

UNIVERSIDAD DE CUENCA



Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Caracterización de la precipitación espacial en las cuencas hidrográficas de los ríos  
Tomebamba y Yanuncay

Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniera Ambiental.

AUTORA:

Liseth Cristina Vélez Brito

C.I. 0106550742

DIRECTOR:

Ing. Rolando Enrique Célleri Alvear, PhD.

C.I. 0602794406

TUTORA:

Ing. Johanna Marlene Orellana Alvear, Msc.

C.I. 0104162268

Cuenca-Ecuador

2018

## **CARACTERIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ESPACIAL EN LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LOS RÍOS TOMBAMBA Y YANUNCAY.**

### **RESUMEN**

El conocimiento de las variables ambientales resulta importante debido a su influencia en las actividades humanas. Un factor de interés es la precipitación. El recurso hídrico es esencial para el desarrollo de las poblaciones siendo vital para actividades como ganadería, agricultura, actividades industriales, domésticas, generación electricidad y para el desarrollo de la vida misma. A lo largo de los años se han implementado técnicas y equipos de medición que permiten recopilar información sobre la precipitación en una zona de interés. El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar la precipitación en las Subcuencas hidrográficas Tomebamba y Yanuncay mediante el uso de imágenes de precipitación del radar meteorológico CAXX. El estudio se realizó a nivel de subcuencas, zonas altitudinales y uso de suelo reportándose valores de precipitación mensual promedio, desviación estándar, celda con valor máximo de precipitación y celda con valor mínimo de precipitación. Se aplicó estadística de mapas usando el software Python 2.7.12 y se procesaron archivos cartográficos mediante el software ArcGis 10.5. Se definieron las características de la precipitación en cada subcuenca durante meses húmedos y secos de 2016-2017. Además, se comparó la distribución de precipitación entre las subcuencas y se calculó la correlación entre precipitación y altitud mediante una regresión lineal simple. Los resultados mostraron que existe una alta correlación entre la precipitación de las subcuencas siendo en Yanuncay siempre menor que en Tomebamba y que existe una baja correlación entre precipitación y altitud. Por otro lado, a nivel de uso de suelo, la precipitación no presentó ningún patrón.

**PALABRAS CLAVE:** RADAR METEOROLÓGICO, PRECIPITACIÓN, TOMBAMBA, YANUNCAY.



## ABSTRACT

Knowledge of environmental variables is important because of their influence on human activities. A factor of interest is precipitation. The water resource is essential for the development of the populations, being vital for activities such as livestock, agriculture, industry, domestic activities, generation of electricity and for the development of life itself. Throughout the years, measurement techniques and equipment have been implemented to collect information on precipitation in an area of interest. The objective of this work was to characterize precipitation in the Tomebamba and Yanuncay hydrographic basins through the use of precipitation images from the CAXX meteorological radar. The study was carried out at the level of sub-basins, altitudinal zones and land use, reporting values of average monthly precipitation, standard deviation, cell with maximum value of precipitation and cell with minimum value of precipitation. Map statistics were applied using Python 2.7.12 software and cartographic files were processed using ArcGis 10.5 software. The characteristics of the precipitation in each sub-basin during wet and dry months of 2016-2017 were defined. In addition, the distribution of precipitation between the sub-basins was compared and the correlation between precipitation and altitude was calculated using a simple linear regression. The results showed that there is a high correlation between the precipitations of the sub-basins, being in Yanuncay always lower than in Tomebamba, but there is a low correlation between precipitation and altitude. By other hand, at the level of land use, rainfall did not present any pattern.

**KEYWORDS:** WEATHER RADAR, PRECIPITATION, TOMBAMBA, YANUNCAY.



## ÍNDICE

RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	3
AGRADECIMIENTO .....	8
1. Introducción .....	9
1.1. Antecedentes .....	9
1.2. Justificación .....	11
1.3. Objetivos .....	12
1.3.1. Objetivo general .....	12
1.3.2. Objetivos específicos .....	12
2. Marco teórico .....	12
3. Metodología .....	13
3.1. Área de estudio .....	13
3.2. Radar Meteorológico de medición de lluvias CAXX.....	15
3.3. Recopilación y análisis de datos. ....	16
3.4. Caracterización de la precipitación en cada subcuenca hidrográfica.....	17
3.5. Caracterización de la precipitación en diferentes zonas altitudinales.....	19
3.6. Caracterización de la precipitación en diferentes usos de suelo. ....	21
4. Resultados. ....	23
4.1. Precipitación en las subcuencas hidrográficas Tomebamba y Yanuncay.....	23
4.2. Precipitación en diferentes zonas altitudinales. ....	24
4.3. Precipitación en diferentes usos de suelo. ....	29
5. Conclusiones .....	32
6. Recomendaciones.....	33
7. Bibliografía.....	34
8. Anexos.....	40
Anexo 1. Precipitación mensual acumulada. ....	40
Anexo 2. Diagramas de cajas y bigotes. ....	45



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona de estudio, ubicación y alcance del Radar de lluvia CAXX. ....	15
Figura 2. Zonas altitudinales consideradas para el estudio. ....	20
Figura 3. Usos de suelo en el área comprendida por las subcuencas Tomebamba y Yanuncay. ....	22
Figura 4. Precipitación mensual promedio acumulada. Tomebamba vs Yanuncay. ....	24
Figura 5. Precipitación mensual promedio por zonas de altitud. Tomebamba vs Yanuncay. ....	28
Figura 6. Correlación entre la precipitación promedio mensual de las subcuencas Tomebamba y Yanuncay. ....	29
Figura 7. Precipitación mensual promedio por uso de suelo para toda la zona de estudio. 31	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de datos disponibles para cada mes de datos analizados. ....	17
Tabla 2. Porcentaje de datos depurados por mes para cada subcuenca. ....	18
Tabla 3. Rangos de altitud por zona altitudinal-Subcuencas Tomebamba y Yanuncay. ....	20
Tabla 4. Estadísticas descriptivas de la precipitación mensual acumulada en la Subcuenca Tomebamba. ....	23
Tabla 5. Estadísticas descriptivas de la precipitación mensual acumulada en la Subcuenca Yanuncay. ....	23
Tabla 6. Precipitación mensual en la Subcuenca del Tomebamba por zonas altitudinales. ....	25
Tabla 7. Precipitación mensual en al Subcuenca del Yanuncay en diferentes zonas altitudinales. .	26
Tabla 8. Precipitación mensual promedio por uso de suelo para toda la zona de estudio. ....	30



Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Liseth Cristina Vélez Brito, autora del trabajo de titulación "Caracterización de la precipitación espacial en las cuencas hidrográficas de los ríos Tomebamba y Yanuncay", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, octubre 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Liseth Brito", written over a horizontal line.

Liseth Cristina Vélez Brito

CI: 0106550742

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

Liseth Cristina Vélez Brito en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Caracterización de la precipitación espacial en las cuencas hidrográficas de los ríos Tomebamba y Yanuncay", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Liseth', written over a horizontal line.

Liseth Cristina Vélez Brito

CI: 0106550742



## AGRADECIMIENTOS

A Dios, quién ha sido mi guía y me ha dado la sabiduría y fortaleza para lograr cada una de mis metas.

A mis padres, Freddy y Georgina, por todo el amor que me han dado, por sus consejos y su apoyo incondicional que me han permitido llegar hasta este punto en mi vida.

A mis hermanos, Erika, Marlon y Patricio, mi motivación para seguir adelante y ser mejor persona cada día, por todo su amor y soporte.

A mis amigas, Tania y Claudia, gracias por ser mi segunda familia, por su cariño, por las aventuras vividas y por todos sus consejos que me motivaron a continuar aún en los momentos más difíciles.

A mis hermanas de corazón Karina y Erika, gracias por todos los momentos vividos, su apoyo incondicional y por motivarme a siempre seguir adelante y a lograr mis metas.

A mi director, Ing. Rolando Céleri por su confianza y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A mi tutora, Ing. Johanna Orellana, por todos los conocimientos compartidos, por su paciencia y apoyo constante.

Al Blgo. Danilo Mejía y al Ing. Galo Carrillo, por todas las recomendaciones dadas para mejorar el presente trabajo.

Al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, Gobierno autónomo descentralizado de Loja, Empresa de telecomunicaciones, alcantarillado y agua potable de Cuenca y a la Fundación Alemana de Investigación; instituciones parte del proyecto “Operational rainfall monitoring in southern Ecuador”, quienes han facilitado los datos del radar meteorológico para la realización de la presente investigación.

A la Universidad del Azuay, Instituto Geográfico Militar, Instituto Nacional de estadísticas y censos y al Gobierno autónomo descentralizado de Cuenca, por proveer la información cartográfica necesaria para el desarrollo del este trabajo.





## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

El conocimiento de las características de los factores ambientales de nuestro entorno resulta de gran importancia ya que estos influyen de manera significativa sobre el desarrollo de todos los organismos vivos presentes y condicionan su dinámica en el entorno. Factores como la precipitación, temperatura, radiación solar, etc., han sido estudiados por varios años con el fin de conocer las características del entorno y aprovechar los diferentes recursos para el desarrollo de la humanidad. Una de las variables más trascendentales es la precipitación, esta juega un papel primordial en las interacciones de los ecosistemas y en las actividades socioeconómicas de las poblaciones. La precipitación es clave para la sociedad ya que afecta su calidad de vida y de ella dependen actividades como la agricultura, el adecuado ordenamiento territorial, el desarrollo de la vida en los ecosistemas y particularmente, la disponibilidad de recursos hídricos para las actividades básicas del hombre (Domínguez, Velásquez, Jiménez, & Faustino, 2008; Méndez, Soto, Rivera, & Caetano, 2014; Puertas, Carvajal, & Quintero, 2011; Zucarelli, 2013).

El agua proveniente de la precipitación al llegar a la superficie terrestre sigue un curso hasta llegar a las diferentes fuentes hídricas de las cuales hace uso el ser humano. Las cuencas hidrográficas funcionan como drenaje de la precipitación. Esta es una zona donde interactúa el agua con los diferentes elementos como suelo, clima y vegetación. La falta de información restringe un adecuado manejo de dichas cuencas. Si bien se han implementado ciertas tecnologías para la medición de variables como la precipitación (Isotta et al., 2014; León Méndez, Hernández González, Garrido Monagas, & Andalia Gilbert, 2013); en los estudios realizados en regiones extensas con medidores puntuales, se presenta cierta incertidumbre cuando ocurren eventos de precipitación en zonas donde no están ubicados estos sensores (Isotta et al., 2014; León Méndez et al., 2013; Woodley, Olsen, Herndon, & Wiggert, 1975).

Una red de pluviómetros y/o pluviógrafos provee información mucho más precisa de puntos específicos. Sin embargo, para obtener una distribución espacial se aplican métodos de interpolación que pueden generar una aproximación gruesa y no precisa de la distribución espacial de la precipitación. Esto ocurre especialmente cuando existe una



topografía compleja y la estructura espacial de la precipitación se ve afectada por factores locales (Biggs & Atkinson, 2011; Yoon, Phuong, & Bae, 2012). Así, estos métodos no son capaces de capturar la variabilidad de eventos importantes de precipitación (Buytaert, Celleri, Willems, Bièvre, & Wyseure, 2006; Tao, Chocat, Liu, & Xin, 2009).

Por otro lado, el uso de radares meteorológicos para el estudio de la precipitación posee algunas ventajas tales como una cobertura continua, alta delimitación espacial de la precipitación, la obtención de una zona tridimensional o bidimensional continua de eventos de precipitación; además se pueden obtener estimaciones de lluvia en intervalos cortos de tiempo (Méndez-Antonio, Domínguez-Mora, Magaña-Rueda, Caetano, & Carrizosa-Elizondo, 2006). Además, los datos no requieren una interpolación ni extrapolación espacial ya que estima la precipitación en una malla de celdas de una distancia definida según el radar. Esto permite estudiar la evolución de tormentas desde su origen hasta el lugar de precipitación ya que el radar puede detectar campos de precipitación sobre el área de cobertura del mismo (Damant, Austin, Bellon, & Broughton, 1983).

En Ecuador, la precipitación ha sido analizada a lo largo de los años mediante estaciones meteorológicas conformadas principalmente por pluviómetros. Sin embargo, a fin de mejorar la calidad de la información meteorológica respecto a la distribución espacial de la precipitación se han implementado radares meteorológicos en los últimos años. La ciudad de Quito cuenta con una red de radares que provee información dentro del casco urbano. Este proyecto fue implementado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Inamhi) mediante un convenio con la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Senescyt) (INAMHI, 2015). Así también cabe recalcar la red de radares presente en el sur del país, proyecto liderado por la Fundación Alemana de Investigación Científica (DFG por sus siglas en alemán) a través de la Universidad Philipps de Marburg (Alemania) y en cooperación con instituciones locales como el Gobierno Provincial de Loja, ETAPA EP, Universidad Técnica Particular de Loja y Universidad de Cuenca. El proyecto denominado “RadarNet-Sur”, es una red meteorológica que incluye tres radares ubicados en el Cerro Guachaurco cerca de Celica (GUAXX), el Cerro El Tiro cerca de Loja (LOXX) y el Cerro Paragüillas en el Parque Nacional Cajas (CAXX) cubriendo gran parte del sur del Ecuador (Bendix et al., 2016; Cárdenas, 2017).



