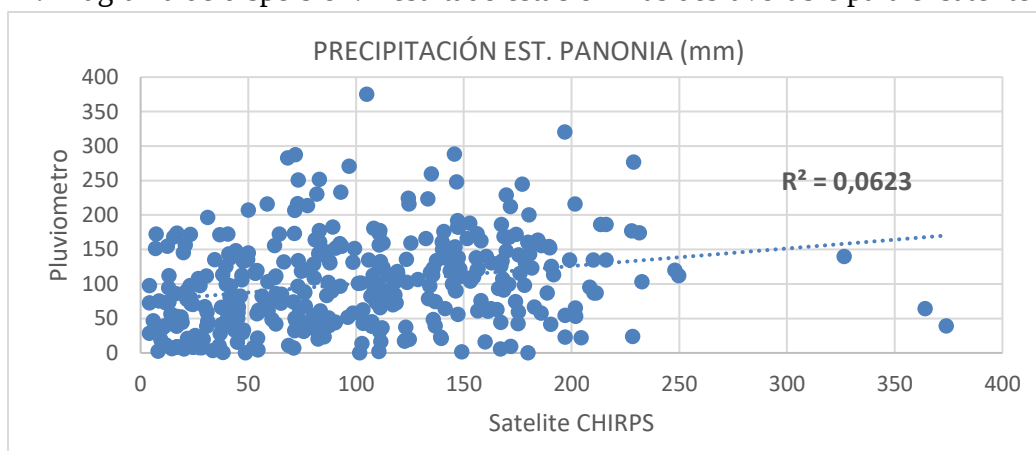
En la figura 40 se presentan los resultados para la estación Valle Grande, se evidencia que, hay una mucha similitud entre los datos del pluviómetro con el corregido mientras que la tendencia del satélite es distinta.

**Figura 40.** Precipitaciones vs probabilidad de lluvia evaluados en Valle Grande.



A continuación, se relacionan los datos de precipitación satelital corregida y los datos de lluvia tomados por pluviómetro para la estación con el mejor resultado y para la estación con el resultado más desfavorable. En la figura 41 se puede evidenciar que la estación PANONIA presenta un coeficiente de correlación de 0.0623, lo que quiere decir que para la zona geográfica donde está ubicada la estación PANONIA, el satélite CHIRPS no es eficiente.

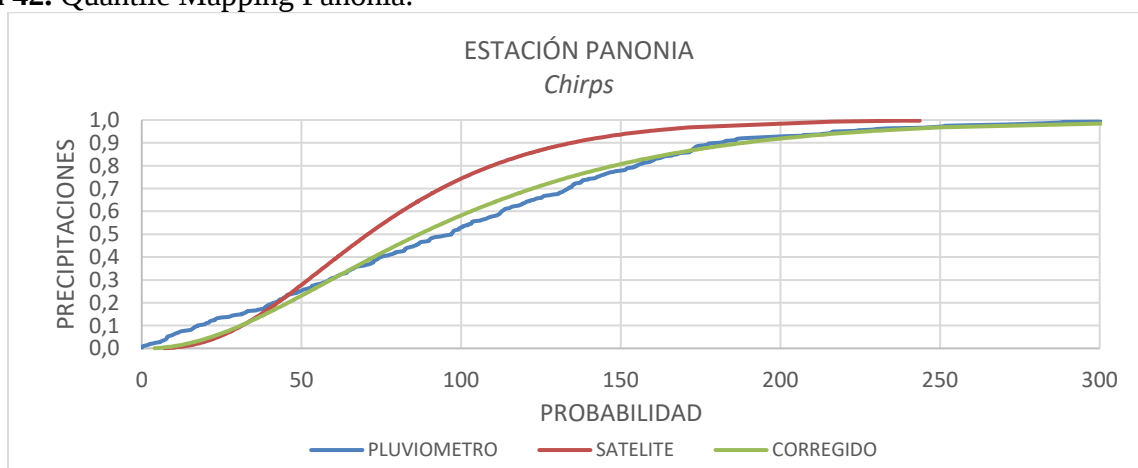
**Figura 41.** Diagrama de dispersión: Resultado estación más desfavorable para el satélite CHIRPS



**Fuente:** Elaboración Propia.

Sin embargo, como se muestra en la figura 42, al momento de aplicar el método de quantile mapping sobre los datos de precipitación, se presenta un ajuste de datos significativo, el dato corregido se ajusta a la línea de tendencia de los datos obtenidos por el pluviómetro Panonia.

