



**Evaluación de la efectividad de las imágenes del sensor GPM para la
representación de la precipitación en el departamento del Meta**

Néstor Alejandro Novoa Herrán

**Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil,
Maestría en Geomática Ambiental,
Bogotá D.C., Colombia**

2020

**Evaluación de la efectividad de las imágenes del sensor GPM para la representación
de la precipitación en el departamento del Meta**

Néstor Alejandro Novoa Herrán

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

Magister en Geomática Ambiental

Directores:

Dra. (c). Liliana Vanesa Celis

Dr. Andrés Felipe Carvajal

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil,

Maestría en Geomática Ambiental,

Bogotá D.C., Colombia

2020

Resumen

La variabilidad de la precipitación en el departamento del Meta resulta ser compleja, no solo por las diferentes subregiones que la componen y las condiciones climáticas ambientales que la afectan, sino también porque su estudio está determinado por la disponibilidad de información pluviométrica tradicional, que para este caso es escasa teniendo en cuenta el área y estar distribuida de una forma que no permite representar la realidad del comportamiento de la variable. La presente investigación pretende evaluar la efectividad de las imágenes satelitales del sensor GPM para representar la precipitación en el departamento del Meta para el periodo 2014-2018, teniendo en cuenta los datos observados (estaciones meteorológicas) y los estimados (datos del producto IMERG V06), y así poder validar la idoneidad del sensor remoto para estimar la precipitación, teniendo en cuenta medidas de rendimiento tales como el coeficiente de correlación, el coeficiente de determinación y la covarianza. La evaluación demostró que las imágenes representan bien el comportamiento de precipitación en rangos bajos e intermedios de precipitación, pero no logra representar adecuadamente eventos fuertes de precipitación. Para los meses secos las correlaciones fueron superiores que para los meses más lluviosos, mientras que las correlaciones de la altillanura y el piedemonte fueron mejores que las de la llanura amazónica, mostrando siempre como las imágenes satelitales subestimaban la precipitación real. En general, la correlación para las estaciones fue de 0,82, la cual se considera una buena correlación.

Palabras clave:

Precipitación, GPM, validación, Meta, imágenes satelitales.

Abstract

The variability of precipitation in the Meta department is complex, not only due to the different subregions that compose it and the environmental climatic conditions that influence it, but also because its study is determined by the availability of traditional rainfall information, which for this case is scarce considering the area and distribution in a way that does not represent the reality of the behavior of the variable. The present investigation tries to evaluate the effectiveness of the satellite images of the GPM sensor to represent the precipitation in the department of Meta for the period 2014-2018, taking into account the observed data (meteorological stations) and the estimated ones (data from the IMERG V06 product) , and thus be able to validate the suitability of the remote sensor to estimate precipitation, taking into account performance measures such as the correlation coefficient, the determination coefficient and the covariance. The validation showed that the images correctly represent the precipitation behavior, but it cannot adequately represent extreme precipitation events. For the dry months the correlations were higher than for the rainier months, while the correlations of the plateau/high plain and foothills/piedmont were better than those of the Amazon plain, always showing how satellite images underestimated actual precipitation. In general, the correlation for the stations was 0,82, which is considered a good correlation.

Keywords:

Precipitation, GPM, validation, Goal, satellite images.

Contenido

Contenido

Lista de Figuras

Lista de Tablas

1.	Introducción	14
2.	Preguntas de Investigación.....	18
3.	Marco Teórico	19
3.1	Precipitación y herramientas para su estimación	19
3.2	Estaciones Meteorológicas.....	20
3.3	GPM (Global Precipitation Measuring)	23
3.4	Imágenes GPM y su predecesor TRMM.....	26
3.5	Estado del conocimiento	28
4.	Objetivos	31
4.1	Objetivo General	31
4.2	Objetivos Específicos.....	31
5.	Materiales y Métodos.....	32
5.1	Área de estudio.....	32
5.2	Métodos.....	34
5.2.1	Descripción de los datos de precipitación in-situ.....	36
5.2.2	Pre procesamiento de datos.....	39
5.2.3	Descripción de imágenes satelitales de precipitación GPM IMERG ...	43
5.2.4	Análisis de la Información	44
5.2.5	Precipitación mensual para el periodo de estudio	46
6.	Resultados y Discusión	48
6.1	Patrones de precipitación en el Meta a partir de las mediciones con estaciones meteorológicas	48
6.1.1	Comportamiento de la Precipitación en la Altillanura.....	49
6.1.2	Comportamiento de la Precipitación en el Piedemonte	52
6.1.3	Comportamiento de la Precipitación en la Llanura Amazónica.....	56
6.2	Patrones de Precipitación en el Meta a partir de las mediciones con las imágenes GPM	59
6.2.1	Comportamiento de la precipitación en la Altillanura	59
6.2.2	Comportamiento de la precipitación en el Piedemonte	61
6.2.3	Comportamiento de la precipitación en la Llanura Amazónica.....	64
6.3	Evaluación del desempeño de las imágenes del sensor GPM frente a las mediciones de las estaciones meteorológicas en el Meta.....	66
6.3.1	Análisis a nivel temporal.....	67
6.3.2	Análisis a Nivel regional.....	73

7. Conclusiones83

8. Recomendaciones87

9. Referencias.....89

Lista de Tablas

Figura 1: Red hidrometeorológica nacional operada por el IDEAM.....	22
Figura 2: Constelación de satélites GPM.....	24
Figura 3: Instrumentos (a) y el concepto de observación (b) de la precipitación realizada por el GPM Core Observatory.....	25
Figura 4: Mapa de subregiones del Meta. Tomado y modificado del SIAC.....	33
Figura 5: Diagrama metodológico general.....	36
Figura 6: Mapa de estaciones del IDEAM.....	38
Figura 7: Plataforma GIOVANNI, donde se pueden descargar productos satelitales de la NASA.....	43
Figura 8: Mapa de distribución de las estaciones meteorológicas en el Meta.	48
Figura 9: Mapa de estaciones de la altillanura.....	49
Figura 10: Precipitación mensual multianual de la altillanura, según datos de las estaciones meteorológicas.....	51
Figura 11: Precipitación mensual multianual de la altillanura, según datos de las estaciones meteorológicas.....	51
Figura 12: Precipitación mensual multianual de la altillanura, según datos de las estaciones meteorológicas.....	52
Figura 13: Mapa de estaciones del piedemonte.	53
Figura 14: Precipitación mensual multianual del piedemonte, según datos de las estaciones meteorológicas.....	55
Figura 15: Precipitación mensual multianual del piedemonte, según datos de las estaciones meteorológicas.....	55

Figura 16: Mapa de estaciones de la serranía.....	56
Figura 17: Precipitación mensual multianual para la llanura amazónica, según datos de las estaciones meteorológicas.	58
Figura 18: Precipitación mensual multianual para la altillanura, según datos de las imágenes satelitales.....	60
Figura 19: Precipitación mensual multianual para la altillanura, según datos de las imágenes satelitales.....	60
Figura 20: Precipitación mensual multianual para la altillanura, según datos de las imágenes satelitales.....	61
Figura 21: Precipitación mensual multianual para el piedemonte, según datos de las imágenes satelitales.....	63
Figura 22: Precipitación mensual multianual para el piedemonte, según datos de las imágenes satelitales.....	64
Figura 23: Precipitación mensual multianual para la llanura amazónica, según datos de las imágenes satelitales.	66
Figura 24: Coeficientes por años.	68
Figura 25: Coeficiente por meses.....	69
Figura 26: Coeficiente por temporada.....	71
Figura 27: Coeficiente por subregión.....	74
Figura 28: Coeficiente por estaciones.	75
Figura 29: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2014.....	78

Figura 30: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2015.....	79
Figura 31: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2016.....	80
Figura 32: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2017.....	81
Figura 33: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2018.....	82
Figura 34: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2014.....	116
Figura 35: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2014.....	116
Figura 36: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2014.....	117
Figura 37: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2014.	117
Figura 38: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2014.	118
Figura 39: Grafica de precipitación para la llanura amazónica en el 2014.....	118
Figura 40: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2015.....	119
Figura 41: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2015.....	119
Figura 42: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2015.....	120
Figura 43: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2015.	120
Figura 44: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2015.	121
Figura 45: Grafica de precipitación para la llanura amazónica en el 2015.....	121
Figura 46: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2016.....	122
Figura 47: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2016.....	122
Figura 48: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2016.....	123

Figura 49: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2016.	123
Figura 50: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2016.	124
Figura 51: Grafica de precipitación para la llanura amazónica en el 2016.	124
Figura 52: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2017.	125
Figura 53: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2017.	125
Figura 54: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2017.	126
Figura 55: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2017.	126
Figura 56: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2017.	127
Figura 57: Grafica de precipitación para la llanura amazónica en el 2017.	127
Figura 58: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2018.	128
Figura 59: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2018.	128
Figura 60: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2018.	129
Figura 61: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2018.	129
Figura 62: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2018.	130
Figura 63: Grafica de precipitación para llanura amazónica en el 2018.	130
Figura 64: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2014.	131
Figura 65: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2014.	131
Figura 66: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2014.	132
Figura 67: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2014.	132
Figura 68: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2014.	133
Figura 69: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2014.	133
Figura 70: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2015.	134

Figura 71: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2015.....	134
Figura 72: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2015.....	135
Figura 73: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2015.	135
Figura 74: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2015.	136
Figura 75: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2015.	136
Figura 76: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2016.....	137
Figura 77: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2016.....	137
Figura 78: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2016.....	138
Figura 79: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2016.	138
Figura 80: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2016.	139
Figura 81: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2016.	139
Figura 82: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2017.....	140
Figura 83: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2017.....	140
Figura 84: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2017.....	141
Figura 85: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2017.	141
Figura 86: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2017.	142
Figura 87: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2017.	142
Figura 88: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2018.....	143
Figura 89: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2018.....	143
Figura 90: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2018.....	144

Figura 91: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2018.	144
Figura 92: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2018.	145
Figura 93: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2018.	145

Lista de Tablas

Tabla 1. Características comparativas de GPM y TRMM.	26
Tabla 2. Comparativa de productos IMERG y TMPA.	27
Tabla 3: Comparativa tipos d estaciones x subregiones.....	38
Tabla 4. Estaciones con datos de precipitación mensuales completas por cada año.	39
Tabla 5: Covarianza del coeficiente de regresión para cada año.	68
Tabla 6: Covarianza del coeficiente de regresión para cada mes.....	70
Tabla 7: Covarianza del coeficiente de regresión por temporadas.	71
Tabla 8: Resultados de la correlación temporal.	72
Tabla 9: Covarianza del coeficiente de regresión por subregiones.	74
Tabla 10: Covarianza del coeficiente de regresión por estaciones.	76
Tabla 11: Resultados para la correlación espacial.	76
Tabla 12: Días faltantes de información por estaciones para el año 2014.....	97
Tabla 13. Días faltantes de información por estaciones para el año 2015.....	99
Tabla 14. Días faltantes de información por estaciones para el año 2016.....	101
Tabla 15. Días faltantes de información por estaciones para el año 2017.....	104
Tabla 16. Días faltantes de información por estaciones para el año 2018.....	106
Tabla 17. Días faltantes de información por estaciones para el año 2019.....	109

1. Introducción

En la Orinoquia colombiana la precipitación presenta un régimen de distribución unimodal biestacional con dos épocas contrastantes, el último y el primer trimestre del año (sequía) y de abril a octubre (lluvias), siendo entre mayo y julio donde se presentan los valores máximos de humedad y se concentra entre el 50,7 - 88,5% del total de la precipitación anual, junio es el mes más húmedo y enero el más seco. Los tipos de clima según el modelo de Thornthwaite van desde ARA' (súper-húmedo) hasta DRA' (moderadamente seco), es decir climas súper-húmedos pluviales hasta climas con períodos de sequía ampliamente marcados. En el piedemonte con montos desde los 667 hasta los 4.664 mm anuales, la temporada de lluvias concentra el 80.3% del total de la precipitación anual, mayo es el mes más lluvioso (405.3 mm). En la altillanura con montos desde los 1.592 hasta los 3.100 mm anuales, la temporada de lluvias concentra el 81.6% del total de la precipitación anual. (Miorta Cely & Rangel Ch., 2014)

La precipitación se constituye en una variable que a la vez es una fase del ciclo hidrológico junto a la evaporación y la condensación, estas tres fases integran el vapor de agua que en conjunto se define como humedad atmosférica; por tanto, la precipitación es una salida de vapor de agua de la atmósfera (Andrades R. & Múnez L., 2012). La precipitación a su vez se puede clasificar según la forma en la que las nubes alcanzan la altura y se enfrían dando lugar a este proceso.

Comúnmente las investigaciones en las que la precipitación tiene una relevancia significativa basan sus análisis en datos obtenidos a partir de técnicas *in situ*, como el uso de pluviómetros, sin embargo, estas no cubren la totalidad del territorio, y representan un gran reto, ya que la calidad de la información y su continuidad no siempre está garantizada (Simbaqueba, 2018).

Las imágenes satelitales y sus correspondientes productos no presentan estos inconvenientes de disponibilidad, calidad y cobertura, los cuales si se ven presentados en los pluviómetros y pluviógrafos (Hunink, Immerzeel, & Droogers, 2013). Los productos satelitales ofrecen una representación espacial mayor, pero suelen requerir de una corrección por sesgo respecto a una red de monitoreo confiable, y obtener como resultados una evaluación favorable del producto. Además, se pueden utilizar estos productos satelitales en zonas no instrumentadas y, de esta forma, se evitarían problemas como disponibilidad de personal, mediciones puntuales, costo en la transferencia de datos y necesidad de interpolación de datos (Caicedo Carrascal, 2008).

Dado lo anterior, importa mucho conocer el comportamiento de la variable precipitación en el país, en especial en los territorios con menor densidad de estaciones meteorológicas, debido a que incide en el equilibrio del ecosistema y en la regulación del ciclo hidrológico, lo cual afecta no solo al medio ambiente, sino también a las actividades socioeconómicas. Al respecto Diniz, da Paz, & Allasia (2016) señalan que: identificar y medir los patrones de ocurrencia de las lluvias trae beneficios imprescindibles para la planificación y operación de diversos sectores de la sociedad, como la agricultura, la pesca,

la navegación, el abastecimiento de agua, el control y la protección contra las inundaciones, la conservación de los ecosistemas estratégicos, entre otras. Es fundamental conocer el comportamiento espacio-temporal de la variable precipitación no solo en la Orinoquia Colombiana, sino en general en el país, porque incide en el equilibrio de los ecosistemas y en la regulación del ciclo hidrológico, lo cual afecta no solo el medio ambiente, sino también las actividades socioeconómicas.

Esta investigación pretende evaluar la efectividad de las imágenes satelitales para la estimación de la precipitación, buscando que las imágenes satelitales puedan llegar a ser utilizada en la planificación del uso del recurso hídrico, en la gestión de riesgos naturales como inundaciones o movimientos en masa, y en el conocimiento y adaptación al cambio climático. Es de esperar que esta investigación pueda tener un impacto a corto plazo en la toma de decisiones para el ordenamiento territorial a diferentes escalas, y pueda ser usada de forma positiva por aquellos actores, que desde la política pública hagan buen uso de esta información.

Para el caso particular de esta investigación se examinará la precipitación líquida y los procesos orográficos y convectivos que inciden en ella, especialmente en el departamento del Meta, esto debido a los diferentes ecosistemas y las variaciones orográficas que presenta este departamento y, a partir del cual, se pueden replicar los resultados obtenidos para otros departamentos con características similares. Esta investigación plantea evaluar las estimaciones de precipitación del producto IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) de la misión GPM a una escala mensual con

series de datos procedentes de 50 estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para la zona del departamento del Meta, durante el periodo de marzo del 2014 a diciembre del 2019.

2. Preguntas de Investigación

Teniendo en cuenta que el departamento del Meta tiene diferencias fisiográficas y ecosistémicas a lo largo de una amplia área del territorio con pocas estaciones meteorológicas que no representan adecuadamente la totalidad del territorio; en esta investigación se formulan las siguientes preguntas.

¿Cuál es la efectividad de las imágenes satelitales del sensor GPM para la representación de los patrones de precipitación en el Meta, con respecto a las estaciones meteorológicas?

¿La efectividad de las imágenes tendrá alguna variación con respecto a las diferentes subregiones presentes?

3. Marco Teórico

3.1 Precipitación y herramientas para su estimación

La variabilidad espacial del clima en Colombia está afectada por los siguientes factores: Oscilación del frente intertropical de convergencia, entrada de humedad desde la Amazonía hacia el interior del país, influencia de la humedad proveniente de los océanos Atlántico y Pacífico y de las cordilleras oriental, central y occidental que se presentan como barreras a la entrada de humedad y que la distribuyen en los valles interandinos. Todos estos factores a su vez se conjugan con la fisiografía propia de cada región lo cual aumenta más la variabilidad (Andrades R. & Múnez L., 2012).

Se ha observado que en la zona tropical los complejos convectivos de mesoescala son los responsables de la precipitación en un 90% (Houze, 1993), estos son grandes sistemas de nubes y precipitación con circulación asociada que incluye un grupo de cumulonimbos durante la mayor parte de la vida del sistema (PIZARRO DÍAZ & GUTIÉRREZ A. , 2006)

Las masas de aire que transportan los complejos convectivos de mesoescala sufren variaciones en su dinámica por la presencia de la altura y orientación de la orografía, la cobertura vegetal y a la interacción suelo-atmósfera. Esto ocasiona variabilidad en la forma como se distribuye espacial y temporalmente la precipitación y en forma más general sobre los procesos del ciclo hidrológico (Andrades R. & Múnez L., 2012).

Se entiende por precipitación como cualquier tipo de agua meteórica recogida sobre la superficie de la Tierra. Esto incluye la lluvia, la nieve y el granizo. Según expertos en estudios meteorológicos e hidrológicos la precipitación juega un papel fundamental en el comportamiento de distintos factores ambientales, para ello es indispensable predecir su variación. Las condiciones que propician la caída de la precipitación son el ascenso de aire y su enfriamiento, la condensación de vapor de agua y la formación de nubes, la fuerte concentración de humedad y el crecimiento de gotitas de agua de las nubes (Andrades R. & Múnez L., 2012).

El principal objetivo en la medición de la precipitación es obtener datos confiables de observación en el área de estudio. Los pluviógrafos y pluviómetros son instrumentos meteorológicos utilizados con este fin, convirtiéndose así en una plataforma de recolección de datos. Sin embargo, los pluviógrafos y pluviómetros cuentan con dos aspectos que afectan a su precisión: errores en la medida puntual y error en la estimación espacial de la precipitación sobre la superficie. La estimación espacial de la precipitación depende básicamente de la densidad de la red meteorológica, por consiguiente las redes deben ser planeadas de tal forma que se consiga un cuadro representativo de la distribución espacial (Linsley M & J., 1994).

3.2 Estaciones Meteorológicas

La medición de la lluvia en tierra se realiza mediante una estación meteorológica dotada de instrumentos apropiados como los pluviómetros (PM) o pluviógrafos (PG). La lluvia se mide utilizando dos tipos de medidores: medidores sin registro (PM) y medidores

con registro (PG). Un medidor que registra automáticamente la profundidad de lluvia en Δt tan pequeños como un minuto de duración. Los medidores sin registro se miden manualmente en intervalos de tiempo mayores (Caicedo Carrascal, 2008).

Desde 1995 en Colombia la entidad encargada de operar y mantener estas estaciones es el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); esta red está compuesta por estaciones sinópticas, de radiosondas, estaciones climatológicas ordinarias, estaciones climatológicas principales, agrometeorológicas, hidrométricas, una red pluviométrica y pluviográfica, y la mareográfica (Caicedo Carrascal, 2008).

La medición de la lluvia por medio de los pluviómetros o pluviógrafos proporciona una adecuada descripción temporal más no una buena descripción espacial de este fenómeno, ya que por estos medios se hacen mediciones puntuales a través del tiempo en lugares fijos del espacio (Caicedo Carrascal, 2008).

Según estudios realizados, para zonas planas por cada 5 km^2 se requiere un pluviómetro. En zonas urbanas el requerimiento sería de una estación por cada 2 km^2 . La red colombiana no cumple con estos requerimientos por lo que la representación espacial de la lluvia se hace por diversos métodos de interpolación (Polígonos de Thiessen, inverso de la distancia, Kriging, entre otros). Estos campos de precipitación obtenidos por interpolación constituyen una fuente de incertidumbre durante la implementación de modelos lluvia escurrentía (Caicedo Carrascal, 2008). Para la zona de estudio se cuenta con poco más de 100 estaciones meteorológicas de las cuales una buena cantidad (más de 30 estaciones) se

encuentra suspendidas lo cual dificulta su uso para estudio de precipitación, sin mencionar que la densidad de estaciones es muy pobre (Figura 1).

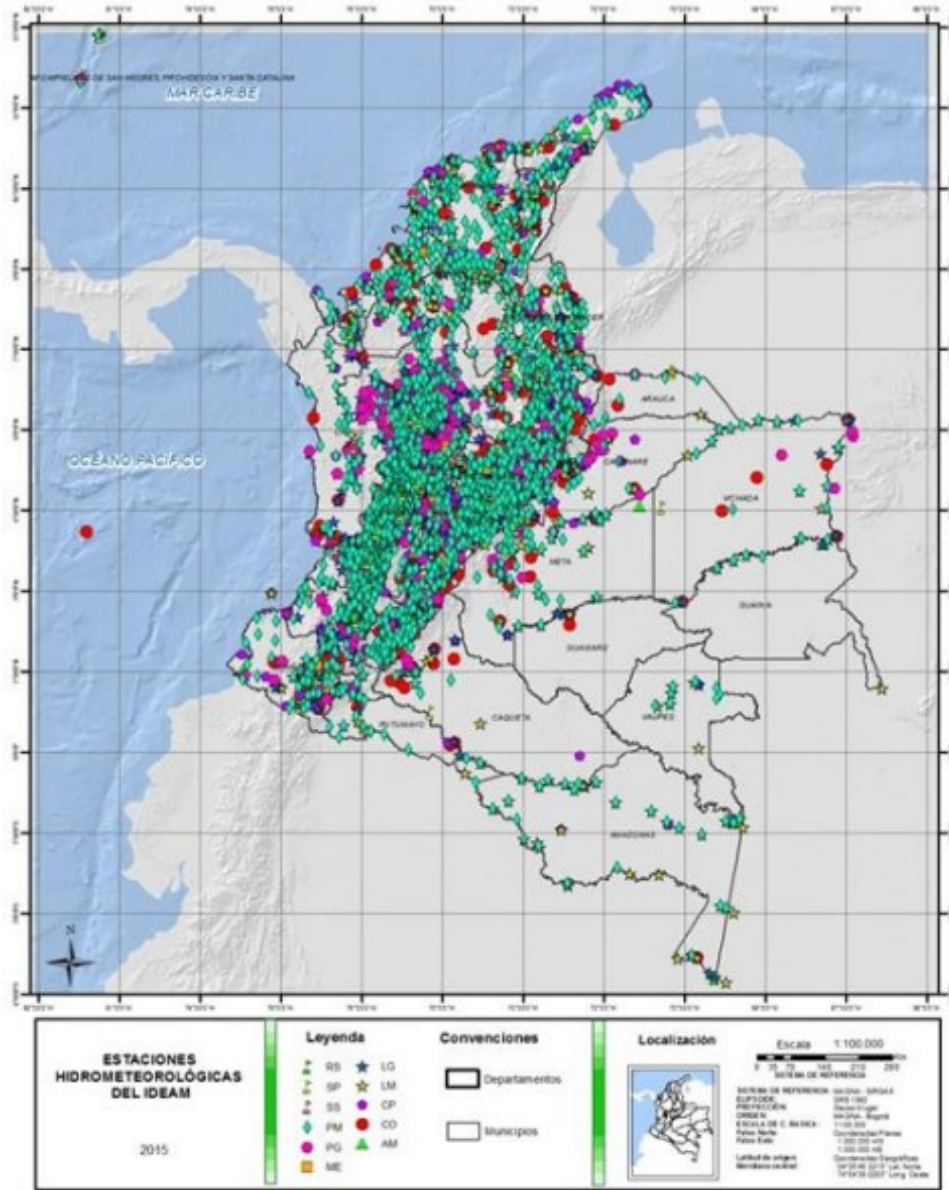


Figura 1: Red hidrometeorológica nacional operada por el IDEAM. Fuente IDEAM (2015).

3.3 GPM (Global Precipitation Measuring)

En estos últimos 30 años, un sin número de productos satelitales han sido lanzados para medir la precipitación, teniendo estas diversas resoluciones temporales y espaciales, uno de estos es TMPA (TRMM Multisatellite Precipitation Analysis) (Huffman et al., 2007) de la misión TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) lanzada a finales de 1997, la cual ha proporcionado una gran cantidad de información cuasi-global para diversas investigaciones y sus respectivas aplicaciones (Chen, Yang, Liang, & Tang, 2019). Los diferentes estudios y sus respectivas aplicaciones basados en los productos del TMPA han sido de gran importancia científica y social, por ejemplo, en la planificación y gestión de recursos hídricos, en la predicción de desastres y la predicción de fenómenos meteorológicos extremos. A pesar de los logros obtenidos en la era TRMM, los datos de precipitación tienen ciertas limitaciones como lo son la cobertura, la incertidumbre en la precipitación sólida y la estimación sobre latitudes y altitudes elevadas (Chen, Yang, Liang, & Tang, 2019).

Siguiendo el objetivo de TRMM llega el GPM (Global Precipitation Measurement) la cual es una misión internacional constituida por una red de satélites que proporciona la nueva generación de productos de medición de lluvia y nieve. La misión espacial GPM fue lanzada por La NASA (American National Aeronautics and Space) y la JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency) el 27 de febrero de 2014. Esta misión se localiza a una altitud de 407 km en una órbita no sincronizada con el sol y continúa la estrategia de muestreo TRMM. En la actualidad, esta misión cubre una latitud de 60°N al 60°S (NASA, 2019). Adicionalmente, posee instrumentos tecnológicamente muy avanzados los cuales marcarán un nuevo estándar en la medición de precipitación. El satélite GPM Core

Observatory está equipado con un sensor de lluvia activo llamado Dual-frequency Precipitation Radar (DPR), así como un sensor de lluvia pasivo con canales de alta frecuencia llamado GPM Microwave Imager (GMI) los cuales mejoran la estimación de nieve y lluvia ligera, los cuales son eventos meteorológicos que otros satélites son incapaces de medir (Sharifi, Steinacker, & Saghafian, 2016). La misión GPM cuenta con cerca de 10 satélites durante este periodo de estudio de diferentes asociaciones internacionales (Figura 2).

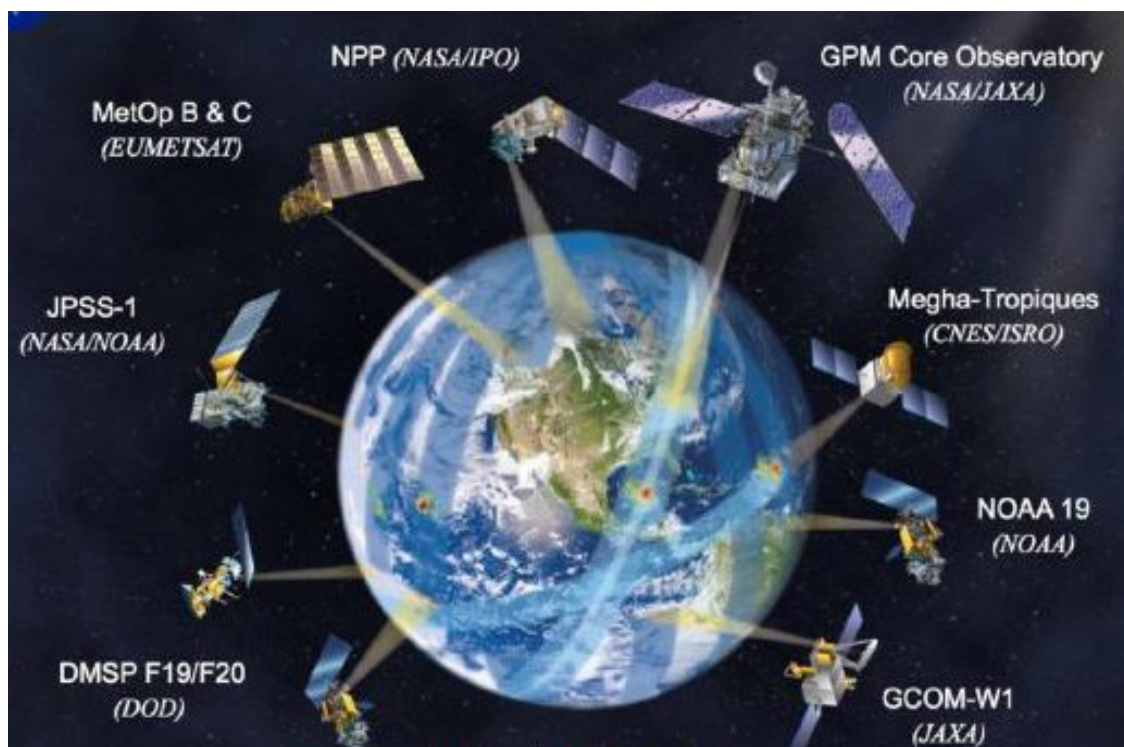


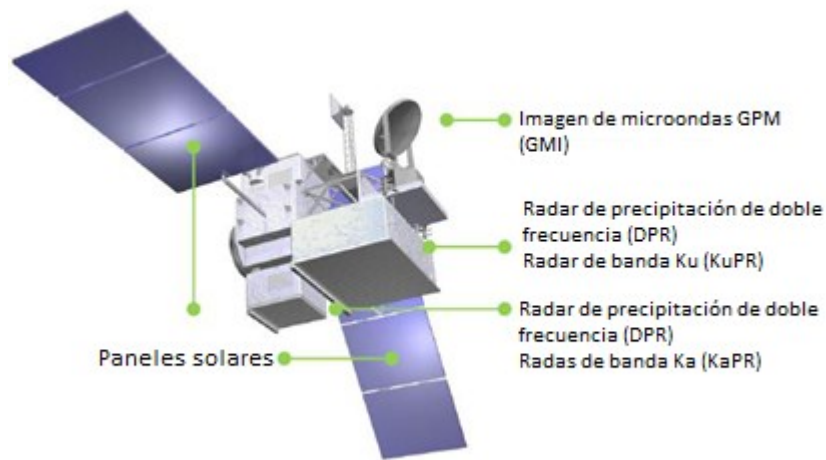
Figura 2: Constelación de satélites GPM.

Adaptado de:

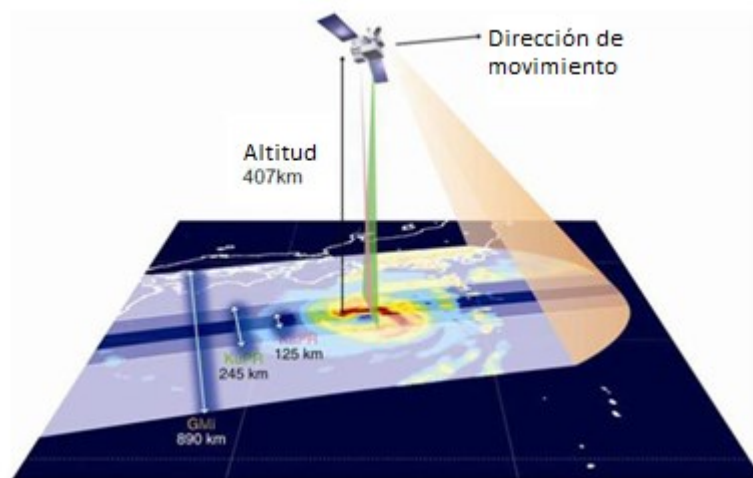
http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.pdf

El DPR opera con dos radares, uno en la banda Ka (35,5 GHz) y otro en la banda Ku (13,6 GHz), ambos llamados KaPR, los cuales cubren franjas de 125 y 245 Km respectivamente. Las mediciones obtenidas por ambos radares son simultáneas y superpuestas, lo cual proporciona información nueva sobre la intensidad de precipitación

ligera. Adicionalmente, el GMI es un radiómetro de microondas multicanal de escaneo cónico el cual cubre una franja de 885 Km y cuenta con trece canales de frecuencia que van desde 10 GHz a 183 GHz (Huffman, y otros, 2015). Estos diferentes instrumentos se encuentran ubicados en diferentes partes de GPM Core Observatory (Figura 3).



(a)



(b)

Figura 3: Instrumentos (a) y el concepto de observación (b) de la precipitación realizada por el GPM Core Observatory.

Adaptado de:

http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.pdf

La misión espacial GPM cuenta con productos de diferentes niveles basados en varios algoritmos, el presente estudio utiliza el algoritmo IMERG V06 que intercalibra, fusiona e interpola las estimaciones de los todos los sensores implicados, con una resolución espacial de 0.1°x0.1° y una resolución temporal de 30 minutos (Huffman, y otros, 2015). Desde enero del 2015 se encuentran publicados los productos finales del IMERG V06, los cuales abarcan datos inicio de marzo del 2014 hasta la fecha.

3.4 Imágenes del GPM y su predecesor TRMM

Las principales diferencias que se pueden encontrar entre la misión GPM y TRMM radican en la cobertura que manejan (GPM tiene una mayor cobertura) así como la sensibilidad de los sensores (GPM puede detectar precipitaciones ligeras) (Tabla 1).

Tabla 1. Características comparativas de GPM y TRMM.

	GPM	TRMM
Mediciones	Globales	Tropical y subtropical
Detección de precipitación	Lluvia, hielo y nieve	Lluvia; no detecta lluvia ligera (menor a 0.5 mm/hr)
Orbita	No polar	No polar
Tiempo de revisita	~95 minutos	~91.5 minutos
Numero de orbitas	16	16
Cobertura	65°S a 65°N de latitud	35°S a 35°N de latitud
Altitud	407 km	350 km (403* km)

* Después de elevar la órbita en agosto de 2001

Fuente: http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.pdf

Los instrumentos que componen el GPM son tecnológicamente más avanzados a los del TRMM, lo cual se evidencia aun más en las innovaciones realizadas en los sensores de medición. El TRMM estaba compuesto por un sensor de precipitación PR (Precipitation Radar) y dos sensores pasivos TMI (TRMM Microwave Imager) y VIRS (Visible and Infrared Scanner) (Huffman, y otros, 2015), mientras que el GPM se encuentra constituido por un sensor activo DPR (Dual-frequency Precipitation Radar) y un sensor pasivo GMI (GPM Microwave Imager) (NASA, 2019).

Las mediciones del GMI (misión GPM) comparadas con las mediciones del TMI (misión TRMM) muestran mejores resoluciones espaciales, así como mejoras en la detección de lluvia ligera. Ahora, comparando DPR con PR se tiene una sensibilidad superior para detectar la lluvia ligera y la nieve, una mejor precisión de mediciones y una mejor identificación de hielo, líquidos, y partículas de fase mixta (ARSET, 2019). Los productos IMERG del satélite GPM cuentan con resoluciones temporales y espaciales mejores a las de los productos TMPA del satélite TRMM (Tabla 2).

Tabla 2. Comparativa de productos IMERG y TMPA.

	IMERG	TMPA
Resolución Temporal	30 minutos (Agregaciones diarias y mensuales)	3 horas (Agregaciones diarias y mensuales)
Resolución Espacial	0.1°x0.1° (~10 x 10 km)	0.25°x0.25° (~27 x 27 km)
Cobertura Espacial	Global 60°S a 60°N (90°S a 90°N*)	Global 50°S a 50°N

*La cobertura para IMERG es 60°S a 60°N y se extenderá a 90°S a 90°N en futuras versiones

Fuente: http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.pdf

3.5 Estado del conocimiento

En Ecuador existe un estudio a escala mensual para la región de Azuay, en el que reportaron un valor alto de detección, mostrándose valores de correlación bajos para estaciones que reportaron bajas precipitaciones. Adicional a lo anterior, existen múltiples evaluaciones del producto TRMM realizadas por Ochoa et al. (2014) a escala diaria en diferentes cuencas de la región costanera del Ecuador, así como la frontera con Perú, en el cual se reveló que los productos satelitales lograron capturar la estacionalidad de la precipitación de manera cualitativa y cuantitativa.

Existen otros estudios relacionados con el producto TRMM 3B43, uno de estos realizado por Castro (2014) mostró que la precipitación mensual es capturada cualitativamente, los errores estadísticos e índices de detección están mejor representados cuantitativamente en la región costera y oriental que en la región andina.

Tang, Ma, Long, Zhong, & Hong, (2016) realizaron una evaluación del producto IMERG a escala horaria en la China, comparados con datos de precipitación obtenidos de observaciones en tierra. El producto IMERG muestra mejores resultados en las medidas de evaluación estadística cuando: la evaluación se realiza en áreas extensas y cuando la resolución temporal aumenta de 3 horas a diaria. Por otro parte, esta investigación concluyo que los productos IMERG necesitan mejoras en altitudes altas y climas secos. En resumen,

observaciones tienen buenas estimaciones, particularmente para rangos bajos de precipitación.

Sharifi *et al.* (2016) realizaron un estudio comparativo de diferentes estaciones pluviométricas con los productos obtenidos del IMERG, el TMPA-3B42 y el ERA-Interim, a lo largo de cuatro regiones de diferentes con diferentes condiciones climáticas y topográficas, en el territorio de Irán. Esta investigación concluyó que a escala diaria IMERG supera a los otros productos en cuanto a exactitud de los datos, obteniéndose una subestima ligeramente de la precipitación, obtuvieron un coeficiente de correlación muy bueno, y un sesgo con mejores resultados en las cuatro regiones en comparación a los otros dos productos satelitales.

Tang, Zeng, et al. (2016) realizó un estudio sobre la cuenca del río Ganjiang en el sureste de China. Las correlaciones obtenidas del producto IMERG fueron aceptables (0,63) y altos (0,87) a nivel de píxel y de cuenca respectivamente. En resumen, este estudio muestra que el producto IMERG supera a producto TMPA.

Prakash, Mitra, Pai, & AghaKouchak (2016) evaluaron los productos IMERG y TMPA-3B42 V7, basándose en la detección y estimación de las lluvias intensas a lo largo de toda la India, con una escala temporal de datos diarios. Esta evaluación mostró una mejora notable de IMERG frente al TMPA en las estribaciones del Himalaya y al noroeste de la India. Esta investigación concluyó que los productos de precipitación por satélite prometen un mejor modelado de fenómenos hidrológicos extremos.

En Colombia existen muy pocos estudios basados en productos del satélite GPM, por otra parte, existen diversas investigaciones las cuales evaluaron los productos del TRMM. Una investigación de la Universidad Antonio Nariño con un área de intersección en la presente investigación fue realizada por Simbaqueba (2018), quien buscó caracterizar el comportamiento de la precipitación para la región amazónica colombiana para el periodo 1998-2014, llegando a la conclusión que las estimaciones para la llanura amazónica son más confiables en los primeros meses del año, mientras que en el piedemonte amazónico las estimaciones más confiables se presentan a finales de año. Para el caso de la montaña amazónica el sensor presenta errores significativos que no permiten afirmar que el sensor sea efectivo para determinar el comportamiento de la precipitación.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Evaluar la efectividad de las imágenes satelitales del sensor GPM en la representación de los patrones de precipitación para un periodo comprendido entre los años 2014 y 2019, en el departamento del Meta.

4.2 Objetivos Especificos

- Identificar patrones de precipitación de la red meteorológica nacional para el departamento del Meta.
- Estimar la precipitación a partir de datos del GPM para el departamento del Meta
- Evaluar la efectividad espacio-temporal de los datos del GPM respecto a las estaciones meteorológicas a partir de metodologías de validación estadísticas.

5. Materiales y Métodos

5.1 Área de estudio

El departamento del Meta es uno de los 32 departamentos de Colombia. Su capital es Villavicencio, este departamento se encuentra ubicado en el centro del país, en la región de la Orinoquía, limitando al Norte con Bogotá D.C., Cundinamarca y Casanare, al Este con Vichada, al sur con Guaviare y Caquetá, y al Oeste con Huila. Con una superficie de 85 635 km², es el cuarto departamento más extenso y con 11,23 hab/km², es el décimo menos densamente poblado (Anónimo, 2019).

El territorio del departamento del Meta se extiende desde el piedemonte llanero hasta los Llanos Orientales. Posee una gran riqueza hídrica debido a los numerosos afluentes del río Orinoco que cruzan el departamento y que nacen en la Cordillera Oriental. Aunque el departamento hace parte de los llanos orientales colombianos, este cuenta con diversas áreas montañosas andinas, entre las cuales se destaca uno de los parques naturales más célebres del país, conocido como la Serranía de la Macarena (Schargel, 2015).

En el Meta se pueden encontrar las siguientes subregiones (Anónimo, 2020) (Figura 4):

- Altillanura: Compuesta por los valles que forman los ríos, de pendiente suave y uniforme.
- Piedemonte: Compuesto por los llanos ubicados al occidente de la región, con pendientes fuertes y grandes alturas geográficas.
- Llanura amazónica: Compuesta por vestigios de la selva tropical húmeda en una prolongada planicie, ubicadas al suroriente y suroccidente de la región.