## 1.2. Justificación

El uso de datos de precipitación provenientes de radar meteorológico ha ido tomando espacio dentro de la investigación sobre este factor climático. Varios son los autores que mencionan dentro de sus investigaciones las ventajas de este equipo para diferentes aplicaciones tales como pronóstico del movimiento y patrones de precipitación (Austin & Bellon, 1974), modelado hidrológico (Guerra Cobián, Bâ, Quentin Joret, Díaz Delgado, & Cârsteanu, 2011; Magaña-Hernández, Bá, & Guerra-Cobián, 2013), prevención de deslizamientos de tierra y flujos de escombros (Aleotti, 2004; United States Geological Survey & National Oceanic Atmospheric Administration, 2005), entre otros.

Los datos de radar meteorológico en el sur del Ecuador no han sido explotados aún y es que para aplicaciones complejas es necesario establecer una línea base sobre zonas de interés utilizando dichos datos, esto permitirá ampliar los conocimientos de las características de la pluviosidad en dichas zonas como lo son cuencas hidrográficas, sobre todo en cuanto a la distribución espacial refiere abriendo paso a nuevos estudios y aplicaciones mencionadas anteriormente.

El presente trabajo pretende identificar las características de la precipitación en las cuencas hidrográficas de dos de los principales ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca como lo son Tomebamba y Yanuncay; esto usando imágenes de precipitación del radar meteorológico CAXX a fin de conocer las características de la precipitación y proveer información base que contribuya en el adecuado manejo de instancias que dependen de la lluvia, por ejemplo para la conservación de sitios y el manejo adecuado de uso de suelo. Se pretende identificar zonas de interés mediante el análisis de precipitación por los criterios de altitud y uso de suelo.

En el ámbito de la Ingeniería Ambiental proyectos tales como emplazamiento de rellenos sanitarios, proyectos hidroeléctricos, programas de mitigación y control del recurso hídrico, programas de saneamiento ambiental, manejo integral de cuenca hídricas, gestión de recursos naturales, entre otros, requieren de información certera sobre precipitación por lo que el estudio representa un aporte para futuros estudios o de línea base para futuros proyectos que se planeen realizar en el área de estudio.



### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo general

Caracterizar la precipitación espacial en las cuencas hidrográficas de los ríos Tomebamba y Yanuncay.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- i. Identificar y analizar las características de la precipitación en las cuencas hidrográficas en diferentes zonas altitudinales.
- ii. Caracterizar la precipitación en las cuencas hidrográficas en los diferentes usos de suelo presentes.

## 2. Marco teórico

A fin de cuantificar e identificar las características espaciales y temporales de la precipitación tales como intensidad, frecuencia, duración, cantidad, entre otras; en un área de interés se han desarrollado diversos instrumentos. Estos instrumentos se clasifican principalmente en dos categorías; mecánicos y sensores remotos. De los instrumentos mecánicos podemos destacar los pluviómetros y pluviógrafos y entre los sensores remotos destacan los radares meteorológicos (Renom, 2011). Si bien los instrumentos mecánicos proveen información valiosa, los radares meteorológicos representan una gran ventaja sobre todo en cuanto a la información de distribución espacial de la precipitación. Se puede decir que ambos tipos de instrumentos son complementarios para el entendimiento del comportamiento de la precipitación.

La información de radar meteorológico ha sido analizada y usada en diversos estudios y aplicaciones. Un estudio de estimación de caudales en Coahuila, México usando datos de precipitación de radar meteorológico obtuvo resultados satisfactorios al realizar una simulación hidrológica. El estudio reconoce que el uso de precipitación estimada por radar en modelos hidrológicos sobre todo en zonas con escasa o ninguna información meteorológica representa una fuente alternativa de información; así también cuando se quiere conocer la variabilidad espacio-tiempo de la precipitación (Magaña-Hernández et al., 2013).



(Guerra Cobián et al., 2011) mencionan además que los datos de radar son especialmente útiles en modelado hidrológico en zonas con tormentas aisladas o tormentas convectivas particularmente si no se posee una red de estaciones meteorológicas que cubra eficientemente tales zonas.

Lo último es confirmado por (United States Geological Survey & National Oceanic Atmospheric Administration, 2005), quienes mencionan que el uso de radares meteorológicos para el análisis de precipitación resulta más efectiva que el uso de una red de pluviómetros. Esto por cuanto, solo una red extremadamente densa de pluviómetros podría equiparar los resultados de un radar. Por otra parte un radar detecta celdas de lluvia intensa pudiendo extrapolarse los datos para prever la precipitación probable en las próximas una o dos horas, capacidad de predicción que no puede igualarse por una red de pluviómetros.

Además se puede mencionar el estudio realizado en Argentina que evalúa los datos de precipitación de radar meteorológico comparándolos con datos pluviométricos mediante regresiones lineales simples. Este estudio se llevó a cabo dividiendo los pluviómetros en 3 grupos según su relación espacial al radar (50km, 100km y más de 100km) y con datos de precipitación acumulada horaria. Los resultados obtenidos para este caso muestran que no existen diferencias en las comparaciones para los valores de pluviómetros de 100 km y más de 100 km mientras que para los datos de pluviómetros en el rango de 50km los valores bajos de precipitación se tienden a sobreestimar en tanto que los valores altos se subestiman (Belmonte & Di Bella, 2012).

### **3. Metodología**

#### **3.1. Área de estudio**

El área de estudio está comprendida dentro del radio de alcance de 60 km del radar meteorológico CAXX. El área de interés son las subcuencas hidrográficas de los ríos Tomebamba y Yanuncay pertenecientes a la cuenca del río Paute y ubicadas al oeste de la misma (Cocha Pallo, 2009).

La zona de estudio presenta una pluviosidad abundante y un régimen de lluvias con estación seca y estación lluviosa (Díaz Delgado, Esteller Alberich, & López-Vera, 2006).



La altitud presenta variaciones que van de los 2440 a 4419 m.s.n.m (Vallejo Llerena, 2014).

Con respecto a la temperatura, esta varía en función de la altitud, la zonas alta presenta una temperatura promedio de 4°C, sin embargo, se han registrado temperaturas de 0°C, en la zona baja la temperatura mínima promedio es de 9°C y la máxima promedio de 23°C (Donoso, 2002; National Oceanic Atmospheric Administration, 2018). Por otro lado, dentro de los usos de suelo presentes se puede mencionar páramo, cuerpos de agua, bosque nativo, cultivos, mosaico agropecuario, vegetación arbustiva, pastizal, plantación forestal, área poblada y área erosionada (GAD provincial de Azuay, 2015).

La subcuenca del río Tomebamba posee un área de 380.42 km<sup>2</sup> y la subcuenca del Yanuncay 418.88 km<sup>2</sup> (Peñañiel Romero, 2014). La subcuenca del río Tomebamba comprende parte de las parroquias de Sayausí, San Joaquín y Cuenca mientras que la subcuenca del río Yanuncay comprende parte de las parroquias Baños, San Joaquín, Sayausí, Cuenca, El Valle, Chaucha, San Fernando, San Gerardo, Victoria del Portete y Zhaglu; estas últimas cinco en pequeñas proporciones (Aguirre Andrade, 2011; Pesántez Quezada, 2015).

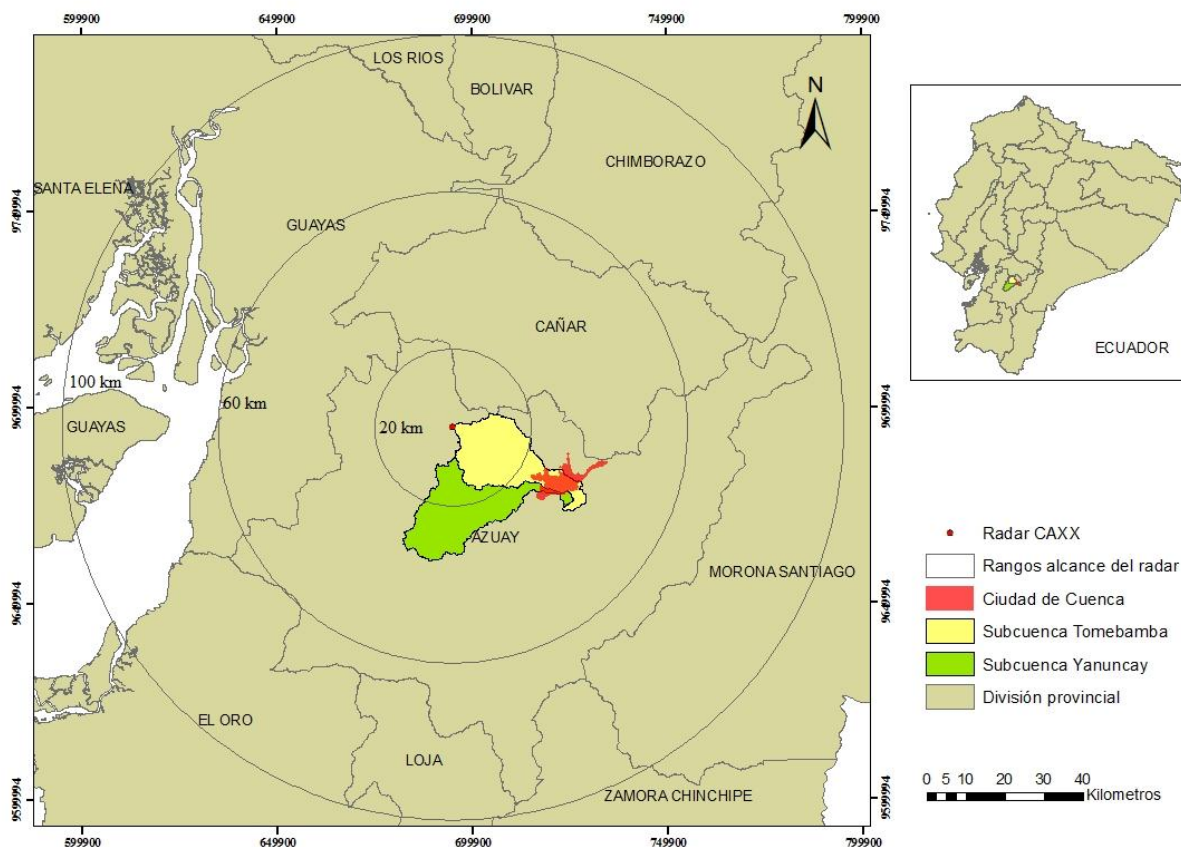


Figura 1. Zona de estudio, ubicación y alcance del Radar de lluvia CAXX.

Elaboración: Autora.

Fuente: (GAD Cuenca, 2011; INEC, 2011; Universidad del Azuay, 2002).

### 3.2. Radar Meteorológico de medición de lluvias CAXX

Los radares meteorológicos son instrumentos de observación atmosférica que permite el análisis espacial y temporal de la precipitación, clasificación de la precipitación, rastreo de tormentas y medición de campos de viento. El radar permite la detección y medición a distancia mediante pulsos de energía y microondas (Moshinsky, 1995). Para el análisis de la precipitación el radar emite un haz (pulsos electromagnéticos) cubriendo un área y cuando las gotas de precipitación atraviesan por el haz, la señal reflejada permite al radar grabar la información; es decir, el radar recibe el reflejo de energía de dichas gotas de precipitación registrando la información en datos de reflectividad mismos que posteriormente en el procesamiento de datos se transforman a unidades de precipitación (Guerra Cobián et al., 2011).

El radar CAXX forma parte del proyecto regional de Transferencia de Conocimiento Alemán “Operational rainfall monitoring in southern Ecuador” (Monitoreo operativo de lluvia en el sur de Ecuador) (German Research Foundation, 2018). El alcance del radar es



de 100 km de radio, con 3 radios de cobertura de 20, 60 y 100 km según la resolución espacial definida: 100, 250 y 400 metros. El radar CAXX se encuentra a una altura de 4450m.s.n.m ubicado en el cerro de Paragüillas al límite norte del Parque Nacional Cajas. El alcance del radar comprende el monitoreo de precipitación sobre las provincias de Azuay y Cañar y cubre parcialmente El Oro y Guayas. El mismo permite un escaneo a nivel de ondas electromagnéticas para posteriormente cuantificar lluvia registrando información cada 5 minutos (GAD provincial de Loja, 2018).

### **3.3. Recopilación y análisis de datos.**

Los datos de precipitación generados por el radar meteorológico CAXX fueron proporcionados por el Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca, los mismos se encuentran en formato NETCDF (Network Common Data Format), este es un formato estándar destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (Environmental Systems Research Institute, 2018). Se diferencia de otros por contener la suficiente información permitiendo así conocer la clase de datos que contiene el archivo como puede ser: tipo de variable, unidades, dimensiones, institución que la creó, entre otras; no así otros formatos que necesitan de un archivo adicional para su correcta interpretación. Puede ser manipulado por cualquier computadora que tenga las librerías NetCDF instaladas en su disco duro (Mosquera Vásquez, 2006).