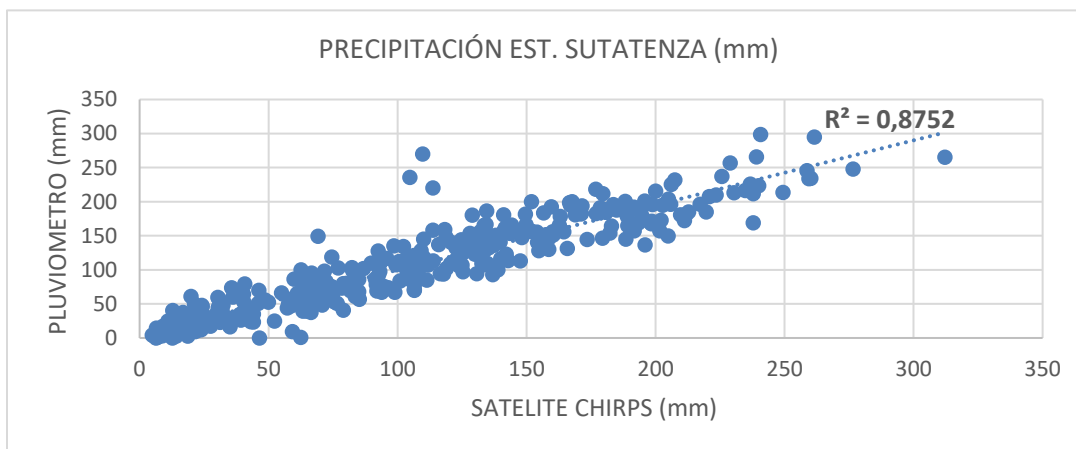
**Figura 42.** Quantile Mapping Panonia.



**Fuente:** Elaboración Propia.

En la figura 43 se puede observar que la estación SUTATENZA presenta un coeficiente de correlación de 0.8752, lo que quiere decir que para la zona geográfica donde está ubicada la estación SUTATENZA, el satélite CHIRPS es eficiente.

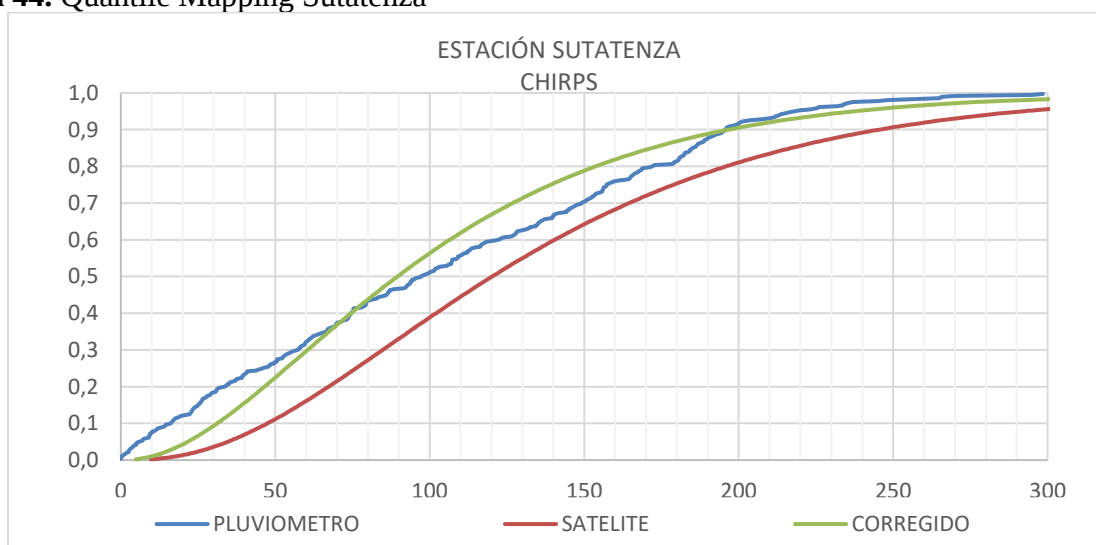
**Figura 43.** Diagrama de dispersión: Resultado estación más favorable para el satélite CHIRPS



**Fuente:** Elaboración Propia.

En la figura 44 se evidencia la aplicación del método de quantile mapping sobre los datos de precipitación, la gráfica presenta un ajuste de datos significativo, el dato corregido se ajusta a la línea de tendencia de los datos obtenidos por el pluviómetro Sutatenza.