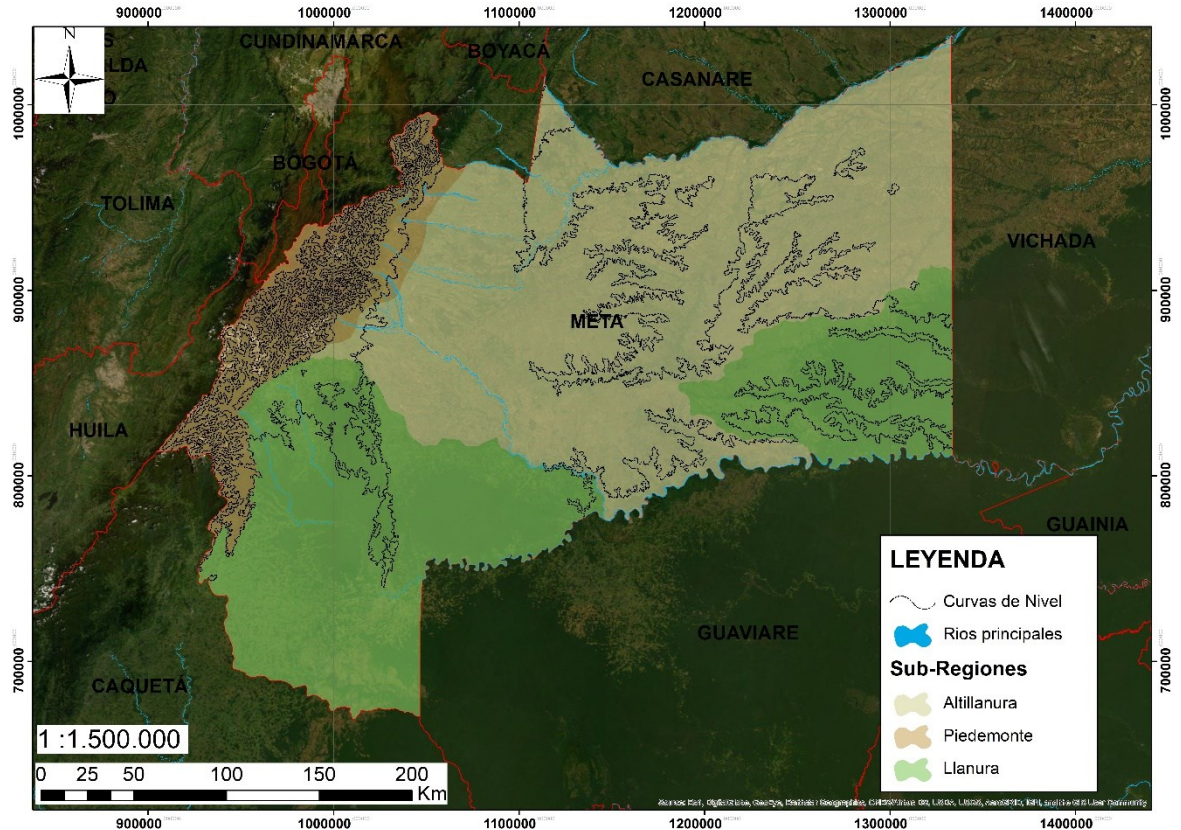


Figura 4: Mapa de subregiones del Meta. Tomado y modificado del SIAC. Tomado y modificado de: <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>.

La altillanura es la zona más extensa del Meta, ocupando un área de 44.427,46 Km², que representa el 51,98% del área total del departamento (85.481,29 Km²); en esta se encuentra la mayor parte de los ríos más importantes del departamento, tales como el Meta, Humea, Ariari, Guamal, Metica, Guayuriba, Cusiana, y Guape. El piedemonte ocupa un área de 9.385,31 Km², que representa el 10,97 % del área del Meta; se encuentra en una franja en dirección nororiental-suroccidental, cubriendo casi todo el costado occidental del departamento. El piedemonte amazónico ocupa un área de 31.668,52 Km², que representa el 37,05 % del área de estudio. Se encuentra localizada dos franjas ubicadas al sureste y suroccidental del departamento (Miora Cely & Rangel Ch., 2014).

La región de la Orinoquia se caracteriza por tener una modalidad de precipitación monomodal, lo cual significa que tiene una sola temporada de lluvias, la cual abarca los meses de abril a noviembre. Por consiguiente, esta región tiene una temporada seca que corresponde a los meses entre diciembre y marzo. La región de Orinoquía de Colombia presenta un clima caracterizado por ser continental y hacia el sur del territorio se convierte en un escenario con elementos propios de la selva tropical húmeda (Rangel Ch., Sanchez C., Lowy C., Aguilar P., & Castillo, 1995).

Los valores promedio de precipitaciones anuales son de 2.800 mm, siendo más abundante en las áreas sur y suroccidental, y más escasas en el norte y el nororiente. La zona cercana al piedemonte presenta características de precipitación particulares, dado que en este espacio la región muestra un comportamiento bimodal, generándose precipitaciones en dos momentos del año: en los meses entre abril y mayo, y en los meses entre septiembre y octubre (Miorita Cely & Rangel Ch., 2014).

5.2 Métodos

La metodología usada para esta investigación corresponde a una adaptación de los métodos planteados por Torres et al. (2015) que buscan realizar la validación de los estimativos de precipitación de las imágenes provenientes del sensor TRMM con las mediciones puntuales de las estaciones meteorológicas, a partir de cuatro pasos claramente definidos.

La metodología contempla la selección y análisis de los datos mensuales de las estaciones meteorológicas para el periodo requerido que, en este caso, es el comprendido entre marzo del 2014 y diciembre del 2019.

En cuanto a los datos provenientes del sensor GPM, se descargaron de acuerdo con el periodo anteriormente mencionada, teniendo en cuenta que los datos del sensor están disponibles desde marzo del 2014 y hasta diciembre del 2019; son datos abiertos disponibles a través de las plataformas NASA y se descargan del siguiente portal: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

El análisis puntual se basó en la validación de las estimaciones del sensor remoto, teniendo en cuenta a Torres *et al.*, (2015). Se utilizaron los parámetros de coeficiente de correlación, coeficiente de determinación y covarianza, teniendo en cuenta el comparativo entre los datos puntuales de las estaciones y los datos de los píxeles correspondientes de las imágenes GPM.

En la Figura 5 se observa los tres ejes sobre los cuales se trabajó la presente investigación, dividiéndose principalmente en la descripción de los datos de las estaciones meteorológicas, descripción de los datos del GPM, y análisis de los resultados de correlación.

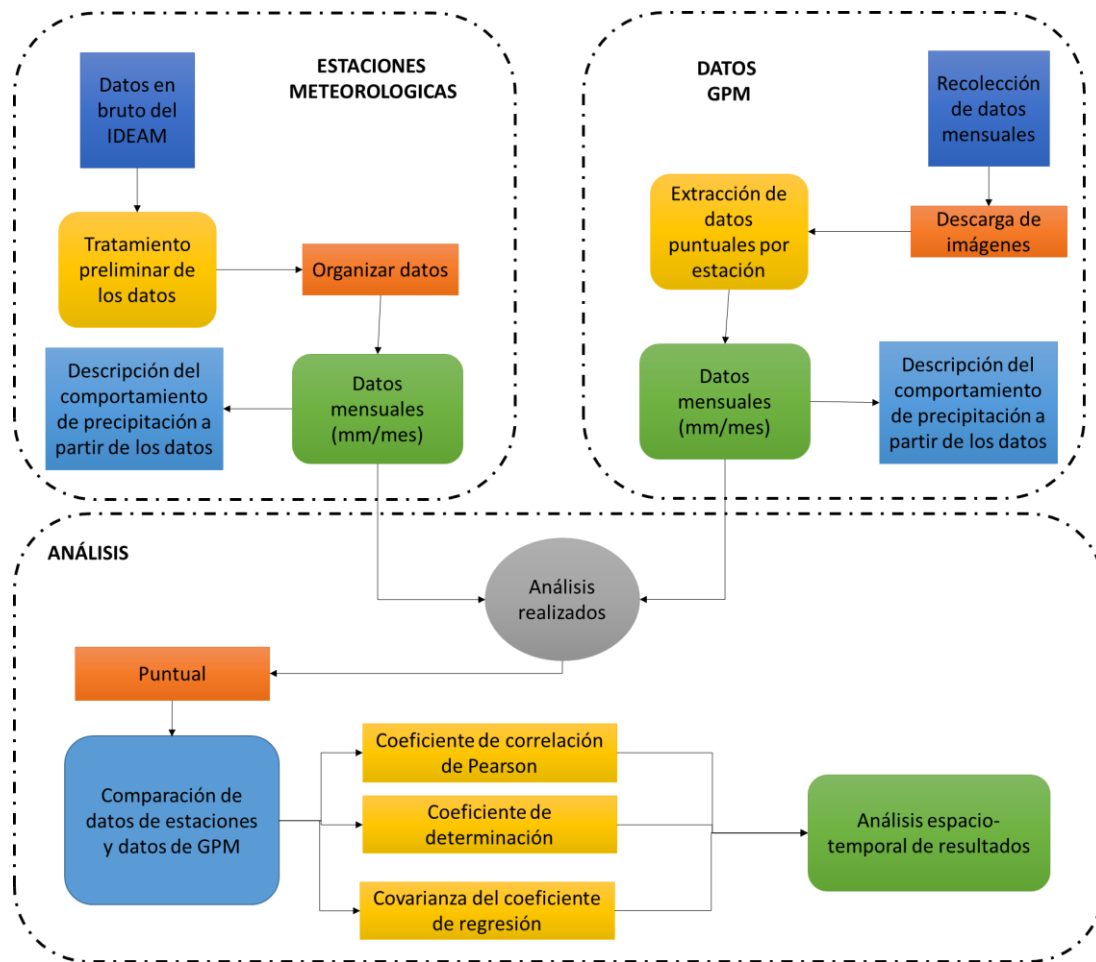


Figura 5: Diagrama metodológico general.

Tomado y modificado de Simbaqueba (2018).

5.2.1 Descripción de los datos de precipitación in-situ

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, dispone para el departamento del Meta de 79 estaciones que registran datos de precipitación, de estas, 50 estaciones presentan un registro continuo de datos para el periodo de tiempo contemplado en esta investigación (36 son pluviométricas, seis son pluviográficas, cinco son climáticas ordinarias, dos son climáticas principales y una es agrometeorológica). De estas 50 estaciones, 29 (58%) están en la altillanura (22 pluviométricas, dos pluviográficas, tres

climáticas ordinarias, una climática principal y una es agrometeorológica), 17 (34%) en el piedemonte (12 pluviométricas, cuatro pluviográficas, una climática ordinaria), y cuatro (8%) en la llanura amazónica (dos pluviométricas, una climática principal, una climática ordinaria) (Tabla 3).

Esta clasificación es importante para comprender el comportamiento de la precipitación, el cual está directamente relacionado con la variación en la orografía del territorio, (Figura 6). La delimitación de la altillanura, piedemonte y llanura amazónica en la zona de estudio fue tomada de la fuente oficial en la plataforma de datos abiertos SIAC (Sistema de Información Ambiental de Colombia), cuyos datos de llanura amazónica fueron tomadas de SINCHI, mientras los datos de altillanura y piedemonte corresponden a la propuesta del IGAC.

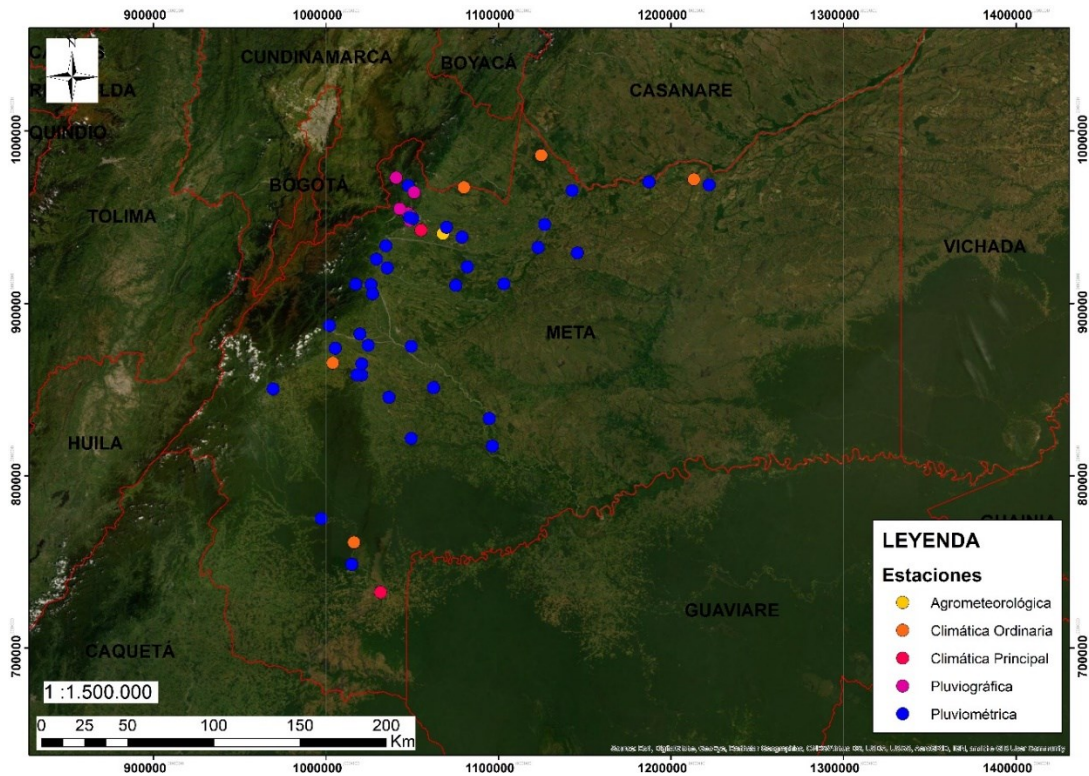


Figura 6: Mapa de estaciones del IDEAM.

Tabla 3: Comparativa tipos d estaciones x subregiones

Tipo de estación vs Subregiones	Altillanura	Llanura amazónica	Piedemonte	Total, general
Agrometeorológica	1			1
Climática Ordinaria	3	1	1	5
Climática Principal	1	1		2
Pluviográfica	2		4	6
Pluviométrica	22	2	12	36
Total, general	29	4	17	50

Los datos de precipitación de las estaciones fueron solicitados al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Para que exista una concordancia entre los datos de las estaciones y las imágenes satelitales del presente estudio, la fecha de estudio abarca desde marzo del 2014 hasta diciembre del 2019.

5.2.2 Preprocesamiento de datos

La calidad de los datos de las estaciones establece la confiabilidad de la evaluación del producto satelital, por ello es necesario tener una base de datos confiable de forma que la evaluación sea correcta.

Los datos de precipitación mensual y diaria se solicitaron al IDEAM, los diarios para identificar la cantidad de días con ausencia de datos y calcular el número de días faltantes de información por mes; mientras que los datos mensuales se solicitaron para trabajar directamente sobre los datos acumulados mensuales de precipitación que entrega el IDEAM. De estos últimos, se seleccionaron para trabajar las estaciones que contaban con información continua para el periodo de tiempo contemplada para esta investigación (marzo de 2014 a diciembre de 2019).

Siguiendo lo anterior, se consideraron un total de 27 estaciones para trabajar en el periodo comprendido entre marzo del 2014 y diciembre del 2019. No obstante, se descartó trabajar con datos del año 2019 ya que existe una gran cantidad de ausencia de datos mensuales (Anexo A), por consiguiente, no permitirían realizar un análisis adecuado (Tabla 4).

Tabla 4. Estaciones con datos de precipitación mensuales completas por cada año.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1	MARIPOS A LA [32010010]	MARIPOS A LA [32010010]	MARIPOS A LA [32010010]	MARIPOS A LA [32010010]	MARIPOS A LA [32010010]	
2	URIBE LA [32020020]	URIBE LA [32020020]	URIBE LA [32020020]	URIBE LA [32020020]	URIBE LA [32020020]	
3	RAUDAL UNO [32030020]		RAUDAL UNO [32030020]		RAUDAL UNO [32030020]	

4	MACAREN A LA [32035010]	MACAREN A LA [32035010]		MACAREN A LA [32035010]	MACAREN A LA [32035010]	
5	LA BALSORA [32035020]	LA BALSORA [32035020]	LA BALSORA [32035020]			
6	MESA DE YAMANES [32060020]	MESA DE YAMANES [32060020]	MESA DE YAMANES [32060020]	MESA DE YAMANES [32060020]	MESA DE YAMANES [32060020]	
7	SAN LUIS CUBARRA L [32060030]	SAN LUIS CUBARRA L [32060030]	SAN LUIS CUBARRA L [32060030]	SAN LUIS CUBARRA L [32060030]	SAN LUIS CUBARRA L [32060030]	SAN LUIS CUBARRA L [32060030]
8	CALIME [32060060]	CALIME [32060060]	CALIME [32060060]	CALIME [32060060]	CALIME [32060060]	
9						
10	PUERTO ANGOSTU RAS [32060100]	PUERTO ANGOSTU RAS [32060100]	PUERTO ANGOSTU RAS [32060100]	PUERTO ANGOSTU RAS [32060100]	PUERTO ANGOSTU RAS [32060100]	PUERTO ANGOSTU RAS [32060100]
11	CAMPO ALEGRE [32070010]	CAMPO ALEGRE [32070010]	CAMPO ALEGRE [32070010]	CAMPO ALEGRE [32070010]	CAMPO ALEGRE [32070010]	
12		CANO BLANCO [32070020]	CANO BLANCO [32070020]		CANO BLANCO [32070020]	
13		MICOS LOS [32070030]				
14	PINALITO [32070040]		PINALITO [32070040]		PINALITO [32070040]	PINALITO [32070040]
15	FUENTE DE ORO [32070060]	FUENTE DE ORO [32070060]	FUENTE DE ORO [32070060]	FUENTE DE ORO [32070060]	FUENTE DE ORO [32070060]	
16	TIERRA GRATA [32070080]	TIERRA GRATA [32070080]	TIERRA GRATA [32070080]		TIERRA GRATA [32070080]	
17	PENAS BLANCAS [32070090]	PENAS BLANCAS [32070090]	PENAS BLANCAS [32070090]	PENAS BLANCAS [32070090]	PENAS BLANCAS [32070090]	
18	SAN JUAN DE ARAMA [32070100]		SAN JUAN DE ARAMA [32070100]	SAN JUAN DE ARAMA [32070100]	SAN JUAN DE ARAMA [32070100]	SAN JUAN DE ARAMA [32070100]
19	AGUAS CLARAS [32070110]	AGUAS CLARAS [32070110]	AGUAS CLARAS [32070110]	AGUAS CLARAS [32070110]	AGUAS CLARAS [32070110]	
20	MESA DE FERNAND	MESA DE FERNAND	MESA DE FERNAND	MESA DE FERNAND	MESA DE FERNAND	

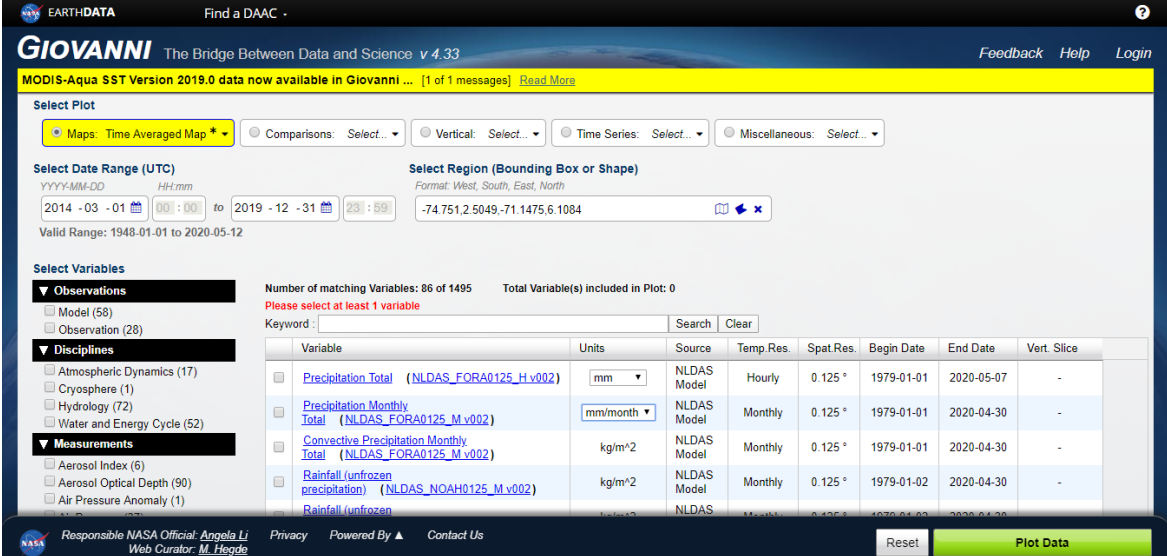
	EZ [32070120]	EZ [32070120]	EZ [32070120]	EZ [32070120]	EZ [32070120]	
21	MESETAS [32075050]		MESETAS [32075050]	MESETAS [32075050]	MESETAS [32075050]	
22	PUERTO RICO [32080010]	PUERTO RICO [32080010]	PUERTO RICO [32080010]	PUERTO RICO [32080010]	PUERTO RICO [32080010]	PUERTO RICO [32080010]
23	PUERTO LOPEZ [35010010]	PUERTO LOPEZ [35010010]	PUERTO LOPEZ [35010010]	PUERTO LOPEZ [35010010]	PUERTO LOPEZ [35010010]	PUERTO LOPEZ [35010010]
24		ACACIAS [35010020]	ACACIAS [35010020]	ACACIAS [35010020]	ACACIAS [35010020]	ACACIAS [35010020]
25	CANO HONDO [35010040]	CANO HONDO [35010040]		CANO HONDO [35010040]	CANO HONDO [35010040]	
26	TORO EL [35010060]	TORO EL [35010060]	TORO EL [35010060]	TORO EL [35010060]	TORO EL [35010060]	
27	GUAMAL [35010070]	GUAMAL [35010070]	GUAMAL [35010070]	GUAMAL [35010070]	GUAMAL [35010070]	
28	NARE [35010080]	NARE [35010080]	NARE [35010080]	NARE [35010080]	NARE [35010080]	
29			YAGUARI TO [35010150]	YAGUARI TO [35010150]		
30			BAJO NARE [35010230]	BAJO NARE [35010230]		
31	POMPEYA [35020060]	POMPEYA [35020060]	POMPEYA [35020060]	POMPEYA [35020060]	POMPEYA [35020060]	POMPEYA [35020060]
32	LA LIBERTAD - AUT [35025110]	LA LIBERTAD - AUT [35025110]	LA LIBERTAD - AUT [35025110]	LA LIBERTAD - AUT [35025110]	LA LIBERTAD - AUT [35025110]	LA LIBERTAD - AUT [35025110]
33	CALVARI O EL [35030010]	CALVARI O EL [35030010]	CALVARI O EL [35030010]	CALVARI O EL [35030010]	CALVARI O EL [35030010]	CALVARI O EL [35030010]
34		MONFORT [35030020]			MONFORT [35030020]	
35	SENA [35030030]	SENA [35030030]	SENA [35030030]	SENA [35030030]	SENA [35030030]	SENA [35030030]
36	ACUEDUC TO LA ESMERAL DA [35030040]	ACUEDUC TO LA ESMERAL DA [35030040]	ACUEDUC TO LA ESMERAL DA [35030040]	ACUEDUC TO LA ESMERAL DA [35030040]	ACUEDUC TO LA ESMERAL DA [35030040]	ACUEDUC TO LA ESMERAL DA [35030040]
37				OJO DE AGUA [35030050]		

38	BUENAVISTA [35030090]	BUENAVISTA [35030090]	BUENAVISTA [35030090]	BUENAVISTA [35030090]	BUENAVISTA [35030090]	
39	ALCALDIA [35030100]		ALCALDIA [35030100]	ALCALDIA [35030100]	ALCALDIA [35030100]	ALCALDIA [35030100]
40	SERVITA [35030290]	SERVITA [35030290]	SERVITA [35030290]	SERVITA [35030290]	SERVITA [35030290]	
41	ICA V/CIO [35030370]	ICA V/CIO [35030370]	ICA V/CIO [35030370]	ICA V/CIO [35030370]		
42	IDEAM V/CIO [35030380]	IDEAM V/CIO [35030380]	IDEAM V/CIO [35030380]	IDEAM V/CIO [35030380]	IDEAM V/CIO [35030380]	IDEAM V/CIO [35030380]
43	UNILLANOS [35035070]					
44	CABANALA HACIENDA [35045020]	CABANALA HACIENDA [35045020]	CABANALA HACIENDA [35045020]	CABANALA HACIENDA [35045020]	CABANALA HACIENDA [35045020]	CABANALA HACIENDA [35045020]
45	CABUYARO [35100020]	CABUYARO [35100020]	CABUYARO [35100020]	CABUYARO [35100020]		
46	GUAICARAMO [35105050]	GUAICARAMO [35105050]	GUAICARAMO [35105050]	GUAICARAMO [35105050]	GUAICARAMO [35105050]	GUAICARAMO [35105050]
47		PUERTO GAITAN [35120010]	PUERTO GAITAN [35120010]	PUERTO GAITAN [35120010]	PUERTO GAITAN [35120010]	
48	HACIENDA LAS MARGARITAS [35125010]	HACIENDA LAS MARGARITAS [35125010]	HACIENDA LAS MARGARITAS [35125010]	HACIENDA LAS MARGARITAS [35125010]	HACIENDA LAS MARGARITAS [35125010]	
49		PLATALA [35130010]		PLATALA [35130010]	PLATALA [35130010]	
50	FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030]	FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030]			FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030]	

*Color azul: estaciones incluidas. Color negro: estaciones descartadas.

5.2.3 Descripción de imágenes satelitales de precipitación GPM IMERG

La NASA ha desarrollado un portal web para el alojamiento de datos GPM y manuales de usuario (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/gpm>). GIOVANNI-4 (Geospatial Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure) (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>) es una interfaz *on-line* que permite la exploración, visualización, descarga y análisis estadístico de los diferentes niveles de los productos GPM (Figura 7).



The screenshot shows the GIOVANNI web interface. At the top, it says "EARTHDATA Find a DAAC - GIOVANNI The Bridge Between Data and Science v 4.33". Below this, there's a yellow banner about MODIS-Aqua SST data. The main interface has several sections: "Select Plot" with a dropdown menu set to "Time Averaged Map"; "Select Date Range (UTC)" with a date range from 2014-03-01 to 2019-12-31; "Select Region (Bounding Box or Shape)" with a bounding box of -74.751,2.5049,-71.1475,6.1084; "Select Variables" with a list of categories like Observations, Disciplines, and Measurements. A table of variables is displayed, including "Precipitation Total", "Precipitation Monthly Total", "Convective Precipitation Monthly Total", "Rainfall (unfrozen precipitation)", and "Rainfall (unfrozen)". The table has columns for Variable, Units, Source, Temp. Res., Spat. Res., Begin Date, End Date, and Vert. Slice. At the bottom, there are links for "Resel" and "Plot Data".

Figura 7: Plataforma GIOVANNI, donde se pueden descargar productos satelitales de la NASA.

Fuente:

<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=2014-03-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-74.751,2.5049,-71.1475,6.1084&variableFacets=dataFieldMeasurement%3APrecipitation%3B>

Para este estudio se utilizó el producto GPM IMERG V06 a una escala mensual, el conjunto de datos se descarga gratuitamente (Huffman, 2015) gracias a su libre distribución. La descarga del producto con datos de precipitación para Suramérica se realizó mediante GIOVANNI-4 en formato GeoTIFF (.tif) con información espacial por píxeles.

Mediante un script de Python (Anexo B) se realizó la intersección de las estaciones con el respectivo píxel del producto, obteniendo así las series temporales de estimaciones de precipitación mensual de IMERG de cada píxel con la respectiva estación con la que se relaciona, extrayendo y guardando estos datos en tablas de Microsoft Excel.

De las imágenes GPM se extrajeron los datos estimados de precipitación para cada píxel que tiene una estación meteorológica correlacionable, donde están ubicadas las estaciones meteorológicas, obteniéndose así los datos estimados de precipitación para cada estación que se correlaciona con los datos obtenidos del IDEAM. Teniendo estos datos se procedió a caracterizar el comportamiento de la precipitación para cada una de las subregiones.

5.2.4 Análisis de la Información

La evaluación es de tipo puntual con correspondencia de la ubicación de las estaciones meteorológicas con el dato estimado de precipitación del respectivo píxel en las imágenes. Los métodos estadísticos se obtuvieron de estudios afines (Castro Loayza , 2014). A continuación, se describen los diferentes métodos estadísticos empleados en este estudio.

El Coeficiente de Correlación de Pearson

La correlación, también conocida como coeficiente de correlación lineal (de Pearson), es una medida de regresión que pretende cuantificar el grado de variación conjunta entre dos variables (Simbaqueba H., 2018).

Por tanto, es una medida estadística que cuantifica la dependencia lineal entre dos variables, es decir, si los valores que toman dos variables se representan en un diagrama de dispersión, el coeficiente de correlación lineal señalará lo bien o lo mal que el conjunto de puntos representados se aproxima a una recta.

$$\gamma = \frac{\text{cov}(Ps, Pp)}{\sqrt{\text{var}(Ps)} \times \sqrt{\text{var}(Pp)}}$$

De una forma menos coloquial, la podemos definir como el número que mide el grado de intensidad y el sentido de la relación entre dos variables.

$\rho = -1$ Correlación perfecta negativa

$\rho = 0$ No existe correlación

$\rho = +1$ Correlación perfecta positiva

Se habla de correlación positiva si siempre que el valor «x» sube, el valor «y» sube, y además con la misma intensidad (+1). En el caso opuesto, si siempre que el valor «x» sube, y el valor «y» baja, y además con la misma intensidad, entonces estamos hablando de correlación negativa (-1), aunque no lo hagan en la misma proporción (salvo que tengan la misma desviación típica) (Camacho., 2019).

Coeficiente de Determinación

El coeficiente de determinación, se define como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El coeficiente de determinación, también llamado R cuadrado, refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar.

Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será (León Gómez , Símuta Champo, Vázquez Montoya, & Solano Barajas , 2016).

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2}$$

Covarianza

En la teoría de la probabilidad y la estadística, la covarianza es una medida del grado en que dos variables aleatorias (X, Y) cambian simultáneamente. Si las variables tienden a mostrar un comportamiento similar, la covarianza es positiva. En el caso contrario, cuando los valores mayores de una variable corresponden principalmente a los valores más pequeños de la otra, la covarianza es negativa. La covarianza se calcula como:

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n}$$

Dónde la \bar{y} con el acento es la media de la variable Y, y la \bar{x} con el acento es la media de la variable X. “i” es la posición de la observación y “n” el número total de observaciones.(Vargas Sabadías, 1995).

5.2.5 Precipitación mensual para el periodo de estudio

Mediante el software InfoStat (Versión actualizada al día 05-05-2020) (Di Rienzo, y otros, 2020) se realizaron las gráficas de correlación entre los datos de las estaciones

meteorológicas y de las imágenes satelitales, para el periodo de tiempo estimado. La comparación gráfica de ambos ayudó a la comprensión de los datos y, con los valores de correlación, se logró conocer si el satélite es capaz de representar cuantitativamente la precipitación en el área de estudio y bajo qué factores.

6. Resultados y Discusión

6.1 Patrones de precipitación en el Meta a partir de las mediciones con estaciones meteorológicas

Una vez identificadas las estaciones con datos mensuales continuos para el periodo de análisis (marzo 2014- diciembre 2018), se obtuvo un total de 27 estaciones de las cuales 18 son pluviométricas, 5 pluviográficas, tres climáticas ordinarias y una agrometeorológica (Figura 8).

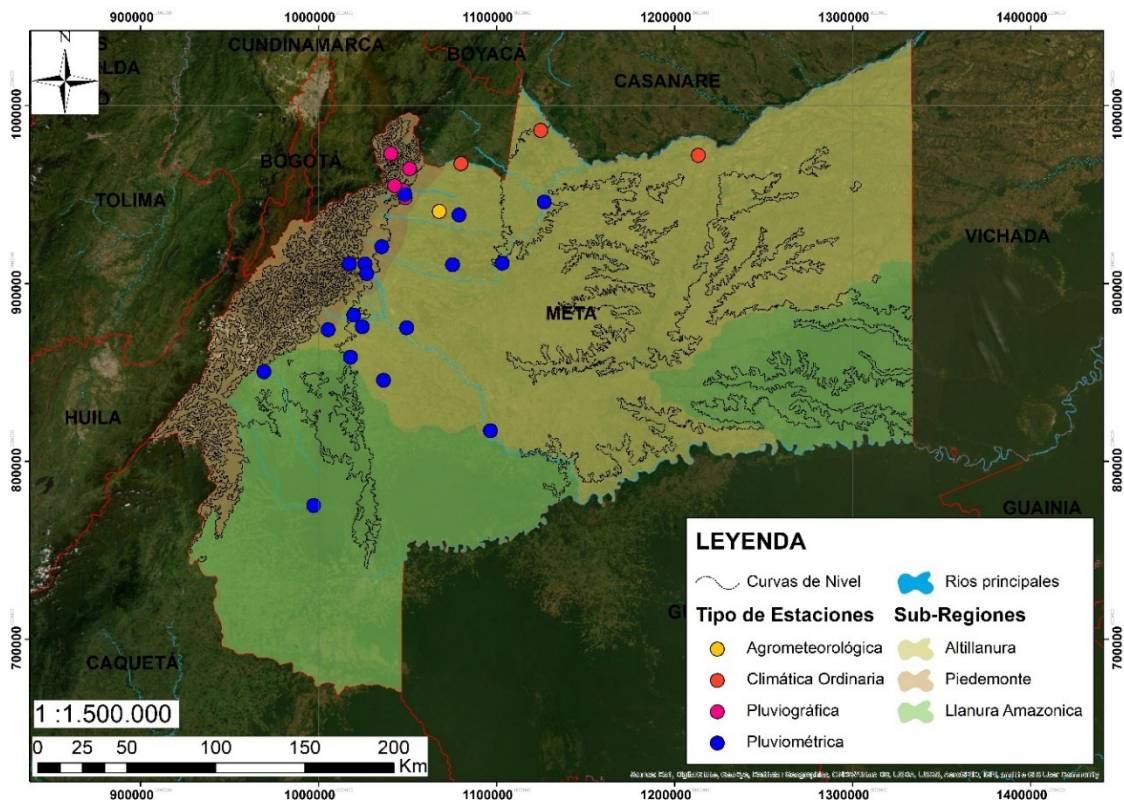


Figura 8: Mapa de distribución de las estaciones meteorológicas en el Meta.

6.1.1 Comportamiento de la Precipitación en la Altillanura

Las estaciones meteorológicas trabajadas para la Altillanura fueron 14, las cuales se encuentran concentradas al norte y al occidente, dejando una gran área al centro y al oriente de la subregión desprovista de estaciones y, por ende, sin información (Figura 9).

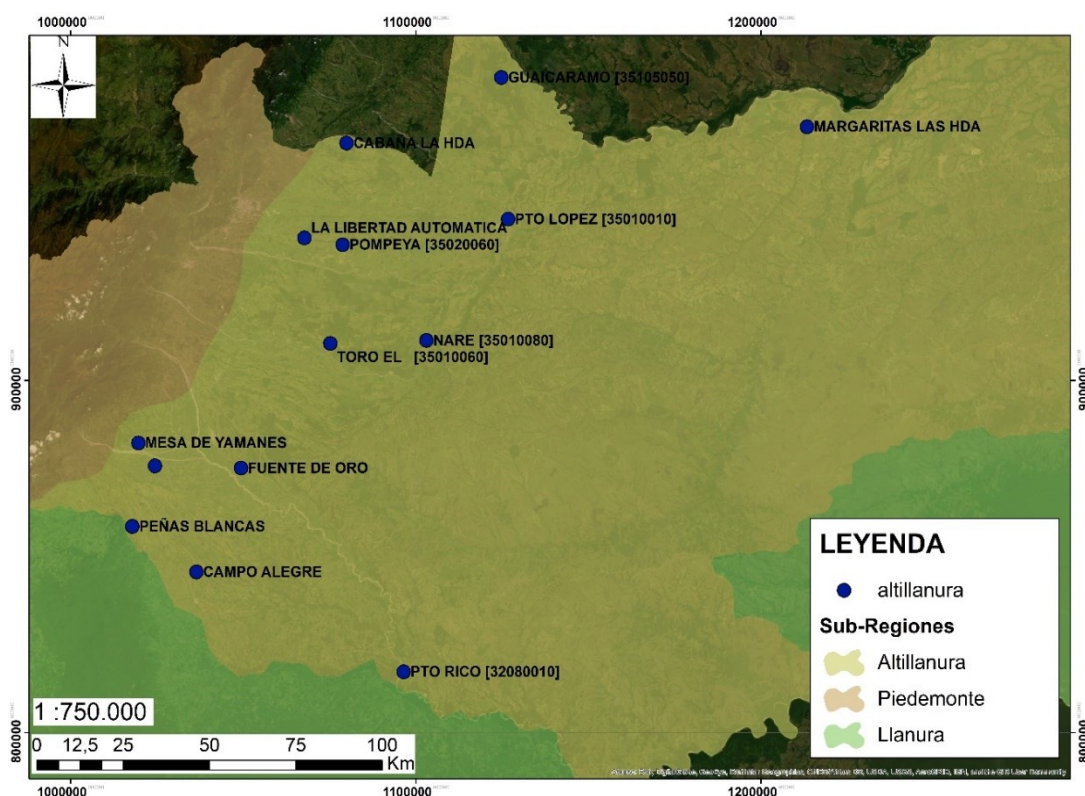


Figura 9: Mapa de estaciones de la altillanura.

La altillanura se caracteriza por presentar montos de precipitación desde los 1.700 hasta los 4.100 mm anuales, la temporada tiene un régimen unimodal biestacional con dos épocas contrastantes, el último y el primer trimestre del año (sequía) y abril a octubre (lluvias), de entre esto últimos siendo los meses de abril, mayo y junio los que presentan los valores más altos de precipitación de todo el año. Los valores de precipitación pueden variar dependiendo del sector de la subregión y la temporalidad, siendo el sector más cercano al piedemonte, principalmente hacia el Noroccidente de la subregión, el que presenta los

valores de precipitación más altos, con valores de precipitación desde 2.800 a 4.100 mm anuales. Lo anterior contrasta con el sector al interior de la altillanura, hacia el norte y centro de esta subregión, donde los valores de precipitación suelen ser los más bajos, estando entre los 1.700 y los 3.400 mm anuales (Anexo C). Los datos anteriores coinciden con lo concluido por Minorta y Rangel (2014), quienes en su estudio reportaron montos desde los 1592 hasta los 3100 mm anuales.

Para el 2014 se reportaron rangos de precipitación entre 1.700 y 3.700 mm anuales, para el 2015 entre 2.000 y 3.100 mm anuales, para el 2016 entre 2.300 y 4.100 mm anuales, para el 2017 entre 1.900 y 3.000 mm anuales, y para el 2018 entre 2.200 y 4.100 mm anuales. Según lo anterior, los años de 2016 y 2018 fueron los más lluviosos en la altillanura, mientras que los años 2015 y 2017 fueron los más secos, el 2014 presenta el rango más amplio de precipitación, teniendo el dato más bajo de precipitación, así como uno bastante alto (Anexo C). Los valores reportados para años secos coincide con la presencia del fenómeno del niño en el país, el cual se presentó desde mayo del 2014 hasta junio del 2016, siendo el último semestre del 2015 los que reportaron condiciones fuertes del Fenómeno del Niño y, por consiguiente, siendo el periodo más seco en el país (Márquez Pérez, Graciela Ustariz, Peña López, Caicedo Rubiano, & Cuevas Marín, 2016).

Según los valores de precipitación mensual promedio multianual para el periodo estudiado se tiene que los meses más secos fueron enero, febrero, marzo y diciembre, con valores de precipitación entre 8 y 286 mm mensuales. Por otra parte, los meses de abril, mayo, junio y julio son los meses más lluviosos, con valores de precipitación entre 272 y

564 mm mensuales (Figura 10, Figura 11, Figura 12). Esto datos son concordantes con los reportado por Rangel y Aguilar (1995) y por Miorta y Rangel (2014), quienes mencionan que la época lluviosa para la Orinoquía colombiana se presenta entre abril y octubre, cuyo periodo concentra entre el 50,7 -88,5% del total de precipitación anual.

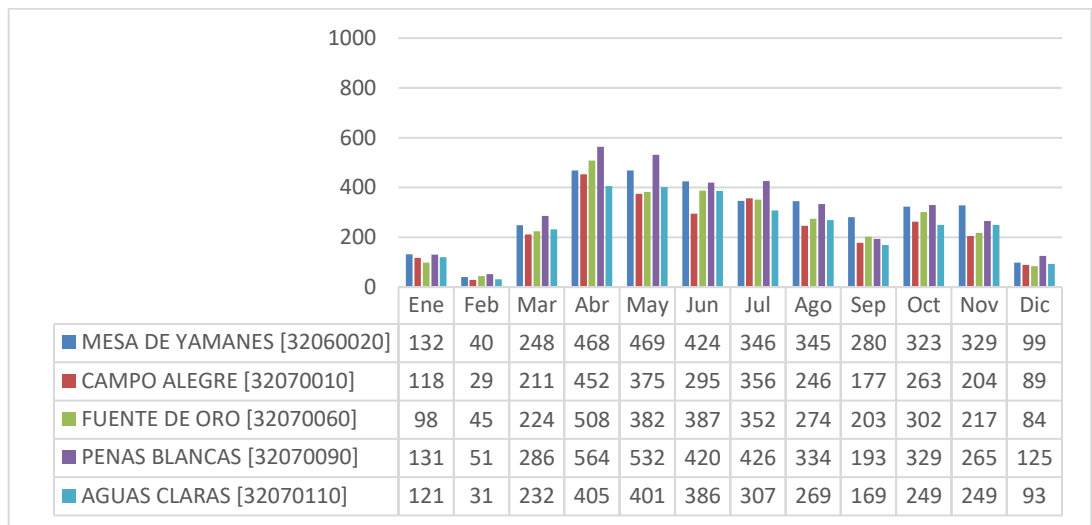


Figura 10: Precipitación mensual multianual de la altillanura, según datos de las estaciones meteorológicas.