Los archivos NETCDF son producto de un proceso de estimación de precipitación a partir de los valores originales de reflectividad medidos por el radar, esta estimación se efectúa a través de la relación precipitación(Z)-reflectividad (R) establecida por Marshall, Langille, & Palmer, (1947),  $Z=aR^b$ , donde a y b son coeficientes que se definen para cada zona de interés. Las estimaciones finales se efectuaron a través de un ajuste de sesgo a partir de datos de pluviómetros de la zona. Cada archivo proporcionado almacena información diaria de precipitación, correspondiente al acumulado horario, es decir cada archivo contiene 24 capas de información y los valores de precipitación se encuentran en mm.

Los datos de precipitación dentro de las imágenes de radar se presentan en forma de una matriz de datos de 1000 x 180 celdas de información, 1000 celdas que representan 100m de cobertura cada una, cubriendo el total de 100km que es el alcance del radar y 180 celdas representando 2° cada una hasta 360° de la rotación total del radar. Esto para cada una de las 24 capas. Dichos datos corresponden al periodo marzo-diciembre 2015, febrero-diciembre 2016 y enero-marzo 2017. Se cuantificó los datos diarios disponibles para cada





mes y a continuación se calculó el porcentaje que estos representaban para la totalidad de datos mensuales. Se obtuvo que los meses aptos para estudio son abril y mayo 2016 como meses representativos de la época lluviosa y noviembre 2016, enero y febrero 2017 como meses representativos de la época seca. Esto debido a que son los meses con mayor porcentaje de datos diarios y cumplen con el criterio de un máximo de 20% de datos faltantes al trabajar con datos de precipitación (Reinoso, 2015; Urrutia, Palomino, & Salazar, 2010), así se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de datos disponibles para cada mes de datos analizados.

MES AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2015			29.03%	100.00%	90.32%	76.67%	80.65%	51.61%		9.68%	100.00%	96.77%
2016		58.62%	100.00%	100.00%	87.10%	46.67%	64.52%	100.00%	83.33%	87.10%	83.33%	74.19%
2017	80.65%	96.43%	41.94%									

Elaboración: Autora.

Se utilizaron archivos cartográficos que fueron obtenidos de la página web de cartografía de libre acceso de la Universidad del Azuay la cual provee diversos mapas de la cuenca del río Paute. Los mapas de las subcuencas del Tomebamba y Yanuncay se obtuvieron de la página mencionada. El archivo cartográfico de uso de suelo utilizado fue generado por el GAD municipal del cantón Cuenca. Por otro lado, a partir de los shapets (archivos vectoriales) de las subcuencas se elaboró el shape de zonas altitudinales mediante las herramientas del software ArcGis 10.5.

### 3.4. Caracterización de la precipitación en cada subcuenca hidrográfica.

Una vez definido el periodo de estudio, se procedió a generar imágenes de precipitación acumulada mensual para dicho periodo. El primer paso fue la acumulación diaria de las imágenes, es decir generar un archivo de una sola capa de información representada en una matriz a partir de los archivos de 24 capas horarias en los archivos base aplicando álgebra de mapas. Esta aplicación se realizó mediante un script utilizando el software Python y la librería wradlib (Heistermann, Jacobi, & Pfaff, 2013) misma que permite procesar los archivos del tipo NETCDF en coordenadas polares. Una vez obtenidos los archivos de precipitación acumulada diaria se procedió a realizar una acumulación mensual para lo cual se generó un script en python nuevamente mediante la librería wradlib se acumuló los

datos diarios a mensuales para cada mes de interés y posteriormente se almacenó la información en un archivo NETCDF. Esta acumulación fue realizada en dos pasos a fin de reducir la complejidad del proceso y costo computacional de acumulación para los datos, facilitando el proceso.

Como control de calidad de los archivos acumulados se procedió a analizar los valores en las matrices de datos. Con este fin se generó una máscara en base a los límites de coordenadas de las subcuencas y se procedió a depurar los datos visualmente eliminando la información de aquellas celdas que presentaban datos extremos o aislados en base a los datos de las celdas contiguas. Para este análisis se generaron gráficos de cajas y bigotes que permitieron observar la presencia de outliers y su posterior exclusión para el estudio. El porcentaje que estos datos representan es mínimo respecto a la totalidad de celdas de información y cumple con el criterio de un máximo de 20% de datos faltantes (Reinoso, 2015; Urrutia et al., 2010). Finalmente las matrices con celdas eliminadas fueron guardadas en un nuevo archivo NETCDF.

*Tabla 2. Porcentaje de datos depurados por mes para cada subcuenca.*

	Meses	% Eliminado
<b>Tomebamba</b>	Abril 2016	6.8%
	Mayo2016	6.3%
	Noviembre 2016	6.0%
	Enero 2017	6.1%
	Febrero 2017	6.0%
<b>Yanuncay</b>	Abril 2016	0.3%
	Mayo2016	0.3%
	Noviembre 2016	0.2%
	Enero 2017	0.2%
	Febrero 2017	0.2%

Elaboración: Autora



Con los archivos .nc (NETCDF) resultantes de estimación cuantitativa de precipitación y archivos vectoriales de las subcuencas Tomebamba y Yanuncay mediante un script en python se procedió a calcular las estadísticas de precipitación para las subcuencas en estudio. Se generó un script en python a partir de la documentación proporcionada en la página web de la librería wradlib. Los datos de radar tuvieron que ser reproyectados a fin de que sean compatibles con los shapes de la zona de estudio ya que los datos originalmente se presentan en coordenadas polares.

Se calculó la precipitación promedio y desviación estándar para cada subcuenca, así también se calculó la celda con el valor mínimo y la de valor máximo de precipitación. Estas variables fueron las consideradas importantes ya que son descriptivas del comportamiento de la precipitación en la zona de estudio. Se estimó además los porcentajes que representa la precipitación en la subcuenca del Yanuncay con respecto a la subcuenca del Tomebamba.

### **3.5. Caracterización de la precipitación en diferentes zonas altitudinales.**

A partir de los shapefiles de las subcuencas se generaron nuevos archivos vectoriales de polígonos utilizando el software ArcGis 10.5. Para el caso del análisis a nivel altitudinal, se procedió a dividir el polígono de cada subcuenca en 5 partes espacialmente equidistantes en sentido del curso del río principal de cada una, esto mediante la herramienta buffer. Para el caso de la Subcuenca del Tomebamba la distancia entre los puntos extremos de la misma (Inicio y final de la subcuenca) es de 38782.9 m dividiéndose en zonas cada 7756.58 m; para el caso de Yanuncay la distancia entre los puntos extremos es de 45011.4 m siendo la división cada 9002.28 m. De esta manera, se crearon polígonos que dividieron las subcuencas en cinco zonas equidistantes espacialmente que representan las gradientes altitudinales. Se consideró este criterio de división ya que al considerar la división en base a las curvas de nivel las zonas resultantes espacialmente no eran comparables de acuerdo al área obtenida por lo que se optó por la división previamente descrita. Se nombraron las zonas tomando como referencia el polígono medio siendo este la Zona media, los dos polígonos ubicados en la parte más alta de la subcuenca como Zona alta 1 y Zona alta 2 y los polígonos en la parte baja como Zona baja 1 y Zona baja 2.

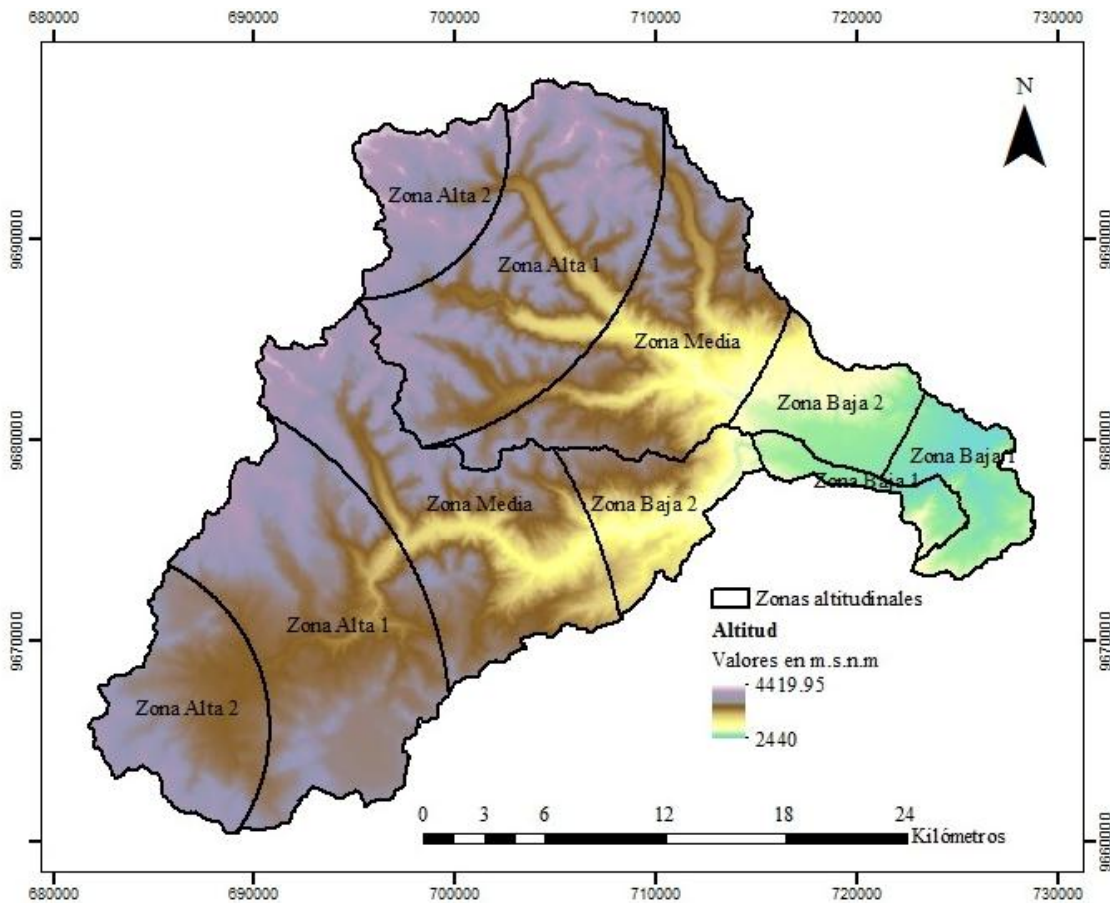


Figura 2. Zonas altitudinales consideradas para el estudio.

Elaboración: Autora.

Fuente: (ODEPLAN, 2002b; Universidad del Azuay, 2002).

La figura 2 muestra las zonas altitudinales antes descritas y adicionalmente se agregó un mdt (modelo digital de terreno) a fin de dar una referencia de los rangos de altitud que comprende cada zona (Tabla 3); este mdt se generó a partir de isolíneas (Curvas de nivel) y los shapes de las subcuencas en estudio. El mismo tiene una resolución de 1:4055.

Tabla 3. Rangos de altitud por zona altitudinal-Subcuencas Tomebamba y Yanuncay.

	Tomebamba			Yanuncay		
	Mínimo [m.s.n.m.]	Máximo [m.s.n.m.]	Media [m.s.n.m.]	Mínimo [m.s.n.m.]	Máximo [m.s.n.m.]	Media [m.s.n.m.]
Zona Baja1	2440.0	2920.0	2561.4	2480.0	2858.3	2610.8
Zona Baja 2	2540.0	3540.0	2711.9	2640.0	3920.0	3208.5
Zona Media	2700.0	4120.0	3487.7	2880.0	4340.0	3657.3
Zona Alta 1	3114.0	4340.0	3794.5	3260.0	4200.0	3758.7
Zona Alta 2	3533.8	4419.9	3974.0	3560.0	4119.3	3770.1



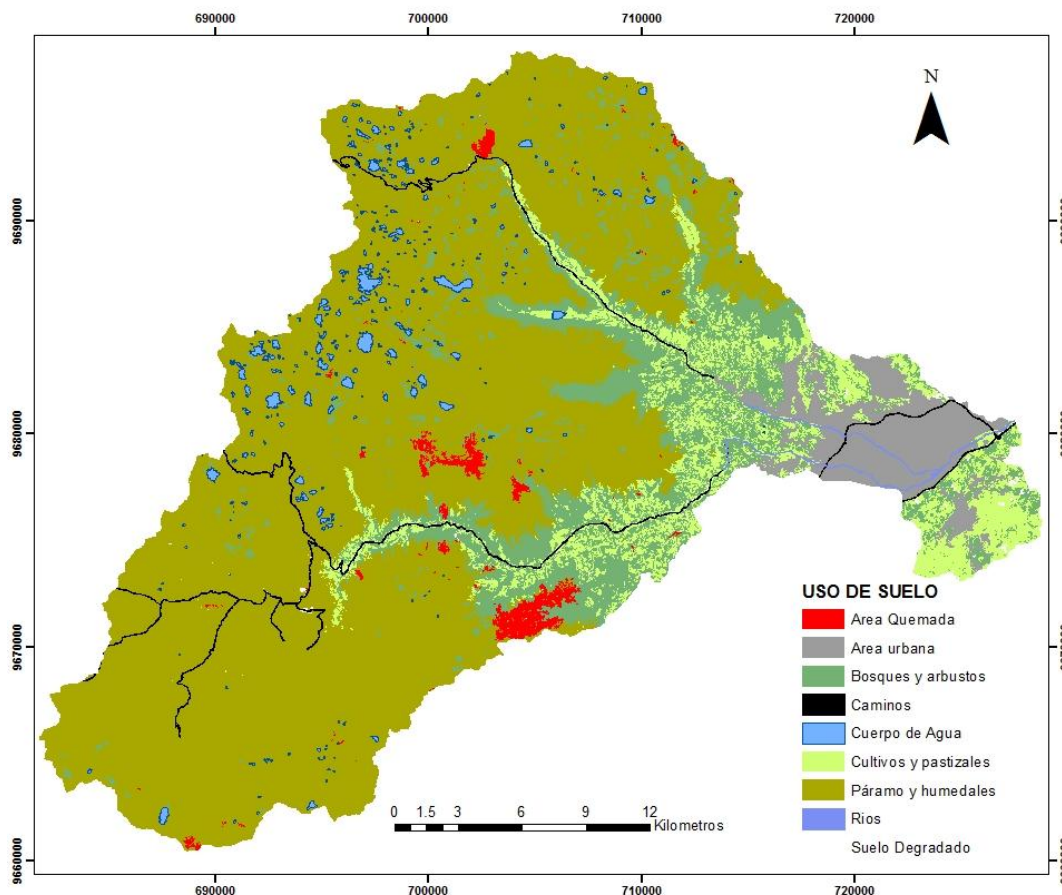
Elaboración: Autora

Una vez generados los shapefiles de zonas altitudinales se procedió al cálculo de estadísticas con los archivos de precipitación mensual acumulada generados posterior al control de calidad. Se adaptó el script de cálculo obteniendo los valores de precipitación promedio, desviación estándar, celda con precipitación máxima y celda con precipitación mínima.