**Figura 44.** Quantile Mapping Sutatenza



**Fuente:** Elaboración Propia.

## 5. Discusión

De manera general, en el desarrollo de la investigación se pudo observar que la utilización de satélites para la estimación de lluvia es de gran ayuda sobre todo para las zonas donde los pluviómetros son escasos, los productos de lluvia satelital resultan ser una alternativa para optimizar tiempo al momento de realizar la recolección de datos de lluvia, sin embargo, es necesario escoger un SRE que tenga una resolución espacial optima, es de gran importancia que contenga una mayor cantidad de pixeles para garantizar mayor exactitud en los resultados.

Al momento de realizar la corrección del sesgo mediante el método de Quantile Mapping no paramétrico se encontró que, para algunas estaciones pluviométricas la variabilidad de los datos aumentó, esto se puede deber a que, en principio, se tomaron los datos de lluvia terrestre de instrumentos como pluviómetros y pluviógrafos dispuestos en la base de datos del IDEAM, se tomaron datos diarios y se evidenció la mala calidad de algunas estaciones al presentarse meses sin registro de lluvia, lo que supone que el instrumento de medición no estaba en funcionamiento. Los autores Lekula Moitela, et. al, en su investigación “Validation of satellite-based reinfall in Kalahari” demuestran que la corrección de sesgo TVSF aplicado en su estudio aumentó la variabilidad espacial en los cuatro SER utilizados debido a que se encontró un número limitado de pluviómetros en la zona, lo que provocó que se utilizaran datos de pluviómetros promediados con grandes distancias de separación para calcular el factor de sesgo diario.

## 6. Conclusiones

Se recopiló la información de precipitación pluviométrica obtenida desde la base de datos del IDEAM, se tomaron las estaciones pluviométricas y climáticas más cercanas a la cuenca del Río Garagoa que alimentaron la base de datos para 30 años de estudio.

El 86,7% de los datos obtenidos de las estaciones pluviométricas no contaban con datos de precipitación completos, para garantizar un correcto manejo de datos se realizó un relleno mediante diferentes métodos estadísticos.

Mediante la plataforma de Google Earth Engine se descargaron los datos de lluvia que almacenaban los satélites CHIRPS y PERSIANN-CDR, para lograrlo, se realizó un código de programación que filtró datos en un rango de 30 años y que enmarcó el área que comprende el río Garagoa.

Se realizó el procesamiento de datos de lluvia satelital, donde se encontró que el satélite PERSIANN-CDR no tiene la resolución suficiente para el área de intervención, al tener una resolución de 0,25x0,25 sólo se alcanzan a diferencias 4 pixeles, lo que nos limita la precisión en los datos obtenidos.

El satélite CHIRPS arrojó datos más precisos, esto se debe a que la resolución del satélite es de 0,05x0,05 lo que se refleja en que cada coordenada de estación pluviométrica contó con grupos de datos satelitales diferentes.

El satélite CHIRPS arroja mayor compatibilidad de datos en los diagramas de dispersión, con un 70,84% de diagramas favorables. La estación Sutatenza tiene mayor compatibilidad de datos con el satélite CHIRPS, con un porcentaje de correlación lineal del 87,67%

El satélite PERSIANN-CDR no arroja diagramas de dispersión favorables, el mejor resultado lo da con la estación Umbita con un porcentaje de correlación lineal del 55,34%

Según las estadísticas categóricas realizadas, los satélites CHIRPS y PERSIANN-CDR tienen una tendencia a sobrestimar los datos de precipitación.

Después de realizar la corrección de datos mediante el método de Quantile Mapping no paramétrico, se obtuvieron resultados favorables para los satélites CHIRPS y PERSIANN-CDR,

lo que muestra que este ajuste funciona para sitios geográficos similares a los de la cuenca del Río Garagoa. Sin embargo, al momento de realizar las estadísticas descriptivas después de la corrección del sesgo, se evidencia que no se presenta una corrección significativa en la corrección del sesgo, esto se puede observar de una manera ilustrativa en las gráficas de dispersión presentadas en los resultados.

Cabe resaltar, que en el presente estudio se tomaron datos de precipitación diaria y posteriormente se agruparon por meses, toda vez que la aplicación del quantile mapping se hace sobre datos mensuales. Esa adaptación de datos puede incurrir en un error al momento de obtener los resultados finales.