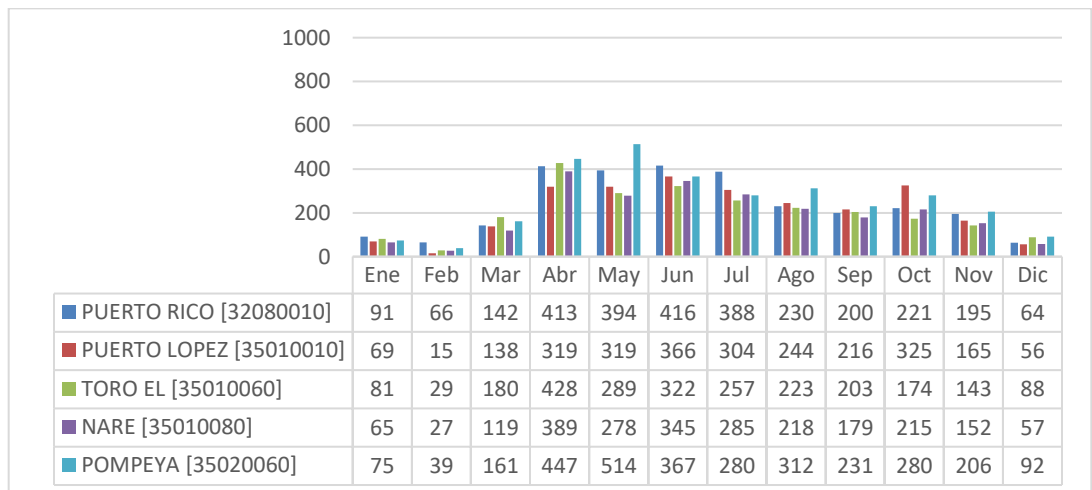


Figura 11: Precipitación mensual multianual de la altillanura, según datos de las estaciones meteorológicas.

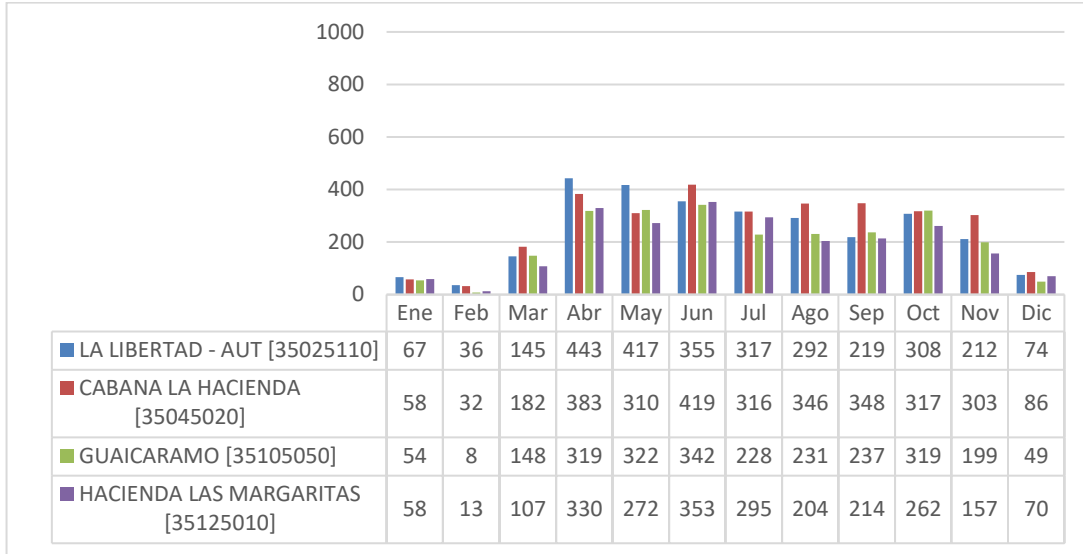


Figura 12: Precipitación mensual multianual de la altillanura, según datos de las estaciones meteorológicas.

6.1.2 Comportamiento de la Precipitación en el Piedemonte

Esta subregión es la zona más alta del Meta y en la cual la precipitación va a estar más influenciada por la orografía. Esta subregión cuenta con 11 estaciones, las cuales se encuentran cerca de donde nacen los principales ríos del departamento, con una mayor concentración en la franja oriental de esta subregión, y una ausencia total de estaciones hacia el suroccidente (Figura 13).

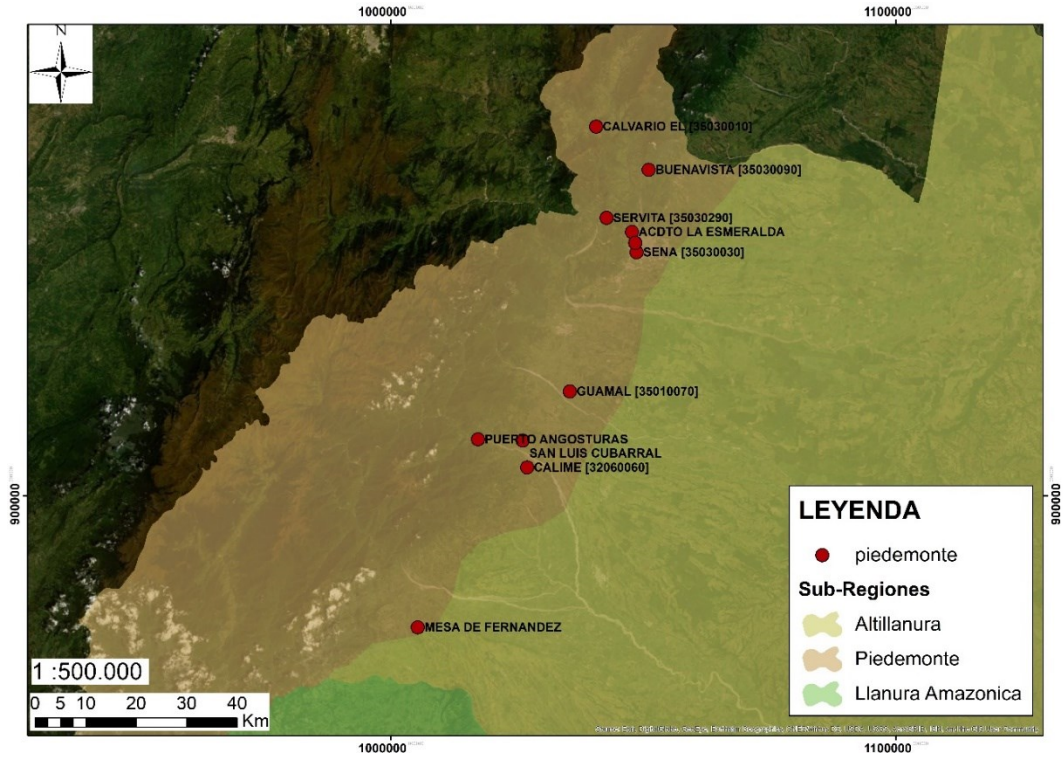


Figura 13: Mapa de estaciones del piedemonte.

El piedemonte se caracteriza por presentar montos de precipitación desde los 2.600 hasta los 8.900 mm anuales, valores cercanos a los de la altillanura. Esta subregión cuenta con un régimen unimodal biestacional con dos épocas contrastantes, Una época seca durante el último y el primer trimestre del año, un otra de lluvias desde abril hasta octubre, siendo los meses entre abril y junio los que presentan los máximos picos de precipitación, mientras que enero y febrero suelen ser los meses más secos de todo el año (Anexo C). Contrario a lo encontrado por Minorta y Rangel (2014) reportaron rangos de precipitación diferentes para el piedemonte, con montos desde los 667 hasta los 4664 mm anuales, debido a la selección de estaciones y la diferencia entre los límites establecidos para esta unidad fisiográfica, por otro lado, la comparación también se realiza con precaución ya que incluye el piedemonte de la llanura aluvial de la Orinoquía.

Para el 2014 se reportaron rangos de precipitación entre 2.600 y 7.300 mm anuales, para el 2015 entre 2.700 y 7.400 mm anuales, para el 2016 entre 3.200 y 8.800 mm anuales, para el 2017 entre 2.700 y 8.900 mm anuales, y para el 2018 entre 3.000 y 7.900 mm anuales. Para el piedemonte, observando cómo los años 2014 y 2015 se caracterizan por presentar precipitaciones anuales menores a los años siguientes, coincidiendo con el periodo del Fenómeno del Niño (Márquez Pérez, Graciela Ustariz , Peña López, Caicedo Rubiano, & Cuevas Marín, 2016), mientras que el 2016 y 2017 los que presentan los valores de precipitación anuales más altos de todo el Meta (Anexo C).

Según los valores de precipitación mensual promedio multianual para el periodo estudiado se tiene que los meses más secos fueron enero, febrero y diciembre, con valores de precipitación entre 38 y 398 mm mensuales. Por otra parte, los meses de abril, mayo y junio son los meses más lluviosos, con valores de precipitación entre 204 y 987 mm mensuales (

Figura 14, Figura 15), siguiendo el mismo comportamiento observado para la altillanura, reportado también por Rangel y Aguilar (1995) y Miorta y Rangel (2014).

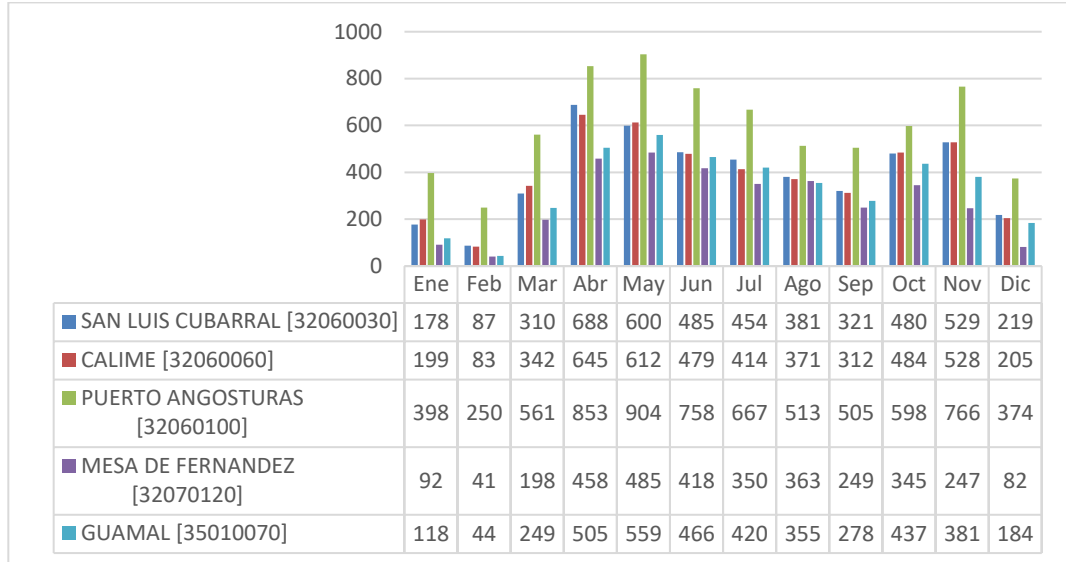


Figura 14: Precipitación mensual multianual del piedemonte, según datos de las estaciones meteorológicas.

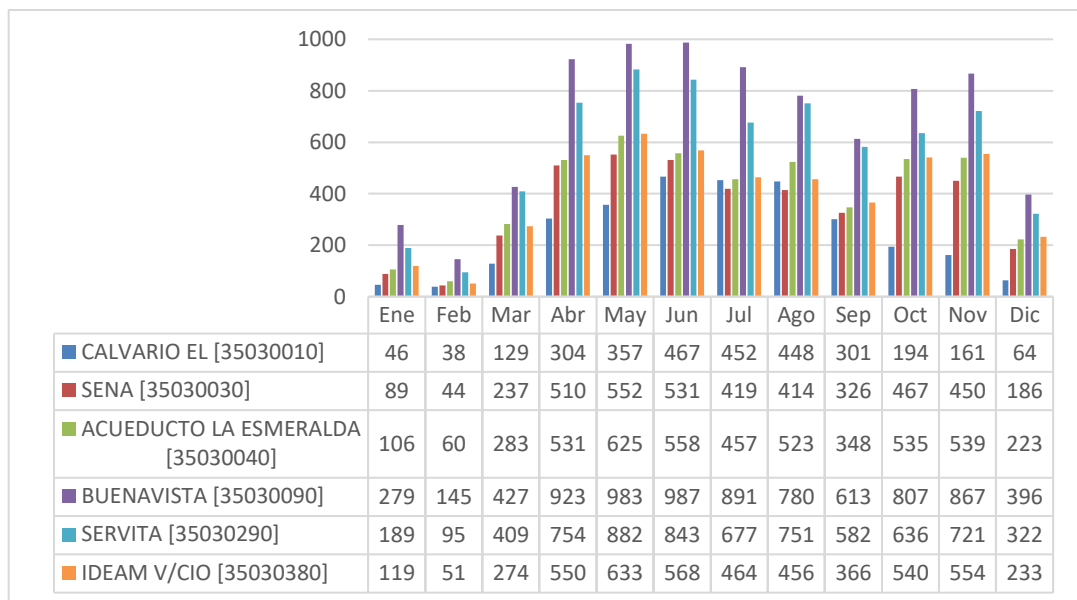


Figura 15: Precipitación mensual multianual del piedemonte, según datos de las estaciones meteorológicas.

6.1.3 Comportamiento de la Precipitación en la Llanura Amazónica

A pesar de ser la segunda subregión con mayor área del departamento, cuenta con apenas 8 estaciones de las cuales solo dos estaciones resultaron útiles para el presente estudio, mostrando como esta subregión no solo carece de suficientes estaciones sino que la mayoría de estas presentan numerosas ausencias de mediciones, lo cual impiden hacer un buen estudio climático en estas zonas (Figura 16).

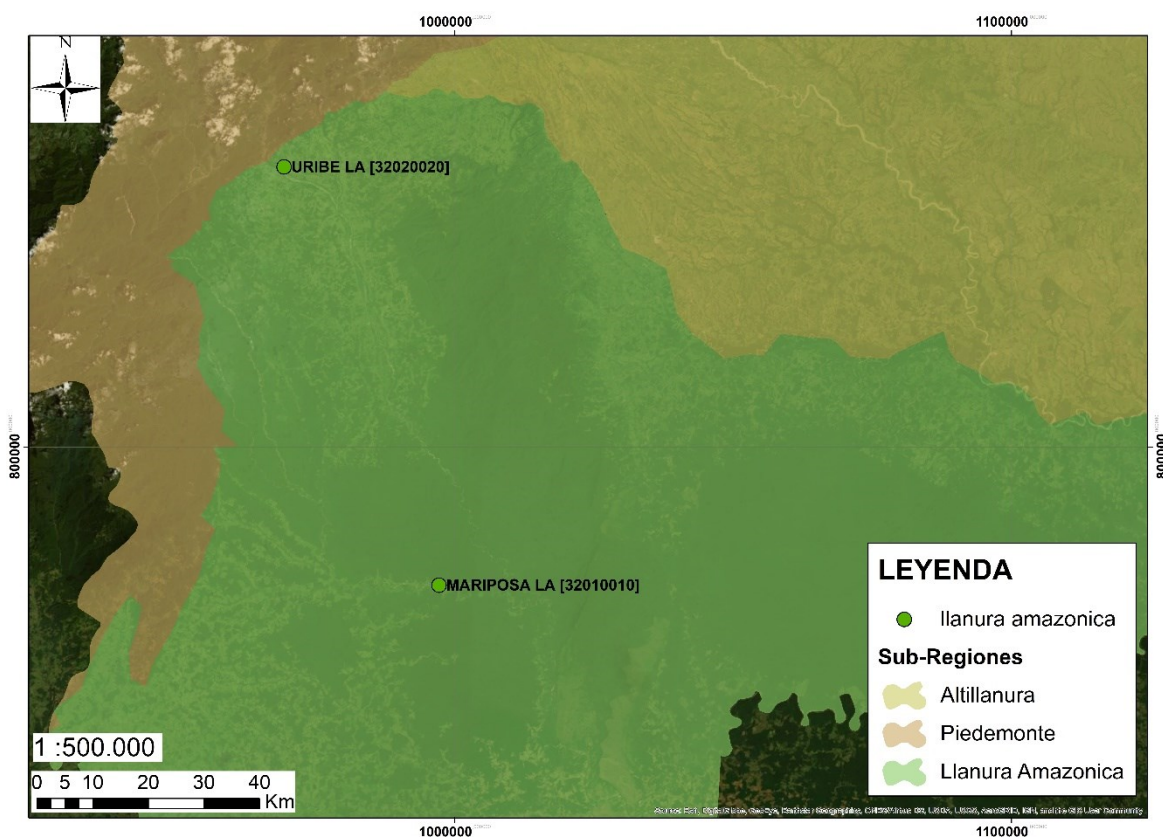


Figura 16: Mapa de estaciones de la serranía.

La Llanura Amazónica se caracteriza por presentar montos de precipitación desde los 2.500 hasta los 5.200 mm anuales. Como las otras dos subregiones, la llanura amazónica cuenta con un régimen unimodal biestacional con dos épocas contrastantes, el último y el

primer trimestre del año (sequía) y abril a octubre (lluvias), entre abril y agosto se presentan los valores máximos de precipitación, mientras que enero, febrero y diciembre se caracterizan por ser los meses más secos (Anexo C). Existe una fuerte coincidencia con los resultados reportados por Simbaqueba (2018), quien reportó un rango de precipitación anual de 2.630 hasta 5.320.

Para el 2014 se reportaron rangos de precipitación entre 2.700 y 3.800 mm anuales, para el 2015 entre 3.000 y 4.400 mm anuales, para el 2016 entre 2.800 y 4.400 mm anuales, para el 2017 entre 2.500 y 3.900 mm anuales, y para el 2018 entre 3.000 y 5.200 mm anuales. Se observó cómo el 2014 y 2017 presentan los valores de precipitación más bajos de los cinco años estudiados, y como el 2018 presentan un máximo de precipitación muy superior a los demás años. En cuanto los mínimos de precipitación, no se perciben diferencias sustanciales entre los diferentes años (Anexo C). Estos datos de precipitación anual se asemejan mucho con los reportados para la altillanura, observándose un comportamiento coherente con el periodo del Fenómeno del Niño (Márquez Pérez, Graciela Ustariz, Peña López, Caicedo Rubiano, & Cuevas Marín, 2016).

Según los valores de precipitación mensual promedio multianual para el periodo de tiempo estudiado se tiene que los meses más secos fueron enero, febrero y diciembre, con valores de precipitación entre 39 y 127 mm mensuales. Por otra parte, los meses de abril, mayo, junio y julio son los meses más lluviosos, con valores de precipitación entre 361 y 558 mm mensuales (Figura 17). Simbaqueba (2018) reportó para la zona norte de la llanura amazónica (norte del Caquetá y Guaviare, y sur del Meta) las precipitaciones más altas se

presentaron entre el mes de abril y julio, mientras que las más bajas se presentaron entre diciembre y febrero; mostrando el mismo comportamiento a lo plasmado en los resultados obtenidos por las estaciones del IDEAM.

Algo para resaltar es que la estación La Uribe (32010010) presenta valores de precipitación superiores a los de la estación La Mariposa (32020020), mostrando que posiblemente la cercanía de la primera estación al piedemonte y, por consiguiente la fisiografía de la subregión, hacen que esta zona sea mucho más lluviosa hacia el piedemonte, lo cual también es mencionado por Miorta y Rangel (2014), quienes reportan un aumento de los valores de precipitación a media que se acercaban al piedemonte al occidente de la Orinoquía. Lo anterior demuestra cómo entre estas dos estaciones existe una gran incertidumbre de los valores reales de precipitación, dado las diferencias de precipitación reportadas por ambas estaciones, y la ausencia de otras estaciones entre ellas.

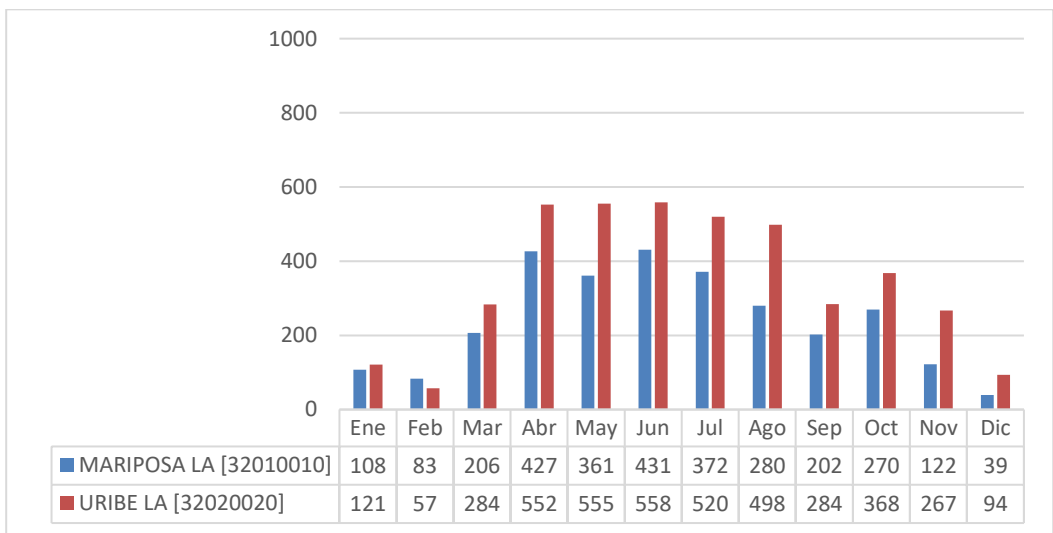


Figura 17: Precipitación mensual multianual para la llanura amazónica, según datos de las estaciones meteorológicas.

6.2 Patrones de Precipitación en el Meta a partir de las mediciones con las imágenes GPM

6.2.1 Comportamiento de la precipitación en la Altiplanura

Según las imágenes satelitales, la altiplanura se caracteriza por presentar montos de precipitación desde los 1.800 hasta los 3.200 mm anuales (Anexo D).

Para el 2014 se reportaron rangos de precipitación entre 1.800 y 2.300 mm anuales, para el 2015 entre 2.000 y 3.100 mm anuales, para el 2016 entre 2.600 y 3.200 mm anuales, para el 2017 entre 2.400 y 3.100 mm anuales, y para el 2018 entre 2.300 y 3.000 mm anuales (Anexo D). Se puede resaltar que las imágenes reportan que el 2014 fue el año más seco de todos, lo cual concuerda con el reportado por las estaciones. En general, todos los datos de precipitación de las imágenes satelitales presentan un rango de precipitaciones menor en comparación con los datos de las estaciones, lo cual es aún más notorio para los meses más lluviosos que van de abril a julio, sin embargo, el comportamiento de la precipitación se representa adecuadamente, mostrando picos de precipitación en los mismos meses y siendo los meses de enero, febrero y diciembre los más secos, coincidiendo con los datos del IDEAM.

Según los valores de precipitación mensual promedio multianual para el periodo de tiempo estudiado, se tiene que los meses más secos fueron enero, febrero y diciembre, con valores de precipitación entre 30 y 108 mm mensuales. Por otra parte, los meses de abril,

mayo, junio y julio son los meses más lluviosos, con valores de precipitación entre 209 y 415 mm mensuales (Figura 18, Figura 19, Figura 20).

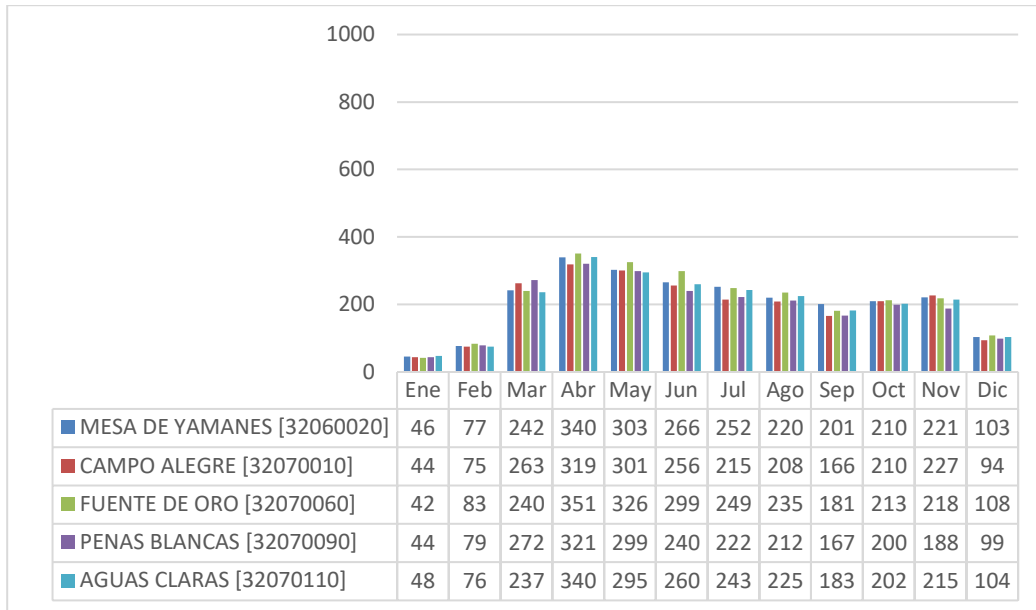


Figura 18: Precipitación mensual multianual para la altillanura, según datos de las imágenes satelitales.

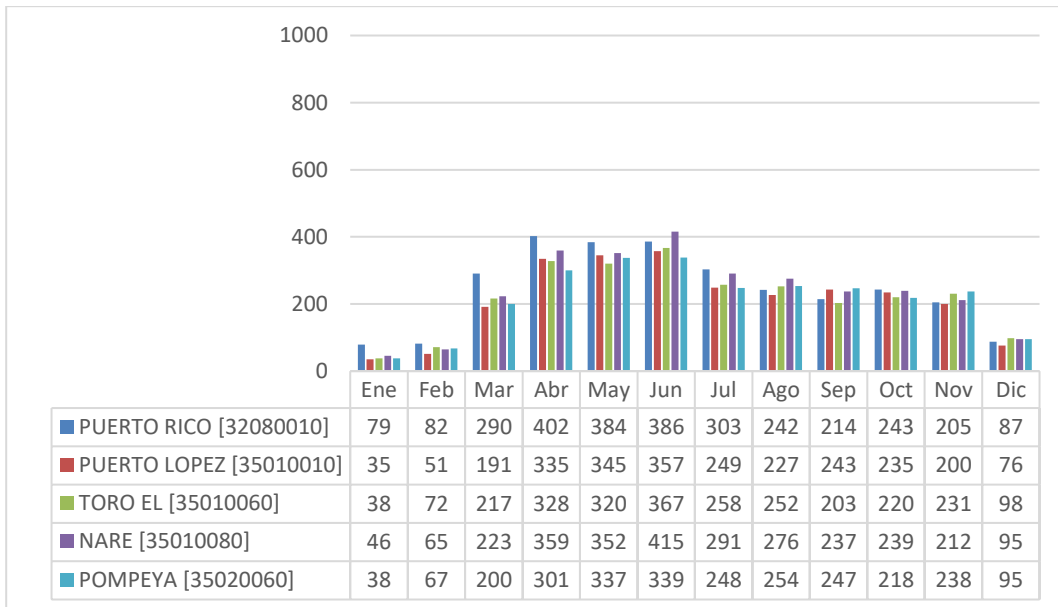


Figura 19: Precipitación mensual multianual para la altillanura, según datos de las imágenes satelitales.

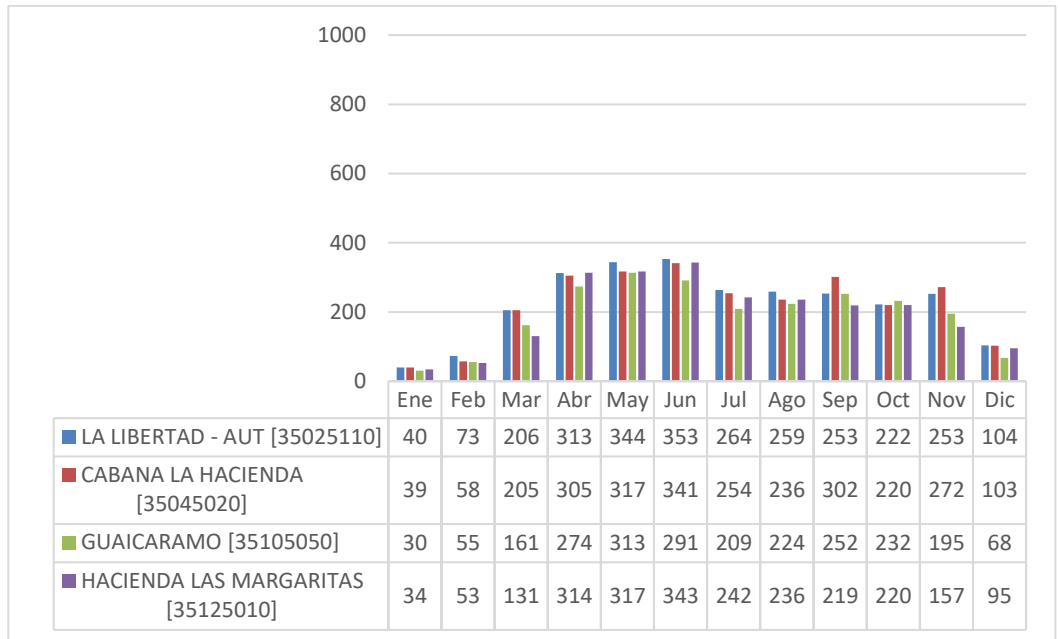


Figura 20: Precipitación mensual multianual para la altillanura, según datos de las imágenes satelitales.

6.2.2 Comportamiento de la precipitación en el Piedemonte

En el piedemonte, los datos estimados del GPM conservan el régimen bimodal, presentando montos de precipitación desde los 1.500 hasta los 3.100 mm anuales (Anexo D), teniendo los meses de enero, febrero y diciembre como los más secos del año, contrastando con los meses de abril, mayo, junio y julio, los cuales son los más lluviosos. Por lo tanto, las imágenes satelitales subestiman considerablemente los valores de precipitación más altas (época de lluvias), llegando a reportar como valor máximo menos de la mitad de valor reportado por las estaciones, lo que indica una deficiencia de las imágenes para estimar la precipitación en zonas con precipitaciones muy altas o en las temporadas más lluviosas (RIVAS ESCOBAR , 2014) (Tang, Ma, Long, Zhong, & Hong,

2016). También se pueden resaltar como los datos de precipitación de las imágenes correspondientes a las diferentes estaciones presentan datos de precipitación muy similares entre sí, mientras que los datos medidos por las estaciones tienen una mayor variabilidad entre cada estación.

Es importante enfatizar que uno de los principales inconvenientes al utilizar un producto satelital es que los valores obtenidos para cada píxel tienen una resolución espacial determinada que limita la estimación correcta de la variable climatológica (Cabrera Atiencia, 2016). Un ejemplo de este comportamiento se puede apreciar con los datos ubicados en los puntos de las estaciones Acueducto La Esmeralda (35030040), IDEAM Villavicencio (35030380) y Sena (35030030), para las cuales las imágenes satelitales reportan datos muy similares, esto debido a estar presentes dentro del mismo píxel, mientras que los datos de las estaciones meteorológicas como Puerto Angosturas (32060100) y Mesa de Fernández (32070120) reportan datos más variados entre sí, dado que se encuentran en píxeles diferentes y muy alejados entre sí. De esta manera, se puede mostrar como las estaciones meteorológicas muestran mejor la variabilidad espacial de la precipitación, aún más cuando se encuentran muy cercanas entre sí; estos contrastes, no se perciben fácilmente con las imágenes satelitales.

Para el 2014 se reportaron rangos de precipitación entre 1.500 y 2.400 mm anuales, para el 2015 entre 1.600 y 2.400 mm anuales, para el 2016 entre 2.400 y 3.100 mm anuales, para el 2017 entre 2.500 y 2.800 mm anuales, y para el 2018 entre 2.200 y 2.800 mm anuales. Al igual que para la altillanura, las imágenes reportan que el año 2014 presentó los valores

más bajos de precipitación, mientras que los demás meses no presentan valores de precipitación tan diferentes unos de otros (Anexo D).

Según los valores de precipitación mensual promedio multianual para el periodo de tiempo estudiado se tiene que los meses más secos fueron enero, febrero y diciembre, con valores de precipitación entre 34 y 122 mm mensuales. Por otra parte, los meses de abril, mayo y junio son los meses más lluviosos, con valores de precipitación entre 243 y 347 mm mensuales (

Figura 21, Figura 22).

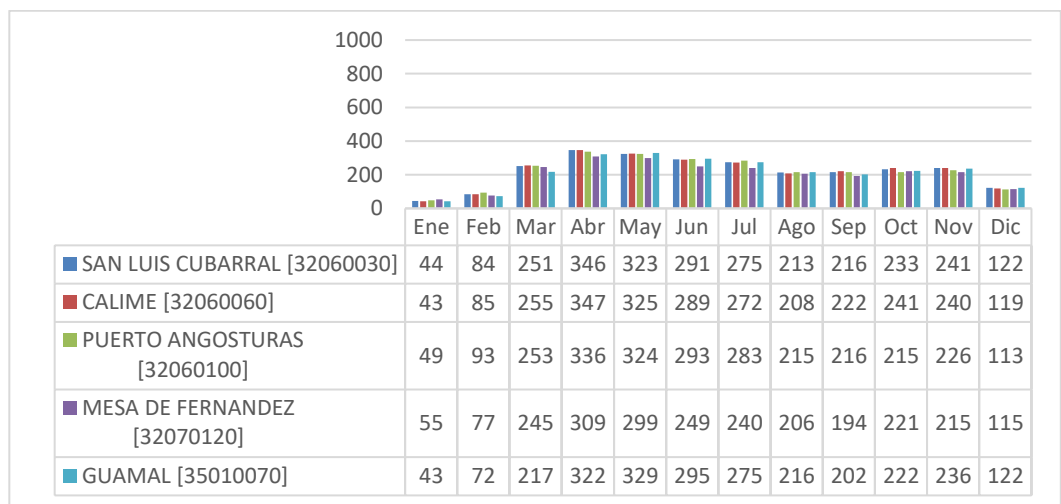


Figura 21: Precipitación mensual multianual para el piedemonte, según datos de las imágenes satelitales.

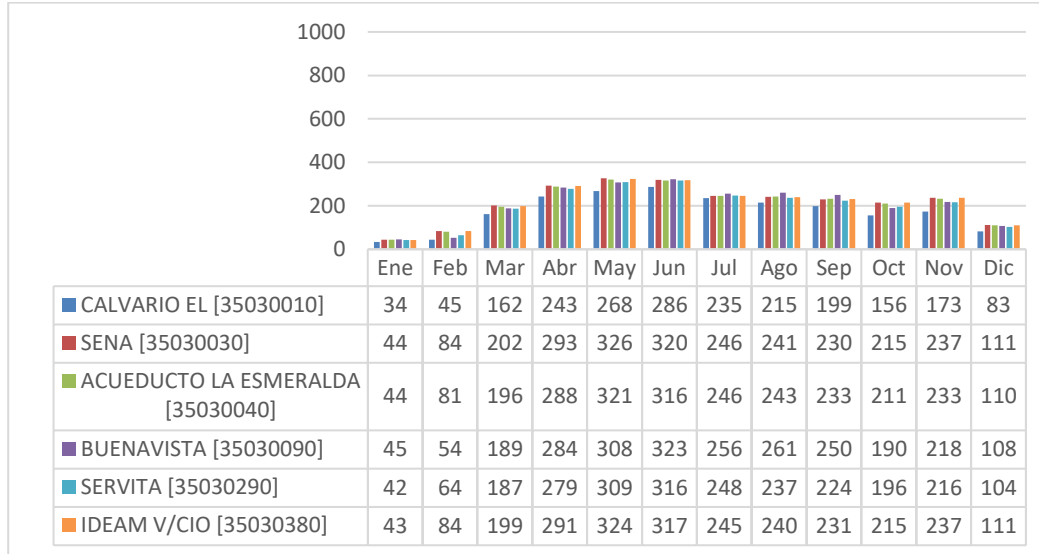


Figura 22: Precipitación mensual multianual para el piedemonte, según datos de las imágenes satelitales.

6.2.3 Comportamiento de la precipitación en la Llanura Amazónica

La Llanura Amazónica, según las imágenes satelitales, presenta montos de precipitación desde los 1.700 hasta los 2.800 mm anuales (Anexo D). En esta subregión, las imágenes satelitales también subestimaron los valores máximos de precipitación, reportando datos inferiores a los reportados por las estaciones.

Para el 2014 se reportaron rangos de precipitación entre 1.800 y 2.200 mm anuales, para el 2015 entre 1.700 y 2.100 mm anuales, para el 2016 entre 2.300 y 2.500 mm anuales, para el 2017 entre 2.600 y 2800 mm anuales, y para el 2018 entre 2.000 y 2.300 mm anuales (Anexo D). Se observa que no existe una clara diferenciación de los rangos de precipitaciones entre los diferentes años, mostrando como las imágenes satelitales parecen

reportar de forma incorrecta el comportamiento temporal de la precipitación, debido a los valores altos de precipitación de esta zona. Castro Loaiza (2014) menciona que los índices de detección de los satélites meteorológicos tienen una tendencia de reportar mejores resultados para intensidades bajas de precipitación. A pesar de que Castro trabajó con productos del TRMM, el cual tenía tecnologías de detección menos actuales que le GPM, ambos satélites presentan la misma tendencia de representar mejor las intensidades bajas de precipitación, teniendo una deficiencia para la representación de las intensidades altas de precipitación.

Según diversos estudios, los productos TRMM en general han demostrado tener un comportamiento razonable a escalas mensuales. Sin embargo, es común que las intensidades altas de precipitación sean subestimadas y las bajas intensidades sobrestimadas (Habib et al., 2009). Por otra parte, los productos del GPM presentan la misma deficiencia para estimar correctamente las precipitaciones altas, pero los nuevos sensores de radar equipados en el GPM permite estimar las precipitaciones ligeras mucho mejor que su predecesor.

Según los valores de precipitación mensual promedio multianual para el periodo de tiempo estudiado se tiene que los meses más secos fueron enero, febrero y diciembre, con valores de precipitación entre 52 y 112 mm mensuales. Por otra parte, los meses de abril, mayo, junio y julio son los meses más lluviosos, con valores de precipitación entre 187 y 327 mm mensuales (

Figura 23).

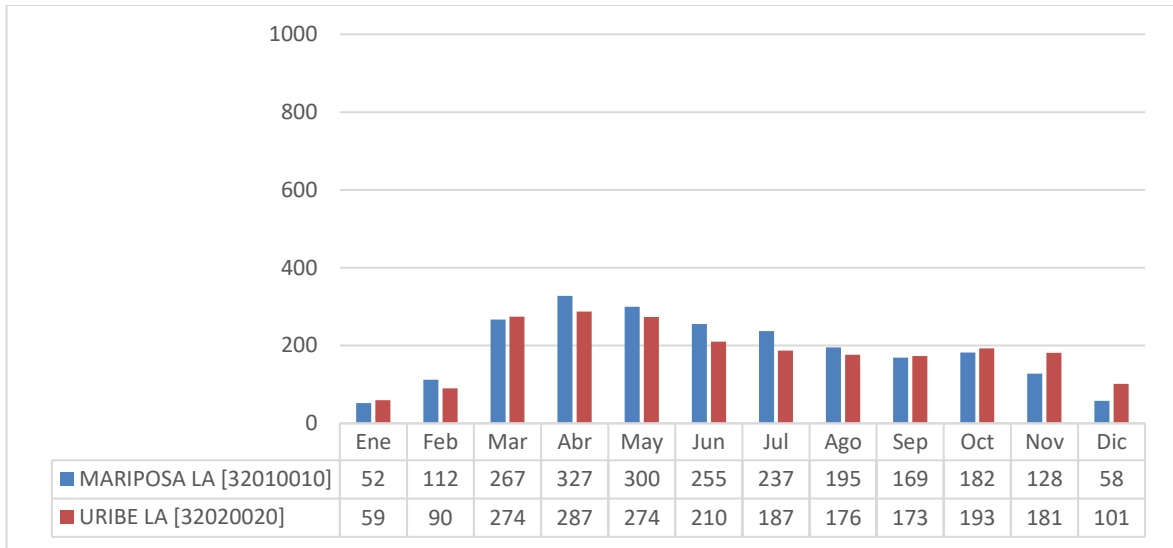


Figura 23: Precipitación mensual multianual para la llanura amazónica, según datos de las imágenes satelitales.

En general, los resultados encontrados en este apartado concuerdan con lo planteado por Ochoa *et al.* (2014) y Ward *et al.* (2011) quienes afirman que las imágenes satelitales, de forma cualitativa, representan adecuadamente el comportamiento de la precipitación; mientras que, cuantitativamente, el valor de precipitación no llega al 100% de certeza, quedando en un rango de 60% - 90%.

6.3 Evaluación del desempeño de las imágenes del sensor GPM frente a las mediciones de las estaciones meteorológicas en el Meta

Para la evaluación de las estimaciones de precipitación del satélite GPM con respecto a los datos medidos por las estaciones meteorológicas se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, así como la regresión lineal simple entre los datos.

Los resultados obtenidos se dividieron en cuanto al análisis a nivel temporal y análisis a nivel regional, ya que en cada uno de estos se reportaron comportamientos diferentes en la correlación.