Posteriormente a fin de definir si existe correlación entre altitud y precipitación, se realizó una regresión lineal simple entre la altitud promedio de cada zona altitudinal y la precipitación promedio, esto para cada mes. Así también se realizó una regresión entre los valores de precipitación mensual promedio entre las subcuencas para cada una de las zonas altitudinales individualmente.

### **3.6. Caracterización de la precipitación en diferentes usos de suelo.**

Se analizaron archivos cartográficos de diferentes fuentes a fin de seleccionar el más propicio para el estudio tomando finalmente el archivo cartográfico generado por el GAD del cantón Cuenca en 2010. El shapefile fue procesado en ArcGis, se seleccionaron los usos de interés y de estos se agruparon ciertos usos de suelo a fin de sintetizar el análisis, quedando como objeto de análisis cuatro usos de suelo: Bosques naturales y arbustos, cultivos y pastizales, páramo y humedales y zona urbana. A diferencia de los análisis anteriores para este caso no se realizó un análisis individual por subcuencas sino se realizó un análisis de la precipitación en la totalidad del área de estudio.



*Figura 3. Usos de suelo en el área comprendida por las subcuencas Tomebamba y Yanuncay.*

Elaboración: Autora.

Fuente: (GAD Cuenca, 2010; Universidad del Azuay, 2002).

A partir del shapefile se calcularon los valores de precipitación promedio, desviación estándar, celda con precipitación máxima y celda con precipitación mínima, a partir del script en python con los archivos de precipitación acumulada depurados previamente.

#### 4. Resultados.

##### 4.1. Precipitación en las subcuencas hidrográficas Tomebamba y Yanuncay.

Los valores de la celda máxima y celda mínima de precipitación, precipitación promedio y desviación estándar para cada subcuenca resultantes se presentan en las Tablas 3 y 4:

*Tabla 4. Estadísticas descriptivas de la precipitación mensual acumulada en la Subcuenca Tomebamba.*

	Media [mm]	Desviación estándar [mm]	Celda con valor mínimo [mm]	Celda con valor máximo [mm]
<b>Abril 2016</b>	151.9	40.1	86.8	428.3
<b>Mayo 2016</b>	68.5	18.5	26.9	175.9
<b>Noviembre 2016</b>	19.5	8.4	0.4	59.1
<b>Enero 2017</b>	10.7	4.8	1.7	32.9
<b>Febrero 2017</b>	23.2	6.8	5.4	50.5

Elaboración: Autora

La Tabla 4 muestra que la precipitación promedio en la subcuenca del Tomebamba es mayor para el mes de abril 2017 seguido por el mes de mayo 2017. Esto concuerda con el comportamiento típico de la precipitación en esta zona ya que son los meses considerados en la época lluviosa. Se observa también que los meses de noviembre 2016 y enero y febrero 2017 presentan una pluviosidad baja. En cuanto a la desviación estándar, se observa que es mayor para los meses de mayor precipitación. Esto se atribuye a la variabilidad espacial que presentan los meses con mayor pluviosidad, variabilidad típica de la zona como lo mencionan (Buytaert et al., 2006).

*Tabla 5. Estadísticas descriptivas de la precipitación mensual acumulada en la Subcuenca Yanuncay.*

	Media [mm]	Desviación estándar [mm]	Celda con valor mínimo [mm]	Celda con valor máximo [mm]
<b>Abril 2016</b>	105.8	42.3	44.2	269.0
<b>Mayo 2016</b>	53.4	25.3	13.2	150.2
<b>Noviembre 2016</b>	12.4	8.2	0.6	47.0
<b>Enero 2017</b>	8.5	3.6	1.9	37.3
<b>Febrero 2017</b>	17.5	5.5	5.5	46.2

Elaboración: Autora.

La Tabla 5 muestra que la precipitación promedio para la subcuencas del Yanuncay tiene un comportamiento similar a la subcuenca del Tomebamba. La precipitación promedio es mayor para los meses de abril y mayo y los meses de noviembre, enero y febrero presentan precipitaciones bajas. Así mismo la desviación estándar tiende a ser mayor para los meses de mayor pluviosidad justamente por los eventos que se presentan en estos meses.

Por otro lado al comparar la precipitación promedio entre ambas subcuencas podemos notar que la precipitación en la subcuenca del Yanuncay es menor con respecto a la subcuencas del Tomebamba (Figura 4).

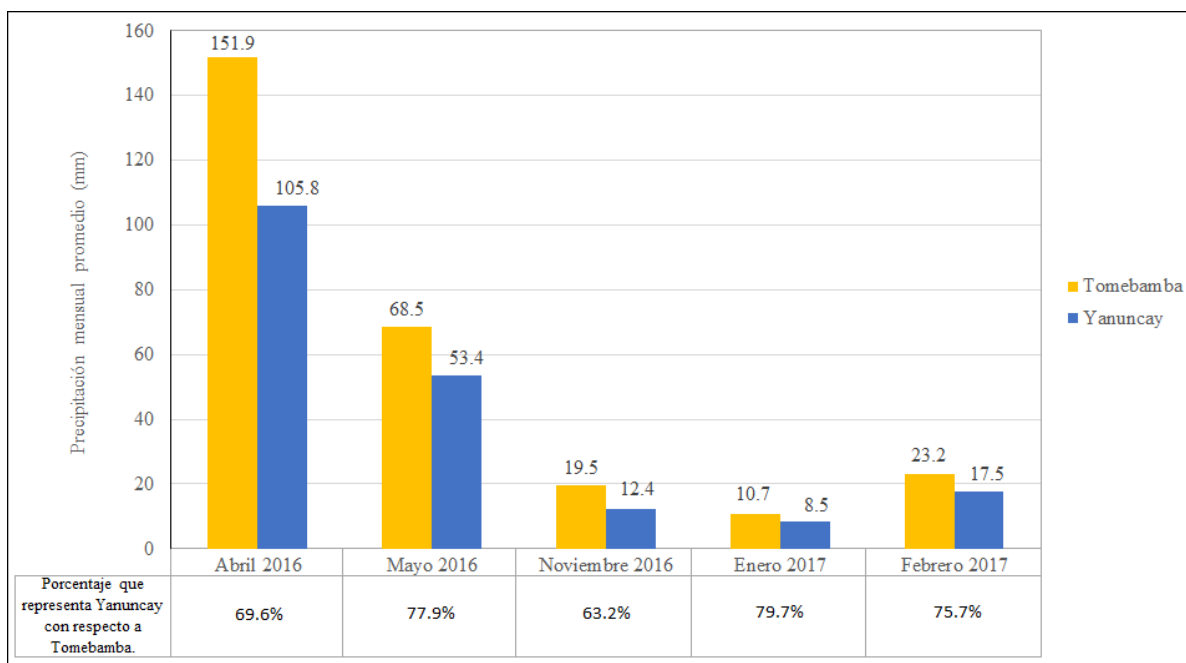


Figura 4. Precipitación mensual promedio acumulada. Tomebamba vs Yanuncay.

Elaboración: Autora.

La Figura 4 muestra la precipitación en ambas subcuencas para cada mes de estudio, notándose que la precipitación promedio mensual es mayor en todos los meses para la subcuenca del Tomebamba. Se puede observar que la precipitación en la subcuenca del Yanuncay representa entre un 63.2 % y un 79.7% de la precipitación que presenta la subcuenca del Tomebamba.

#### 4.2. Precipitación en diferentes zonas altitudinales.

Los valores calculados de celda máxima y celda mínima de precipitación, precipitación promedio y desviación estándar para cada zona altitudinal en las subcuencas Tomebamba y Yanuncay se muestran en las Tablas 6 y 7 respectivamente.



Tabla 6. Precipitación mensual en la Subcuenca del Tomebamba por zonas altitudinales.

	Meses en estudio	Media [mm]	Desviación estándar [mm]	Celda con valor mínimo [mm]	Celda con valor máximo [mm]
<b>ZONA BAJA 1</b>	Abril 2016	131.0	14.3	97.7	168.3
	Mayo2016	77.9	17.9	34.3	112.1
	Noviembre 2016	21.5	7.3	5.0	39.3
	Enero 2017	3.8	1.3	1.7	9.2
	Febrero 2017	8.0	1.4	5.4	12.4
<b>ZONA BAJA 2</b>	Abril 2016	190.4	50.9	110.7	366.9
	Mayo2016	74.5	18.7	49.2	150.2
	Noviembre 2016	14.8	6.7	3.8	38.2
	Enero 2017	5.2	1.0	2.9	8.6
	Febrero 2017	11.5	2.0	7.7	17.8
<b>ZONA MEDIA</b>	Abril 2016	184.4	45.2	95.8	366.9
	Mayo2016	76.3	16.5	45.6	135.6
	Noviembre 2016	17.9	5.6	8.2	38.3
	Enero 2017	7.7	2.0	4.3	15.7
	Febrero 2017	19.2	3.3	10.7	29.0
<b>ZONA ALTA 1</b>	Abril 2016	141.7	20.4	90.3	212.1
	Mayo2016	69.0	16.7	43.5	175.9
	Noviembre 2016	19.1	8.5	8.2	59.1
	Enero 2017	9.2	2.9	4.3	32.9
	Febrero 2017	24.2	4.2	15.7	50.5
<b>ZONA ALTA 2</b>	Abril 2016	142.1	39.3	86.8	428.3
	Mayo2016	63.7	19.4	26.9	161.4
	Noviembre 2016	21.2	9.4	0.4	58.8
	Enero 2017	14.6	4.2	7.6	32.9
	Febrero 2017	27.0	6.2	12.9	50.5

Elaboración: Autora.

La Tabla 6 muestra que la precipitación promedio para los diferentes meses en estudio en la subcuenca del Tomebamba no sigue un patrón definido. Si bien en los meses de menor precipitación (noviembre, enero y febrero) esta tiende a aumentar con el gradiente, en los meses de mayor precipitación (abril y mayo) la precipitación promedio es variable en las diferentes zonas lo que nos muestra la variabilidad espacial de la precipitación en la zona de estudio. Por lo mismo es evidente que la desviación estándar es mayor en los meses de mayor precipitación. Además los valores de celda con precipitación mínima y máxima nos permite conocer en qué rango de valores se encuentra la precipitación en esta zona.

La regresión lineal simple realizada entre la precipitación promedio mensual y la altitud promedio de cada zona altitudinal corrobora lo expresado anteriormente, arrojando como resultado que en general no existe una correlación entre la precipitación y la altitud para esta subcuenca presentándose los valores del coeficiente de determinación  $R^2$  entre 0.035 y 0.657 excepto en los meses de enero 2017 y febrero 2017 donde se obtuvieron valores de 0.826 y 0.989 respectivamente.

Tabla 7. Precipitación mensual en al Subcuenca del Yanuncay en diferentes zonas altitudinales.