### Referencias

- [1] Hisam, E., Danandeh, A., Alganci, U., Zafer, D. (2023) Comprehensive evaluation of Satellite –Based and reanalysis precipitation products over the Mediterranean region in Turkey. *Advances in Space Research*, Volumen 71, 3005–3021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.007>
- [2] Google News Initiative, s.f. Google Earth. <https://newsinitiative.withgoogle.com/es-es/resources/trainings/google-earth-pinpoint-eyewitness-locations/>
- [3] Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (2018, 15 de junio). Documento General POMCARG (Código 3507 – SZH). CONSORCIO RÍO GARAGOA. <https://www.car.gov.co/vercontenido/2511>
- [4] López, C., Montoya, R., Caro, F., Díaz, J. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth*, Volumen 127, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>
- [5] Defensoría del Pueblo Colombia. (2015). Tras visita a municipios afectados por ola invernal en Boyacá, Defensoría advirtió riesgo de avalancha en dos poblaciones, Defensoría del Pueblo, Tunja. <https://www.defensoria.gov.co/-/tras-visita-a-municipios-afectados-por-ola-invernal-en-boyac%C3%A1-defensor%C3%ADa-advirti%C3%B3-riesgo-de-avalancha-en-dos-poblaciones-1>
- [6] Ebert, E. E., Janowiak, J. E., & Kidd, C. (2007). Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(1), 47-64. doi:10.1175/BAMS-88-1-47

- [7] Rodríguez-González, B., Pineda-Martínez, L.F., Guerra-Cobián, V.H., (2018). Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en el Estado de Zacatecas, México, por medio de información satelital y pluviométrica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 19 (04), 1-12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.031>
- [8] Díaz Prieto, L. (2022). Identificación de zonas susceptibles a inundación en el casco urbano del municipio de Sopó, Cundinamarca. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/4918>
- [9] Brito, C. S., da Silva, R. M., Santos, C. A. G., Neto, R. M. B., & Coelho, V. H. R. (2021). Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. *Atmospheric Research*, 250, 105380. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105380>
- [10] Lee, G., Nguyen, D. H., & Le, X. -. (2023). A novel framework for correcting satellite-based precipitation products for watersheds with discontinuous observed data, case study in mekong river basin. *Remote Sensing*, Volumen 15, 630 doi: <https://doi.org/10.3390/rs15030630>
- [11] Mab, P., Ly, S., Chompuchan, C., Kositsakulchai, E. (2019) Evaluation of Satellite Precipitation from Google Earth Engine in Tonle Sap Basin, Cambodia. Presentado en la Conferencia Internacional THA 2019 “Water Management and Climate Change towards Asia’s Water”, Bangkok, Thailand, January 2019, 231-239.
- [12] Mianaadi, A. (2023). Evaluation of long-term satellite-based precipitation products for developing intensity-frequency (IF) curves of daily precipitation. *Atmospheric Research*, 286 doi:10.1016/j.atmosres.2023.106667

- [13] Keikhosravi-Kiany, M. S., Masoodian, S. A., & Balling Jr, R. C. (2023). Reliability of satellitebased precipitation products in capturing extreme precipitation indices over iran. *Advances in Space Research*, 71(3), 1451-1472. doi:10.1016/j.asr.2022.10.003
- [14] Lekula, M., Lubczynski, M., Shemang, E., Verhoef, W., (2018) Validation of satellite-based rainfall in Kalahari. *Physics and Chemistry of the Earth*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2018.02.010>.
- [15] Rivera, J., Marianetti, G., Hinrichs, S. (2018) Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research*, Volumen 213, 437–449, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.023>
- [16] Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M. et al. Los peligros climáticos de la precipitación infrarroja con estaciones: un nuevo récord ambiental para monitorear los extremos. *Sci Data* 2, 150066 (2015). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- [17] Sadeghi, M., Nguyen, P., Naeini, M.R. et al. PERSIANN-CCS-CDR, un registro de datos climáticos de precipitación global de 3.0 ° de 04 horas para estudios de precipitaciones intensas. *Sci Data* 8, 157 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00940-9>
- [18] Vilchis Francés, A. Y., Díaz Delgado, C., M. Bâ, K., & Quentin, E. (2009). Optimización de la red de estaciones pluviométricas del Estado de México. *Revista interdisciplinaria de ciencia y tecnología del agua*, Volumen 24 (1). Recuperado a partir de <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/84>
- [19] Weijia, Q., Howard, C., (2021). Proyección de los impactos en la salud de la temperatura futura: una comparación de los métodos de corrección de sesgo de mapeo cuantil. *Environmental Research and Public Health*, Volumen 18(4). doi:10.3390/IJERPH18041992