En general, al estimar el valor de correlación de Pearson y calcular la regresión lineal para todos los datos de precipitación de las imágenes satelitales, respecto a los datos de las estaciones meteorológicas, se obtuvieron valores de correlación = 0,65, mientras que el coeficiente de determinación arrojó una confiabilidad de los datos de 32%.

Lo anterior muestra cómo existe una correlación aceptable para estos datos, según el resultado de Pearson. Por otra parte, la regresión lineal muestra si es posible generar una ecuación (modelo) que represente la relación existente entre ambas (Amat Rodrigo , 2016). Dado el resultado obtenido (32% de confiabilidad de modelo), resulta muy difícil intentar predecir con exactitud el comportamiento de la precipitación a partir de las imágenes.

6.3.1 Análisis a nivel temporal

Con relación al coeficiente de Pearson (γ) se obtuvieron correlaciones significativas de 0,71 y 0,76 para los años 2016 y 2018, mientras que la correlación fue más baja en el 2014 con 0,41, la cual se interpreta como una correlación débil. Para los resultados del coeficiente de determinación se obtuvieron valores por debajo de 0,5, lo cual refleja una confiabilidad del modelo menor del 50% (Figura 24).

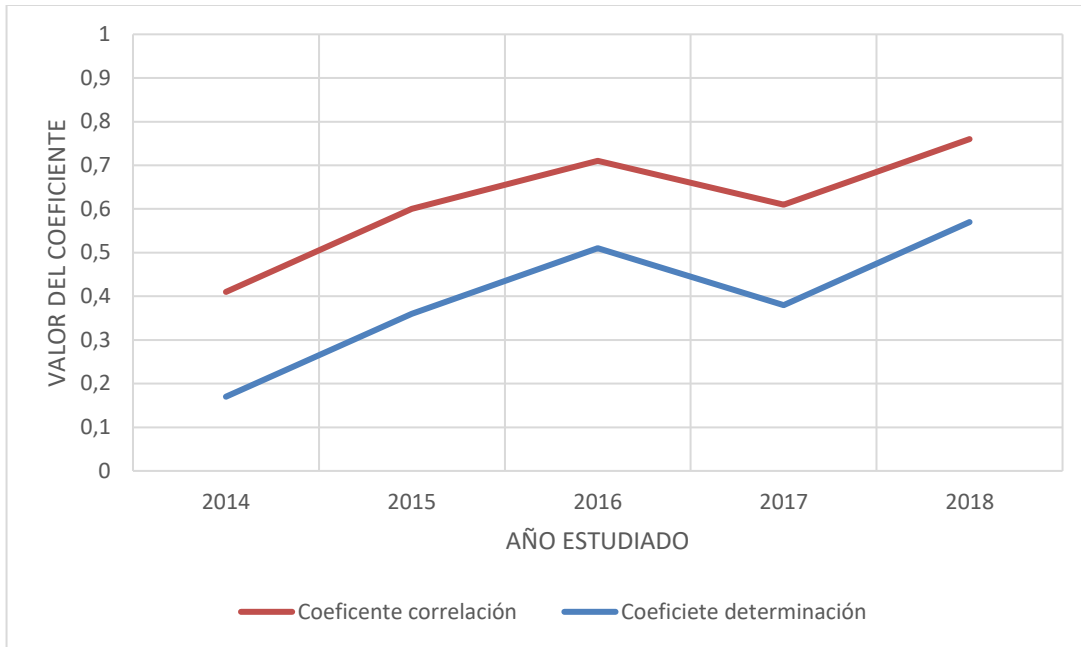


Figura 24: Coeficientes por años.

En general el coeficiente de correlación es moderado, lo cual es aceptable para investigaciones de este tipo, por otra parte, el coeficiente de determinación presenta valores débiles, por lo que crear un modelo de representación de la precipitación a partir de imágenes satelitales por años sea poco confiable. Según los datos de covarianza del coeficiente de regresión, las imágenes satelitales tienden a subestimar los valores de precipitación, sin embargo, esta subestimación es pequeña (Tabla 5).

Tabla 5: Covarianza del coeficiente de regresión para cada año.

Año	2014	2015	2016	2017	2018
Covarianza Coef. de regresión	-0,18	-0,12	-0,17	-0,19	-0,14

Al analizar las correlaciones obtenidas para cada mes del año, se obtuvieron correlaciones aceptables (0,50 - 0,69) para los primeros y últimos meses del año, los cuales

coinciden con las temporadas secas, mientras que para los meses de mitad de año (de abril a julio) se obtuvieron correlaciones débiles (0,20 - 0,49) y muy débiles (0,10 - 0,19), coincidiendo con la temporada de lluvias. Los resultados obtenidos para el coeficiente de correlación se pueden catalogar como moderada (Figura 25). El coeficiente de determinación presenta valores cercanos a cero al analizarlos por cada mes, mostrando una confiabilidad pobre para la representación de la precipitación de las imágenes satelitales con relación a cada mes.

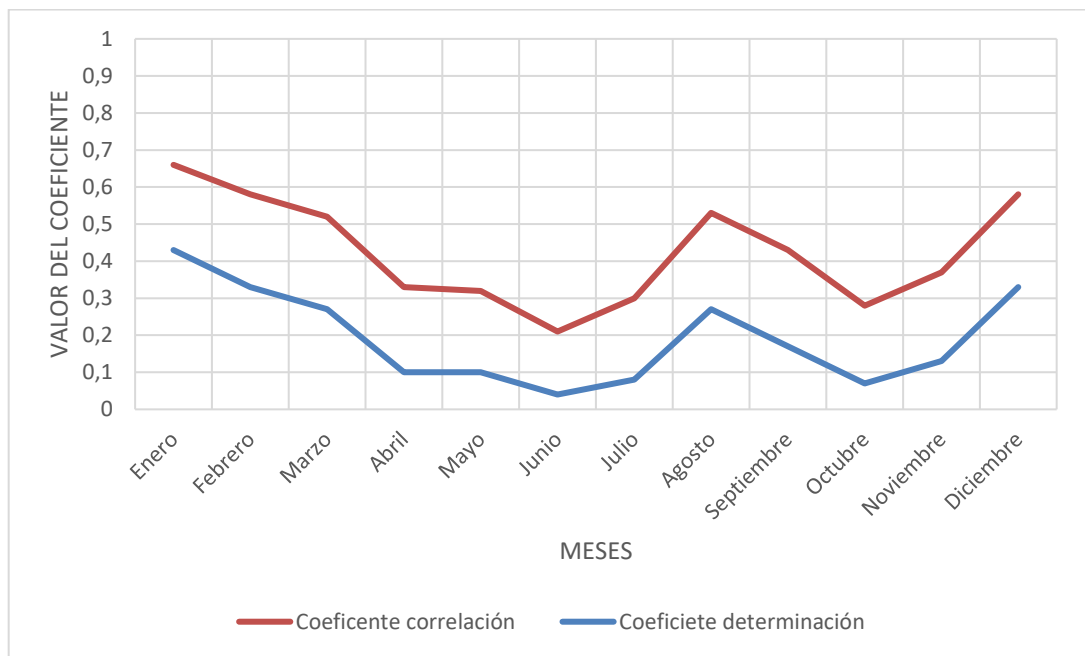


Figura 25: Coeficiente por meses.

Al revisar los resultados de la covarianza se observó como las imágenes satelitales vuelven a subestimar la precipitación reportada, siendo aún más notorio para los meses de abril a julio, los cuales son los meses que reportan las precipitaciones más altas para todo el Meta. Estos resultados muestran que las imágenes satelitales tienen una fuerte deficiencia para representar los valores extremos de precipitación los cuales pueden asociarse a eventos de fuertes lluvias (Tabla 6).

Tabla 6: Covarianza del coeficiente de regresión para cada mes.

Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Covarianza Coef. de regresión	-0,09	-0,09	-0,33	-1,16
Meses	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Covarianza Coef. de regresión	-0,89	-0,62	-0,52	-0,32
Meses	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Covarianza Coef. de regresión	-0,31	-0,31	-0,27	-0,23

Los resultados del coeficiente de correlación para la temporada seca muestran valores superiores a la temporada de lluvias, mostrando como las imágenes satelitales no son buenas para representar valores altos de precipitación el cual, históricamente, ha sido una deficiencia para este tipo de imágenes (NASA, 2018) (NASA, 2019). Por otra parte, los nuevos sensores de radar que emplea el GPM para medir lluvias ligeras parece ser eficiente, logrando estimar con una mayor precisión la precipitación para los meses con valores bajos del mismo, lo cual se ve reflejado en los resultados de la correlación con valores superiores a 0,5 para la correlación, y una confiabilidad en los datos superior al 30% (Tabla 8: Resultados de la correlación temporal. Tabla 8). El coeficiente de determinación para los meses lluviosos presenta resultados entre 20% y 5%, los cuales representan una confiabilidad muy débil por parte de las imágenes satelitales.

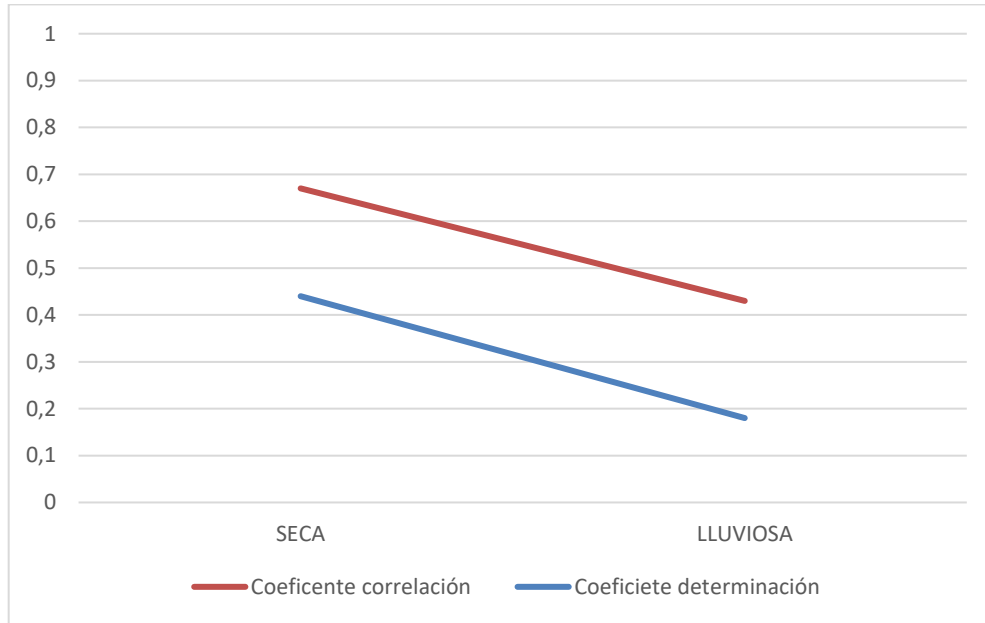


Figura 26: Coeficiente por temporada.

Al obtener la covarianza del coeficiente de regresión por temporadas se obtuvo nuevamente que las imágenes satelitales subestiman la precipitación real pero, a diferencia de los reportado para cada mes, la subestimación es baja (menos a 0,1), lo cual significa que, al analizar los datos de las imágenes en función de las temporadas, se puede obtener una mejor estimación del valor real de precipitación, a diferencia de analizarlos en función de los meses, los cuales al presentar un rango de valores tan variados, presenta una covarianza mucho menor (Tabla 7).

Tabla 7: Covarianza del coeficiente de regresión por temporadas.

Temporada	Seca	Lluvias
Covarianza Caer. de regresión	-0,08	-0,05

Tabla 8: Resultados de la correlación temporal.

CORRELACIÓN TEMPORAL						
Año	2014	2015	2016	2017	2018	
Coefficiente Correlación	0,41	0,6	0,71	0,61	0,76	
Coefficiente Determinación	0,17	0,36	0,51	0,38	0,57	
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Coefficiente Correlación	0,66	0,58	0,52	0,33	0,32	0,21
Coefficiente Determinación	0,43	0,33	0,27	0,10	0,10	0,04
Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Coefficiente Correlación	0,3	0,53	0,43	0,28	0,37	0,58
Coefficiente Determinación	0,08	0,27	0,17	0,07	0,13	0,33
Temporada	SECA			LLUVIOSA		
Coefficiente Correlación	0,67			0,43		
Coefficiente Determinación	0,44			0,18		

Estos resultados presentan el mismo comportamiento que los obtenidos por Simbaqueba (2018), quien reportó valores más altos de correlación para los primeros meses del año usando producto del satélite TRMM, teniendo resultados de entre 0,50 y 0,69, los cuales él consideraba aceptables, mientras que para los meses de mitad de año él reportó valores de correlación entre 0,3 y 0,50. En cuanto a otros estudios realizados con el satélite GPM, Cabrera Atencia (2016) reportó que los productos IMERG estiman correctamente la precipitación con ligera sobreestimación para los meses secos con correlaciones superiores a 0,6, excepto para los meses de mucha lluvia como Abril y Mayo, los cuales presentan diferencias altas de precipitación entre pluviómetro y satélite, teniendo correlaciones inferiores a 0,5.

6.3.2 Análisis a Nivel regional

Al realizar los estudios para el componente espacial, se obtuvieron resultados favorables con correlaciones mucho más altas que las reportadas para el componente temporal.

Para la subregión de la altillanura se obtuvo el mejor resultado de correlación el cual fue de 0,77, seguido del piedemonte con 0,74, y, por último, la llanura amazónica con 0,62, todos los tres resultados siendo aceptables.

Los resultados de coeficiente de determinación también son favorables, teniendo valores de 60% y 50% para la altillanura y el piedemonte respectivamente, mostrando una confiabilidad en los datos moderada; mientras que para la llanura amazónica se obtuvo una confiabilidad de 37% (Figura 27). Estas diferencias se pueden deber a que la llanura amazónica tiene datos significativamente menores a los de las otras dos regiones, lo cual la hace más susceptible a las diferencias entre los datos de las estaciones y de las imágenes satelitales, mientras que la altillanura y el piedemonte tienen datos más robustos, teniendo así una susceptibilidad menor y, por consiguiente, una mayor correlación.

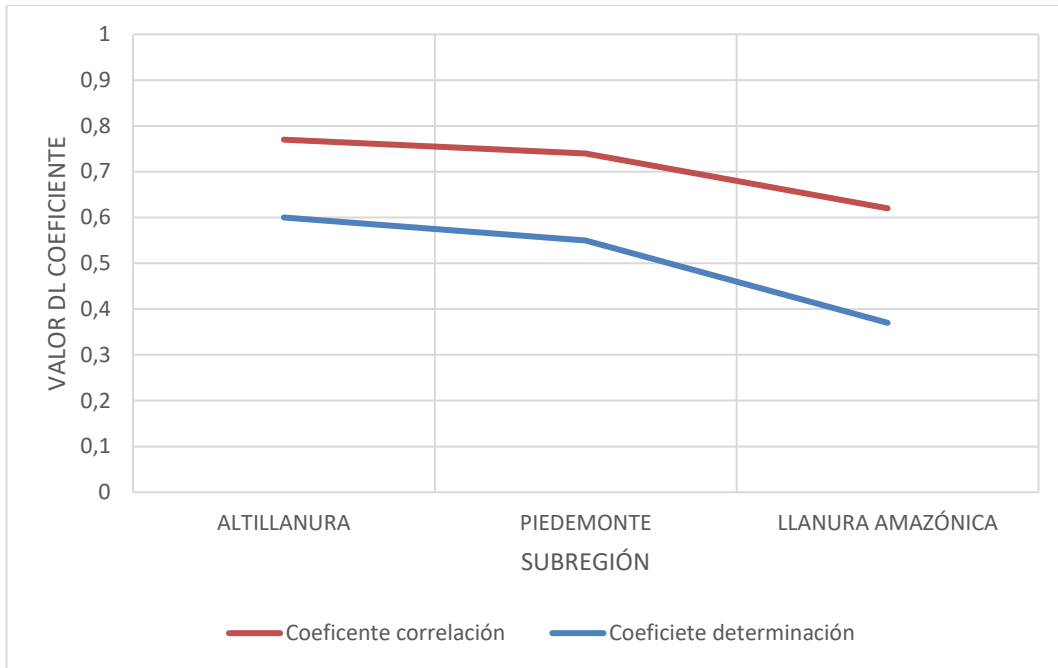


Figura 27: Coeficiente por subregión.

Los resultados de covarianza del coeficiente de regresión muestran, al igual que en los casos anteriores, una subestimación de la precipitación por parte de las imágenes satelitales. Se observa como el piedemonte presenta los valores más altos de subestimación, debido a que esta subregión presenta los valores de precipitación más altos de todo el Meta.

Tabla 9: Covarianza del coeficiente de regresión por subregiones.

Temporada	Altillanura	Piedemonte	Llanura Amazónica
Covarianza Coef. de regresión	-0,08	-0,43	-0,06

Al sacar la correlación para cada estación, se obtuvieron resultados muy favorables, con datos entre 0,61 y 0,92, con un promedio de correlación para todas las estaciones de 0,82 (Figura 28) (Tabla 11). Cabrera Aitiencia (2016) y Castro Loayza (2014) reportan

resultados muy similares al analizar las correlaciones por estaciones: Cabrera presenta correlaciones entre 0,77 y 0,92, mientras que Castro reporta correlaciones de 0,75 a 0,90. Estos autores aseguran en sus conclusiones que los productos satelitales proporcionan información concisa y aceptable sobre la estimación cuantitativa de la precipitación. El coeficiente de determinación obtuvo sus valores más altos al sacarlos para cada estación, teniendo casi la totalidad de estos del 60%, esto le aporta una confiabilidad significativa a la representación de la precipitación por parte de las imágenes satelitales.

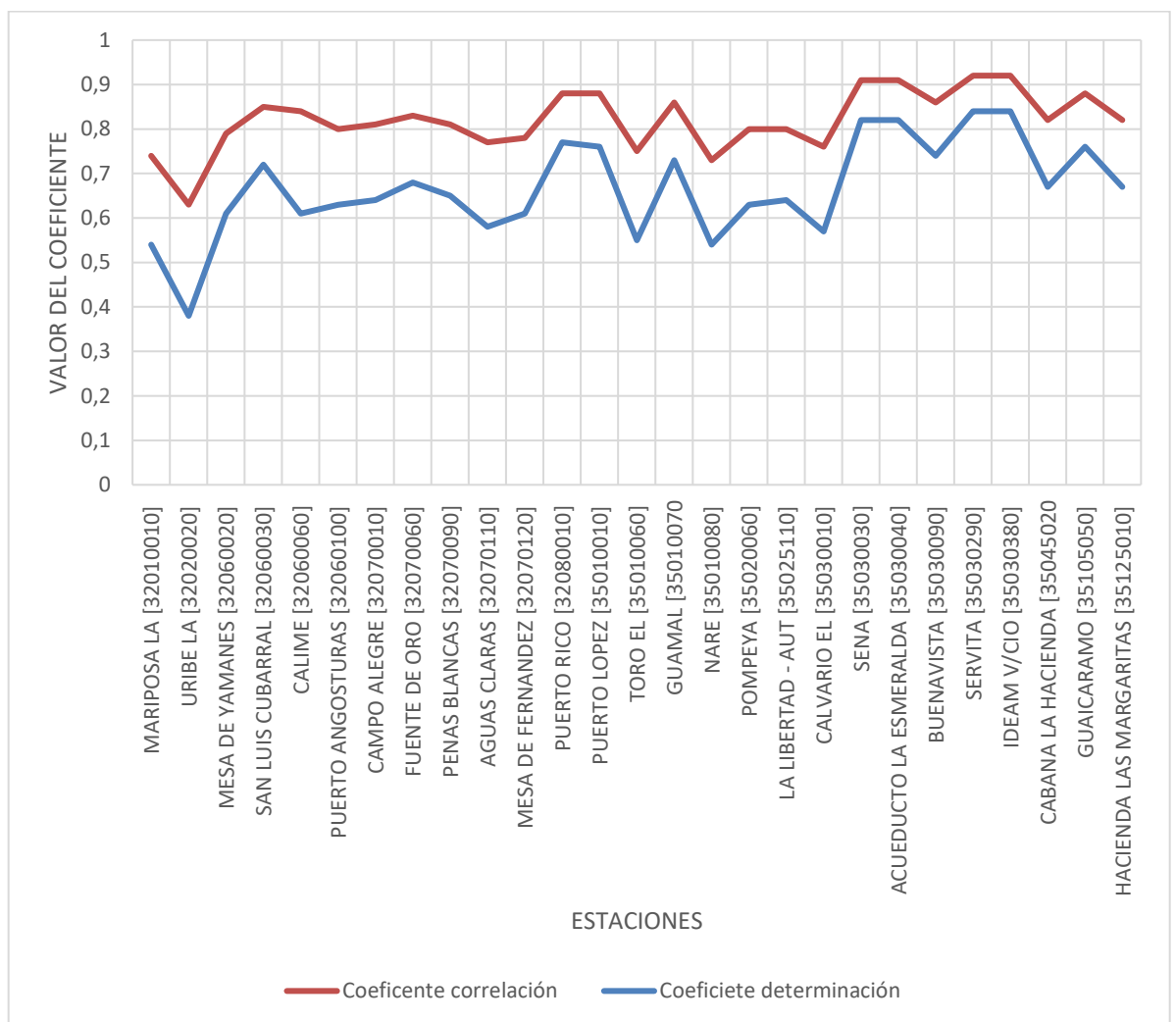


Figura 28: Coeficiente por estaciones.

Al analizar la covarianza del coeficiente de regresión para cada estación, encontramos que las imágenes satelitales siguen subestimando la precipitación, lo cual siempre se repite. En cuanto a los valores reportados, estos rondan entre -0,27 y -1,96, mostrando que, para unas estaciones, la subestimación de los valores es menor al 20%, mientras que para otras supera el 100%, llegando a ser casi el 200% del valor de precipitación real (Tabla 10).

Tabla 10: Covarianza del coeficiente de regresión por estaciones.

Estación	MARIPOSA LA [32010010]	URIBE LA [32020020]	MESA DE YAMANES [32060020]	SAN LUIS CUBARRAL [32060030]	CALIME [32060060]	PUERTO ANGOSTURAS [32060100]	CAMPO ALEGRE [32070010]	FUENTE DE ORO [32070060]	PENAS BLANCAS [32070090]
Covarianza Coef. de regresión	-1,04	-0,7	-1,03	-0,64	-0,77	-0,89	-0,94	-0,87	-0,67
Estación	AGUAS CLARAS [32070110]	MESA DE FERNANDEZ [32070120]	PUERTO RICO [32080010]	PUERTO LOPEZ [35010010]	TORO EL [35010060]	GUAMAL [35010070]	NARE [35010080]	POMPEYA [35020060]	LA LIBERTAD - AUT [35025110]
Covarianza Coef. de regresión	-1,03	-0,76	-0,74	-0,79	-1,37	-0,63	-1,96	-0,97	-1,24
Estación	CALVARIO EL [35030010]	SENA [35030030]	ACUEDUCTO LA ESMERALDA [35030040]	BUENAVISTA [35030090]	SERVIT A [35030290]	IDEAM V/CIO [35030380]	CABANA LA HACIENDA [35045020]	GUAICARAMO [35105050]	HACIENDA LAS MARGARITAS [35125010]
Covarianza Coef. de regresión	-0,86	-0,48	-0,42	-0,41	-0,27	-0,37	-1,1	-0,7	-0,99

Tabla 11: Resultados para la correlación espacial.

CORRELACIÓN ESPACIAL									
Subregión	ALTILLANURA			PIEDEMONTE			LLANURA AMAZÓNICA		
Coefficiente Correlación	0,77			0,74			0,62		
Coefficiente Determinación	0,60			0,50			0,37		
Estación	MARIPOSA LA [32010010]	URIBE LA [32020020]	MESA DE YAMANES [32060020]	SAN LUIS CUBARRAL [32060030]	CALIME [32060060]	PUERTO ANGOSTURAS [32060100]	CAMPO ALEGRE [32070010]	FUENTE DE ORO [32070060]	PENAS BLANCAS [32070090]

Coefficiente Correlación	0,74	0,63	0,79	0,85	0,84	0,8	0,81	0,83	0,81
Coefficiente Determinación	0,54	0,38	0,61	0,72	0,61	0,63	0,64	0,68	0,65
Estación	AGUAS CLARAS [32070110]	MESA DE FERNANDEZ [32070120]	PUERTO RICO [32080010]	PUERTO LOPEZ [35010010]	TORO EL [35010060]	GUAMAL [35010070]	NARE [35010080]	POMPEYA [35020060]	LA LIBERTAD - AUT [35025110]
Coefficiente Correlación	0,77	0,78	0,88	0,88	0,75	0,86	0,73	0,8	0,8
Coefficiente Determinación	0,58	0,61	0,77	0,76	0,55	0,73	0,54	0,63	0,64
Estación	CALVARIO EL [35030010]	SENA [35030030]	ACUEDUC TO LA ESMERALDA [35030040]	BUENAVISTA [35030090]	SERVITA [35030290]	IDEAM V/CIO [35030380]	CABANA LA HACIENDA [35045020]	GUAICARAMO [35105050]	HACIENDA LAS MARGARITAS [35125010]
Coefficiente Correlación	0,76	0,91	0,91	0,86	0,92	0,92	0,82	0,88	0,82
Coefficiente Determinación	0,57	0,82	0,82	0,74	0,84	0,84	0,67	0,76	0,67

Se puede resaltar la manera en que los resultados de correlación son más exactos a medida que la correlación es más puntual. La correlación de varias estaciones muy separadas espacialmente entre sí arrojó resultados inferiores a las estaciones independientes, debido a las variabilidades espaciales del comportamiento de la precipitación. Lo anterior significa que, al realizar estudios de correlación, resulta mejor hacerlos para cada estación por separado.

Se observa como las imágenes satelitales suelen subestimar los valores de precipitación para todos los casos analizados, al igual que lo reportado por Cabrera Aitencia (2016) y Castro Loayza (2014), siendo esta subestimación más notoria en los casos donde las precipitaciones fueron las más altas, ya sean en meses, subregiones o estaciones en sí. Sin embargo, es de resaltar que las correlaciones para los casos de muy poca precipitación

fueron fuertes, teniendo una subestimación de precipitación muy baja. Esto se le puede atribuir a que el satélite GPM cuenta con un sensor que permite identificar mejor las lluvias ligeras (NASA, 2019), lo cual muestra su superioridad con respecto al satélite TRMM para representar con mayor exactitud estos valores, coincidiendo con lo concluido por Cabrera (2016).

Con una correlación promedio de 0,8, y una confiabilidad de los datos del 60%, se presentan a continuación los estimados de precipitación reportados por el satélite GPM para el departamento del Meta.

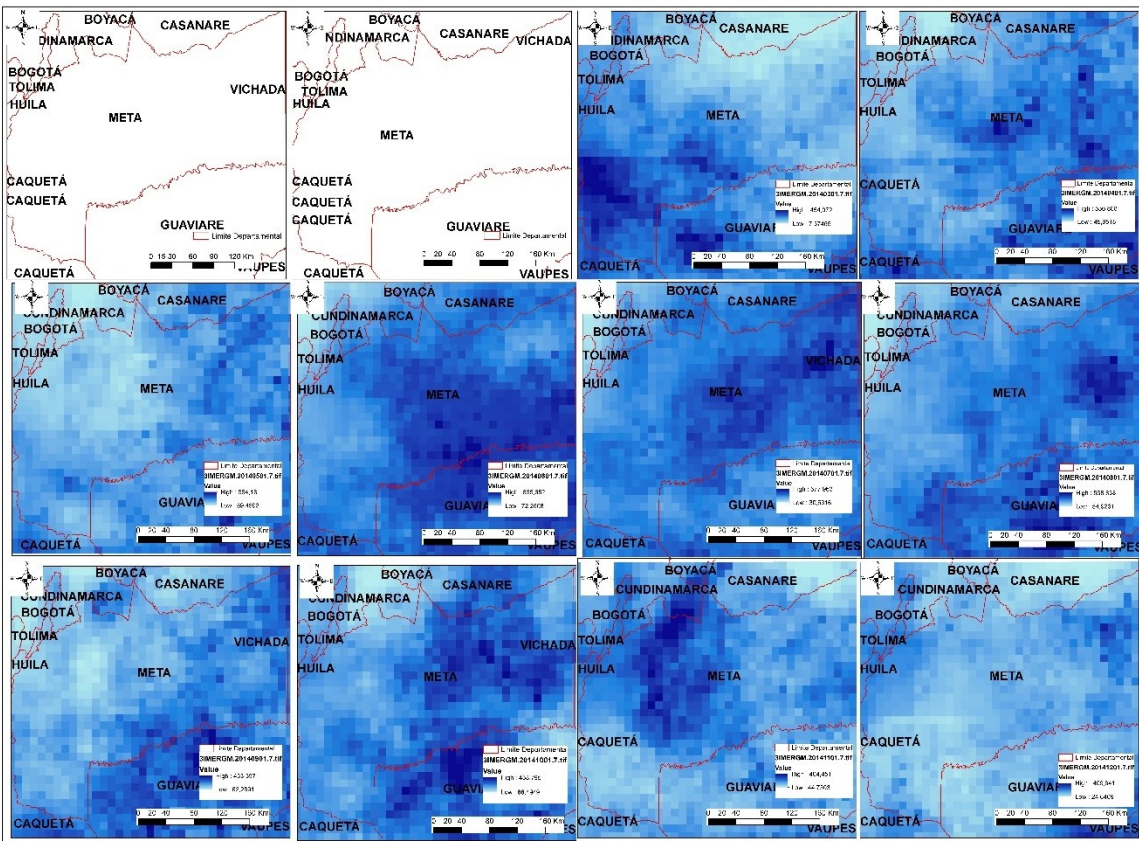


Figura 29: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2014.

*De izquierda a derecha, de arriba abajo: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre.

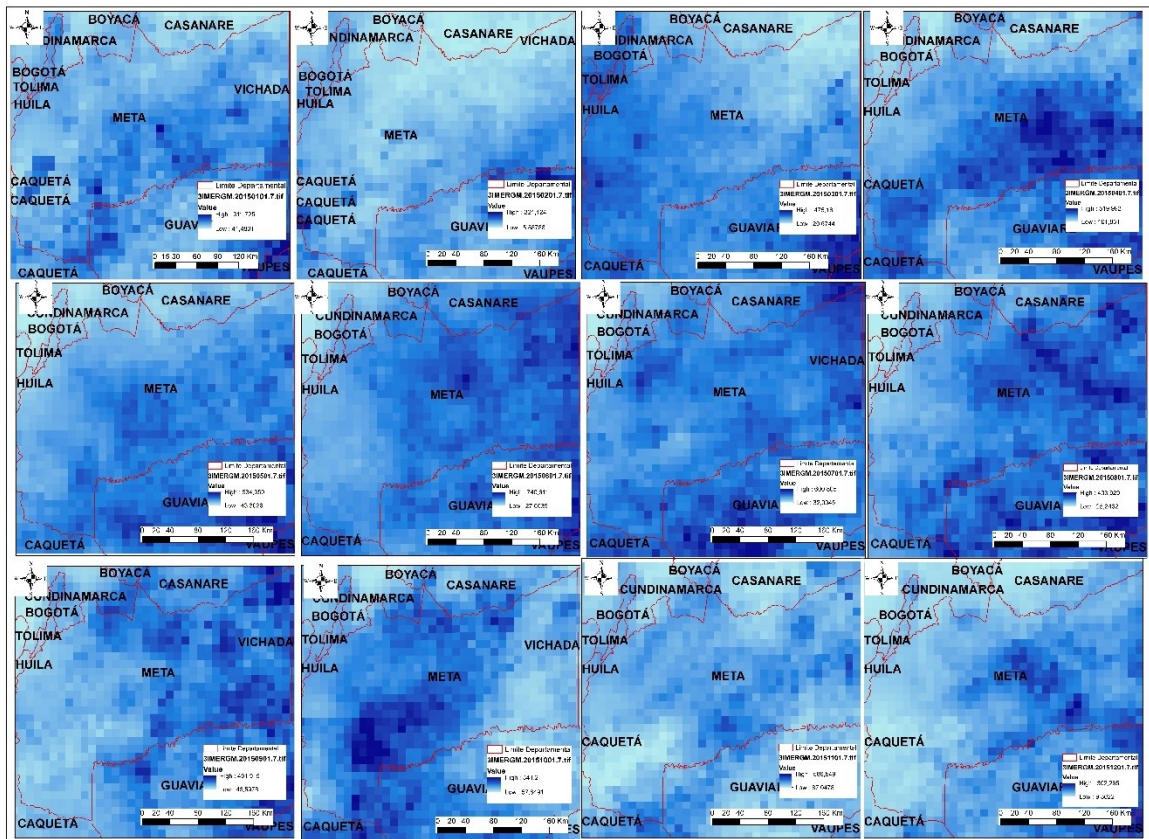


Figura 30: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2015.

*De izquierda a derecha, de arriba abajo: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre.

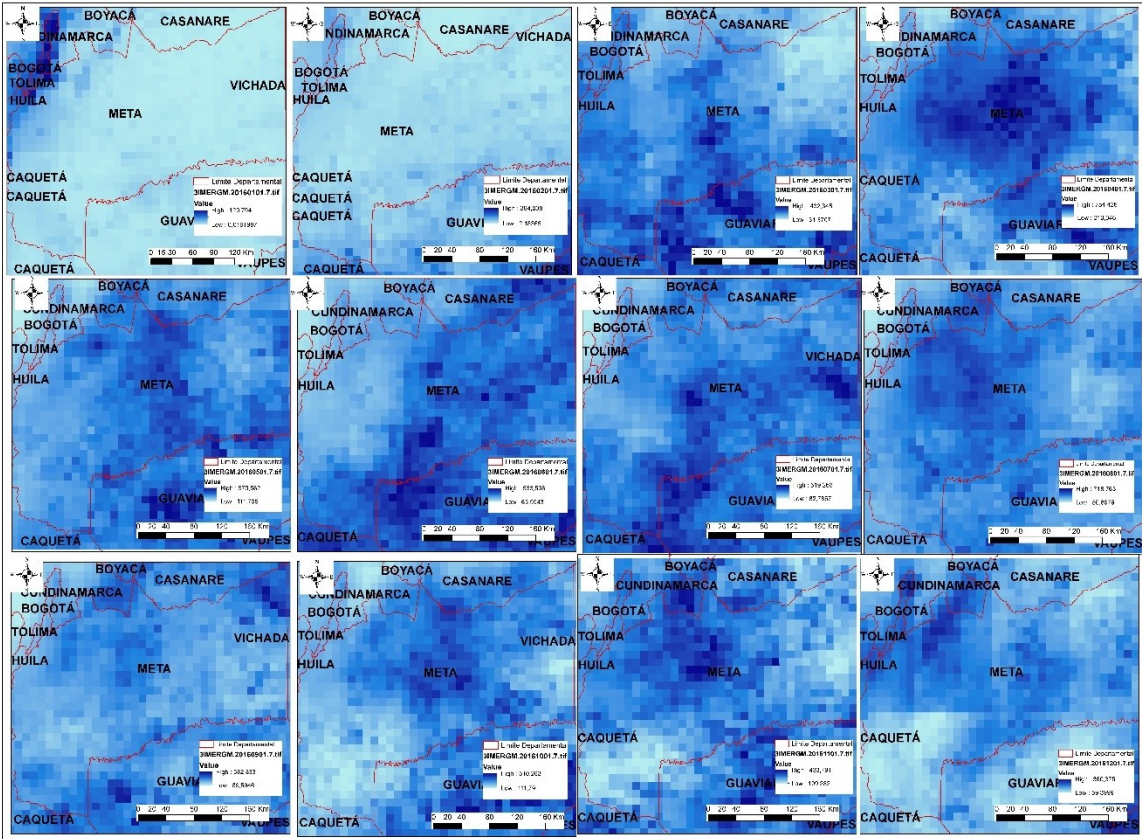


Figura 31: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2016.

*De izquierda a derecha, de arriba abajo: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre.

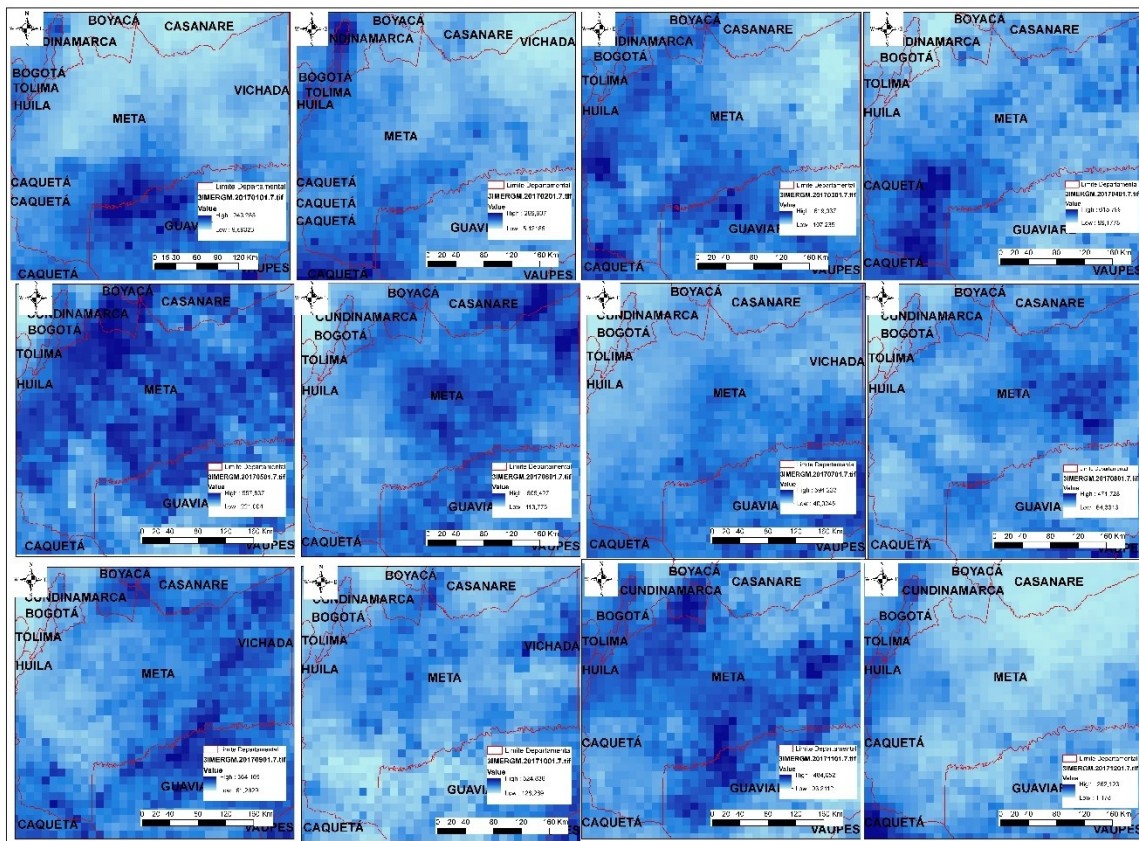


Figura 32: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2017.

*De izquierda a derecha, de arriba abajo: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre.

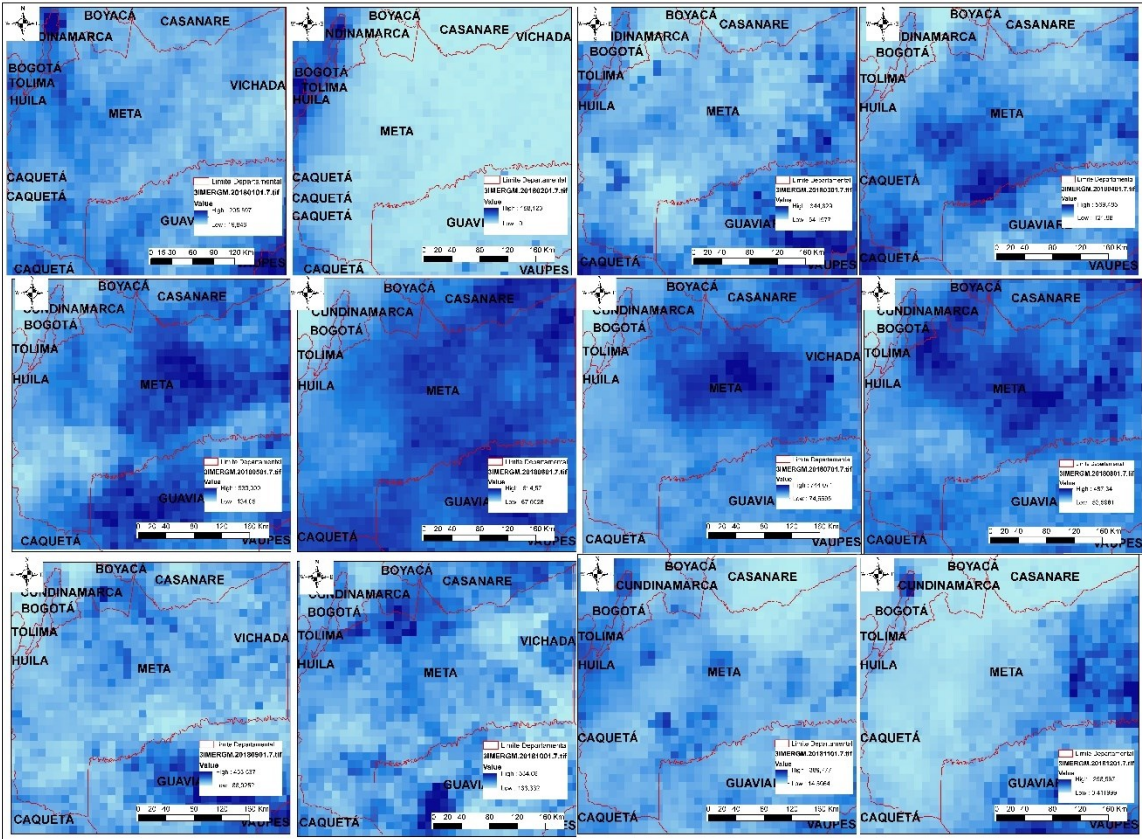


Figura 33: Precipitación estimada para el departamento del Meta a partir de imágenes satelitales, año 2018.