	Meses en estudio	Media [mm]	Desviación estándar [mm]	Celda con valor mínimo [mm]	Celda con valor máximo [mm]
<b>ZONA BAJA 1</b>	Abril 2016	139.5	25.0	97.7	198.4
	Mayo2016	94.4	23.7	48.5	150.2
	Noviembre 2016	20.4	5.8	9.3	39.3
	Enero 2017	4.7	0.8	2.9	6.8
	Febrero 2017	9.1	2.8	5.5	16.6
<b>ZONA BAJA 2</b>	Abril 2016	177.9	43.9	105.7	269.0
	Mayo2016	86.8	20.1	62.2	150.2
	Noviembre 2016	27.3	4.7	16.9	47.0
	Enero 2017	8.4	1.7	4.8	13.2
	Febrero 2017	18.4	2.7	10.6	28.0
<b>ZONA MEDIA</b>	Abril 2016	118.4	27.7	66.1	223.6
	Mayo2016	57.2	15.4	20.9	118.4
	Noviembre 2016	14.4	6.0	5.2	44.5
	Enero 2017	11.6	2.6	6.5	37.3
	Febrero 2017	21.4	4.8	12.2	46.2
<b>ZONA ALTA 1</b>	Abril 2016	74.9	13.3	52.5	117.0
	Mayo2016	36.1	20.7	13.2	141.4
	Noviembre 2016	5.9	2.5	0.8	14.0
	Enero 2017	7.0	2.5	2.1	14.0
	Febrero 2017	15.5	3.7	8.4	26.2
<b>ZONA ALTA 2</b>	Abril 2016	67.1	10.3	44.2	114.5
	Mayo2016	40.6	16.3	15.0	121.9
	Noviembre 2016	6.2	3.4	0.6	14.6
	Enero 2017	4.2	1.4	1.9	7.6
	Febrero 2017	12.5	2.1	7.4	17.4

Elaboración: Autora.

La Tabla 7 muestra que la precipitación promedio para cada mes de estudio no sigue un patrón determinado en relación a las diferentes zonas altitudinales definidas. En este caso y a diferencia de lo que se observa para la subcuenca del Tomebamba tanto en los meses



representativos de la época seca como en los meses de la época lluviosa la precipitación promedio es variable en todas las zonas. La desviación estándar es mayor para los meses de mayor pluviosidad. Así también, los valores de las celdas con precipitación mínima y máxima nos dan a conocer el rango de valores en que se presentó la precipitación en esta subcuenca durante el periodo de estudio.

El análisis de correlación de la precipitación promedio y la altitud promedio de cada zona altitudinal para esta subcuenca arrojó como resultado que no existe una correlación entre dichas variables presentándose valores entre 0.081 y 0.524 excepto en el mes de mayo 2016 donde el coeficiente  $R^2$  fue de 0.833.

Por otro lado la Figura 5 muestra una comparación de la precipitación promedio en las subcuencas para cada zona altitudinal en los diferentes meses en estudio. Se observa que no existe un patrón de comportamiento de la precipitación comparando las subcuencas a lo largo de las zonas altitudinales y las zonas con mayor precipitación promedio varía entre cada mes de estudio. El efecto presente en los meses de enero y febrero 2017 podría ser un artefacto del criterio de la división de la cuenca del Yanuncay

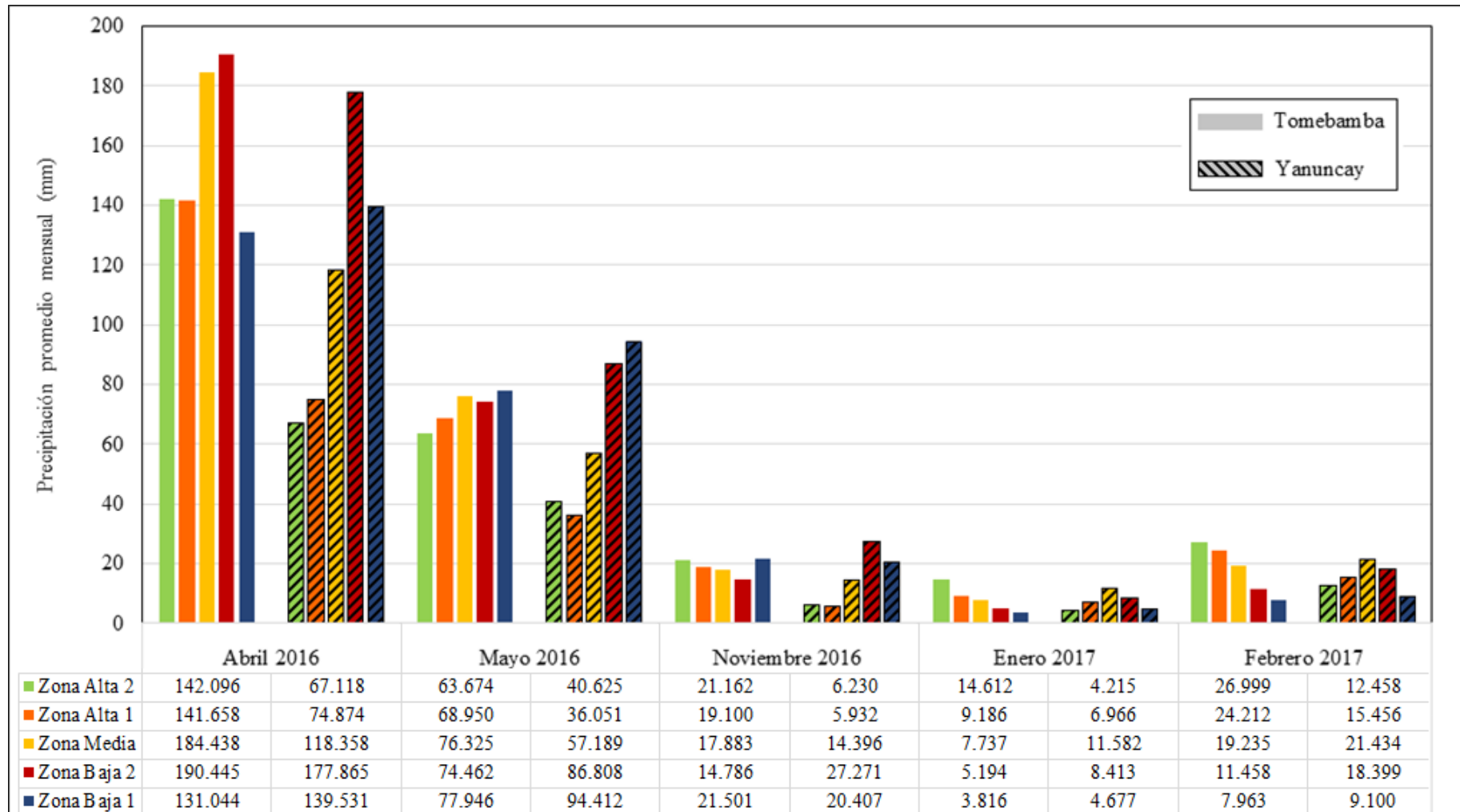


Figura 5. Precipitación mensual promedio por zonas de altitud. Tomebamba vs Yanuncay.

Elaboración: Autora.

Por otro lado la regresión lineal entre la precipitación promedio mensual de cada subcuenca se encontró que existe una correlación alta entre los valores de las subcuencas en cada una de las zonas altitudinales (Figura 6).

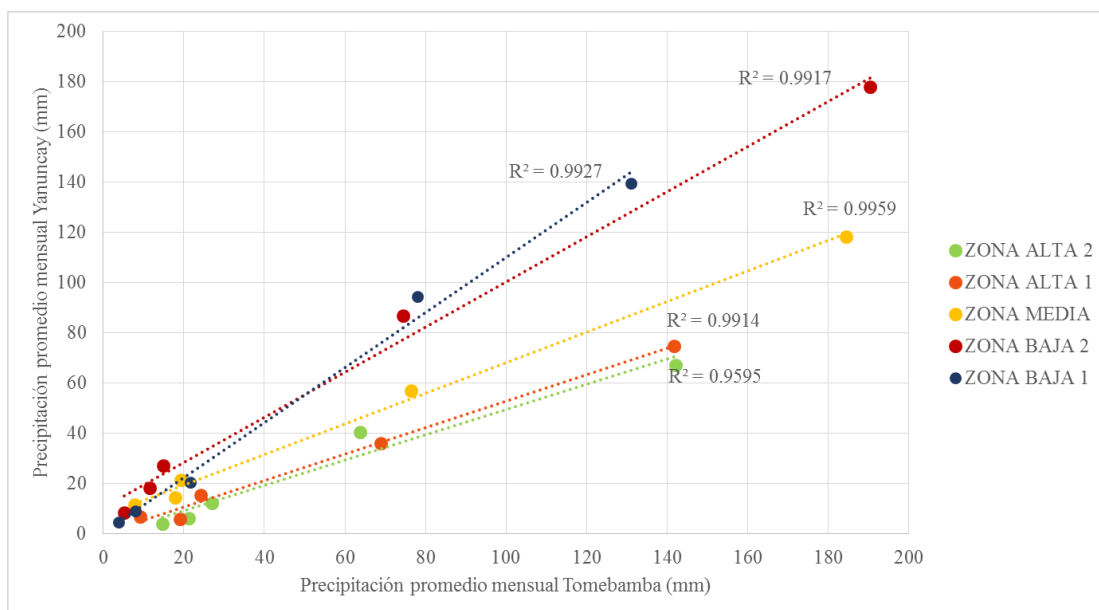


Figura 6. Correlación entre la precipitación promedio mensual de las subcuencas Tomebamba y Yanuncay.

### 4.3. Precipitación en diferentes usos de suelo.

Los valores resultantes para celda máxima y celda mínima de precipitación, precipitación promedio y desviación estándar de cada uso de suelo presente en la zona de estudio se presenta en la Tabla 8:

Tabla 8. Precipitación mensual promedio por uso de suelo para toda la zona de estudio.

	Meses en estudio	Media [mm]	Desviación estándar [mm]	Celda con valor mínimo [mm]	Celda con valor máximo [mm]
<b>PÁRAMO</b>	Abril 2016	130.8	38.7	44.2	428.3
	Mayo2016	60.9	19.6	13.2	175.9
	Noviembre 2016	17.3	8.4	0.4	59.1
	Enero 2017	10.9	4.5	1.9	37.3
	Febrero 2017	23.5	6.5	7.0	50.5
<b>CULTIVOS Y PASTIZALES</b>	Abril 2016	119.6	28.7	54.2	237.7
	Mayo2016	62.1	22.3	14.5	150.2
	Noviembre 2016	20.1	9.1	2.4	47.0
	Enero 2017	8.4	2.6	2.2	13.1
	Febrero 2017	15.3	3.7	5.4	23.0
<b>BOSQUES Y ARBUSTOS</b>	Abril 2016	91.7	40.0	8.3	233.0
	Mayo2016	50.5	23.2	13.2	137.7
	Noviembre 2016	14.3	10.0	1.4	47.0
	Enero 2017	7.1	2.7	2.0	14.2
	Febrero 2017	14.6	4.0	5.4	26.4
<b>ZONA URBANA</b>	Abril 2016	158.1	38.7	97.7	255.6
	Mayo2016	83.7	20.3	36.9	138.1
	Noviembre 2016	18.2	6.5	3.8	39.3
	Enero 2017	4.6	1.2	2.1	7.6
	Febrero 2017	10.1	3.0	5.4	19.5

Elaboración: Autora.

La Tabla 8 muestra valores descriptivos de la precipitación en base al uso de suelo presente en la zona. Los valores de precipitación promedio observados muestran que la distribución de la precipitación no presenta un patrón respecto al uso de suelo presentándose los valores de precipitación promedio mayores en diferentes usos de suelo a lo largo del periodo de estudio. Los valores de desviación estándar mantienen el comportamiento de los anteriores análisis siendo mayor para meses de mayor pluviosidad (abril y mayo), además este parámetro resulta mayor en el uso “Bosques y arbustos”, esto debido a la distribución dispersa de este uso espacialmente.

La Figura 6 muestra de manera más visual lo expresado anteriormente, notándose que la precipitación no sigue un patrón respecto al uso de suelo siendo en general su comportamiento diferente para cada mes de estudio a excepción de lo que se observa para el uso “Zona urbana”, mismo que presenta la mayor precipitación promedio para los meses de abril, mayo y noviembre 2016.