- [20] Gidahatari, gestión sostenible del agua, sf. Curso Virtual de Python en Hidrologia. Tomado de: <https://gidahatari.com/cu-es/curso-virtual-de-python-en-hidrologia-bpzh>
- [21] ARSET: uso de Google Earth Engine para aplicaciones de monitoreo terrestre (2021). Access: 16 DIC, 2023. Disponible: <https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-using-google-earth-engine-land-monitoring-applications>
- [22] Hamill, T., Engle, E., Myrick, D., Peroutka, M., Finan, C., Scheuerer, M. (2017) The U.S. National Blend of Models for Statistical Postprocessing of Probability of Precipitation and Deterministic Precipitation Amount. MONTHLY WEATHER REVIEW, Volumen 145, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-16-0331.s1>.
- [23] Giarno, Promono M., Suprayogi, S., Herumurti, S. (2018) Modified mean field bias and local bias for improvement bias corrected satellite rainfall estimates. MAUSAM, Volumen 69, doi: 543-552.
- [24] Grillakis, M., Koutroulis, A., Tsanis, I. (2013) Multisegment statistical bias correction of daily GCM precipitation output. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: ATMOSPHERES, Volumen 118, 3150–3162, doi:10.1002/jgrd.50323.
- [25] Grillakis, M., Polykretis, C., Manoudakis, S., Seiradakis, K., Alexakis, D., (2020) A Quantile Mapping Method to Fillin Discontinued Daily Precipitation Time Series. Water, Volumen 12, 2304.
- [26] Gudmundsson, L., Bremnes, J., Haugen, J., Engen-Skaugen, T., (2012) Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. Hydrol.EarthSyst.Sci., Volumen 16, 3383–3390, doi: 10.5194/hess-16-3383-2012.

- [27] Gudmundsson, L., Bremnes, J., Haugen, J., EngenSkaugen, T. (2012) Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping—acomparison of methods. *Hydrol.EarthSyst.Sci.Discuss.*, Volumen 9, 6185–6201, doi: 10.5194/hessd-9-6185-2012
- [28] Hamill, T., Engle, E., Myrick, D., Peroutka, M., Finan, C., Scheuerer, M. (2017) The U.S. National Blend of Models for Statistical Postprocessing of Probability of Precipitation and Deterministic Precipitation Amount. *MONTHLY WEATHER REVIEW*. Volume 145, 3441-3463, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-16-0331.s1>.
- [29] Perilla, G., Mas, J. (2020) Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones Geográficas*. Volumen 101, doi: [dx.doi.org/10.14350/rig.59929](http://dx.doi.org/10.14350/rig.59929).
- [30] Giarno, Promono, M., Suprayogi, S., Herumurti, S. (2018) Sesgo de campo medio modificado y sesgo local para sesgo de mejora estimaciones satelitales de lluvia corregidas. *Mausam*. Volumen 69, 543-552, doi: 551.501.8 : 551.553.21.
- [31] Barbosa, A. (2021) Verificación de productos satelitales con base a estaciones meteorológicas y modelación lluvia esorrentía [Tesis de grado, Pregrado en Ingeniería Ambiental]. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/afae9ab0-a4d6-400e-bae4-634f2877a5ea>
- [32] Méndez, R. (2016) Productos de precipitación satelital de alta resolución espacial y temporal en zonas de topografía compleja. [Tesis de grado, Magíster en ciencias de la Ingeniería] Pontificia Universidad Católica De Chile Escuela De Ingeniería. <https://repositorio.uc.cl/dspace/handle/11534/21480>

- [33] Grillakis, M., Koutroulis, A., Daliakopoulos, I., Tsanis, I. (2017) Un método para preservar las tendencias en el sesgo del mapeo de cuantiles corrección de la temperatura modelada del clima. Sistema Tierra Dinámica, Volumen 8, 889–900, doi: <https://doi.org/10.5194/esd-8-889-2017>
- [34] Cuello, F. (2020) Aplicación de programa para modelación de lluvia-escorrentía en la cuenca del rio cabrera, departamento del Huila. [Especialización en recursos Hídricos, Facultad Ingeniera] Universidad Católica De Colombia  
<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/ecb8b0a3-b785-40e7-9d30-d9b809556000>
- [35] Blanco, M., Demaria, E., Cazenave, G., Zimmermann, E. Validación y corrección de estimaciones de precipitación satelital utilizando observaciones en superficie en la región pampeana argentina. Tecnología y ciencias del agua. Volumen 14 (2), 110-168, doi: 10.24850/j-tyca-14-02-04.