*De izquierda a derecha, de arriba abajo: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre.

7. Conclusiones

Del total de estaciones solicitadas al IDEAM (50) solo 27 fueron útiles para la presente investigación, mostrando como el 46% de las estaciones presentan una gran ausencia de datos en sus registros históricos, evidenciando la poca confiabilidad que representan este tipo de mediciones. Del total de estaciones solicitadas menos de 10 (20%) no tienen datos en sus registros, algo más de 15 estaciones (30%) presentan de uno a 5 datos faltantes por mes (hasta un 16% de ausencia de datos), mientras que unas 10 estaciones tienen desde uno hasta 4 meses por año con ausencia total de datos, lo que no las permite su utilización para estudios de precipitación. La mayoría de estas estaciones podemos ubicarlas en la llanura amazónica y en las zonas más al oriente de la altillanura, lugares que históricamente son considerados de difícil acceso y se encuentran alejados de cascos urbanos importantes, lo cual demuestra la poca atención que las entidades de gobierno les prestan a estos sectores.

Los datos de precipitación obtenidos de las estaciones meteorológicas son concordantes con lo presentado en otros estudios, en donde cada subregión presentó rangos de precipitación similares a los reportados por Minorta y Rangel (2014) y por Simbaqueba (2018), mostrando que estas subregiones suelen presentar un comportamiento similar a lo largo del tiempo. También es de resaltar como el Fenómeno del Niño influenció en los rangos de precipitación para los años en los cuales se presentó, los cuales mostraron valores menores de precipitación que los demás años.

La cobertura de estaciones meteorológicas en relación con el tamaño del área de estudio (85.481,29 km²) es muy baja, aproximadamente una estación cada 3.100 km², lo anterior es importante al momento de realizar análisis regionales de la precipitación. Más aún teniendo en cuenta que la mayoría de las estaciones se concentran en una zona en particular del territorio (el noroccidente), dejando un área extensa del territorio desprovisto totalmente de estaciones (el oriente y suroriente).

Respecto a los datos del sensor GPM se puede concluir de manera general que representan de manera acertada el comportamiento de la precipitación, mostrando de forma adecuada cuales fueron las temporalidades más secas y cuales las más lluviosas, al igual que con las subregiones, sin embargo, no es muy exacto al momento de representar los valores de precipitación, sobre todo para los periodos de mucha precipitación.

Respecto a las mediciones de correlación se puede afirmar que el producto GPM IMERG V6 representó de manera aceptable el comportamiento de la precipitación para periodos de tiempo sin precipitaciones extremas. Para los meses de enero, febrero, marzo, agosto y diciembre se registraron valores de correlación en su mayoría de entre 0,52 y 0,66, considerándose como aceptables, mientras que para los demás meses la correlación arrojó valores inferiores a 0,50, lo cual tiene relación directa con las temporadas de lluvias y, más directamente, con los valores extremos de precipitación, lo cual se puede apreciar mejor gracias a los resultados de la regresión lineal, la cual muestra una relación cercana a 0,1 para los meses más lluviosos. Para la temporada de lluvias la correlación fue de 0,43, mientras

que la temporada seca tuvo una correlación de 0,67, evidenciando las limitaciones del satélite GPM para representar valores altos de precipitación.

Para la altillanura y el piedemonte las correlaciones fueron significativas, siendo de 0,77 y 0,74 respectivamente, no siendo igual para la llanura amazónica para la cual se reportó una correlación de 0,62, esto debido no tanto al sensor sino más al hecho que para esta subregión se emplearon solo dos estaciones, lo cual la vuelve más susceptible a las diferencias de precipitación.

Las correlaciones por estaciones arrojaron un promedio de 0,82, considerándose correlaciones fuertes (82-95), teniendo valores de regresión lineal en promedio de 0,70, lo cual se cataloga como significativo (70-81) y demuestra que la relación entre los datos de las estaciones meteorológicas y las imágenes satelitales es considerable. Así los resultados obtenidos a partir de imágenes del satélite GPM resultan aceptables para la representación de la precipitación, principalmente en condiciones donde no se presente precipitaciones fuertes, la cual sigue siendo una debilidad de este sensor.

La altillanura fue la subregión que reportó la correlación más alta, junto con la subestimación de precipitación más baja, lo cual muestra que se puede replicar este estudio para otros departamentos en donde se cuente con esta misma subregión.

El piedemonte, a pesar de contar con una correlación significativa, presentó valores de subestimación de la precipitación muy altos, por lo que se aconseja tener precaución al momento de realizar estudios en estas subregiones, principalmente en temporadas de lluvias.

Para las estaciones se obtuvo resultados de coeficiente de determinación promedio superior al 0,6, lo cual representa una confiabilidad en el modelo de representación de la precipitación por parte de las imágenes satelitales superior al 60%, considerándose un resultado significativo, teniendo en cuenta que se trata del comportamiento de un fenómeno natural, difícil de predecir.

8. Recomendaciones

Aunque el comportamiento de la precipitación pueda ser similar para una misma subregión, a lo largo de la misma los rangos de precipitación pueden variar, por consiguiente, se recomienda realizar estudios similares para otros departamentos con estas mismas subregiones, para identificar las diferencias de precipitación en estas y, de esta forma, realizar una mejor caracterización de la precipitación para estas subregiones.

Dado que el satélite GPM ha demostrado describir de forma acertada el comportamiento de la precipitación, se recomienda seguir empleándolo para conocer el comportamiento de la precipitación, sobre todo en sectores donde no se cuente con una red de estaciones meteorológicas.

El coeficiente de correlación de Pearson ha demostrado ser una herramienta versátil para la correlación de datos de estaciones e imágenes satelitales, la cual se ha utilizado en numerosas investigaciones de este tipo. Se recomienda seguir empleando este coeficiente para este tipo de estudios.

El coeficiente de determinación, si se emplea junto a la regresión lineal simple, se pueden obtener modelos que representen el comportamiento de la precipitación a partir de imágenes satelitales. Dado que el coeficiente de determinación presentó mejores resultados para cada estación por separado, se recomienda usarse de este modo si se quiere encontrar un modelo que represente la precipitación.

La covarianza del coeficiente de regresión demostró como es el comportamiento de las imágenes satelitales al momento e sobreestimar o subestimar la precipitación, resulta indispensable para estudios similares con el fin de entender las deficiencias de las imágenes satelitales para representar la realidad de forma correcta.

Como el satélite GPM ha demostrado representar con mayor exactitud las precipitaciones ligeras frente a su antecesor el TRMM, es recomendable realizar futuras investigaciones basados en productos del GPM.

9. Referencias

- Amat Rodrigo , J. (2016). *Correlación lineal y Regresión lineal simple*. GitHub.
- Andrades R., M., & Múnez L., C. (2012). *Fundamentos de climatología*. Universidad de la Rioja.
- Anónimo. (24 de Agosto de 2019). *Ecosystem Accounts Planned for Stragic Orinoquia Region of Colombia*. Obtenido de www.wavespartnership.org
- Anónimo. (22 de Agosto de 2019). *Mecanismos de condensación precipitación*. Obtenido de www.um.es/geograf/clima/tema05.pdf
- Anónimo. (24 de Febrero de 2020). *Geographic Regions of Colombia*. Obtenido de www.discovercolombia.com
- ARSET, A. R. (15 de Septiembre de 2019). *Introducción a los datos y las aplicaciones de las mediciones de la precipitación global*. Obtenido de www.arset.gsfc.nasa.gov/sities/default
- Cabrera Atiencia, E. B. (2016). *Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay*. Quito: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL.
- Caicedo Carrascal, F. M. (2008). *Asimilación de precipitación estimada por imágenes de satélite en modelos hidrológicos aglutinados y distribuidos, caso de estudio afluencias al embalse de Betania*. Bogotá D.C.: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Calle Cordero, S. (2016). *ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DE LOS SATÉLITES TRMM Y GPM, EN LAS 4 MACRO*

REGIONES CLIMÁTICAS DE BOLIVIA. La Paz: UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES.

Camacho., C. (Agosto de 24 de 2019). *Coeficiente correlación de Pearson*. Obtenido de www.personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf

Castiblanco, C., & Martínez, , G. (2002). *Manejo y Análisis de Imágenes de Satélite Aplicadas en Estudios Hidrológicos de Cuencas Mediante el SIG-GRASS*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

Castro Loayza , E. S. (2014). *Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en Región Costa, Sierra y Oriente del Ecuador*. Quito: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL .

Castro, E. S. (2014). *Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en Región Costa, Sierra y Oriente del Ecuador*. Quito: Universidad de Cuenca.

Cerro Carpio, M. (24 de Agosto de 2019). *Precipitación*. Obtenido de www.olivacordobesa.es/Precipitaci%F3n.pdf

Chen, Z., Yang, K., Liang, S., & Tang, W. (24 de Agosto de 2019). *Estimation of monthly-mean daily global solar radiation based on MODIS*. Obtenido de www.ac.els-cdn.com

Chiara, J. (22 de Agosto de 2018). *Fundamento para la medición de la precipitación*. Obtenido de www.olivacordobesa.es.

Colombani, E., Behr, S., & Brandizi, L. (2017). ESTIMACION DE PRECIPITACIONES EXTREMAS A TRAVES DE GSMAP Y APLICACIÓN HIDROLOGICA A LA

CRECIDA DEL ARROYO TELSEN, CHUBUT, PATAGONIA ARGENTINA.

Meteorologica, 53-66.

Colombia, I. D. (2004). *Ecosistemas de la cuenca del Orinoco Colombiano*. Bogotá D.C.:

Biodiversidad.

Cruz G., B. (2006). *Validación del Algoritmo Hidroestimador en la Región de Puerto*

Rico. San Juan: Universidad de Puerto Rico.

Di Rienzo, J. A., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F., Tablada, M., & Walter

Robledo, C. (5 de 5 de 2020). InfoStat. Universidad Nacional de Córdoba,

Cordoba, Argentina.

Domínguez, E. A. (2005). *Pronóstico probabilístico de afluencias para la evaluación de*

riesgos en embalses hidroeléctricos. Medellín: Avances en Recursos Hidráulicos.

H., H. (28 de Agosto de 2019). *Precipitaciones*. Obtenido de

www.agr.unne.edu.ar/Materias/Agroclima/Precipitaciones.pdf

Hobouchian, M. P., García Skabar, Y., Barrera, D., Vila, D., & Salio, P. (2017).

VALIDACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN POR SATÉLITE

APLICANDO LA TÉCNICA HIDROESTIMADOR. *Meteorologica*, 19-37.

Houze, R. A. (1993). Cloud Dynamics. *International Geophysics Series*.

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., & Xie, P.

(2015). NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE

Retrievals for GPM. *Journal of Hydrometeorology*.

Hunink, J. E., Immerzeel, W. W., & Droogers, P. (2013). *Análisis de Patrones Espaciales*

de Precipitación en la Provincia de Tungurahua .

-
- IDEAM-a. (2005). *Protocolo para la Emisión de Pronósticos Hidrológicos*. Bogotá:
Grupo de Investigación en Hidrología.
- IDEAM-b. (2007). *Pruebas Piloto de Modelación Hidrológica para Emitir Pronósticos Hidrológicos en Forma Cuantitativa y con Uso de Modelos Autorregresivos para el Horizonte Diario, Pentadal y Decadal de los Niveles de Agua*. Bogotá D.C:
Grupo de Investigación en Hidrología.
- JAXA. (6 de Octubre de 2019). *GPM Data Utilization Handbook*. Obtenido de
www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.p
- JAXA. (24 de Agosto de 2019). *Japan Aerospace Exploration Agency*. Obtenido de
www.eorc.jaxa.jp/TRMM/index_e.htm
- León Gómez , M. J., Símuta Champo, R., Vázquez Montoya, I. J., & Solano Barajas , R. (2016). *Análisis comparativo de los métodos para interpolar precipitación en el estado de Chiapas*. Chiapas.
- Linsley M, M. A., & J., P. (1994). *Hidrología para Ingenieros*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Márquez Pérez, C. I., Graciela Ustariz , M., Peña López, D. F., Caicedo Rubiano, I. H., & Cuevas Marín, A. (2016). *Fenómeno El Niño. Análisis comparativo 1997-1998 / 2014-2016*. Bogotá D.C.: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- Mesa, , O. J., Poveda, G., & Carvajal, L. F. (1977). *Introducción al clima de Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Miorta Cely, V., & Rangel Ch., J. O. (2014). El clima de la Orinoquia colombiana. *Colombia Diversidad Biótica XIV*, 153-206.

-
- Moreno R., A. L. (2013). Sistema de Información para la Interpolación de datos de Temperatura y de Precipitación del Ecuador. *Revista Politécnica*.
- Muller, A. (22 de Agosto de 2019). *Pluviómetros y pluviogágrafos*. Obtenido de www.rfuess-mueller.de/221-0S.pdf
- NASA. (24 de Agosto de 2018). *Visualización TRMM online y sistema de análisis* . Obtenido de http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_Monthly
- NASA. (8 de Octubre de 2019). *README Document for the GPM Data*. Obtenido de www.gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/s4pa/GPM_L1A/doc/README.GPM.pdf
- Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., & Willems, P. (2014). Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific--Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3179–3193.
- PIZARRO DÍAZ , H., & GUTIÉRREZ A. , J. M. (2006). *ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN UTILIZANDO HERRAMIENTAS PROCESAMIENTO ESPACIAL DE INFORMACIÓN*. Medellín: UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA .
- Prakash, S., Mitra, A. K., Pai, D. S., & AghaKouchak, A. (2016). From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? *Advances in Water Resources*, 1–77.
- Rangel Ch., J. O., & Aguilar P., M. (1995). Una aproximación sobre la diversidad climática en las regiones naturales de Colombia. *Colombia Diversidad Biótica I*, 25-77.

-
- Rangel Ch., J. O., Sanchez C., H., Lowy C., P., Aguilar P., M., & Castillo, A. (1995).
Región de la Orinoquia. *Colombia Diversidad Biótica I*, 239-254.
- Rangel-Ch., J. O. (2014). Ecosistemas de la Orinoquia de Colombia. *Colombia Diversidad Biótica XIV*, 807-847.
- Rangel-Ch., J. O. (2014). La región de la Orinoquia . *Colombia Diversidad Biótica XIV*, 895.
- Rangel-Ch., J. O., & V. Minorta, C. (2014). Los tipos de vegetación de la Orinoquia colombiana. *Colombia Diversidad Biótica XIV*, 533-612.
- Ravelo, A. C., & Santa, J. A. (2000). Estimación de las precipitaciones utilizando información satelital y terrestre en la provincia de Córdoba (Argentina). *AGRISCIENTIA*, 21-27.
- Region, O. o. (22 de Agosto de 2019). *colombia bird watch*. Obtenido de www.colombiabirdwatch.com
- RIVAS ESCOBAR , J. A. (2014). *ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN ENTRE EL SATÉLITE TRMM Y LAS ESTACIONES PLUVIOMETRICAS UBICADAS EN LA CUENCA DEL RIO BOGOTA*. Bogotá D.C.: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
- Roman, F. J. (8 de Septiembre de 2019). *Precipitaciones*. Obtenido de www.hidrologia.usal.es/temas/Precipitaciones.pdf
- Ruiz, J. J. (2009). EVALUACIÓN DE DIFERENTES METODOLOGÍAS PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE PRECIPITACIÓN CMORPH SOBRE SUDAMÉRICA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 473-488.

-
- Schargel, R. (2015). Suelos llaneros: geomorfología, distribución geográfica y caracterización. *Tieras Llaneras de Venezuela*, 63-125.
- Sharifi, E., Steinacker, R., & Saghafian, B. (2016). Assessment of GPM-IMERG and Other Precipitation Products against Gauge Data under Different Topographic and Climatic Conditions in Iran: Preliminary Results. *Remote Sensing*, 135.
- Simbaqueba H., A. (2018). *Estimación de la Capacidad Imágenes del Sensor TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), para la Identificación del Comportamiento de la Precipitación en la Amazonia Colombiana*. Bogotá D.C.: Universidad Antonio Nariño .
- Tang, G., Ma, Y., Long, D., Zhong, L., & Hong, Y. (2016). Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. *Journal of Hydrology*, 152-167.
- Tang, G., Ma, Y., Long, D., Zhong, L., & Hong, Y. (2016). Statistical and Hydrological Comparisons between TRMM and GPM Level-3 Products over a Midlatitude Basin: Is Day-1 IMERG a Good Successor for TMPA 3B42V7? *Journal of Hydrometeorology*, 121-137.
- Torres, C., Coll D., R., Oliveira J., J. F., Gois, G., & Samento C., A. (2015). Assessment of Rainfall Estimates from the TRMM-3B43 Product in the State of Amazonas. *Floresta e Ambiente*, 279-286.
- Vargas Sabadías, A. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial*. La Mancha: Colección Ciencia y Técnica.
- Zinck, A. (2015). Las tierras llaneras " vuelo de pájaro". *Tierras Llaneras de Venezuela*, 26-32.

OJO DE AGUA [35030050]	0	0	0	0	0	30	31	31	0	0	1	0
PENAS BLANCAS [32070090]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PINALITO [32070040]	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0
PLATA LA [35130010]	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
POMPEYA [35020060]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PUERTO ANGOSTURAS [32060100]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PUERTO GAITAN [35120010]	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
PUERTO LOPEZ [35010010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PUERTO RICO [32080010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RAUDAL UNO [32030020]	0	0	0	0	0	0	3	2	30	0	0	0
SAN JUAN DE ARAMA [32070100]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0
SAN LUIS CUBARRAL [32060030]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SENA [35030030]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SERVITA [35030290]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TIERRA GRATA [32070080]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TORO EL [35010060]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UNILLANOS [35035070]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0
URIBE LA [32020020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
YAGUARITO [35010150]	31	28	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0

Tabla 14. Días faltantes de información por estaciones para el año 2016.

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Ab r	Ma y	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
------------	-----	-----	-----	---------	---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

ACACIAS [35010020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACUEDUCTO LA ESMERALDA [35030040]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGUAS CLARAS [32070110]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALCALDIA [35030100]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BAJO NARE [35010230]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BUENAVISTA A [35030090]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CABANA LA HACIENDA [35045020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CABUYARO [35100020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CALIME [32060060]	0	0	0	0	0	0	1	3	5	4	2	0
CALVARIO EL [35030010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAMPO ALEGRE [32070010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CANO BLANCO [32070020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CANO HONDO [35010040]	0	0	0	0	0	0	0	31	30	0	0	0
FUENTE DE ORO [32070060]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030]	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0
GUAICARAMO [35105050]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GUAMAL [35010070]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HACIENDA LAS MARGARITAS [35125010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ICA V/CIO [35030370]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IDEAM V/CIO [35030380]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LA BALSORA [32035020]	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	4	0

SAN LUIS CUBARRAL [32060030]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SENA [35030030]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SERVITA [35030290]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TIERRA GRATA [32070080]	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
TORO EL [35010060]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
UNILLANOS [35035070]	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
URIBE LA [32020020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
YAGUARITO [35010150]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 15. Días faltantes de información por estaciones para el año 2017.

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Ab r	Ma y	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ACACIAS [35010020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACUEDUCTO LA ESMERALDA [35030040]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGUAS CLARAS [32070110]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALCALDIA [35030100]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BAJO NARE [35010230]	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
BUENAVISTA [35030090]	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CABANA LA HACIENDA [35045020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CABUYARO [35100020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CALIME [32060060]	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
CALVARIO EL [35030010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAMPO ALEGRE [32070010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CANO BLANCO [32070020]	0	1	0	2	7	9	0	0	0	0	0	0

AGUAS CLARAS [32070110]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALCALDIA [35030100]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BAJO NARE [35010230]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
BUENAVISTA [35030090]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CABANA LA HACIENDA [35045020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CABUYARO [35100020]	30	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
CALIME [32060060]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CALVARIO EL [35030010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAMPO ALEGRE [32070010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CANO BLANCO [32070020]	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0
CANO HONDO [35010040]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FUENTE DE ORO [32070060]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FUNDO NUEVO HUMAPO [35180030]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GUAICARAMO [35105050]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GUAMAL [35010070]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HACIENDA LAS MARGARITAS [35125010]	0	0	0	0	0	1	4	0	2	0	0	0
ICA V/CIO [35030370]	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	31
IDEAM V/CIO [35030380]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LA BALSORA [32035020]	31	30	31	30	2	3	5	1	7	0	0	0
LA LIBERTAD - AUT [35025110]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LEJANIAS CASTILLO [32060090]	0	0	0	0	0	1	2	2	30	31	30	0

TIERRA GRATA [32070080]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TORO EL [35010060]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UNILLANOS [35035070]	1	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0
URIBE LA [32020020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
YAGUARITO [35010150]	0	0	0	0	31	30	31	31	30	31	30	31

Tabla 17. Días faltantes de información por estaciones para el año 2019.

Estaciones	En e	Feb	Ma r	Ab r	Ma y	Jun	Jul	Ag o	Sep	Oct	Nov	Dic
ACACIAS [35010020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACUEDUCTO LA ESMERALDA [35030040]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGUAS CLARAS [32070110]	0	0	0	0	0	0	0	0	30	31	330	31
ALCALDIA [35030100]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BAJO NARE [35010230]	31	28	31	30	31	0	0	0	0	1	30	31
BUENAVISTA [35030090]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4
CABANA LA HACIENDA [35045020]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CABUYARO [35100020]	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
CALIME [32060060]	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
CALVARIO EL [35030010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAMPO ALEGRE [32070010]	0	0	0	0	0	2	0	0	0	31	30	31
CANO BLANCO [32070020]	0	0	0	0	0	0	0	0	30	31	30	31
CANO HONDO [35010040]	0	0	0	0	0	0	0	0	30	31	30	31
FUENTE DE ORO [32070060]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1
FUNDO NUEVO	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	2

PUERTO GAITAN [35120010]	0	0	0	0	0	0	0	31	0	31	30	31
PUERTO LOPEZ [35010010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PUERTO RICO [32080010]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RAUDAL UNO [32030020]	0	0	0	0	0	0	31	31	30	31	30	31
SAN JUAN DE ARAMA [32070100]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SAN LUIS CUBARRAL [32060030]	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
SENA [35030030]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SERVITA [35030290]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	31
TIERRA GRATA [32070080]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	30	31
TORO EL [35010060]	0	0	0	0	0	0	0	0	30	31	30	31
UNILLANOS [35035070]	1	0	0	0	0	1	8	8	0	9	1	10
URIBE LA [32020020]	0	0	0	0	0	0	0	0	30	31	30	31
YAGUARITO [35010150]	31	28	31	30	31	0	0	0	0	31	30	31

B. Anexo B: Script de Python para extraer información de imágenes geotiff con relación a un shapefile tipo punto

```
import geopandas as gpd

import os # Leer informacion de carpetas y archivos

import sys # Libreria de sistema

from rasterstats import point_query

import pandas as pd

# Configuracion de GDAL

exec_prefix = sys.exec_prefix

gdal_data = '{}/Library/share/gdal/'.format(exec_prefix)

os.environ['GDAL_DATA'] = gdal_data

print(gdal_data)

def extraer_datos_tif(nombre_tif):

    """

    Extrae datos de un archivo tif con base en un archivo shape de puntos

    :param nombre_tif:

    :return:

    """

    ruta_shp_estaciones = 'F:\Datos\Meta.shp'

    gdf_estaciones = gpd.read_file(ruta_shp_estaciones)

    ruta_tif = 'tif/{}.tif'.format(nombre_tif)
```

```
results = point_query(gdf_estaciones, ruta_tif, property_name='TRMM',  
geojson_out=True)
```

```
gdf_stats = gpd.GeoDataFrame.from_features(results)
```

```
return gdf_stats[['CODIGO_CAT', 'TRMM']]
```

```
# Recorrer las fechas en las que tengo informacion
```

```
rango_fechas = pd.date_range('2014-01-01', '2019-12-01', freq='MS')
```

```
lista_datos_trmm = [] # Lista para guardar la salida de cada archivo
```

```
for fecha in rango_fechas:
```

```
    print(fecha)
```

```
    yyyyymmdd = '{:%Y%m%d}'.format(fecha)
```

```
    # construir nombre del archivo
```

```
    nombre_archivo = '3B43.' + yyyyymmdd + '.7'
```

```
    # ejecuto la funcion extraer_datos_tif()
```

```
    df_datos_trmm = extraer_datos_tif(nombre_archivo)
```

```
    # convierto las fechas en tipo de dato fecha
```

```
    df_datos_trmm['Fecha'] = pd.to_datetime(fecha, format='%Y-%m-%d')
```

```
    # agrego el resultado obtenido a la lista lista_datos_trmm
```

```
    lista_datos_trmm.append(df_datos_trmm)
```

```
# vuelvo todos los elementos de la lista un solo dataframe
```

```
df_datos_totales = pd.concat(lista_datos_trmm)
```

```
# pivoteo los datos para que me queden en el indice las fechas y en las columnas las
estaciones

df_gpm_mensual = df_datos_totales.pivot(index='Fecha', columns='CODIGO_CAT',
values='TRMM')

# guardar en un archivo xlsx los resultados de la extraccion

df_gpm_mensual.to_excel('resultados/datos_gpm_meta.xlsx', 'TRMM',
engine='xlsxwriter')
```

C. Anexo C: Graficas de precipitación por estaciones del IDEAM por año

2014

Altillanura

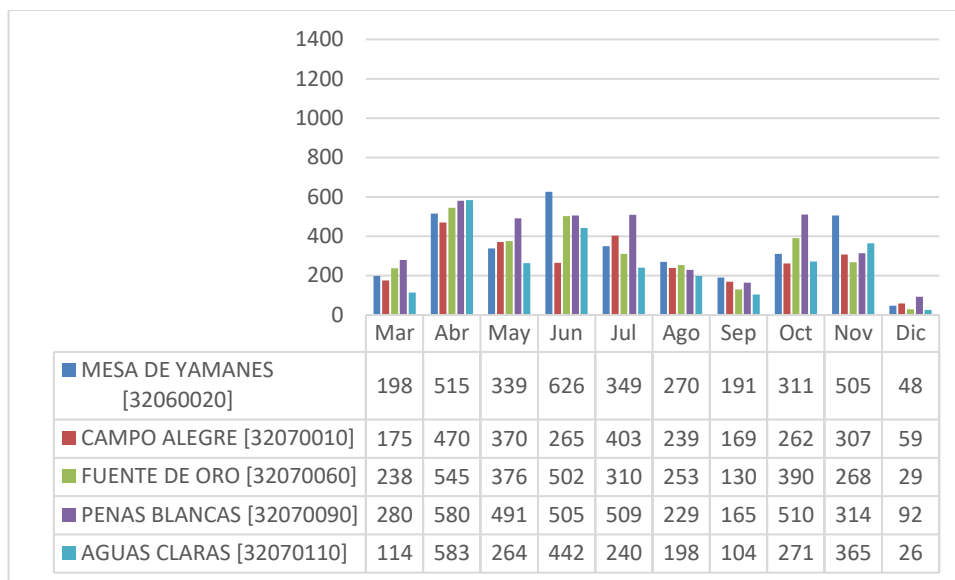


Figura 34: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2014.

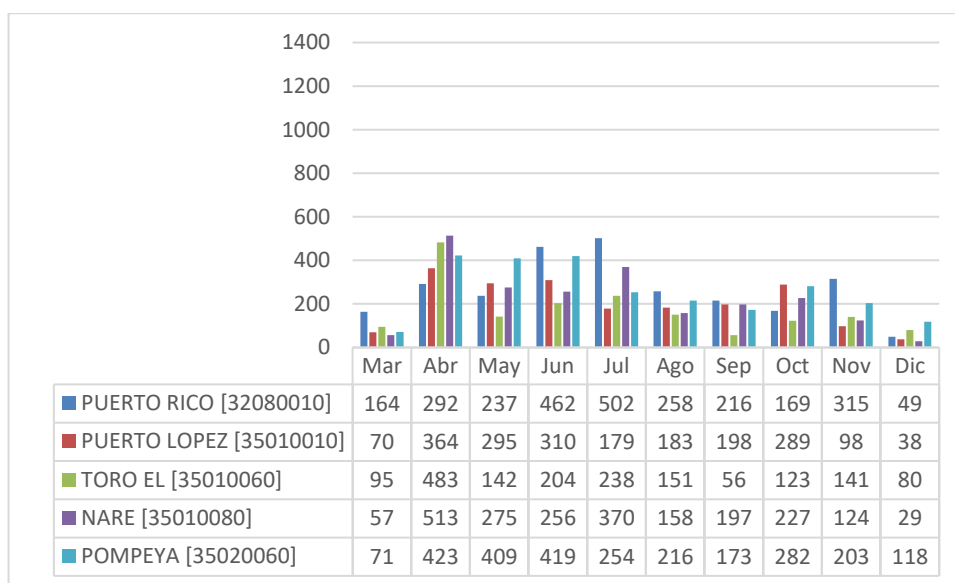


Figura 35: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2014.

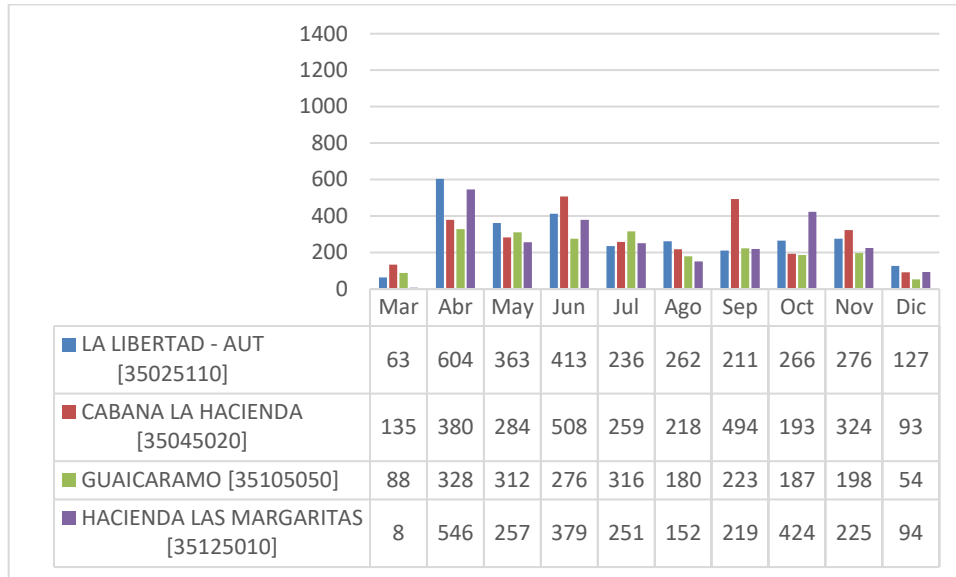


Figura 36: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2014.

Piedemonte

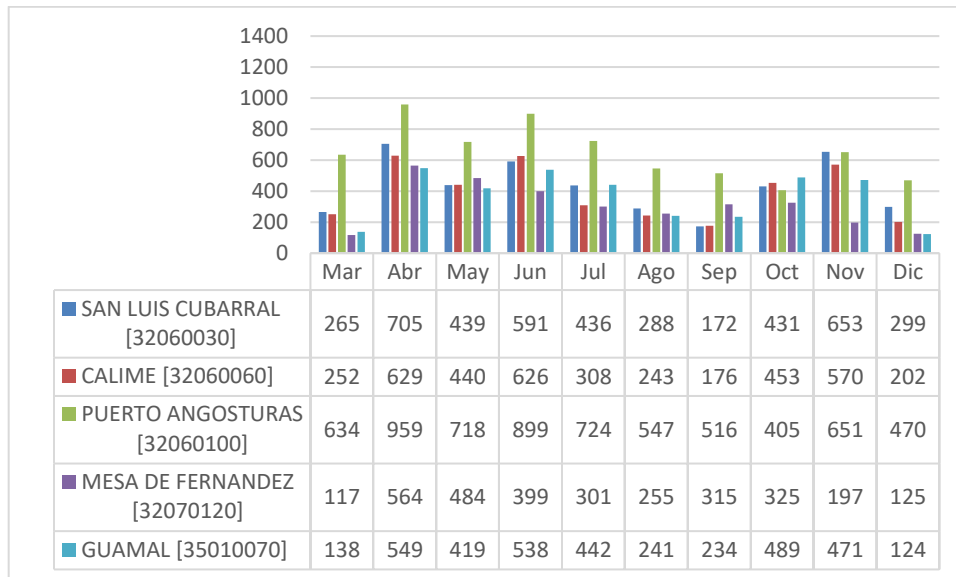


Figura 37: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2014.

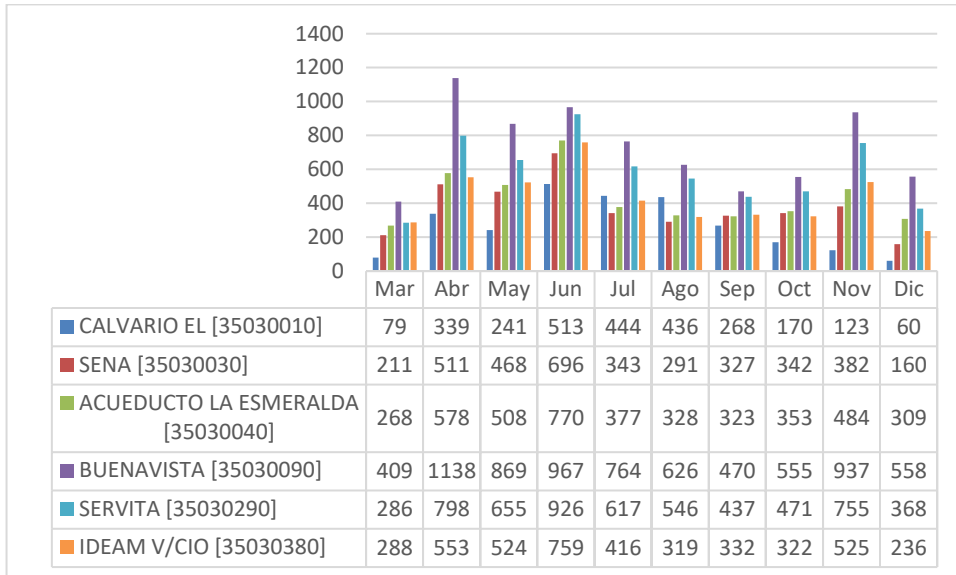


Figura 38: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2014.

Llanura Amazónica

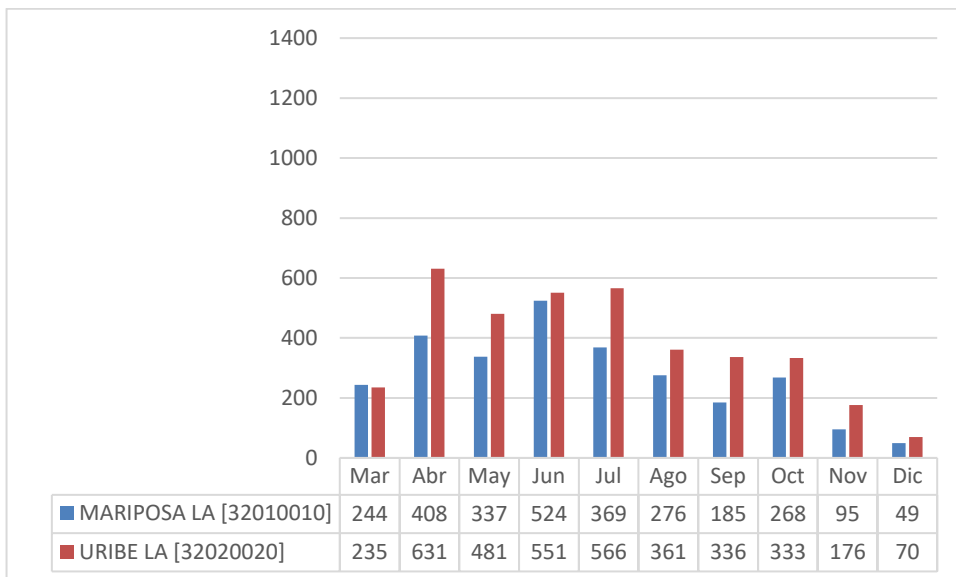


Figura 39: Grafica de precipitación para la llanura amazónica en el 2014.

2015

Altilanura

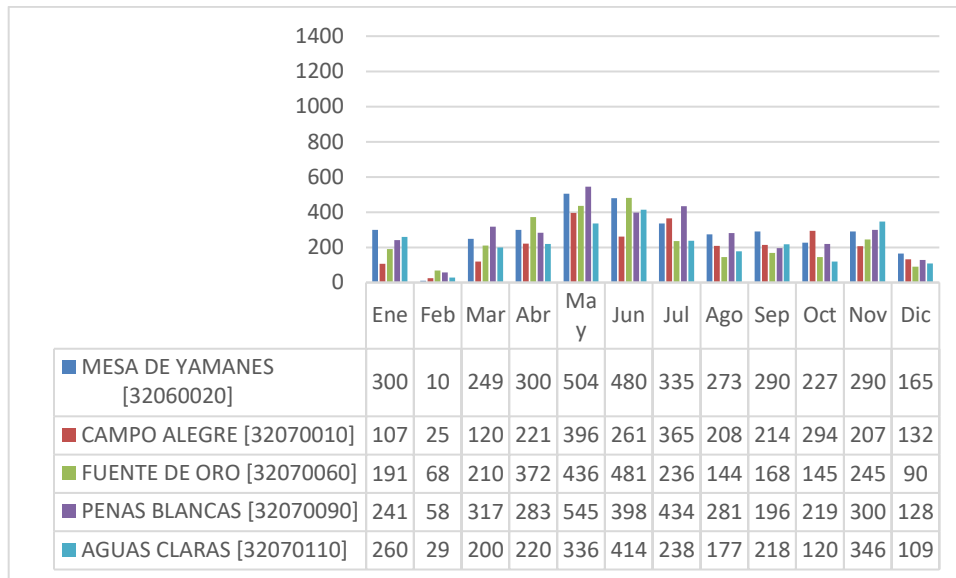


Figura 40: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2015.

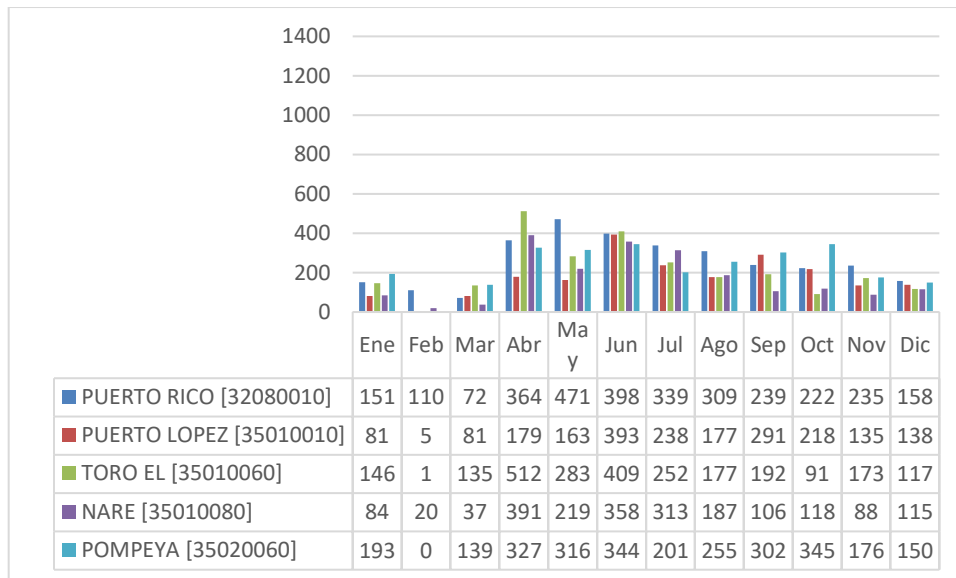


Figura 41: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2015.

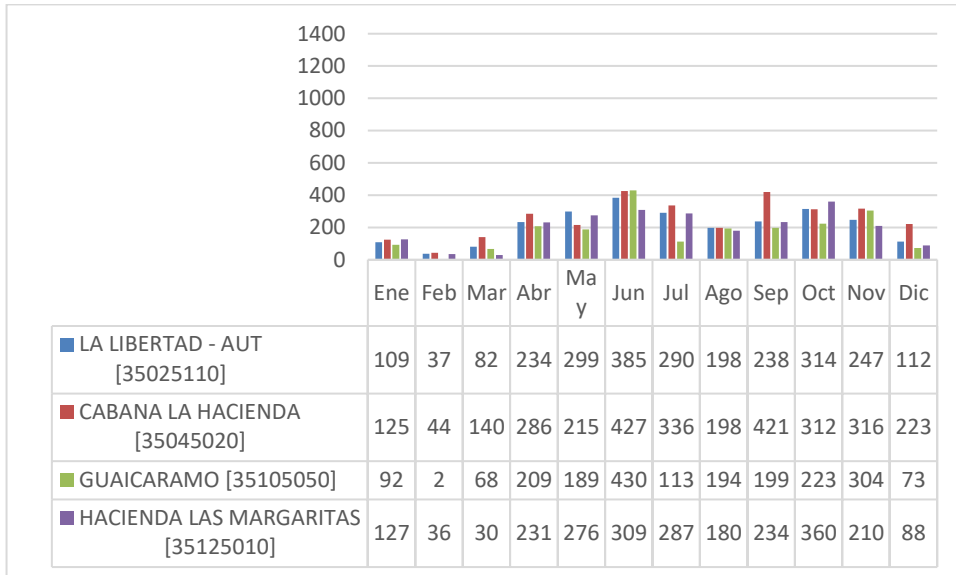


Figura 42: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2015.