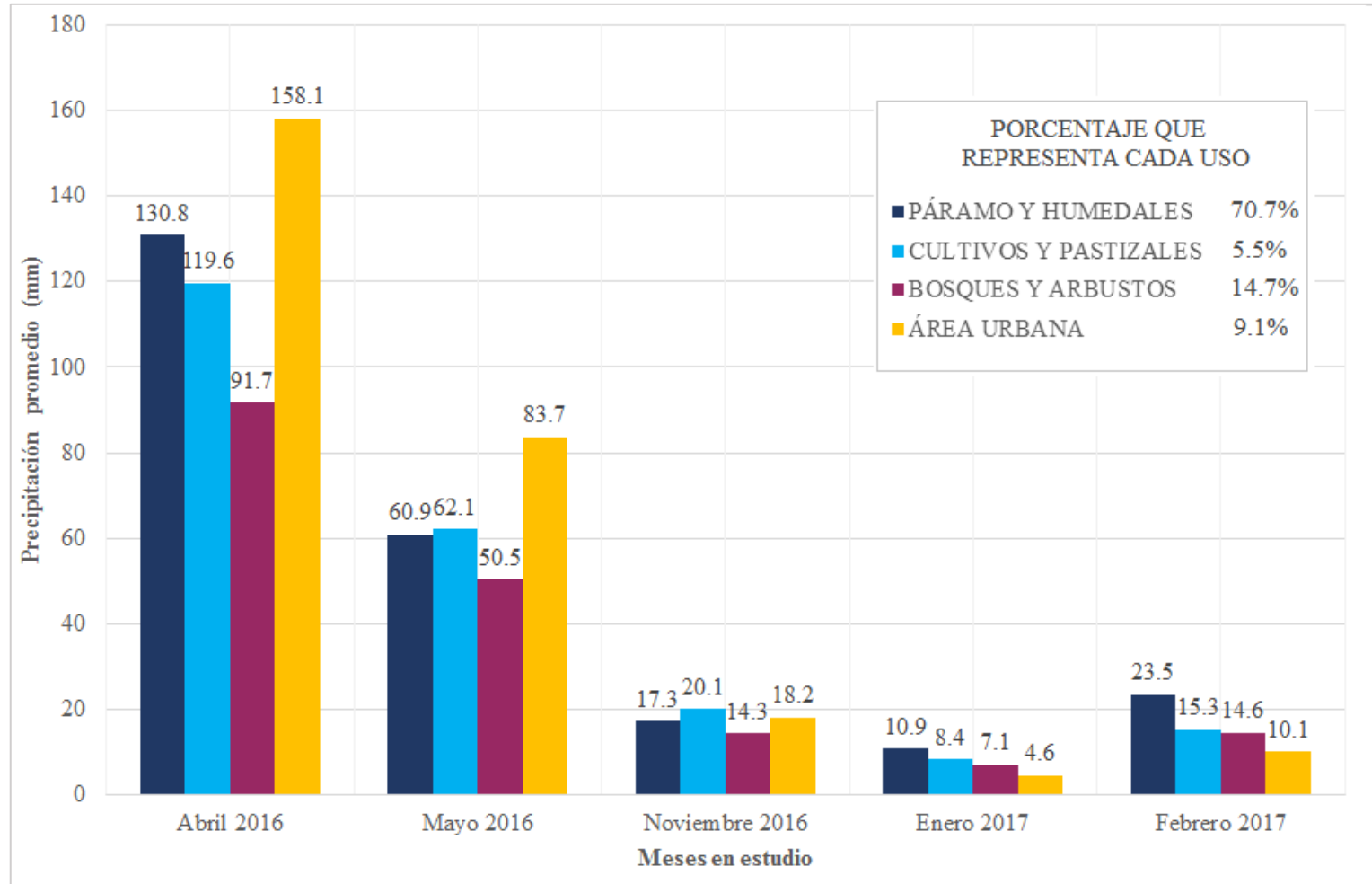


Figura 7. Precipitación mensual promedio por uso de suelo para toda la zona de estudio.

Elaboración: Autora.



## 5. Conclusiones

- ✓ Los valores obtenidos de desviación estándar se muestran mayores para los meses de mayor pluviosidad (abril y mayo) lo cual es demostrativo de la variabilidad espacial de la precipitación en las subcuencas en dichos meses. Esta característica también se ve reflejada con los valores de las celdas con mayor y menor precipitación dentro de las subcuencas.
- ✓ La precipitación promedio mensual resultó mayor para el mes de abril 2016, seguido por mayo 2016, tendiendo a disminuir para los meses de noviembre 2016 y enero 2017. Esto corresponde directamente a los meses más húmedos (abril y mayo) y menos húmedos (noviembre y enero).
- ✓ Mediante la comparación de precipitaciones promedio entre las subcuencas del Tomebamba y Yanuncay se evidenció que en todo el periodo de estudio la precipitación fue menor en la subcuenca del Yanuncay con respecto a la del Tomebamba, representando la precipitación en Yanuncay entre un 63.2 % y un 79.7% de la precipitación en Tomebamba. Además, el análisis de correlación mediante regresión lineal entre los valores de precipitación promedio de la Subcuenca del Tomebamba y la Subcuenca del Yanuncay mostró una alta correlación entre los mismos con valores del coeficiente de determinación  $R^2$  entre 0.95 y 0.99.
- ✓ La precipitación mensual promedio para las diferentes zonas altitudinales no presentan un patrón de comportamiento. La regresión lineal entre la altitud promedio y la precipitación promedio mostró en general valores bajos del coeficiente  $R^2$  entre 0.036-0.657 para el caso de la subcuenca del Tomebamba y 0.081- 0.524 para la subcuencas del Yanuncay. Siendo excepciones enero y febrero 2017 (Tomebamba) y mayo 2016 (Yanuncay) con valores altos de correlación. Por lo tanto, se puede concluir que los valores de precipitación son independientes de la altitud en la zona de estudio.





- ✓ Así también, al comparar mediante los diagramas de barras las zonas altitudinales entre las dos subcuencas en estudio, se observó que el comportamiento de la precipitación a lo largo de las zonas altitudinales difiere entre las subcuencas. Esto pudo deberse también al criterio de división del gradiente altitudinal generándose zonas no correspondientes lo que también impidió un análisis de correlación entre las subcuencas por lo que en un futuro pueden plantearse otros criterios que permitan dicha comparativa.
- ✓ Por otro lado las características de la precipitación en los uso de suelo es variable a lo largo de los meses de análisis, lo que demuestra justamente la variabilidad espacial de la precipitación. Sin embargo se evidenció que durante los meses lluviosos (abril y mayo 2016) el uso con precipitación promedio mayor fue la Zona urbana por lo que resultaría interesante analizar varios años de datos y verificar si este comportamiento es constante o fue característico solo del periodo en estudio.

## 6. Recomendaciones.

- ✓ Si bien los datos de precipitación disponibles resultaron limitados debido a la reciente implementación del radar meteorológico, se pudo establecer un periodo de análisis que permitió caracterizar la precipitación para meses representativos de época lluviosa y seca. No obstante posteriormente los periodos de análisis podrían ampliarse, permitiendo realizar análisis a diferentes escalas temporales así como comparaciones con datos de precipitación provenientes de otras fuentes y lograr así un mayor entendimiento de este fenómeno en las subcuencas.
- ✓ La zonificación altitudinal en las subcuencas permitió conocer como varia la precipitación promedio para cada subcuenca y la relación precipitación-altitud en la zona de estudio, no obstante no permitió una adecuada comparación entre las subcuencas por lo que en estudios futuros se recomienda probar otros criterios de zonificación altitudinal.



## 7. Bibliografía.

- Aguirre Andrade, J. F. (2011). *Validación de los indicadores biológicos (macroinvertebrados) para el monitoreo de la cuenca del río Yanuncay* (B.S. thesis).
- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73(3), 247-265. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007>
- Austin, G. L., & Bellon, A. (1974). The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 100(426), 658-664. <https://doi.org/10.1002/qj.49710042612>
- Belmonte, M. L., & Di Bella, C. M. (2012). PRIMERAS EVALUACIONES DE ESTIMACION DE LA PRECIPITACION A PARTIR DEL RADAR METEOROLOGICO DE ANGUIL. *XIV Reunión Argentina de Agrometeorología. RADA 2012*, 17–19.
- Bendix, J., Fries, A., Zárate, J., Trachte, K., Rollenbeck, R., Pucha-Cofrep, F., ... Achilles, S. (2016). RadarNet-Sur First Weather Radar Network in Tropical High Mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(6), 1235-1254. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00178.1>
- Biggs, E. M., & Atkinson, P. M. (2011). A comparison of gauge and radar precipitation data for simulating an extreme hydrological event in the Severn Uplands, UK. *Hydrological Processes*, 25(5), 795-810. <https://doi.org/10.1002/hyp.7869>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. D., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south



Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 413-421.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>

Cárdenas, N. (2017). Radares climatológicos para prevenir desastres naturales en Ecuador | Blog. Recuperado 23 de septiembre de 2018, de <https://noticias.utpl.edu.ec/radares-climatologicos-para-prevenir-desastres-naturales-ecuador>

Cocha Pallo, J. (2009). *Estado actual de la calidad fisico-quimica, bacteriologica y biologica del agua de la subcuenca del Río Yanuncay en dos estaciones climaticas (invierno y verano) del canton Cuenca Provincia del Azuay-Ecuador* (B.S. thesis). Universidad del Azuay.

Damant, C., Austin, G. L., Bellon, A., & Broughton, R. S. (1983). Errors in the Thiessen technique for estimating areal rain amounts using weather radar data. *Journal of Hydrology*, 62(1), 81-94. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90095-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90095-1)

Díaz Delgado, C., Esteller Alberich, M. V., & López-Vera, F. (2006). Recursos Hídricos: Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica.

Domínguez, S., Velásquez, S., Jiménez, F., & Faustino, J. (2008). Zonificación ambiental para el ordenamiento territorial de la subcuenca bimunicipal del río Aguas Calientes, Nicaragua. 55, 64-73.

Donoso, M. (2002). *LA CUENCA DEL RIO PAUTE: DIAGNOSTICO Y PROPUESTA DE MANEJO INTEGRAL. POLITICAS DE DESARROLLO AGROPECUARIO*. Recuperado de <http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/985>

Environmental Systems Research Institute. (2018). ¿Qué son los datos netCDF? Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/data/multidimensional/what-is-netcdf-data.htm>

GAD Cuenca. (2010). Plan de ordenamiento territorial 2010.

GAD Cuenca. (2011). Catastro Cuenca ciudad.



- GAD provincial de Azuay. (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Azuay. Recuperado de [http://www.azuay.gob.ec/prv/wp-content/uploads/2017/07/2015.Plan\\_Desarrollo\\_Ordenamiento\\_Territorial\\_Azuay.pdf](http://www.azuay.gob.ec/prv/wp-content/uploads/2017/07/2015.Plan_Desarrollo_Ordenamiento_Territorial_Azuay.pdf)
- GAD provincial de Loja. (2018). Radar Network South Ecuador Test site. Recuperado 20 de septiembre de 2018, de <http://137.248.191.17:8080/radarnetsur/>
- German Research Foundation. (2018). T2 Knowledge Transfer in South Ecuador: RADARNET SUR - Operational rainfall monitoring in southern Ecuador. Recuperado 29 de octubre de 2018, de [http://vhrz669.hrz.uni-marburg.de/tmf\\_respect/content\\_subprojects.do?phase=2&subpage=aims&subprojectid=142](http://vhrz669.hrz.uni-marburg.de/tmf_respect/content_subprojects.do?phase=2&subpage=aims&subprojectid=142)
- Guerra Cobián, V. H., Bâ, K. M., Quentin Joret, E., Díaz Delgado, C., & Cârsteanu, A. A. (2011). Empleo de información NEXRAD en el modelado hidrológico para cuencas con pluviometría deficiente. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(3), 35–48.
- Heistermann, M., Jacobi, S., & Pfaff, T. (2013). Technical Note: An open source library for processing weather radar data (&lt;i&gt;wradlib&lt;/i&gt;). *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 863-871. <https://doi.org/10.5194/hess-17-863-2013>
- INAMHI. (2015). Radares meteorológicos en Quito optimizan el pronóstico del tiempo. Recuperado de [http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/05/BOLETIN\\_23.pdf](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/05/BOLETIN_23.pdf)
- INEC. (2011). División provincial. polígono.
- Instituto Geográfico Militar. (2012). rio\_a.
- Isotta, F. A., Frei, C., Weilguni, V., Tadić, M. P., Lassègues, P., Rudolf, B., ... Vertačnik, G. (2014). The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis



- of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. *International Journal of Climatology*, 34(5), 1657-1675. <https://doi.org/10.1002/joc.3794>
- León Méndez, A., Hernández González, A., Garrido Monagas, M., & Andalia Gilbert, A. I. (2013). Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento, 34(2), 73-87.
- Magaña-Hernández, F., Bá, K. M., & Guerra-Cobián, V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*, 47(8), 739-752.
- Marshall, J. S., Langille, R. C., & Palmer, W. M. K. (1947). Measurement of rainfall by radar. *Journal of Meteorology*, 4(6), 186-192. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1947\)004<0186:MORBR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1947)004<0186:MORBR>2.0.CO;2)
- Méndez, B., Soto, G., Rivera, F., & Caetano, E. (2014). Modelación hidrológica distribuida apoyada en radares meteorológicos. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(1), 83-101.
- Méndez-Antonio, B., Domínguez-Mora, R., Magaña-Rueda, V., Caetano, E., & Carrizosa-Elizondo, E. (2006). Calibración hidrológica de radares meteorológicos. *Ing. Hidraul. Méx*, 20, 43-64.
- Moshinsky, M. R. (1995). Fundamentos de radares meteorológicos: Aspectos clásicos. *Ingeniería hidráulica en México*, 10(1), 55-74.
- Mosquera Vásquez, K. (2006). NetCDF [Gubernamental]. Recuperado de <http://www.met.igp.gob.pe/users/kobi/NETCDF/index.html>
- National Oceanic Atmospheric Administration. (2018). National Centers for Environmental Information. Recuperado 26 de septiembre de 2018, de <https://www.ncdc.noaa.gov/>
- ODEPLAN. (2002). Curvas de nivel.