Piedemonte

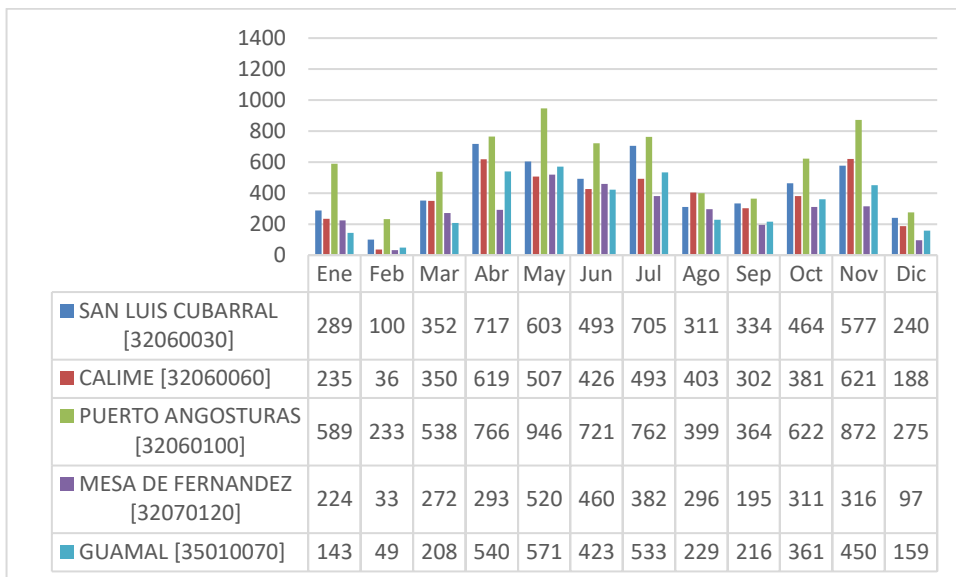


Figura 43: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2015.

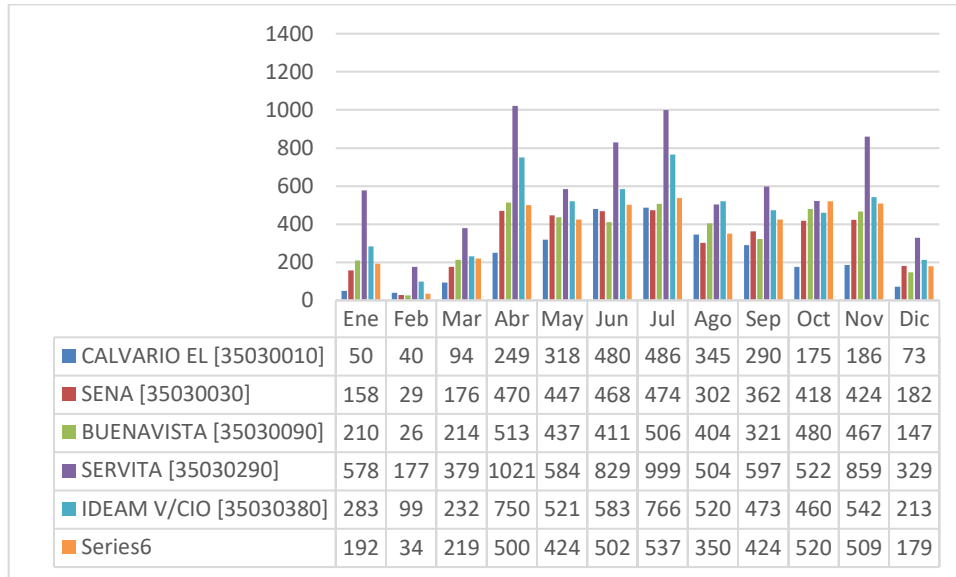


Figura 44: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2015.

Llanura Amazónica

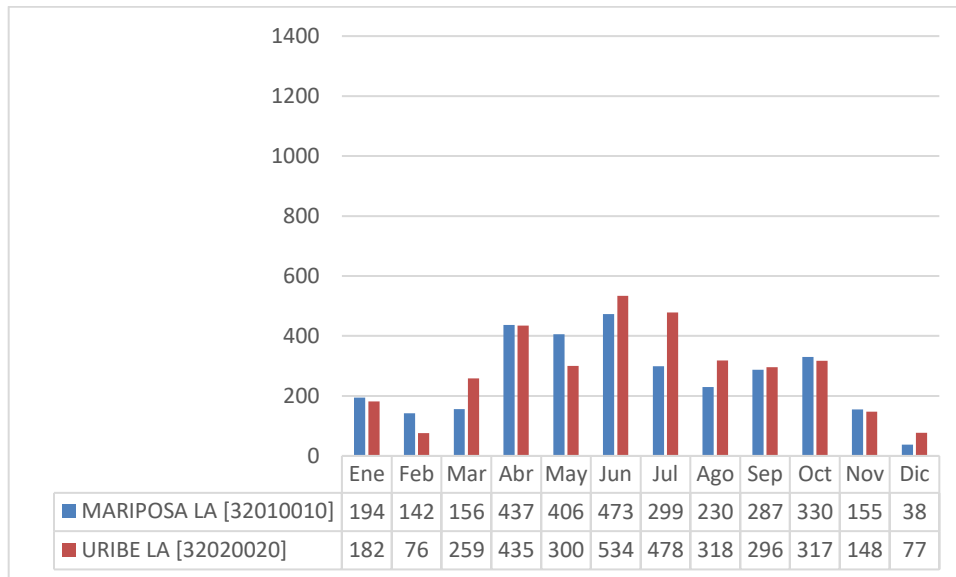


Figura 45: Grafica de precipitación para la llanura amazónica en el 2015.

2016

Altillanura

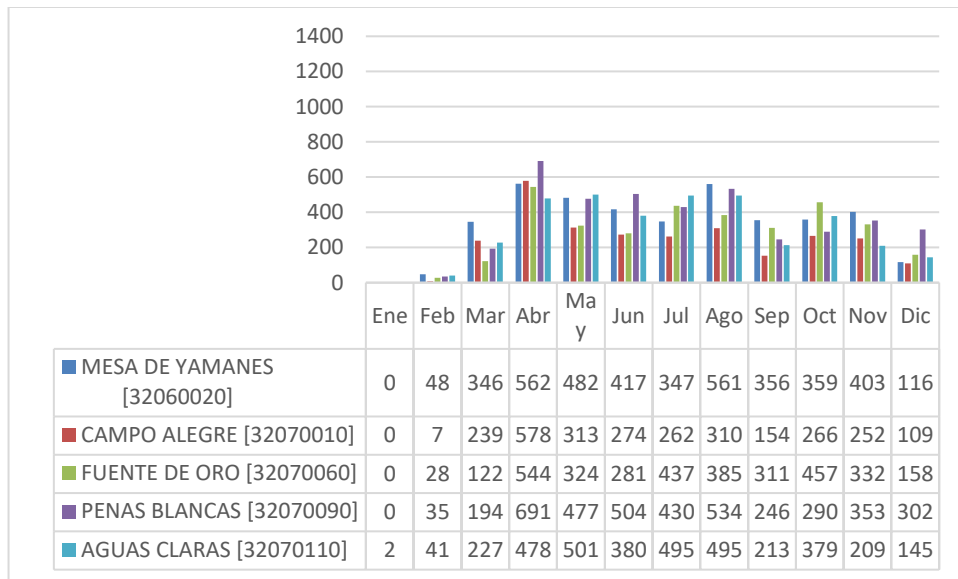


Figura 46: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2016.

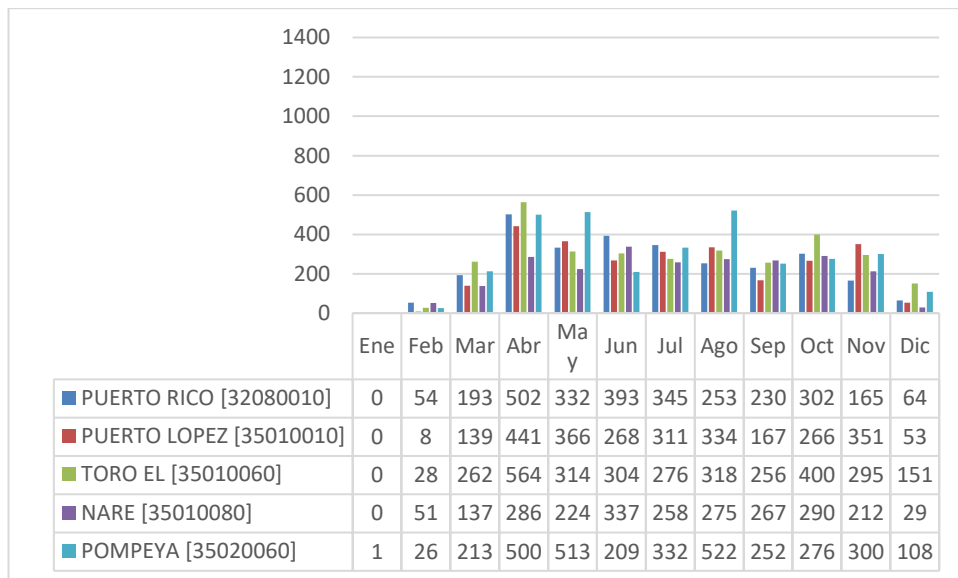


Figura 47: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2016.

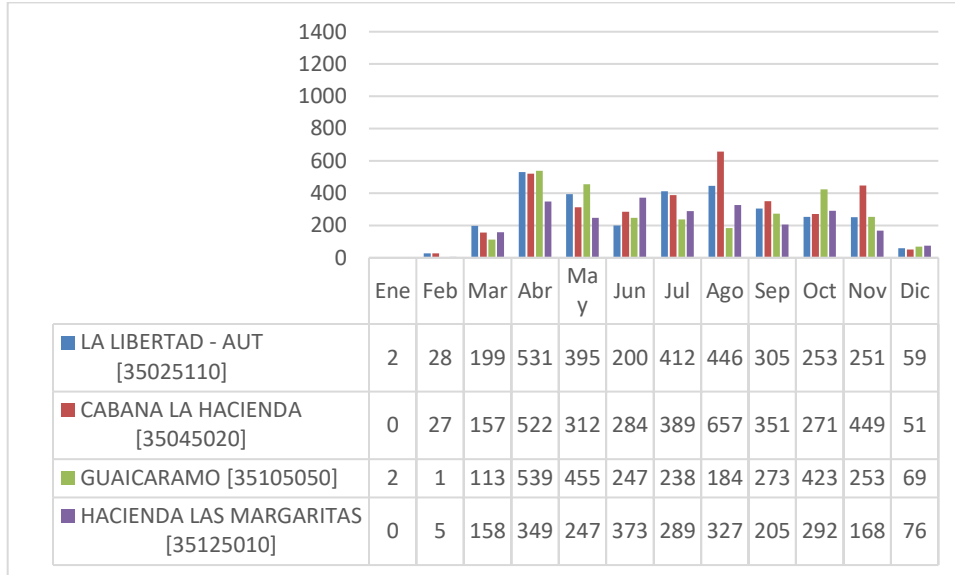


Figura 48: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2016.

Piedemonte

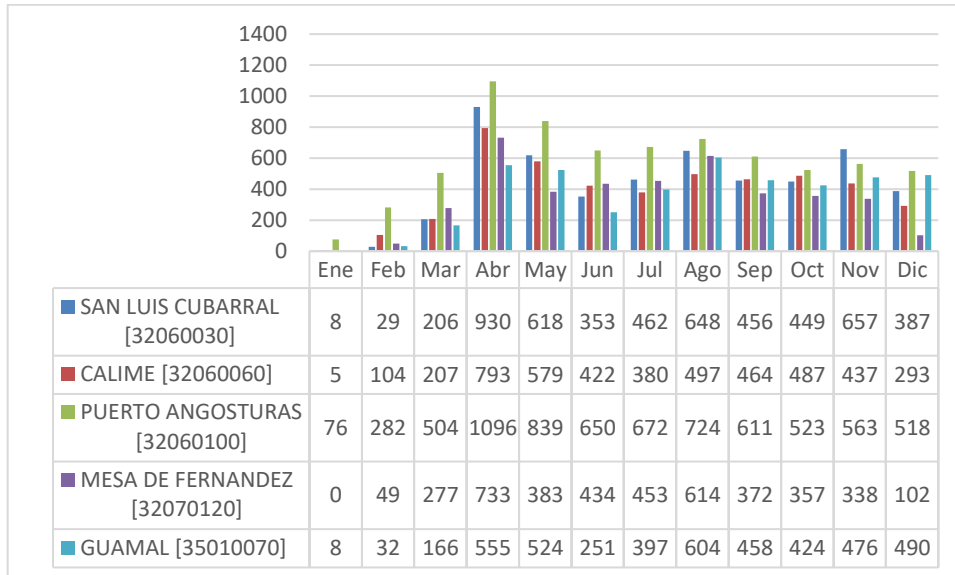


Figura 49: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2016.

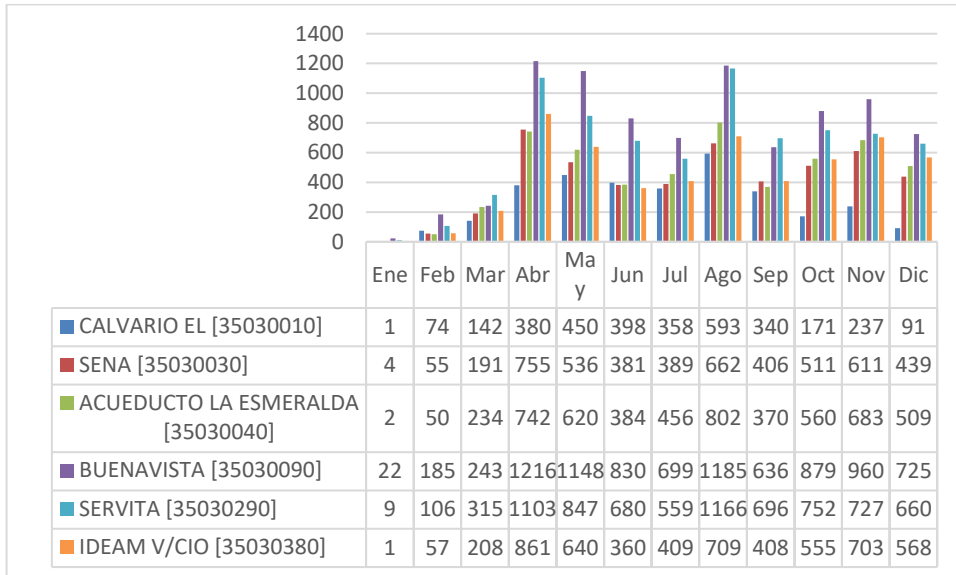


Figura 50: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2016.

Llanura Amazónica

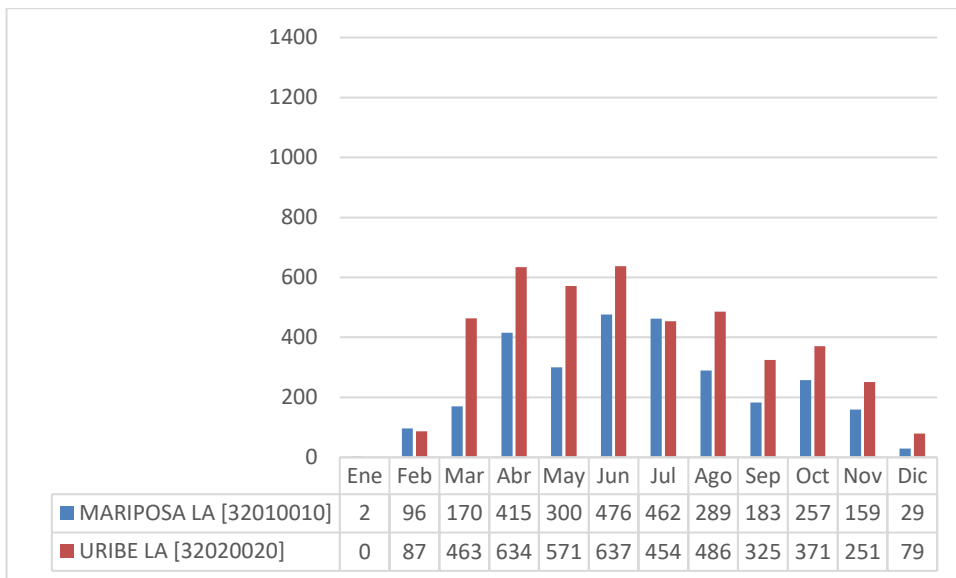


Figura 51: Grafica de precipitación para la llanura amazónica en el 2016.

2017

Altiplanura

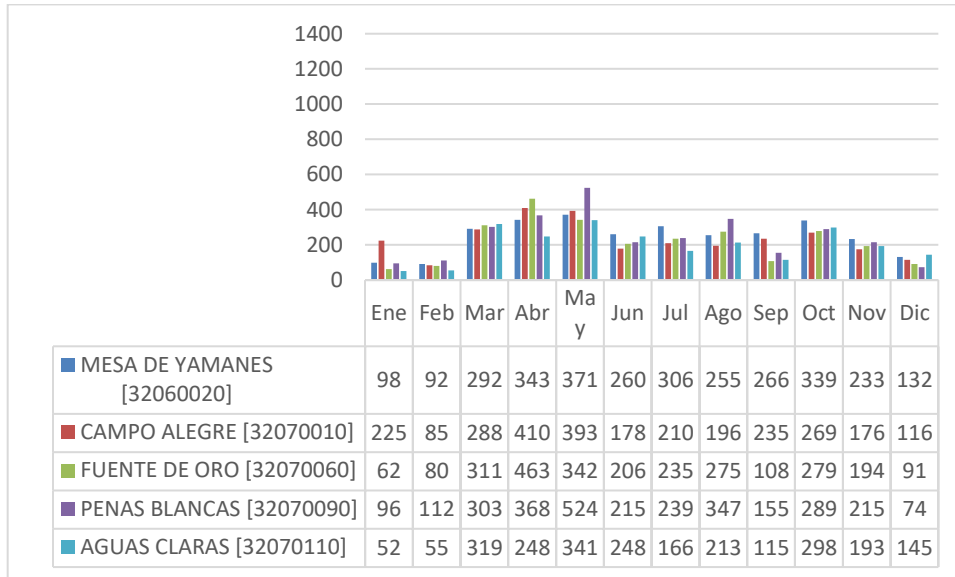


Figura 52: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2017.

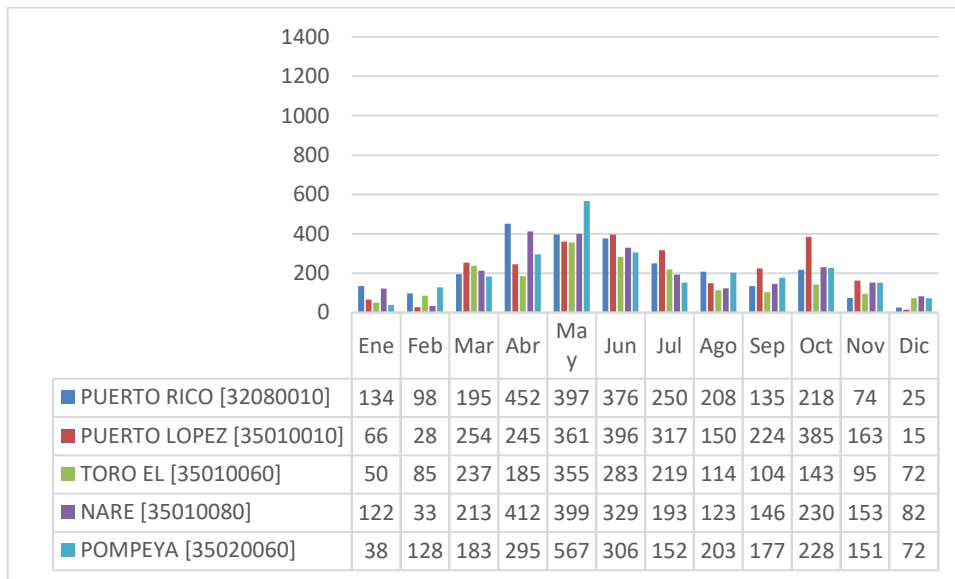


Figura 53: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2017.

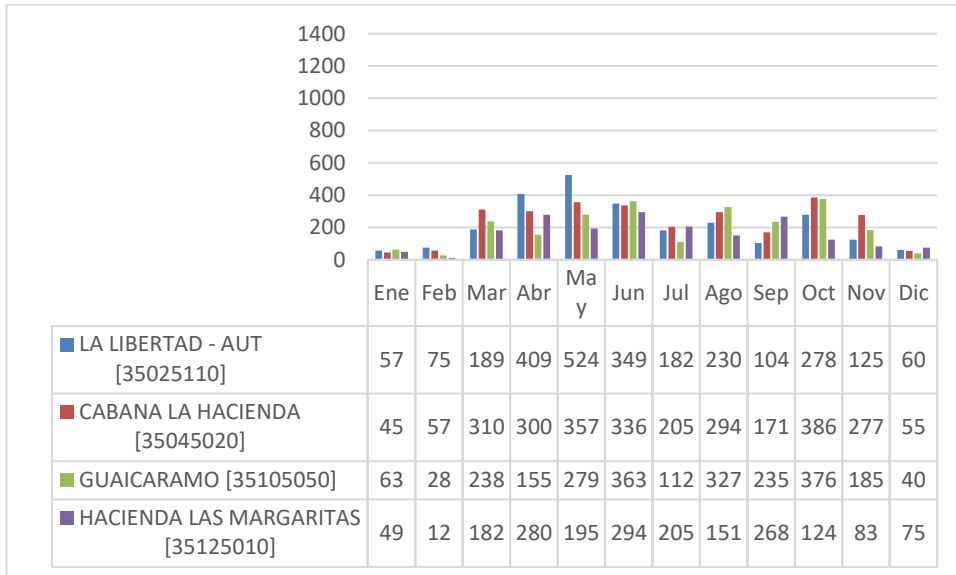


Figura 54: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2017.

Piedemonte

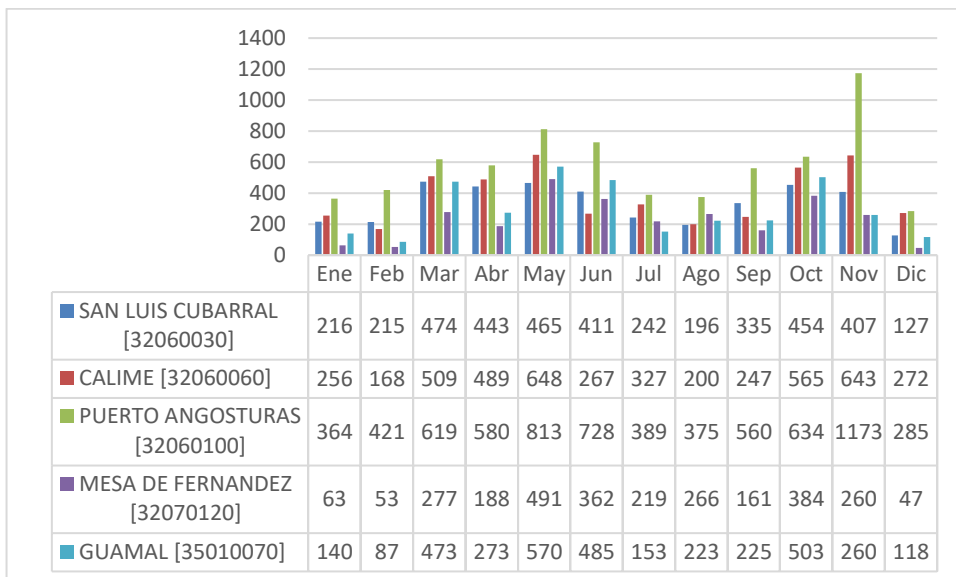


Figura 55: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2017.

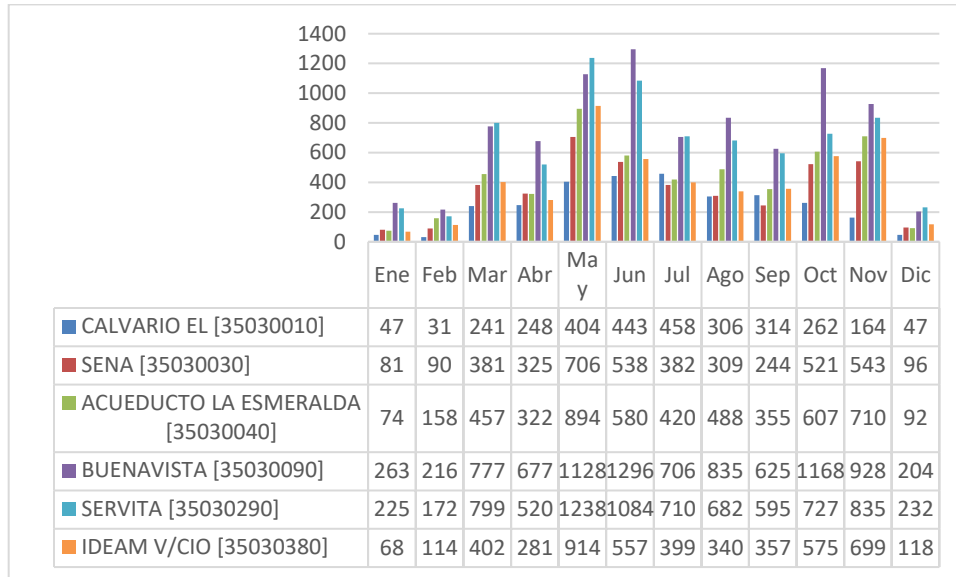


Figura 56: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2017.

Llanura Amazónica

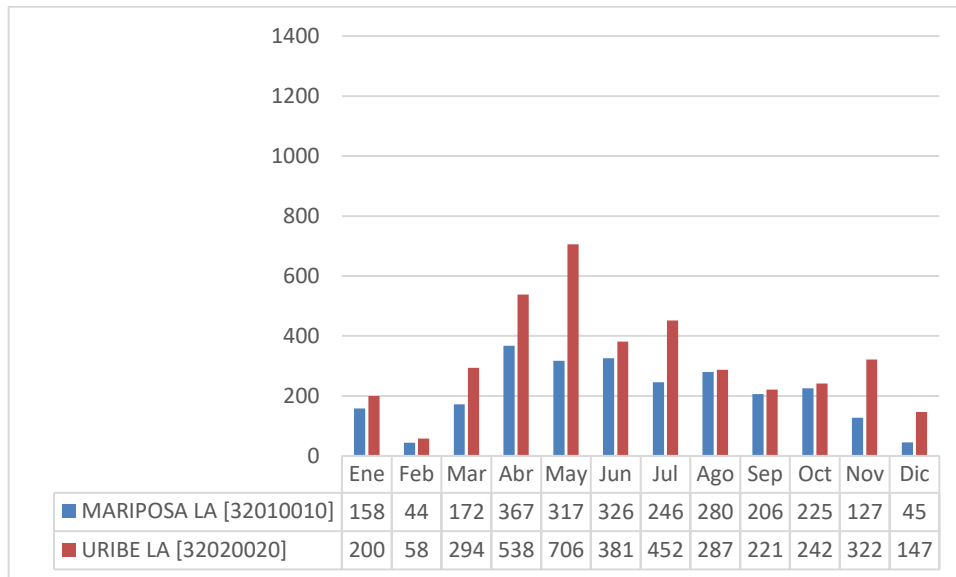


Figura 57: Grafica de precipitación para la llanura amazónica en el 2017.

2018

Altillanura

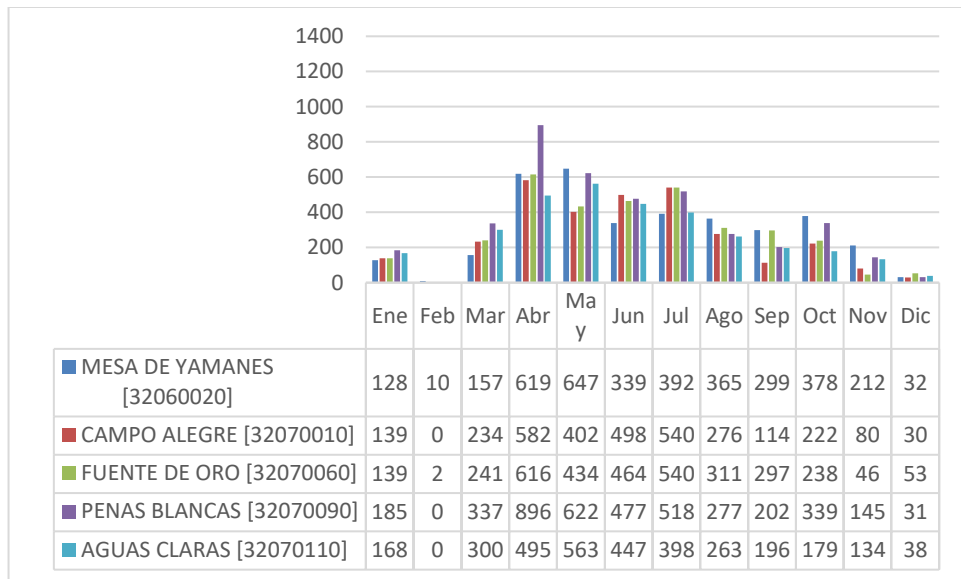


Figura 58: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2018.

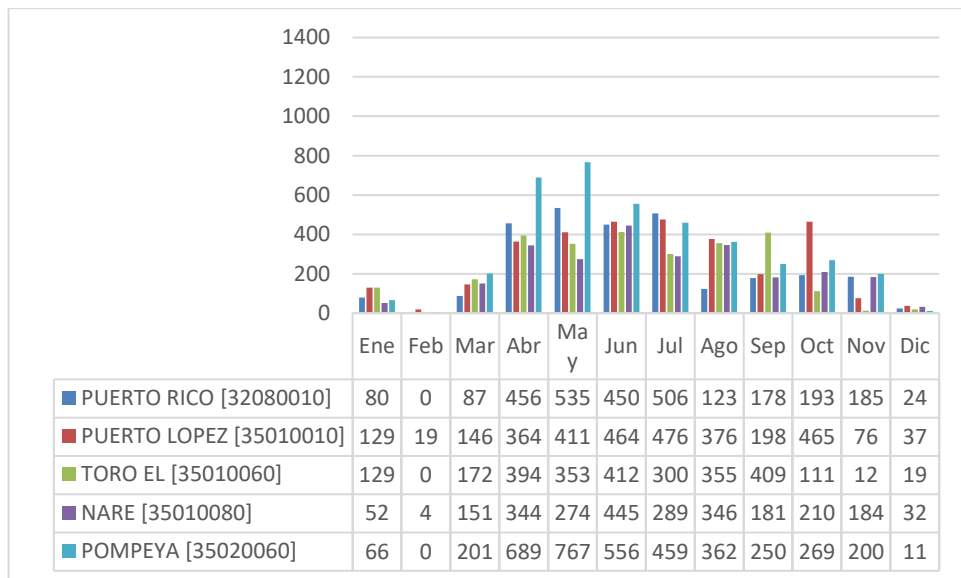


Figura 59: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2018.

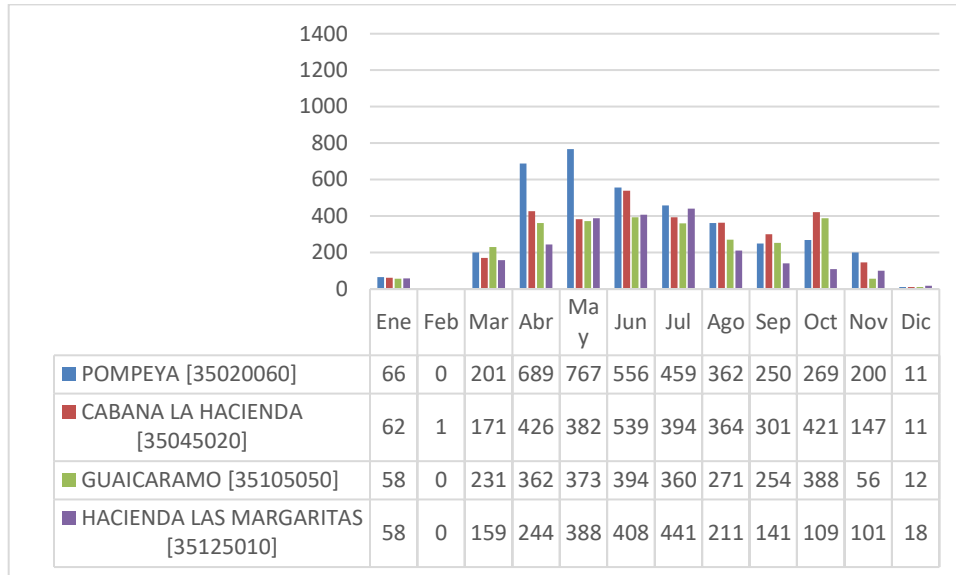


Figura 60: Grafica de precipitación para la altillanura en el 2018.

Piedemonte

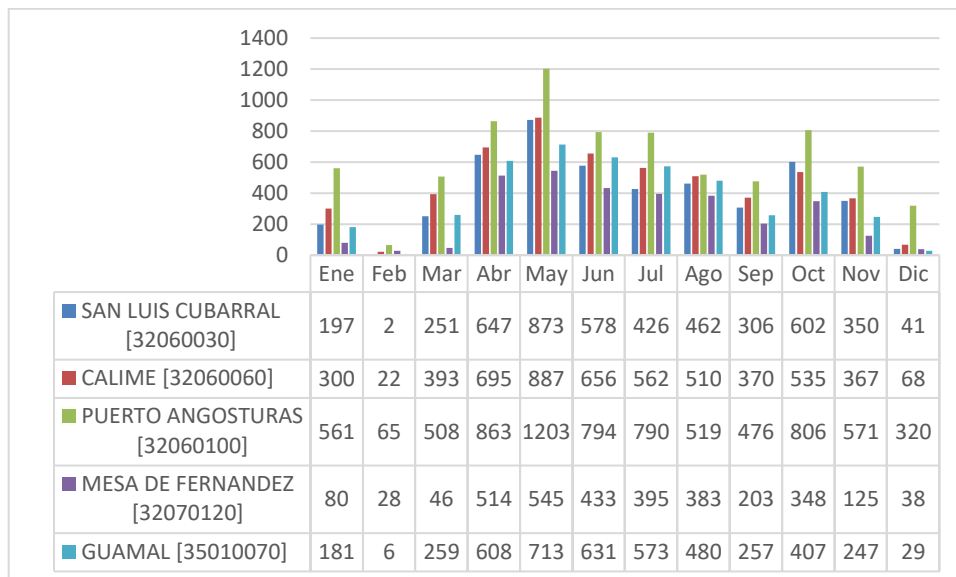


Figura 61: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2018.

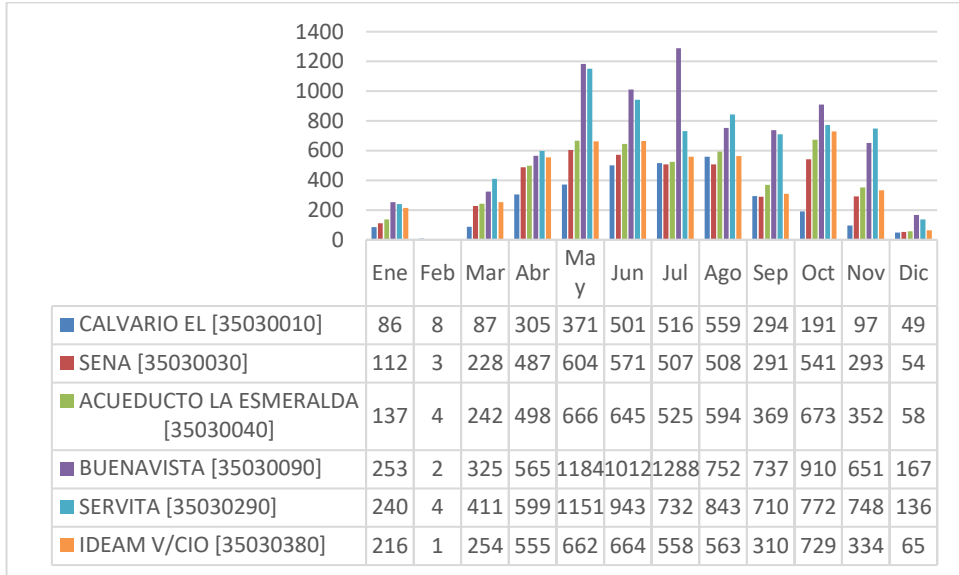


Figura 62: Grafica de precipitación para el piedemonte en el 2018.

Llanura Amazónica

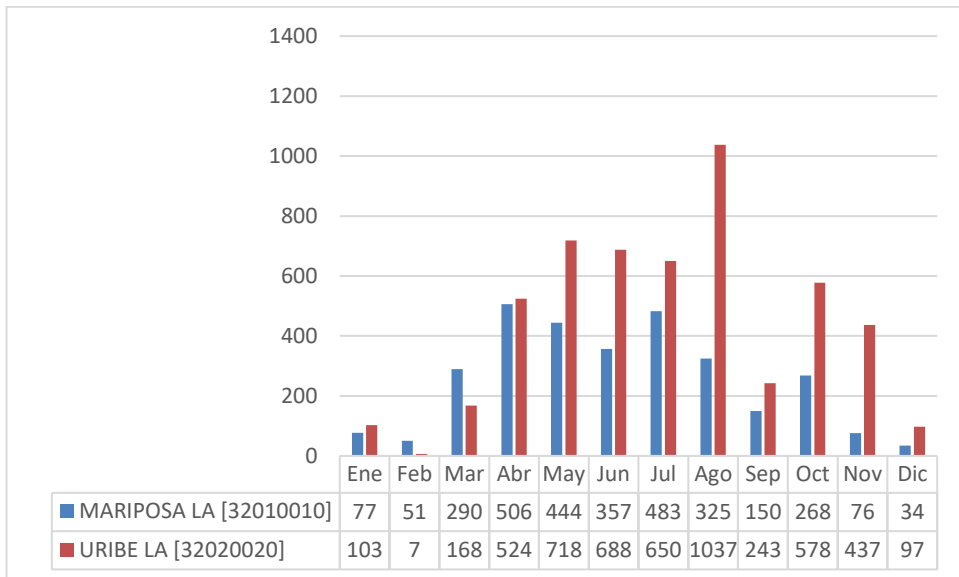


Figura 63: Grafica de precipitación para llanura amazónica en el 2018.

D. Anexo D: Graficas de precipitación por imágenes del GPM para cada estación por año

2014

Altillanura

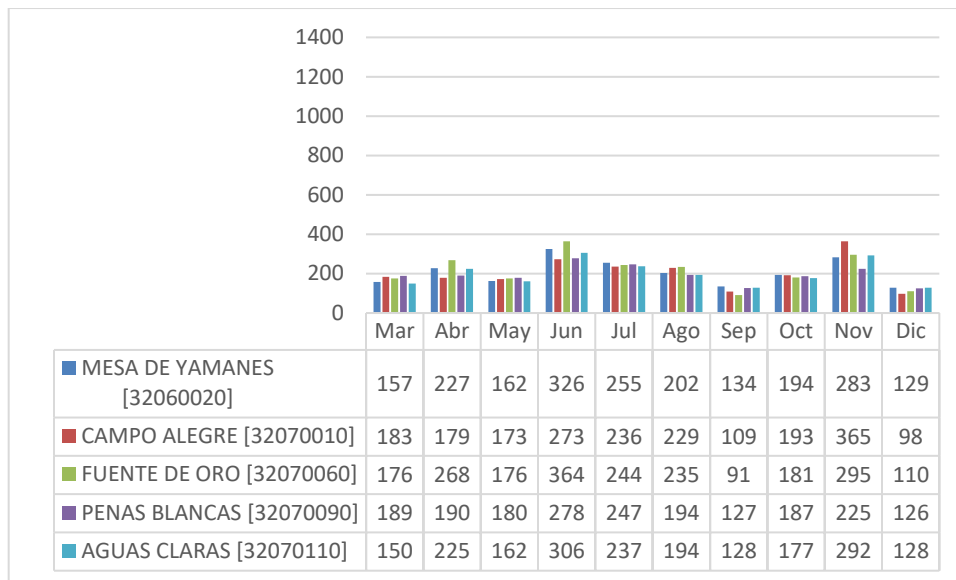


Figura 64: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2014.