- Peñañiel Romero, A. G. (2014). *Evaluación de la calidad del agua del río Tomebamba mediante el índice ICA del Instituto Mexicano de tecnología del agua* (B.S. thesis).
- Pesántez Quezada, J. D. (2015). *Propuesta de modelo de gestión de la subcuenca del río Tomebamba, como herramienta de manejo integrado y conservación* (Master's Thesis). Universidad del Azuay.
- Puertas, O., Carvajal, Y., & Quintero, M. (2011). ESTUDIO DE TENDENCIAS DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL EN LA CUENCA ALTA-MEDIA DEL RÍO CAUCA, COLOMBIA., 9.
- Reinoso, P. L. G. (2015). Imputación de Datos en Series de Precipitación Diaria Caso de Estudio Cuenca del Río Quindío. *Ingeniare*, (18), 73-86.
- Renom, M. (2011). PLUVIOMETRÍA. Recuperado de [http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/PBMA/PBMA\\_teotico/Bolilla6-PLUVIOMETRIA.pdf](http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/PBMA/PBMA_teotico/Bolilla6-PLUVIOMETRIA.pdf)
- Tao, T., Chocat, B., Liu, S., & Xin, K. (2009). Uncertainty Analysis of Interpolation Methods in Rainfall Spatial Distribution—A Case of Small Catchment in Lyon. *Journal of Water Resource and Protection*, 01(02), 136-144. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2009.12018>
- United States Geological Survey, & National Oceanic Atmospheric Administration. (2005). USGS Circular 1283: NOAA-USGS Debris-Flow Warning System—Final Report. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/circ/2005/1283/>
- Universidad del Azuay. (2002). Microcuencas Cuenca del río Paute. Recuperado de <http://web.uazuay.edu.ec/promsa/paute/home.htm>
- Urrutia, J. A., Palomino, R., & Salazar, H. D. (2010). Metodología Para La Imputación De Datos Faltantes En Metereología. *Scientia Et Technica*, XVII(46), 44-49.

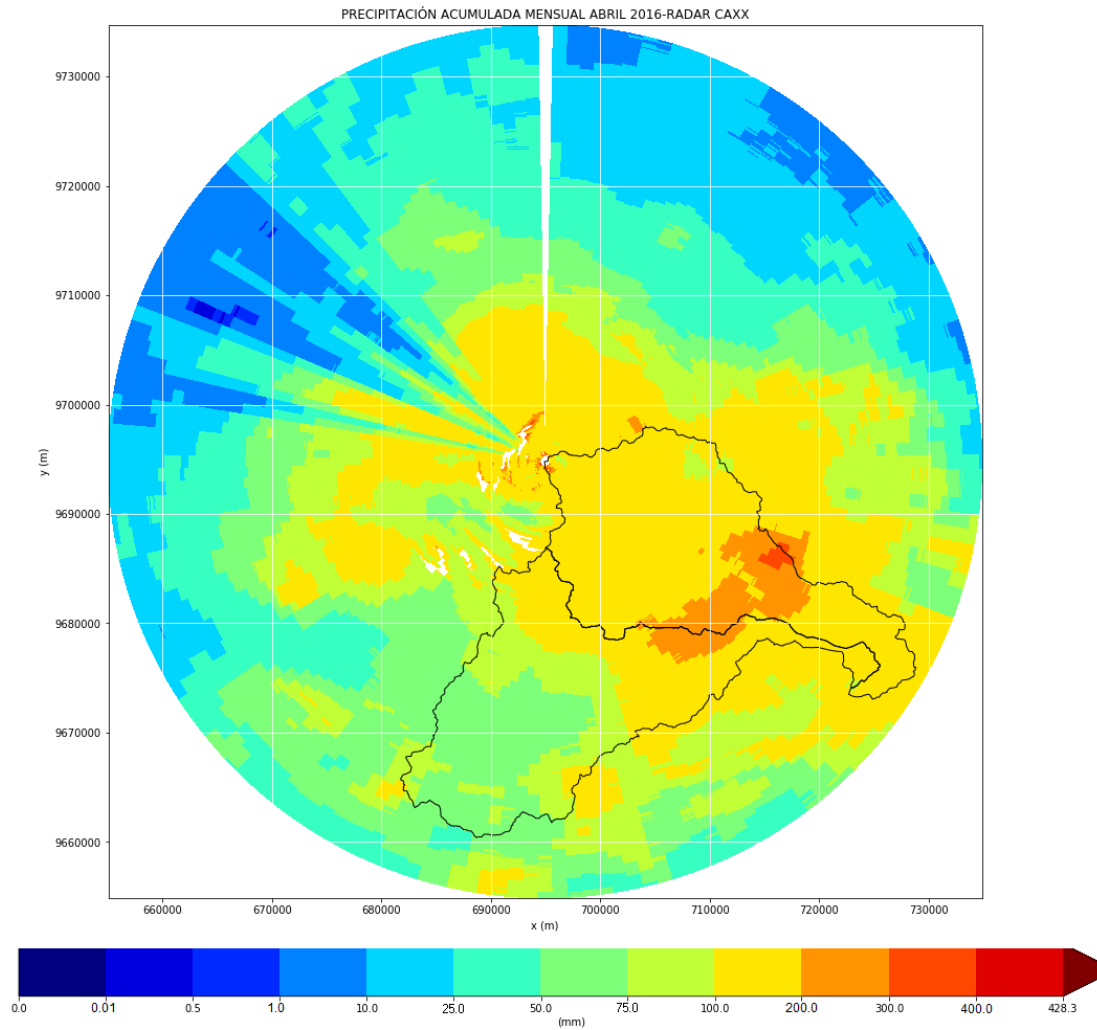


- Vallejo Llerena, E. C. (2014). *Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011* (B.S. thesis).
- Woodley, W. L., Olsen, A. R., Herndon, A., & Wiggert, V. (1975). Comparison of Gage and Radar Methods of Convective Rain Measurement. *Journal of Applied Meteorology*, 14(5), 909-928. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<0909:COGARM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<0909:COGARM>2.0.CO;2)
- Yoon, S.-S., Phuong, A. T., & Bae, D.-H. (2012). Quantitative Comparison of the Spatial Distribution of Radar and Gauge Rainfall Data. *Journal of Hydrometeorology*, 13(6), 1939-1953. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-066.1>
- Zucarelli, G. V. (2013). Identificación de eventos hídricos extremos en la cuenca del río Paraná. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 181-187.



### 8. Anexos

#### Anexo 1. Precipitación mensual acumulada.



*Figura A1 1. Precipitación mensual acumulada Abril 2016.*



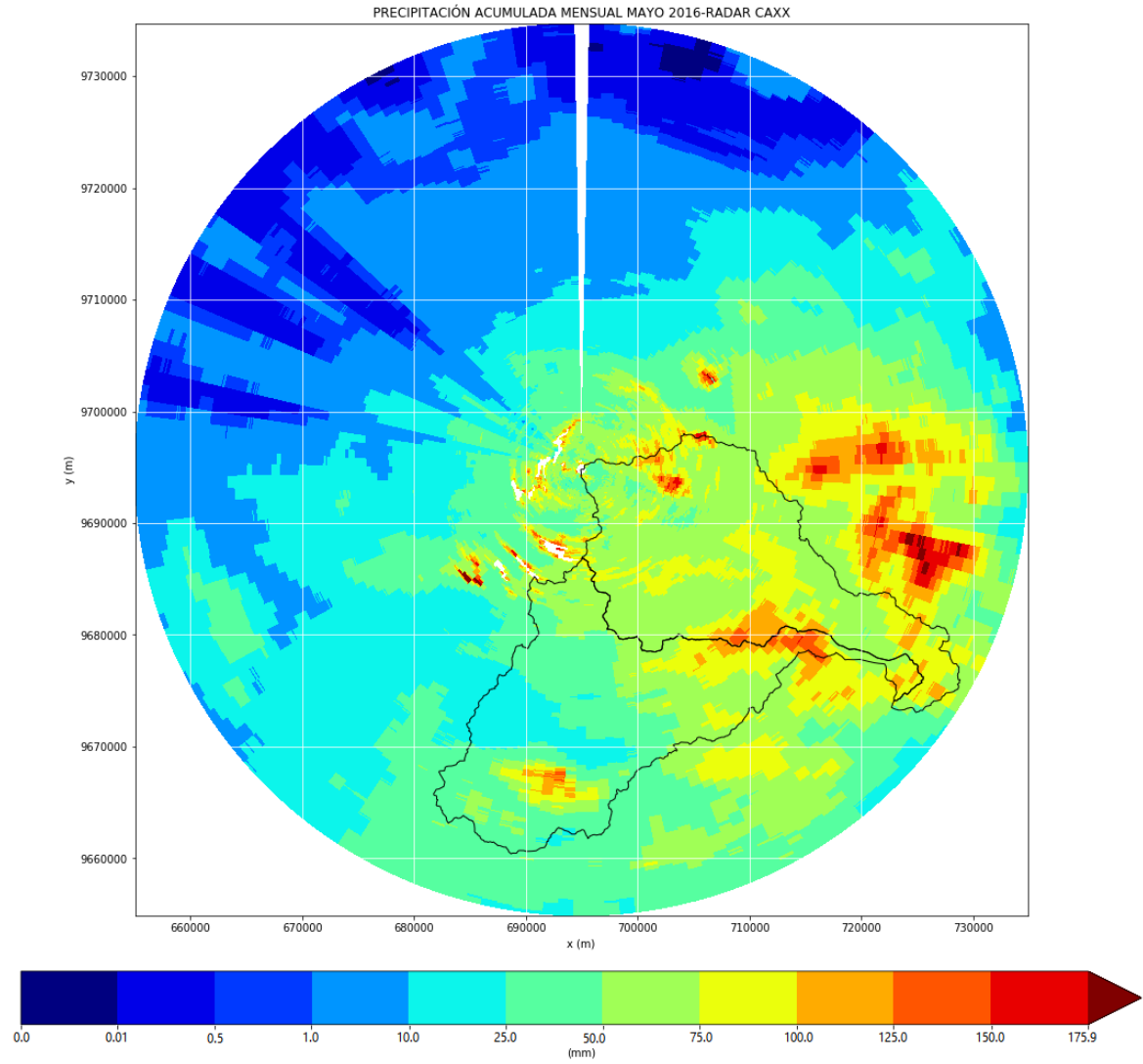


Figura A1 2. Precipitación mensual acumulada Mayo 2016.



PRECIPITACIÓN ACUMULADA MENSUAL NOVIEMBRE 2016-RADAR CAXX

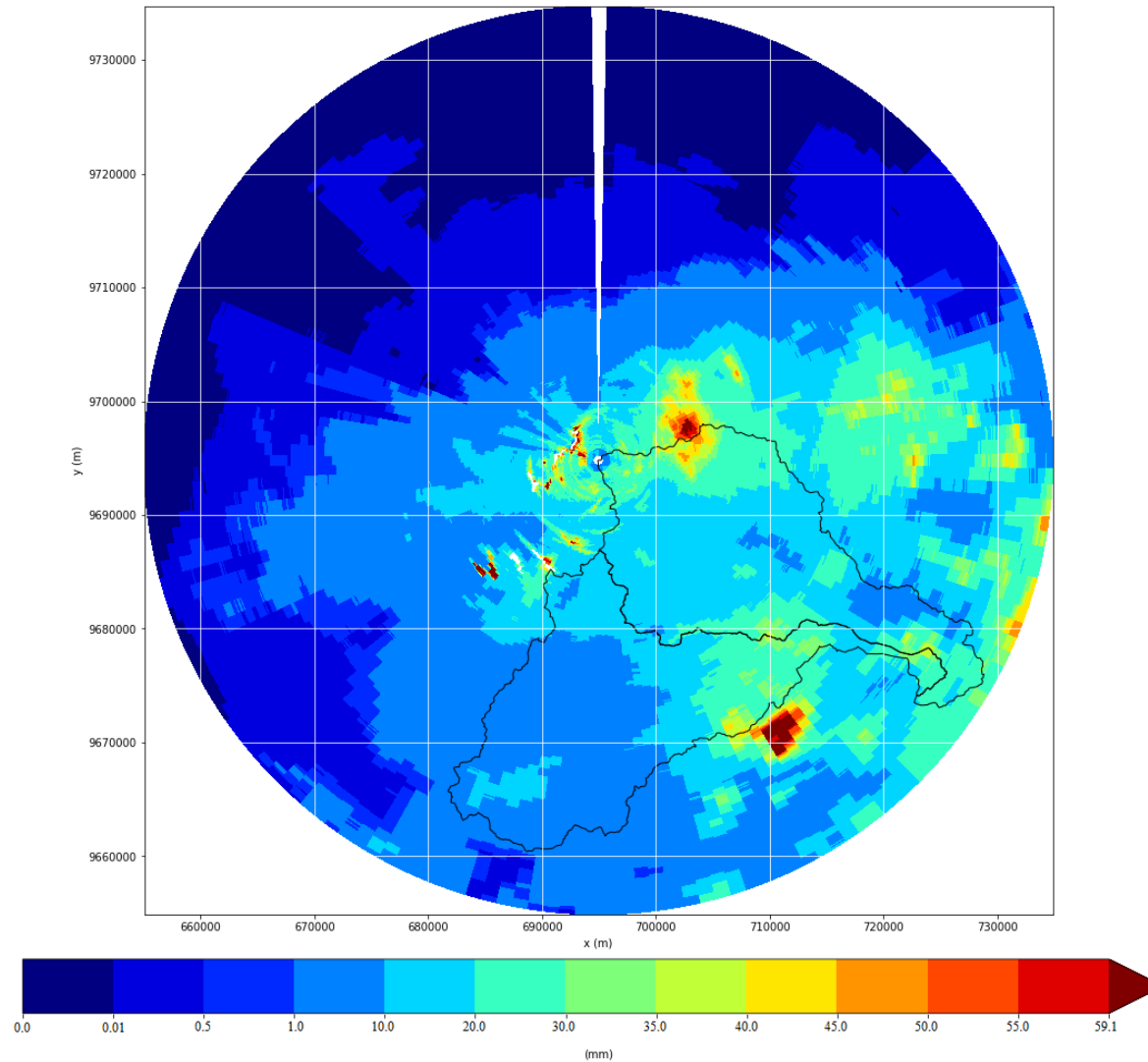


Figura A1 3. Precipitación mensual acumulada Noviembre 2016.