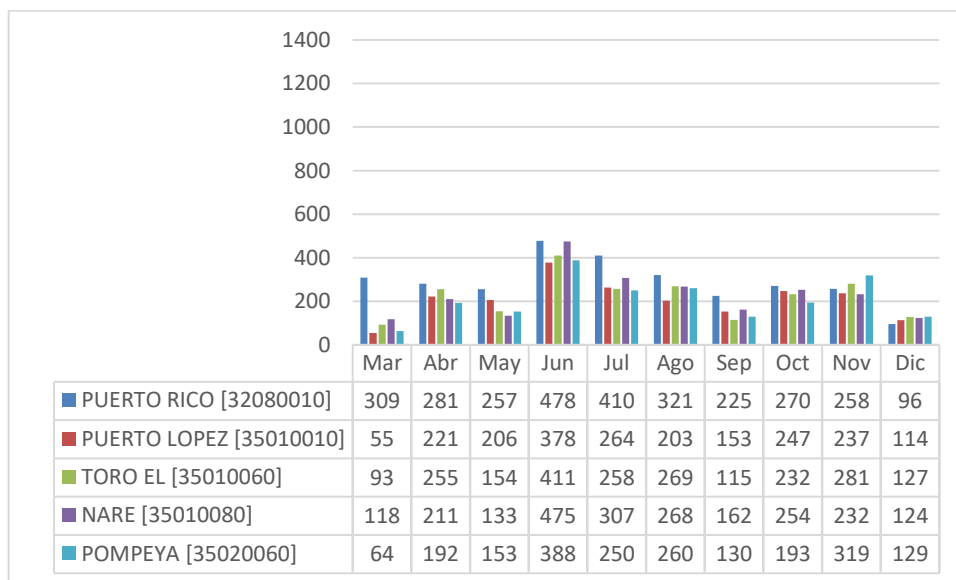


Figura 65: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2014.

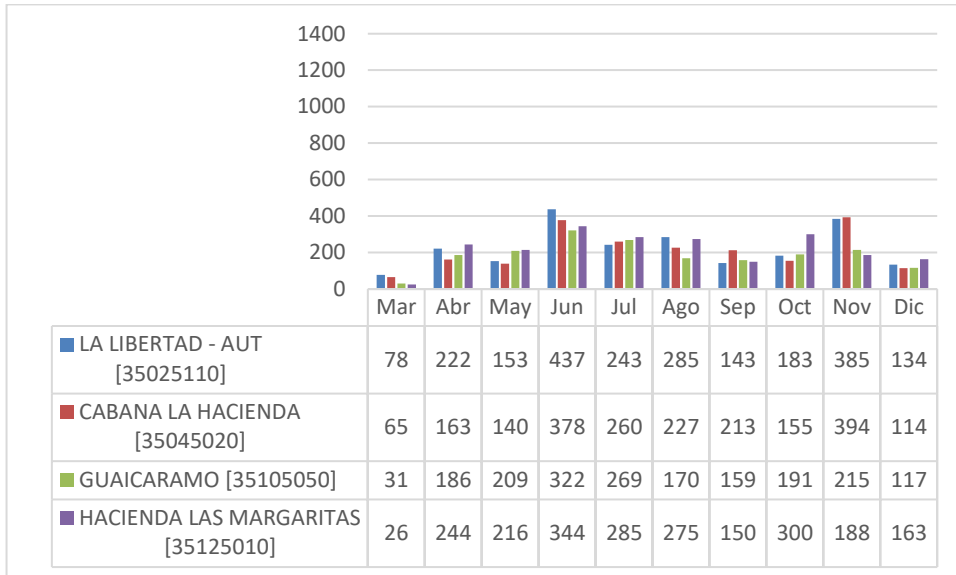


Figura 66: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2014.

Piedemonte

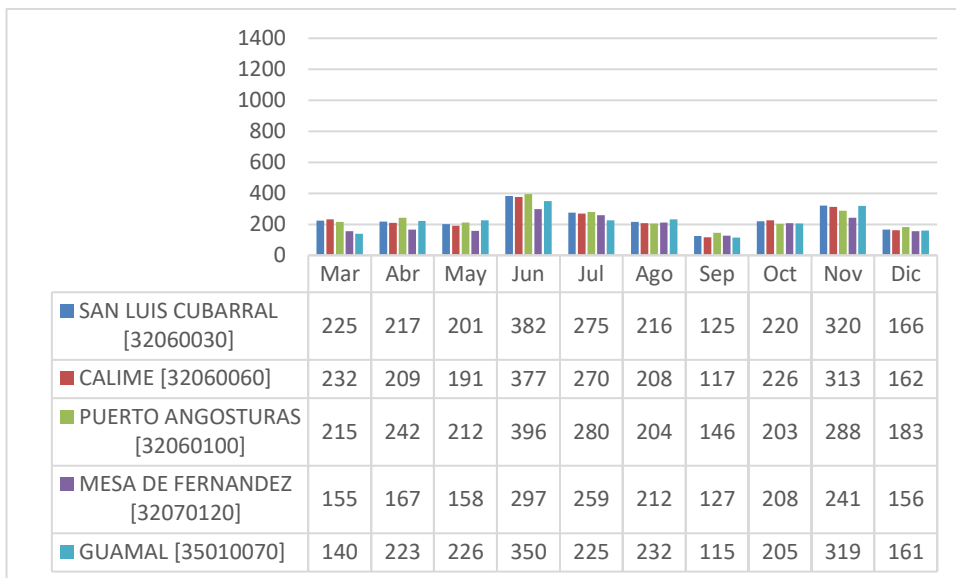


Figura 67: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2014.

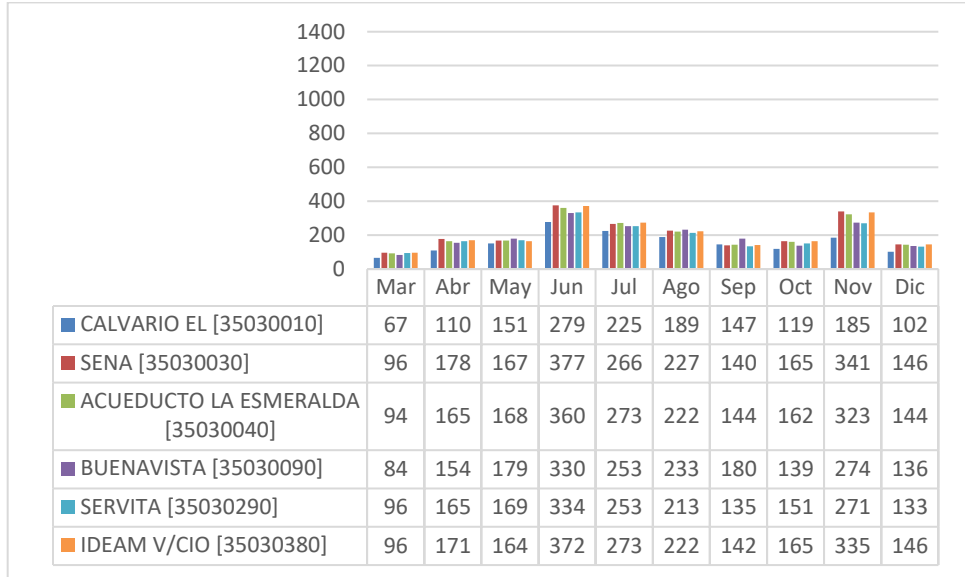


Figura 68: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2014.

Llanura Amazónica

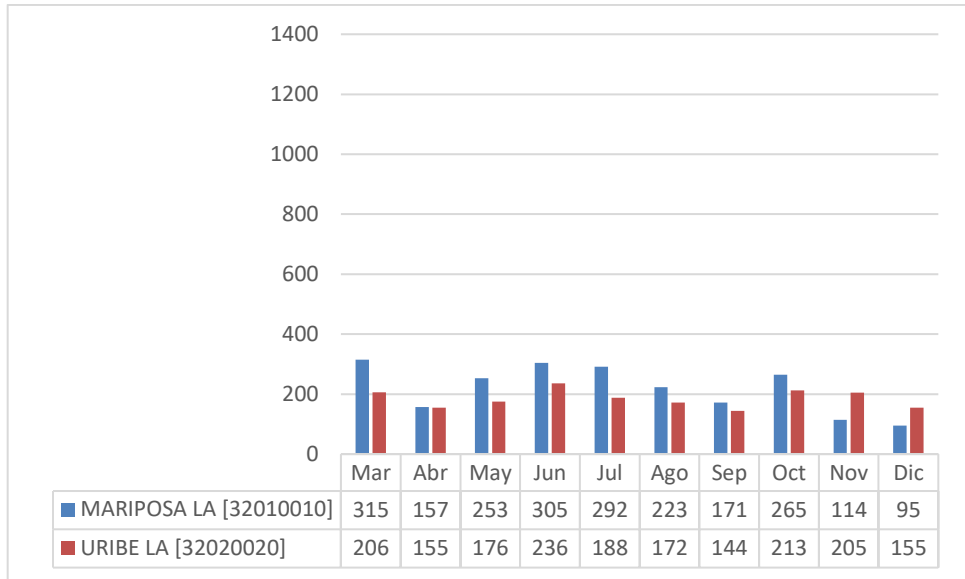


Figura 69: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2014.

Altillanura

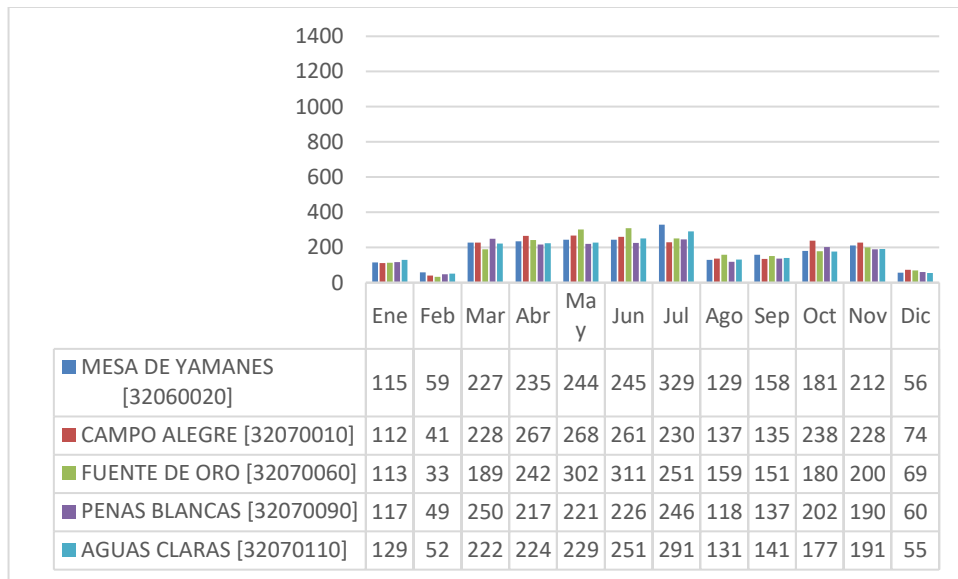


Figura 70: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2015.

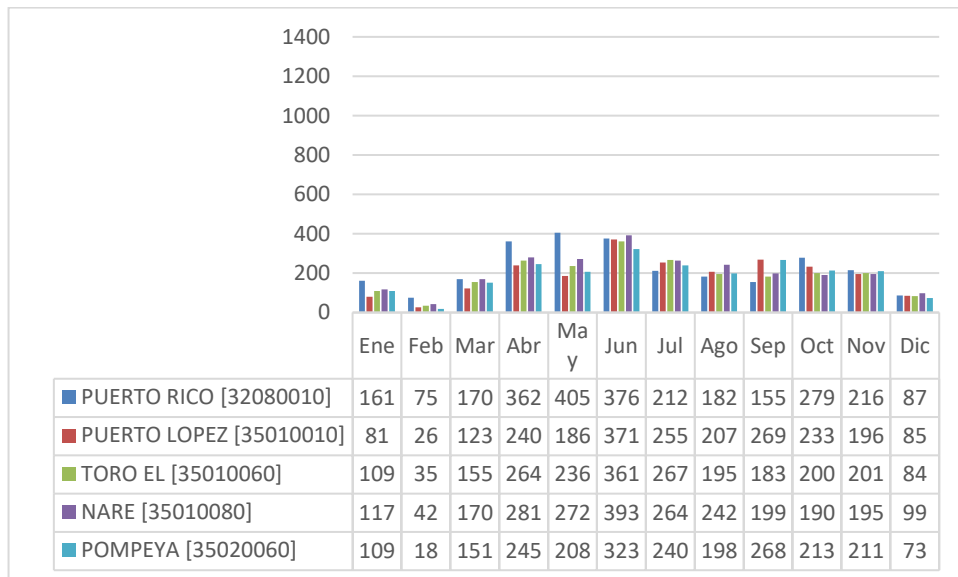


Figura 71: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2015.

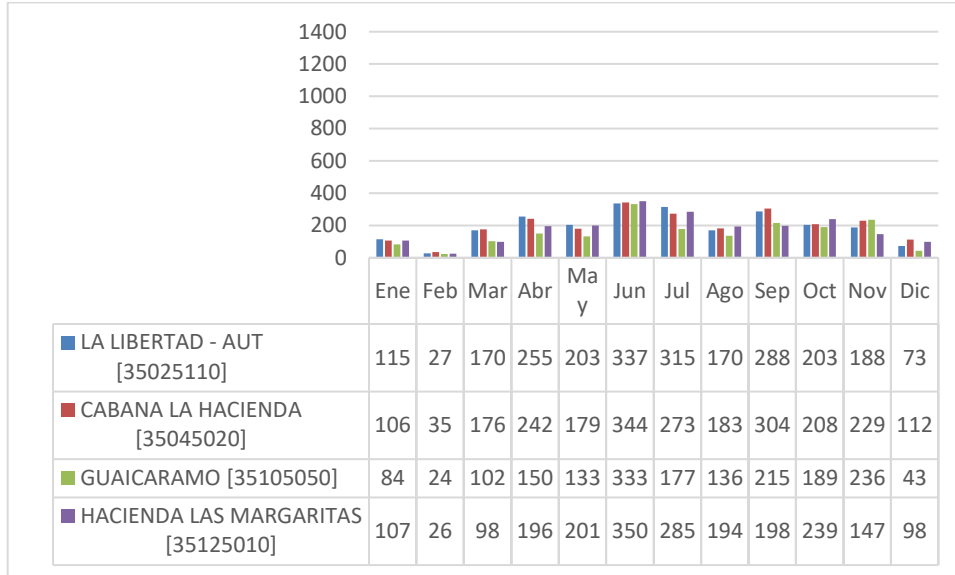


Figura 72: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2015.

Piedemonte

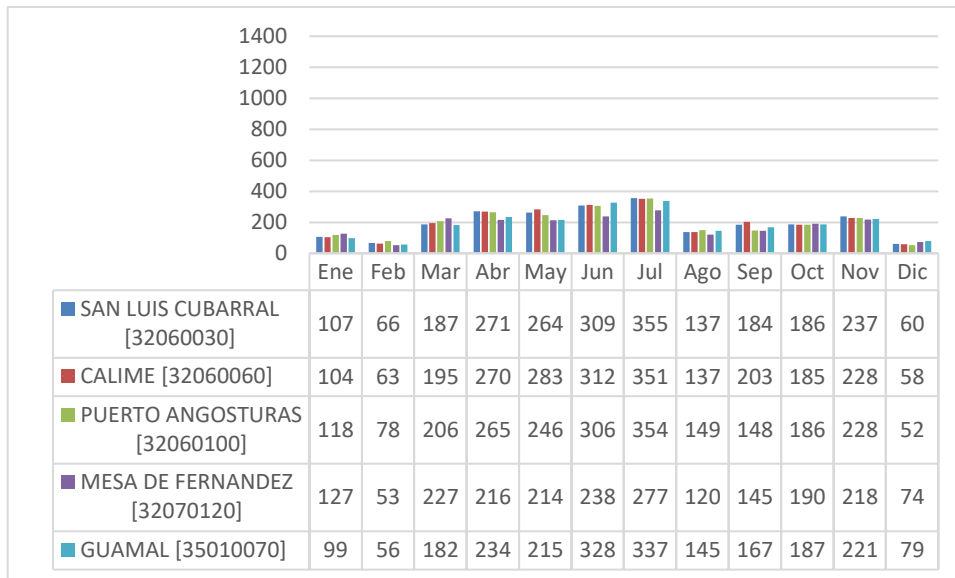


Figura 73: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2015.

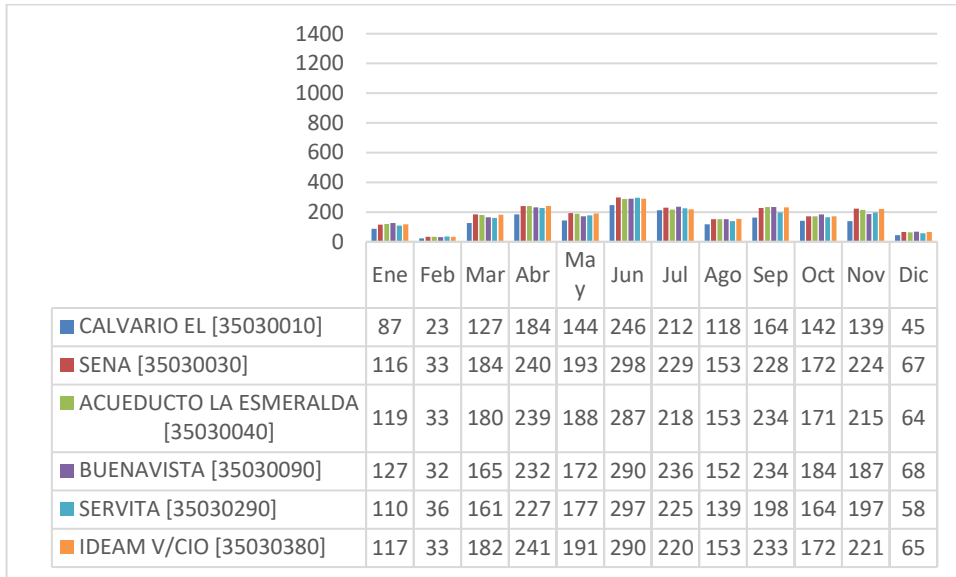


Figura 74: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2015.

Llanura Amazónica

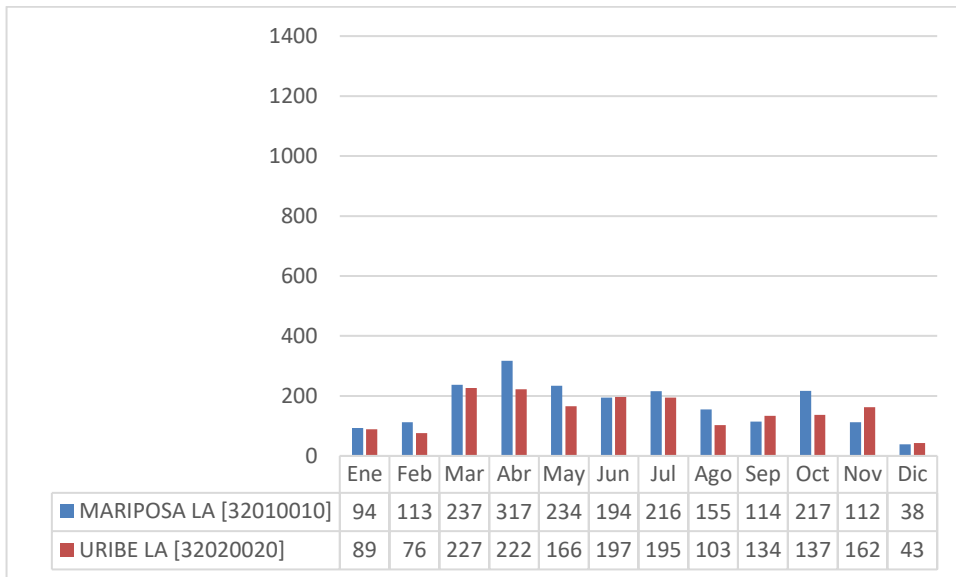


Figura 75: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2015.

2016

Atillanura

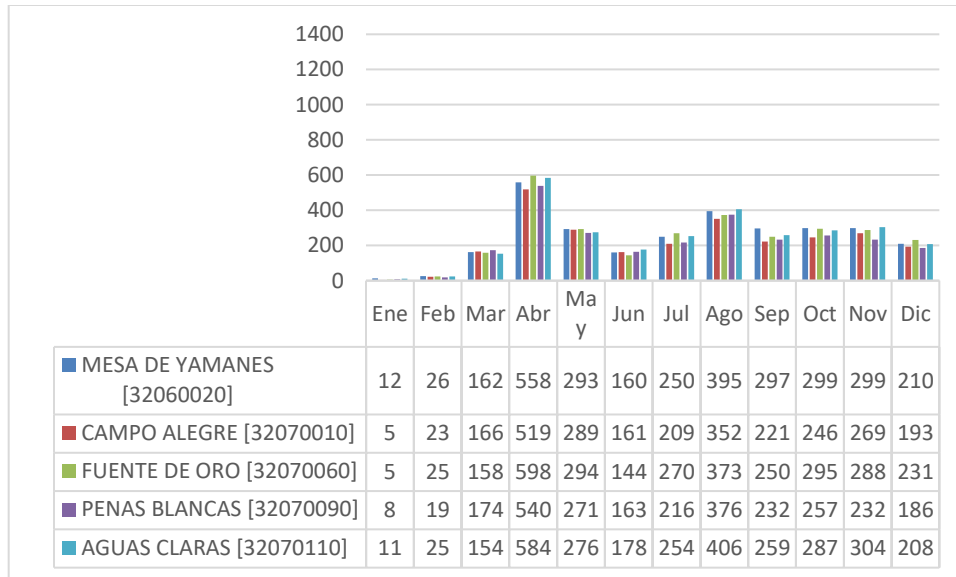


Figura 76: Grafica de precipitación estimada para la atillanura en el 2016.

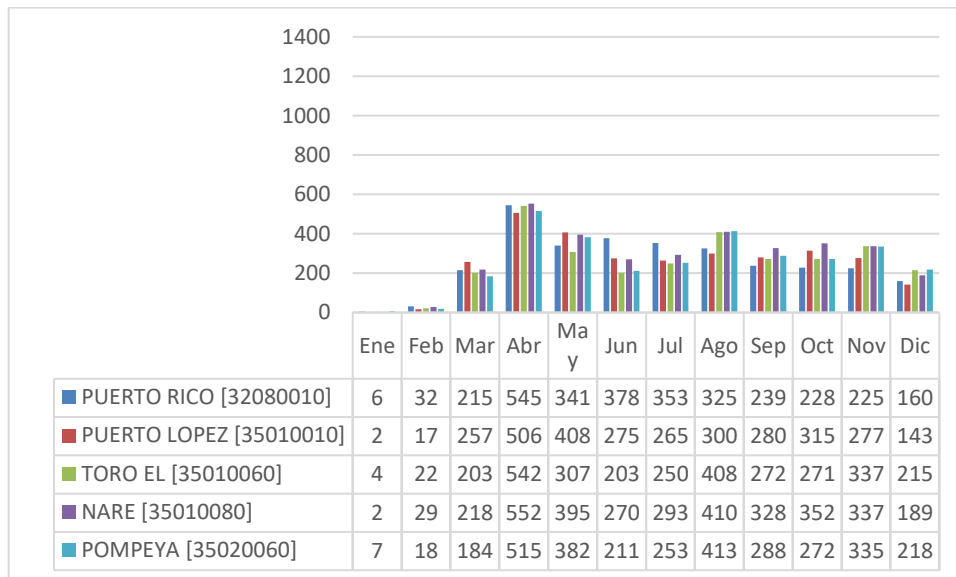


Figura 77: Grafica de precipitación estimada para la atillanura en el 2016.

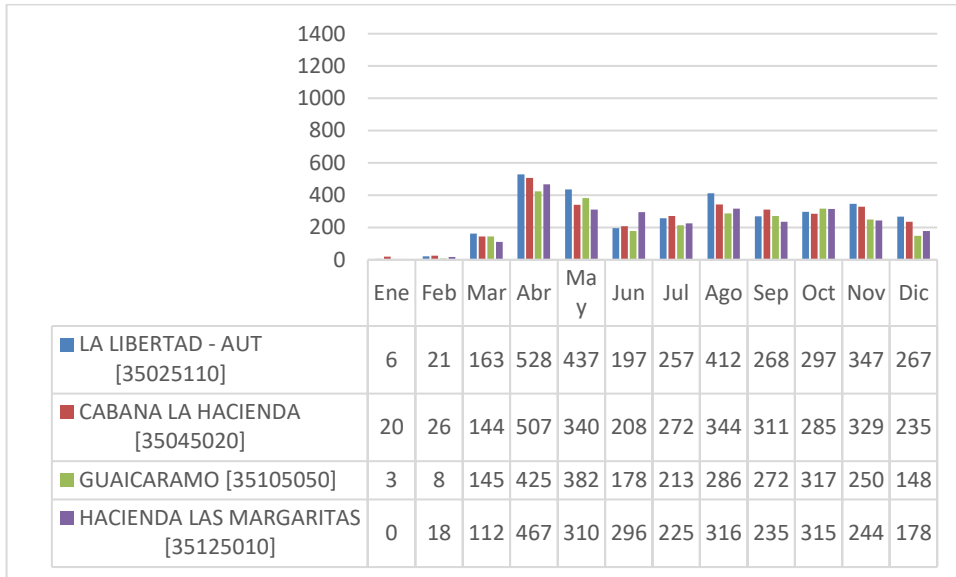


Figura 78: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2016.

Piedemonte

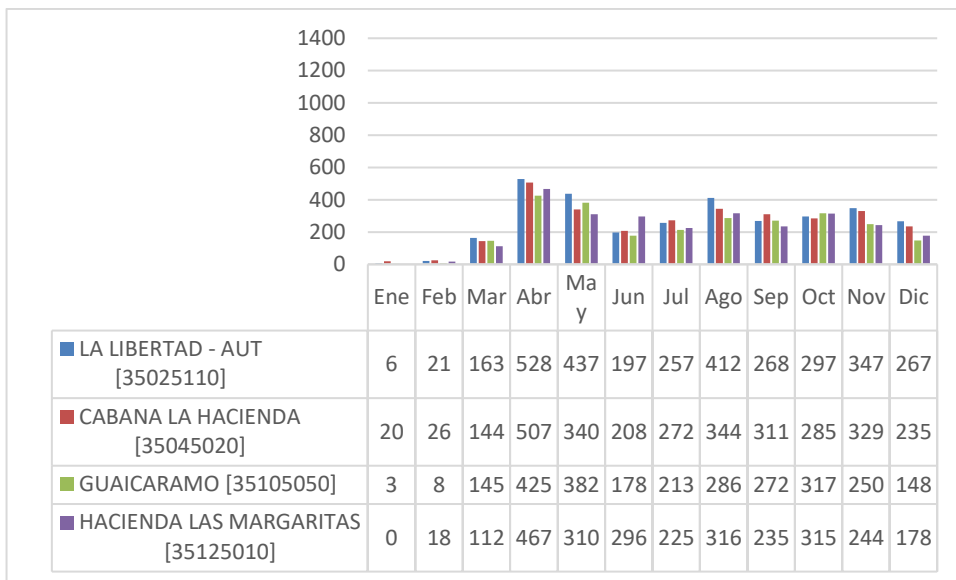


Figura 79: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2016.

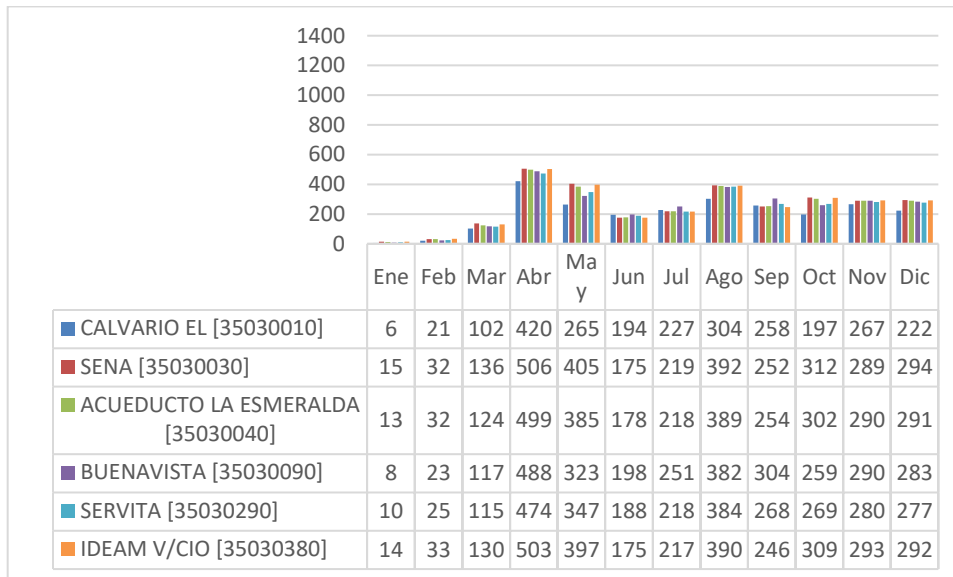


Figura 80: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2016.

Llanura Amazónica

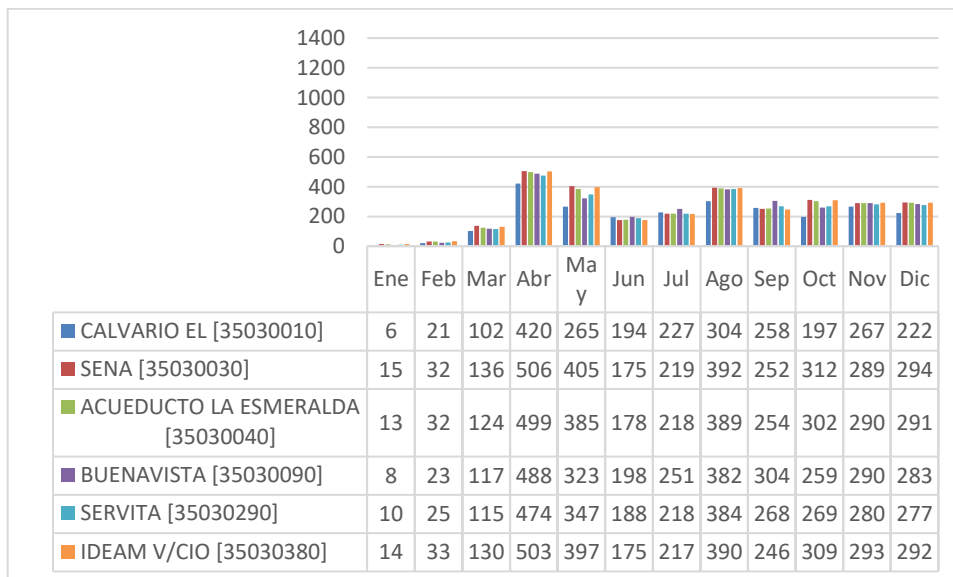


Figura 81: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2016.

2017

Altillanura

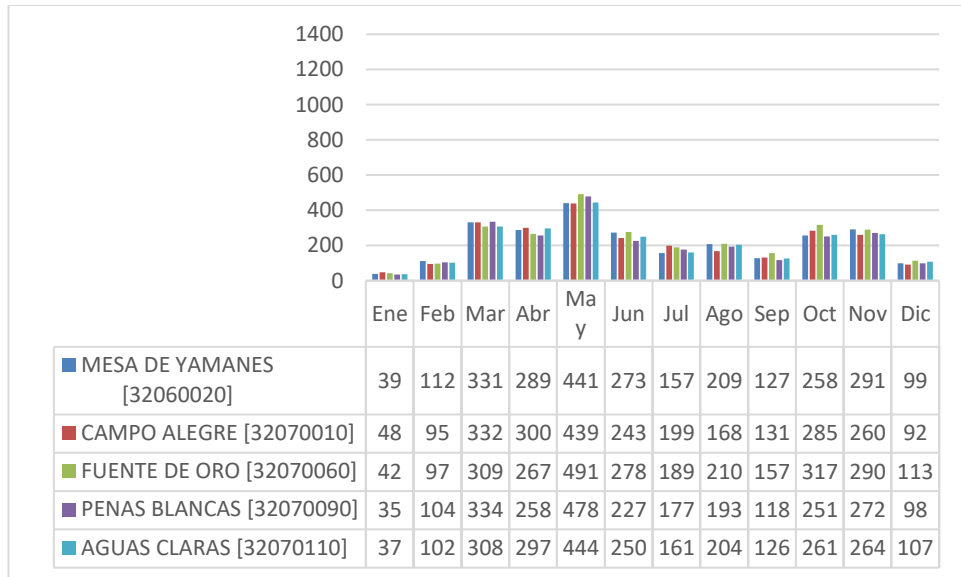


Figura 82: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2017.

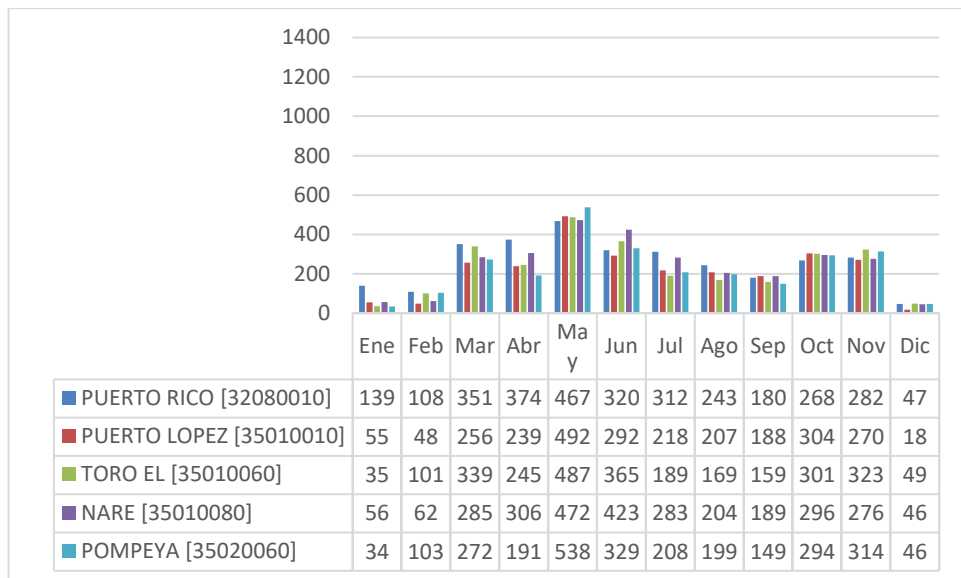


Figura 83: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2017.

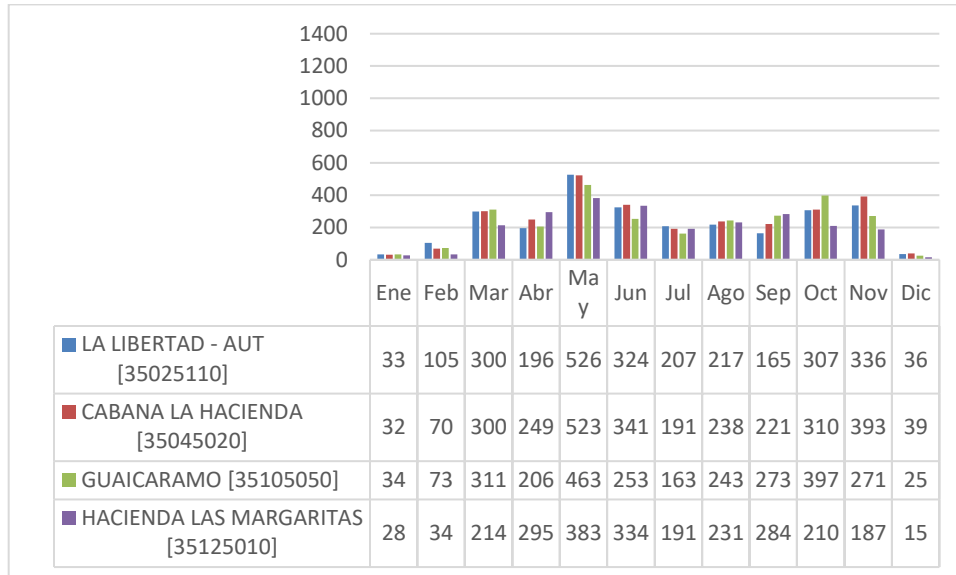


Figura 84: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2017.

Piedemonte

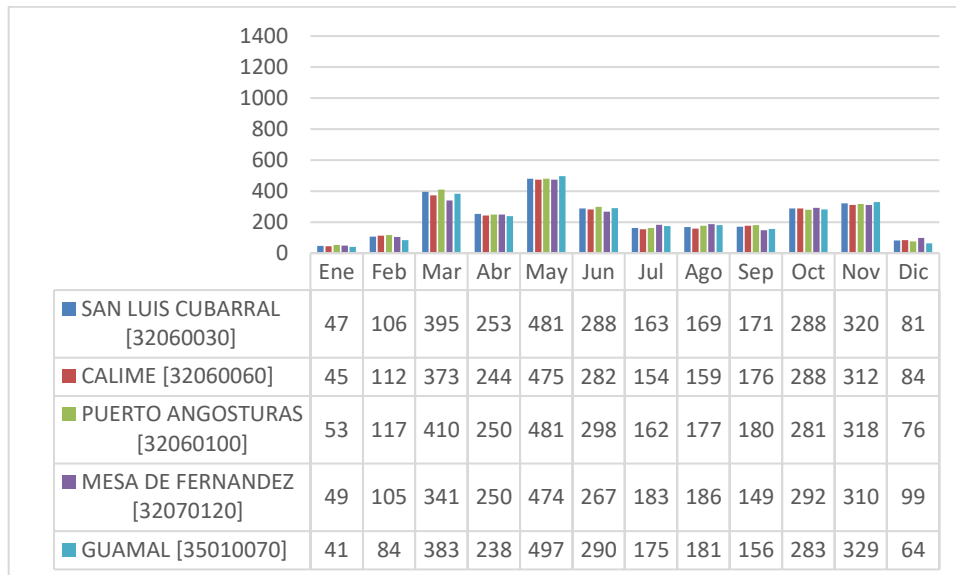


Figura 85: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2017.

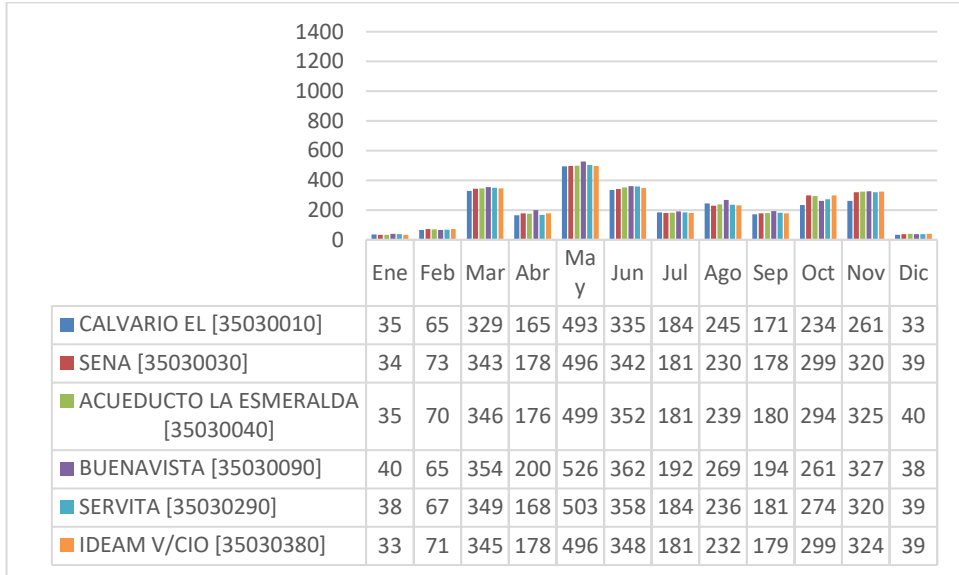


Figura 86: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2017.

Llanura Amazónica

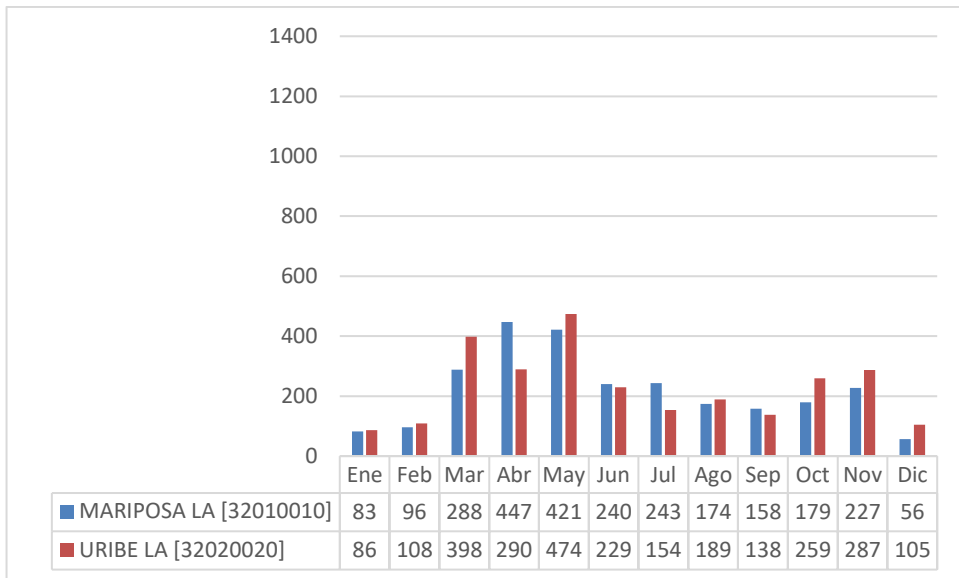


Figura 87: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2017.

2018

Atillanura

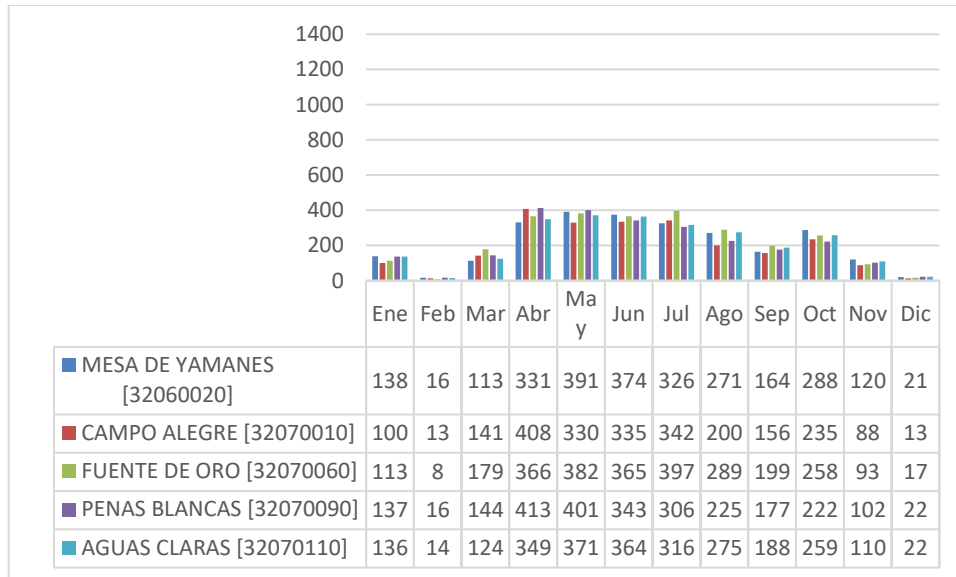


Figura 88: Grafica de precipitación estimada para la atillanura en el 2018.

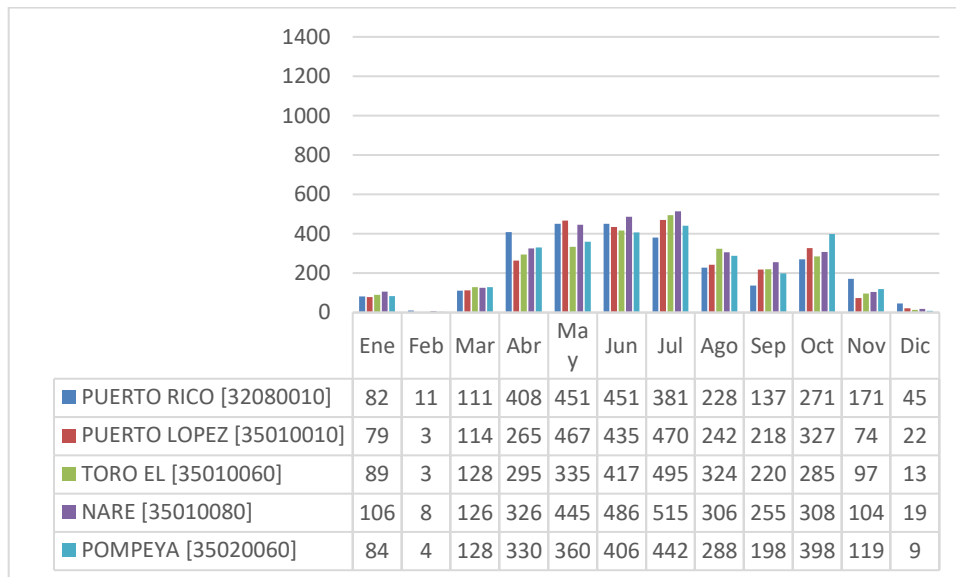


Figura 89: Grafica de precipitación estimada para la atillanura en el 2018.

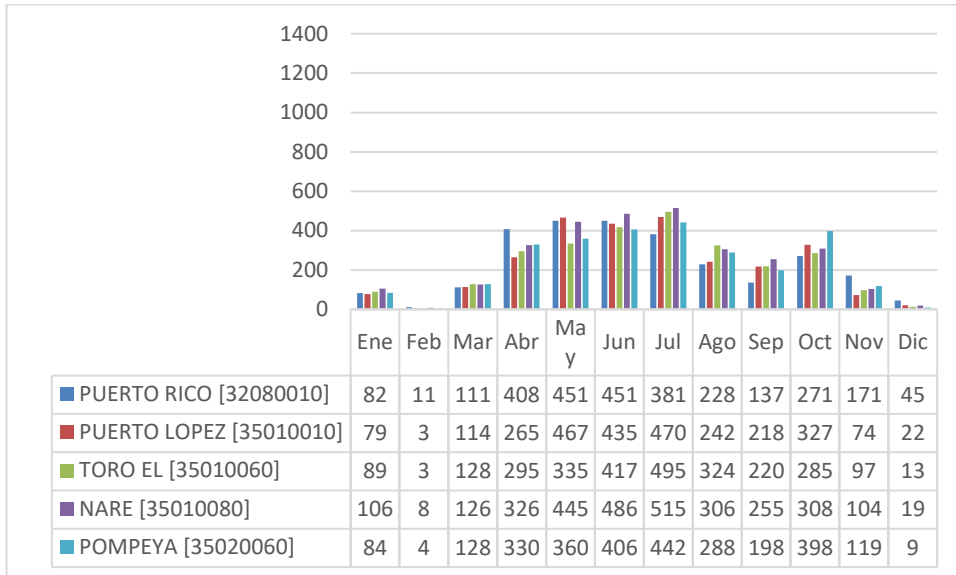


Figura 90: Grafica de precipitación estimada para la altillanura en el 2018.

Piedemonte

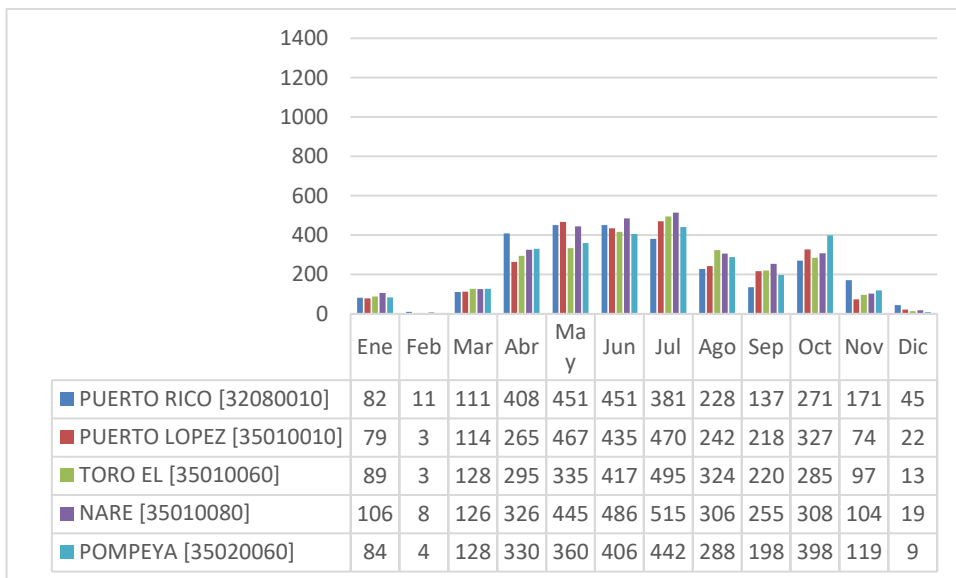


Figura 91: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2018.

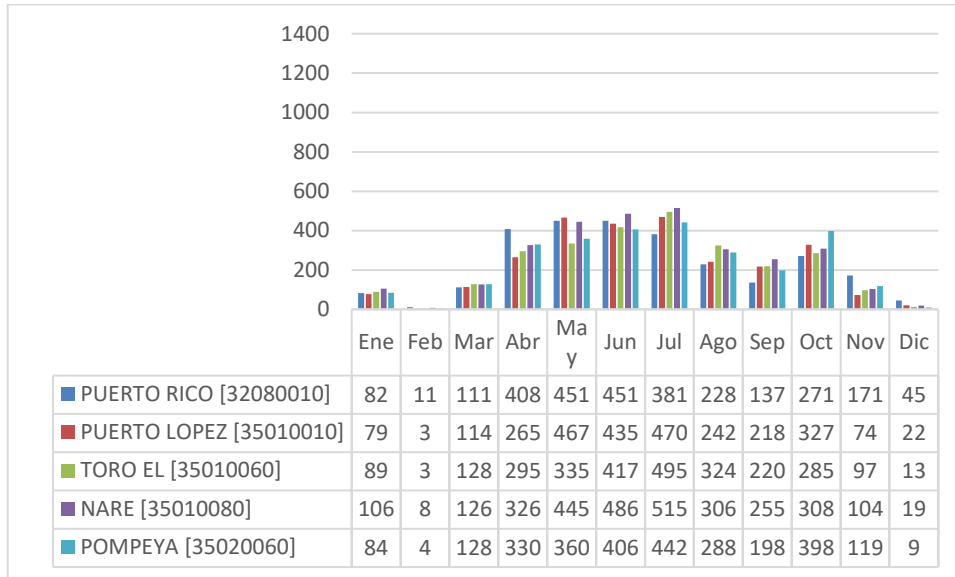


Figura 92: Grafica de precipitación estimada para el piedemonte en el 2018.

Llanura Amazónica

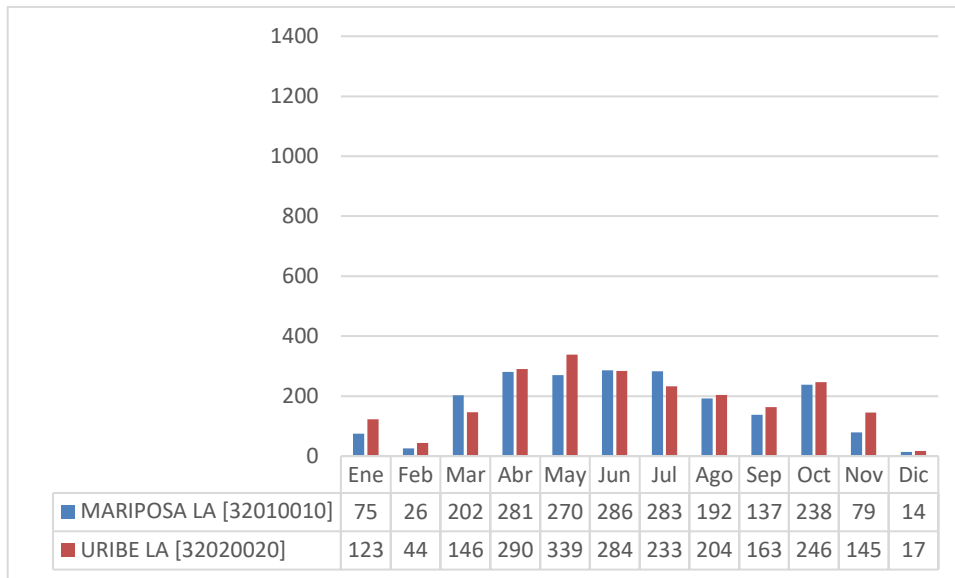
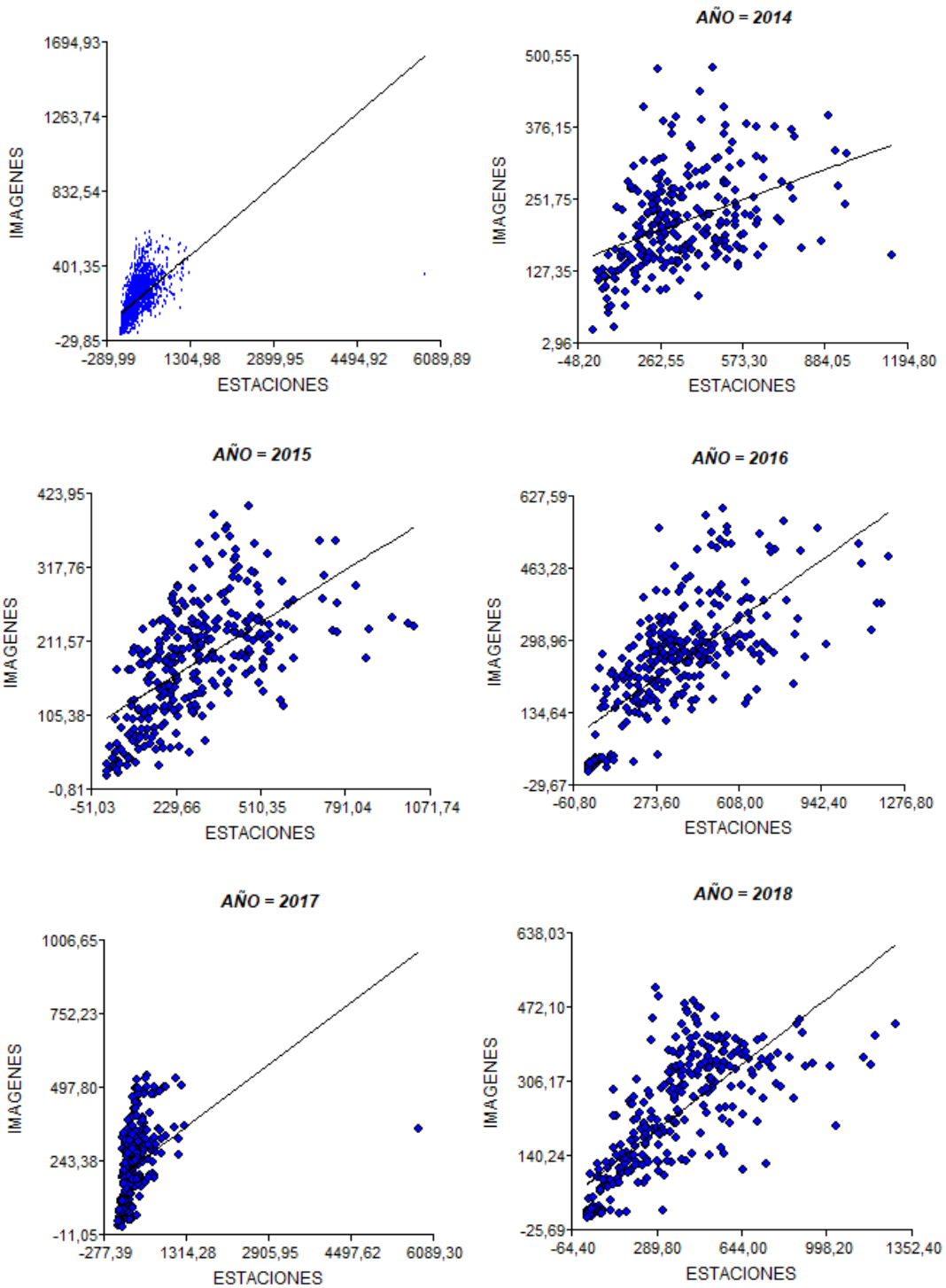
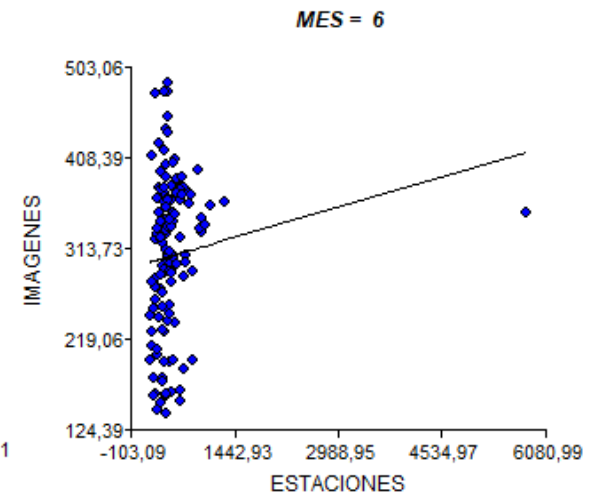
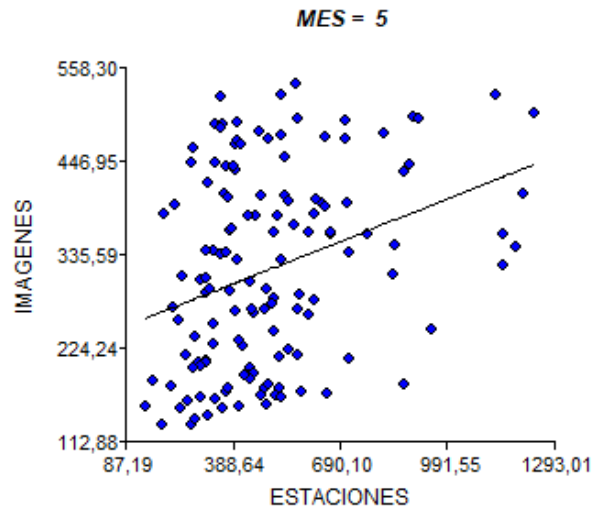
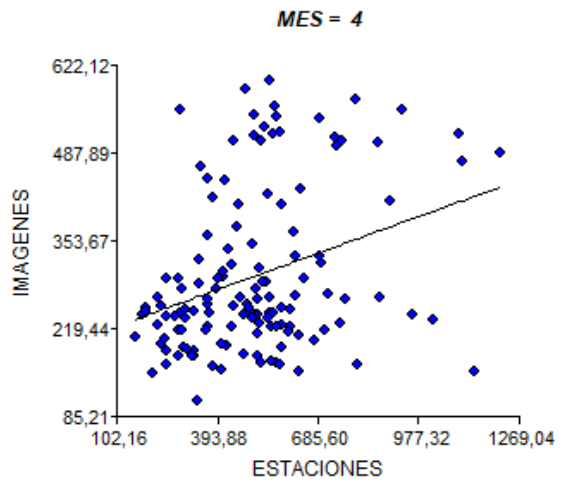
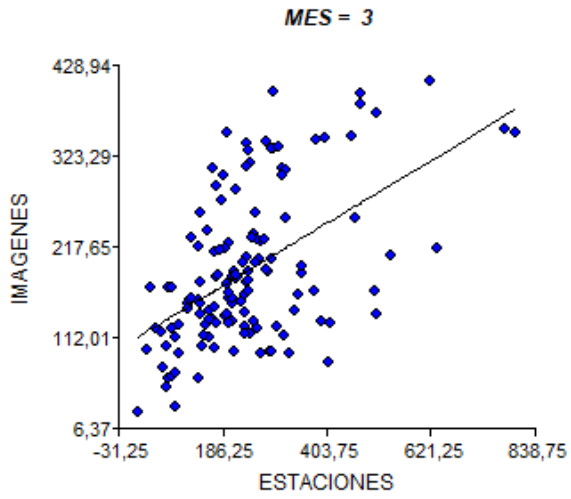
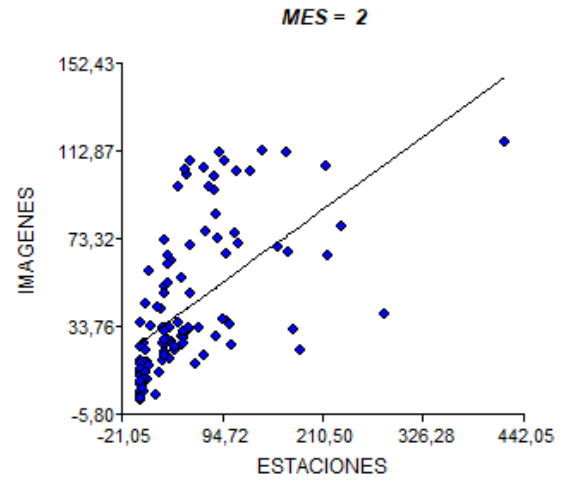
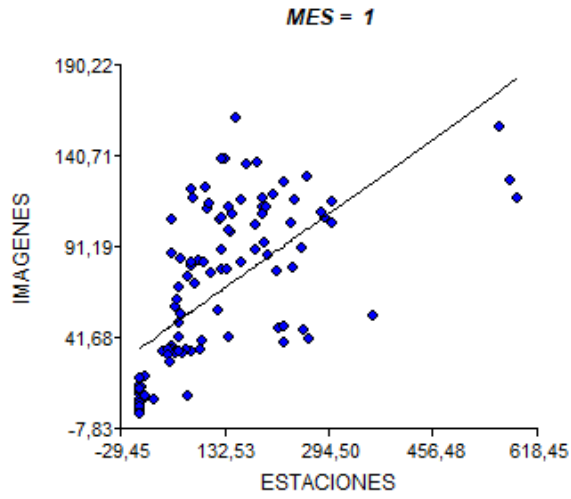
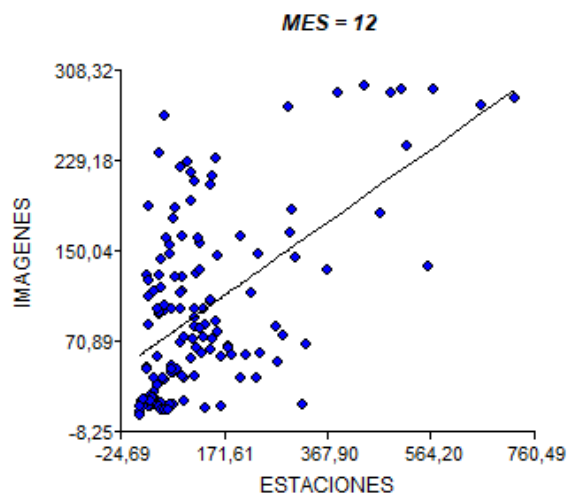
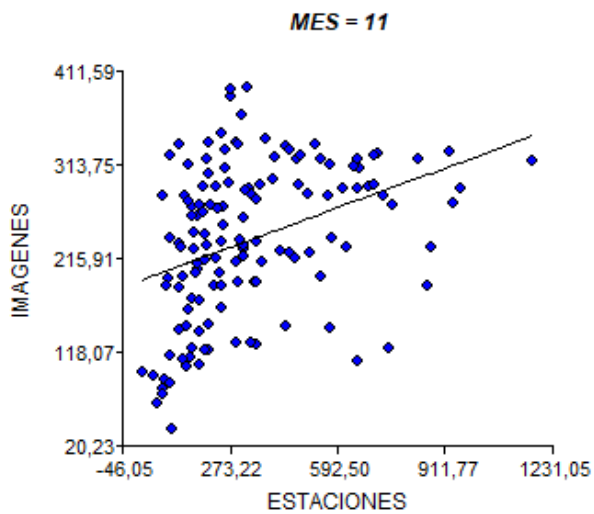
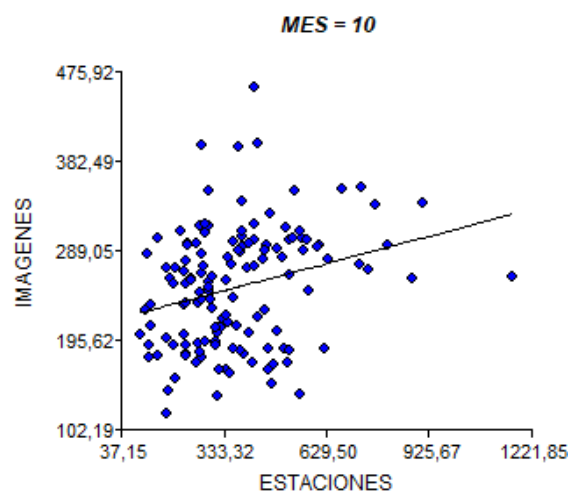
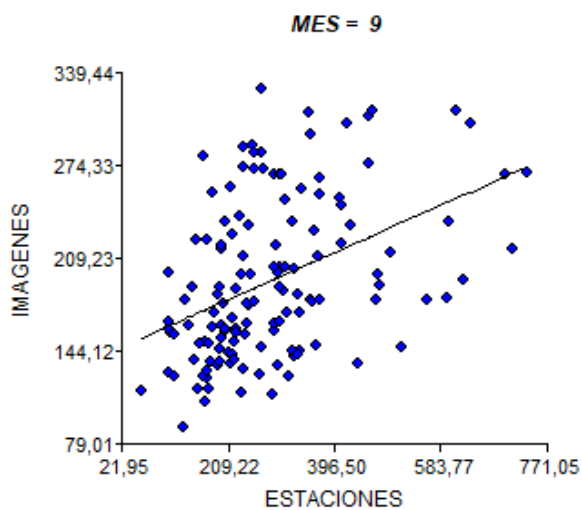
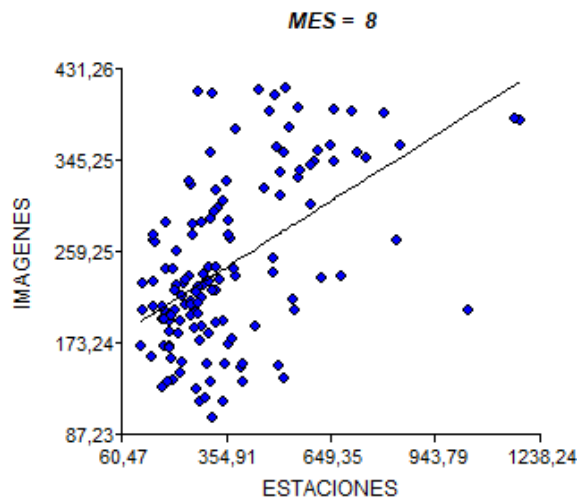
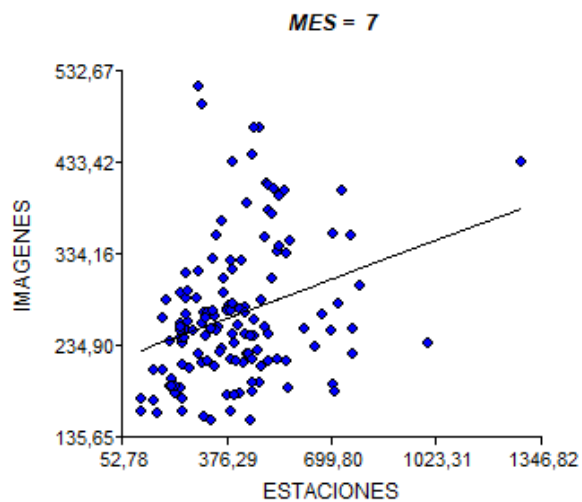


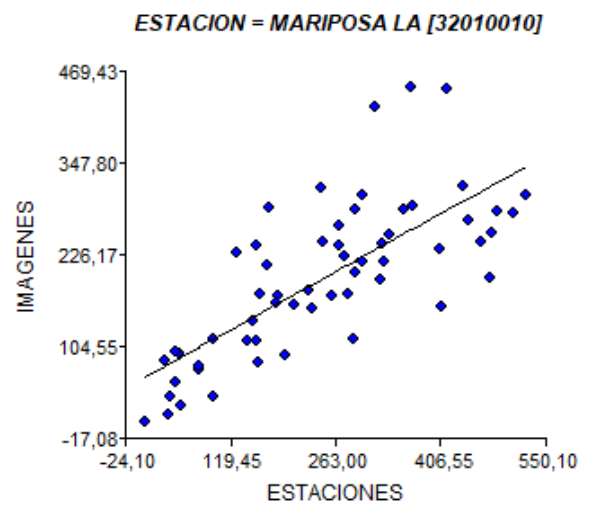
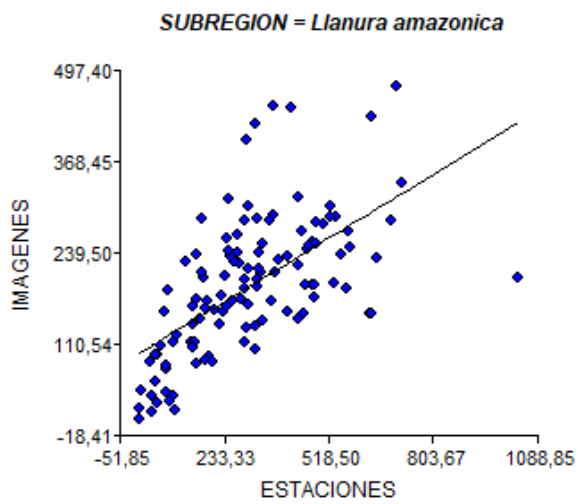
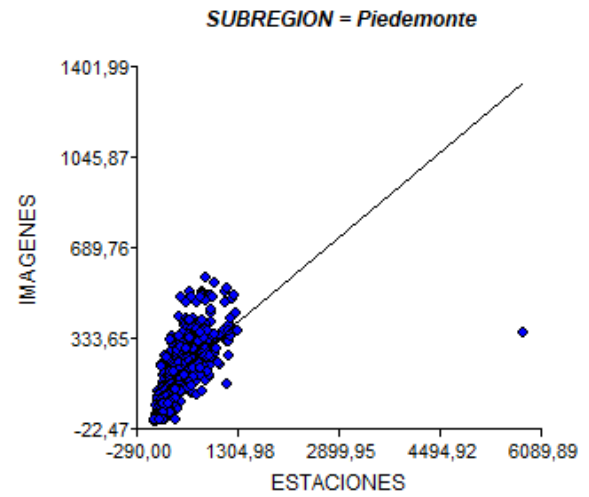
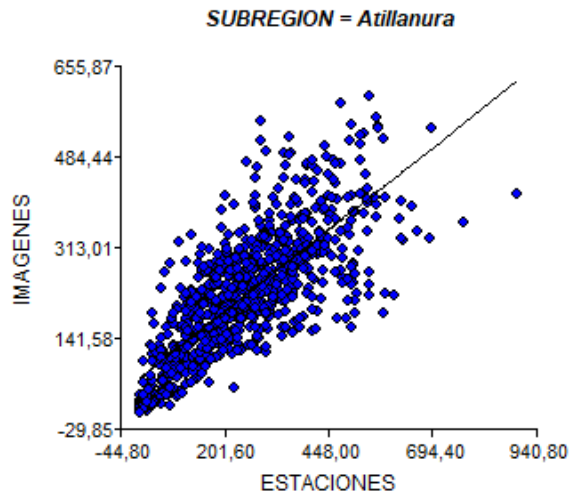
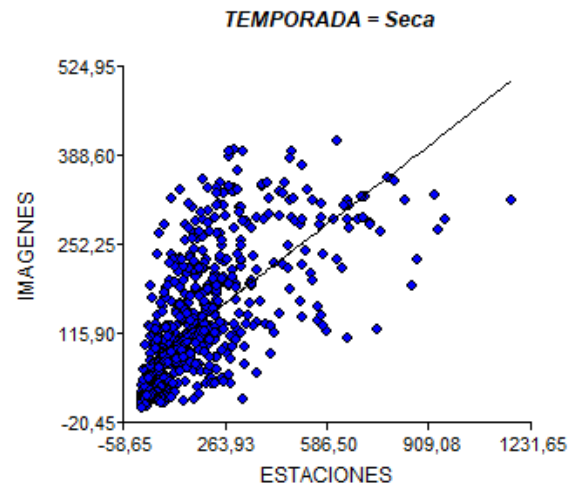
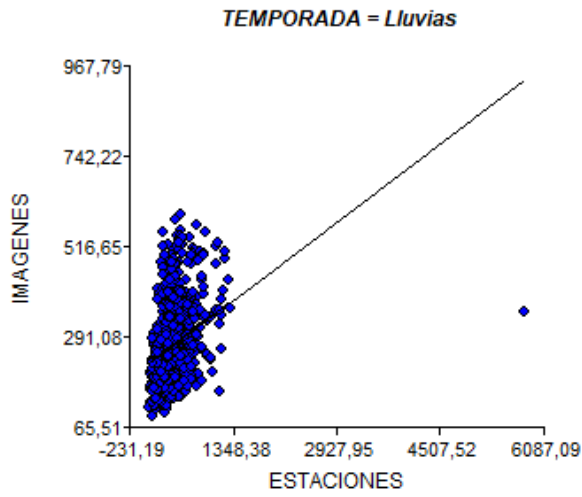
Figura 93: Grafica de precipitación estimada para la llanura amazónica en el 2018.

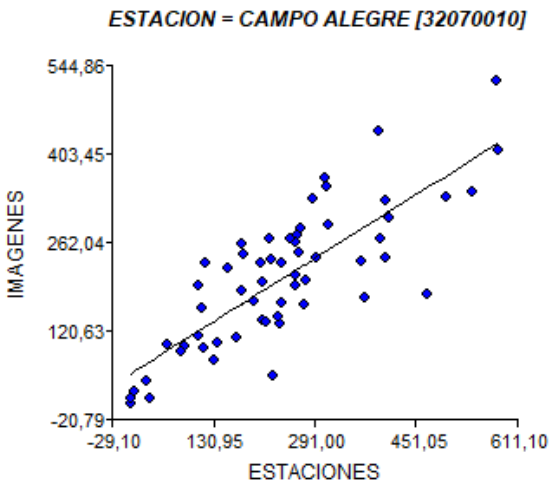
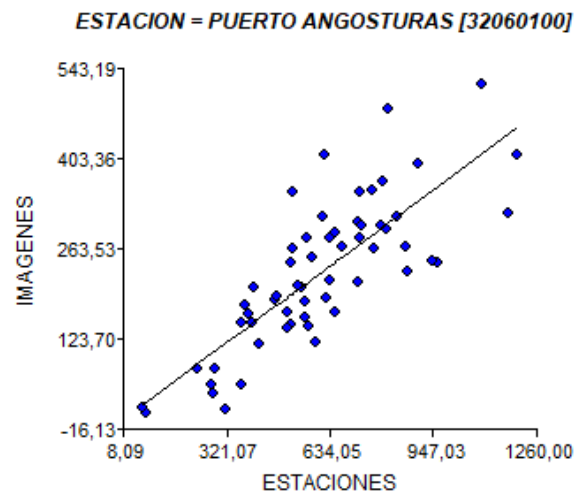
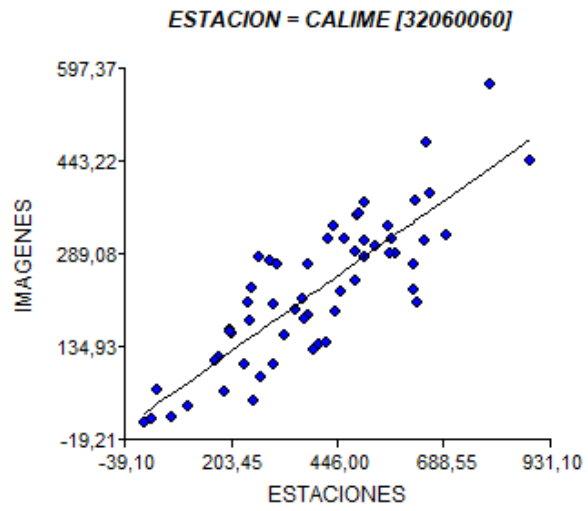
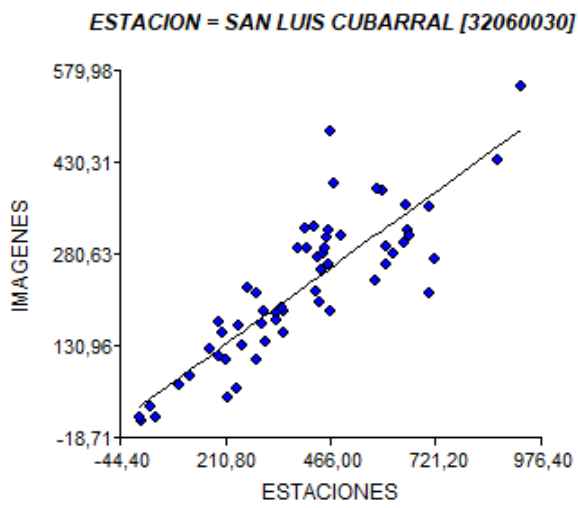
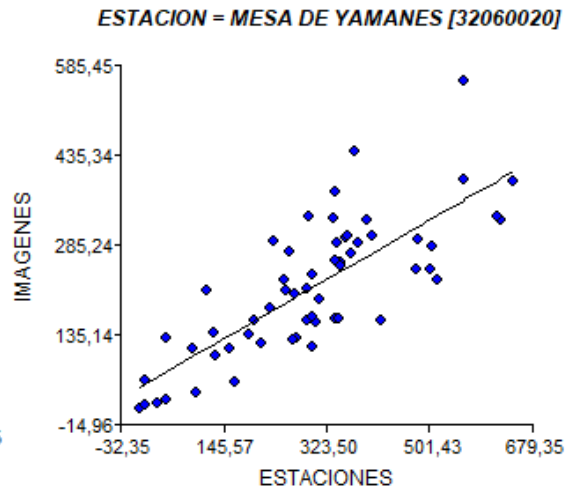
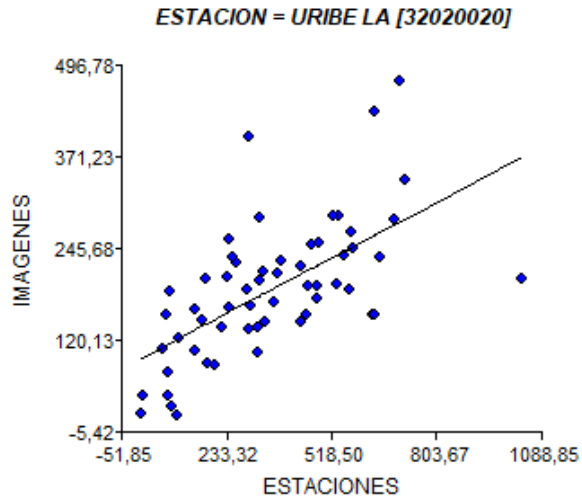
E. Anexo E: Graficas de correlación entre datos de las estaciones vs imágenes satelitales



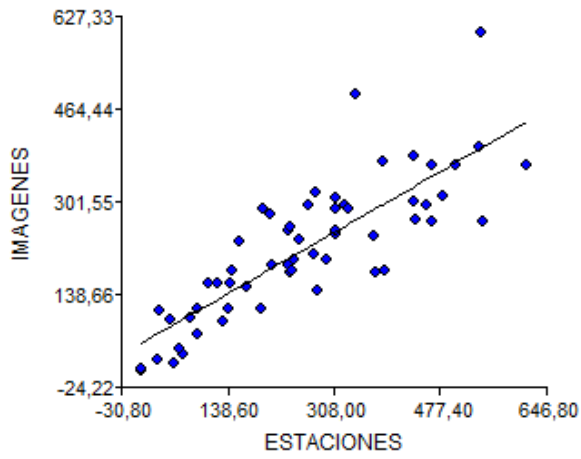




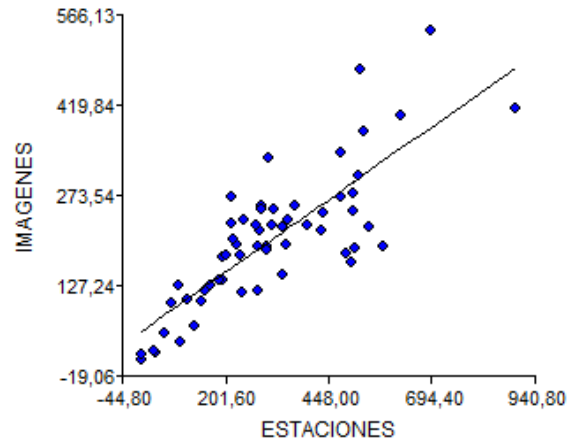




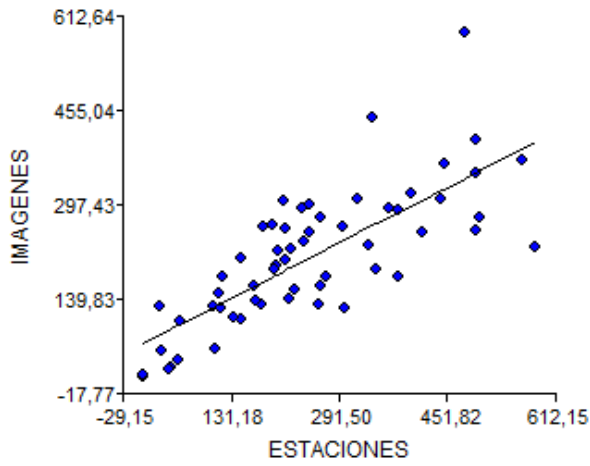
ESTACION = FUENTE DE ORO [32070060]



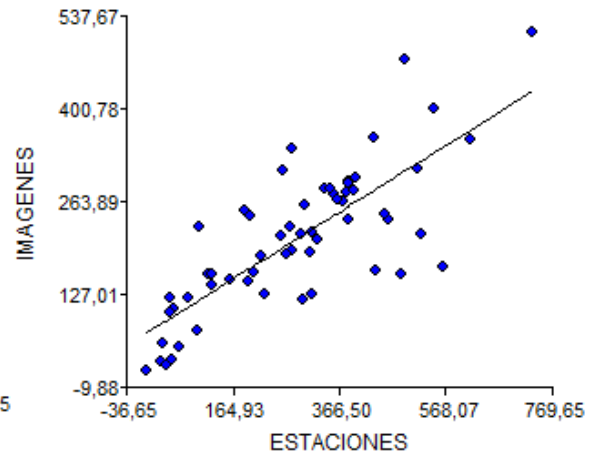
ESTACION = PENAS BLANCAS [32070090]



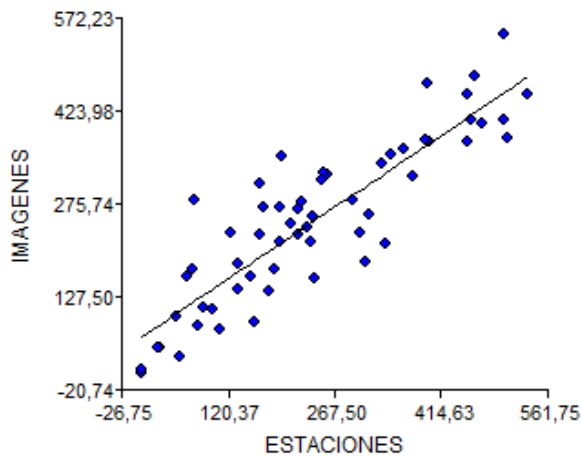
ESTACION = AGUAS CLARAS [32070110]



ESTACION = MESA DE FERNANDEZ [32070120]



ESTACION = PUERTO RICO [32080010]



ESTACION = PUERTO LOPEZ [35010010]