PRECIPITACIÓN ACUMULADA MENSUAL ENERO 2017-RADAR CAXX

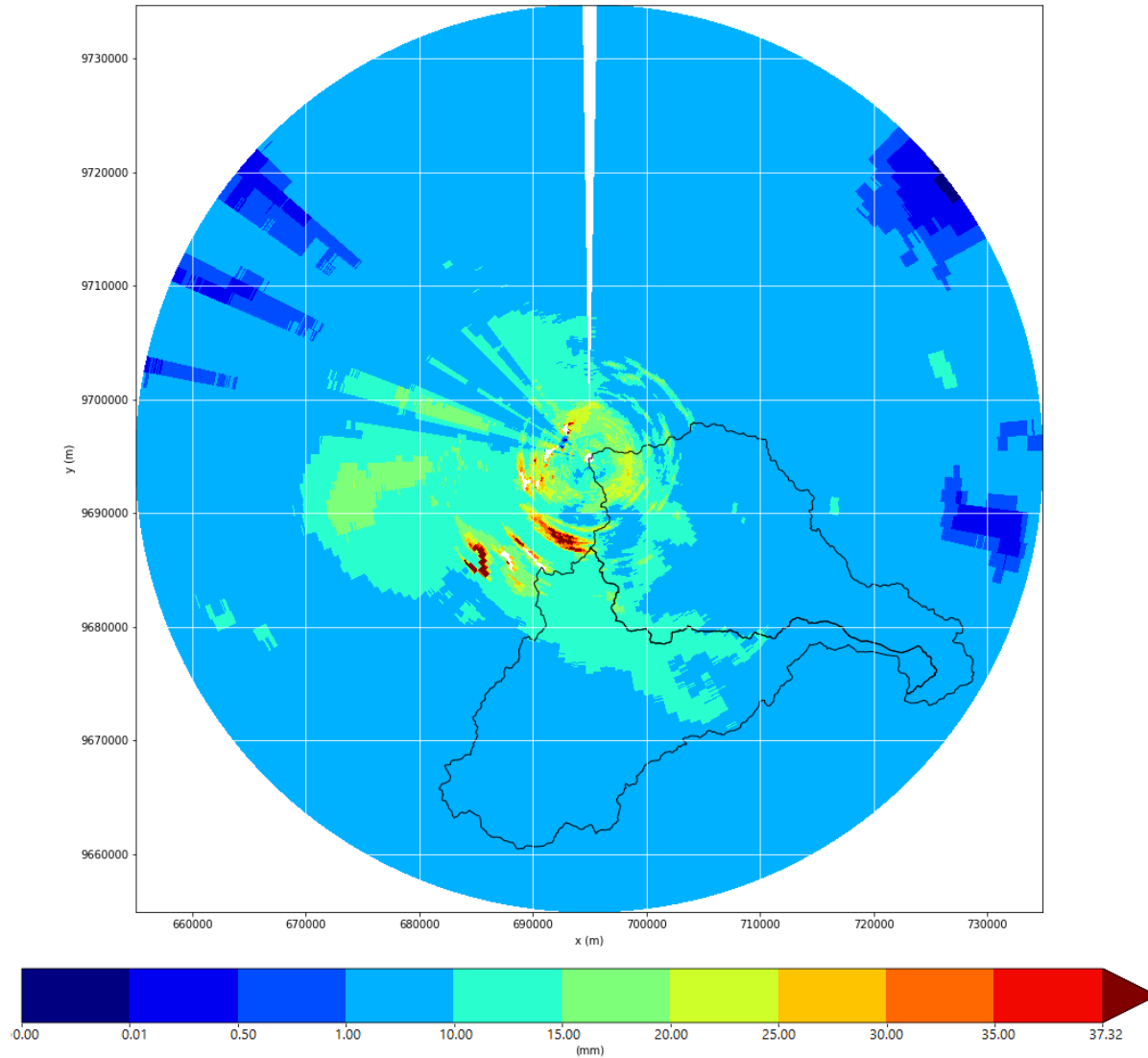


Figura A1 4. Precipitación mensual acumulada Enero 2017.



PRECIPITACIÓN ACUMULADA MENSUAL FEBRERO 2017-RADAR CAXX

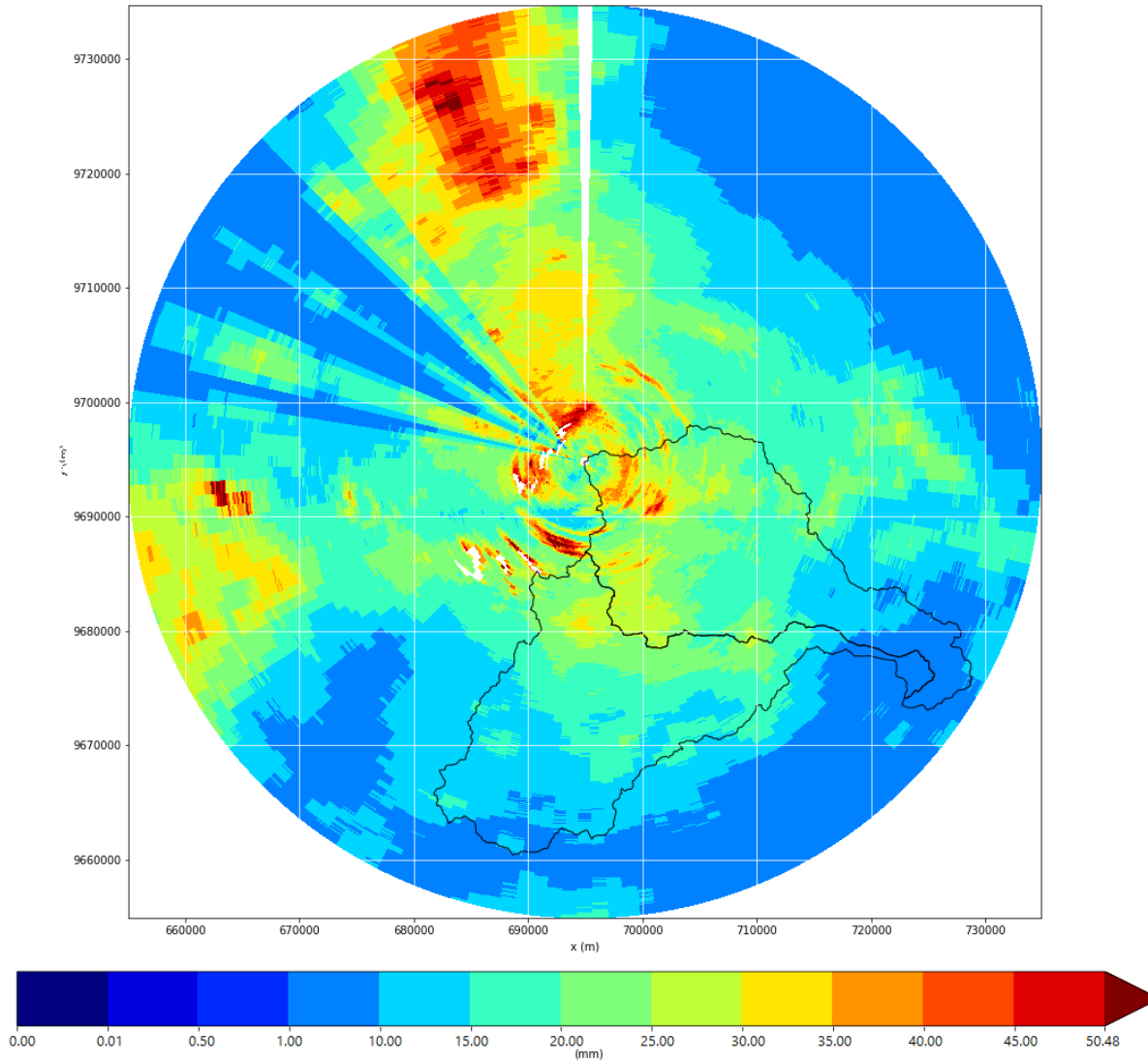


Figura A1 5. Precipitación mensual acumulada Febrero 2017.



Anexo 2. Diagramas de cajas y bigotes.

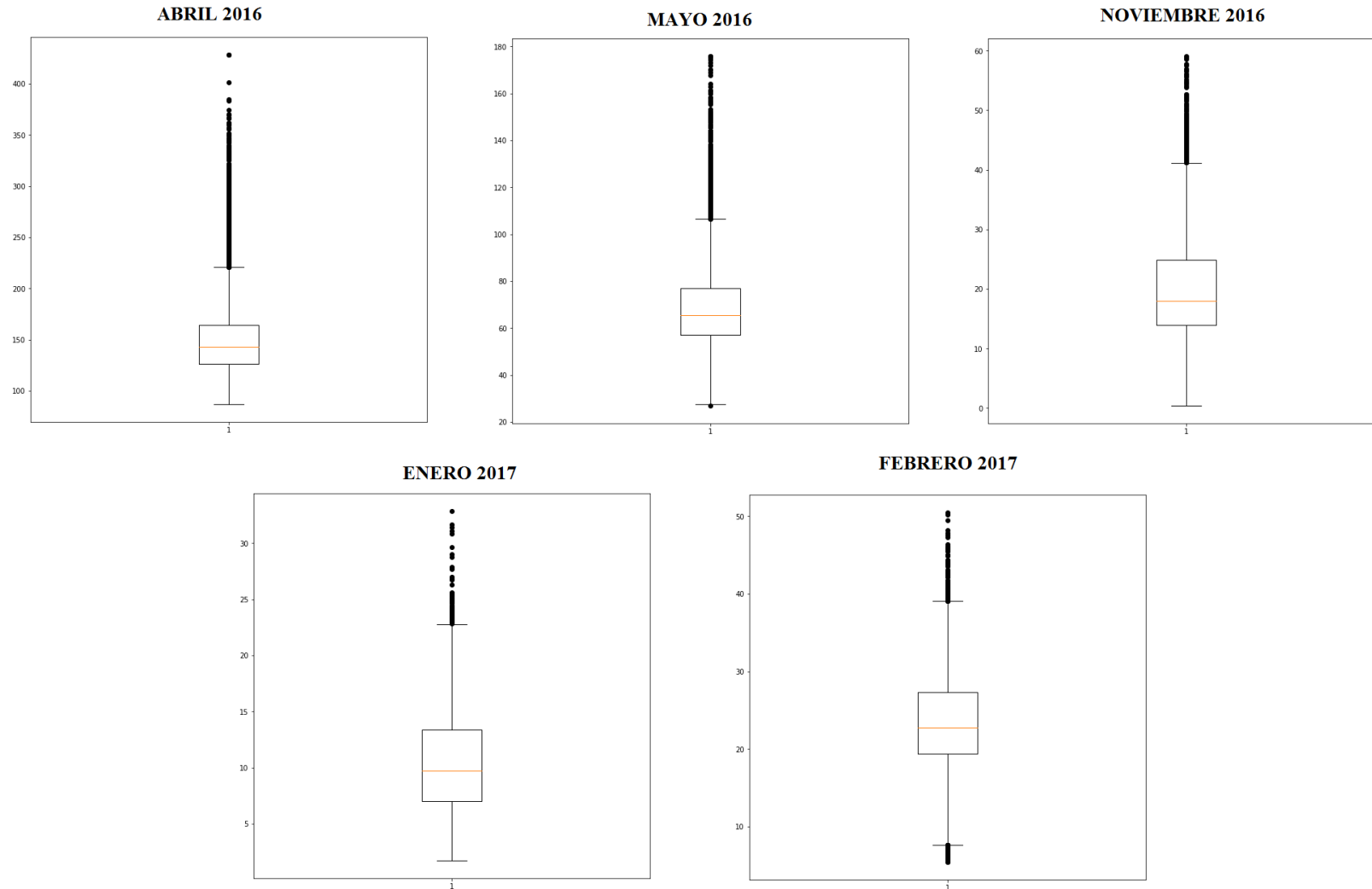


Figura A2 1. Diagramas de cajas y bigotes Subcuenca del Tomebamba.

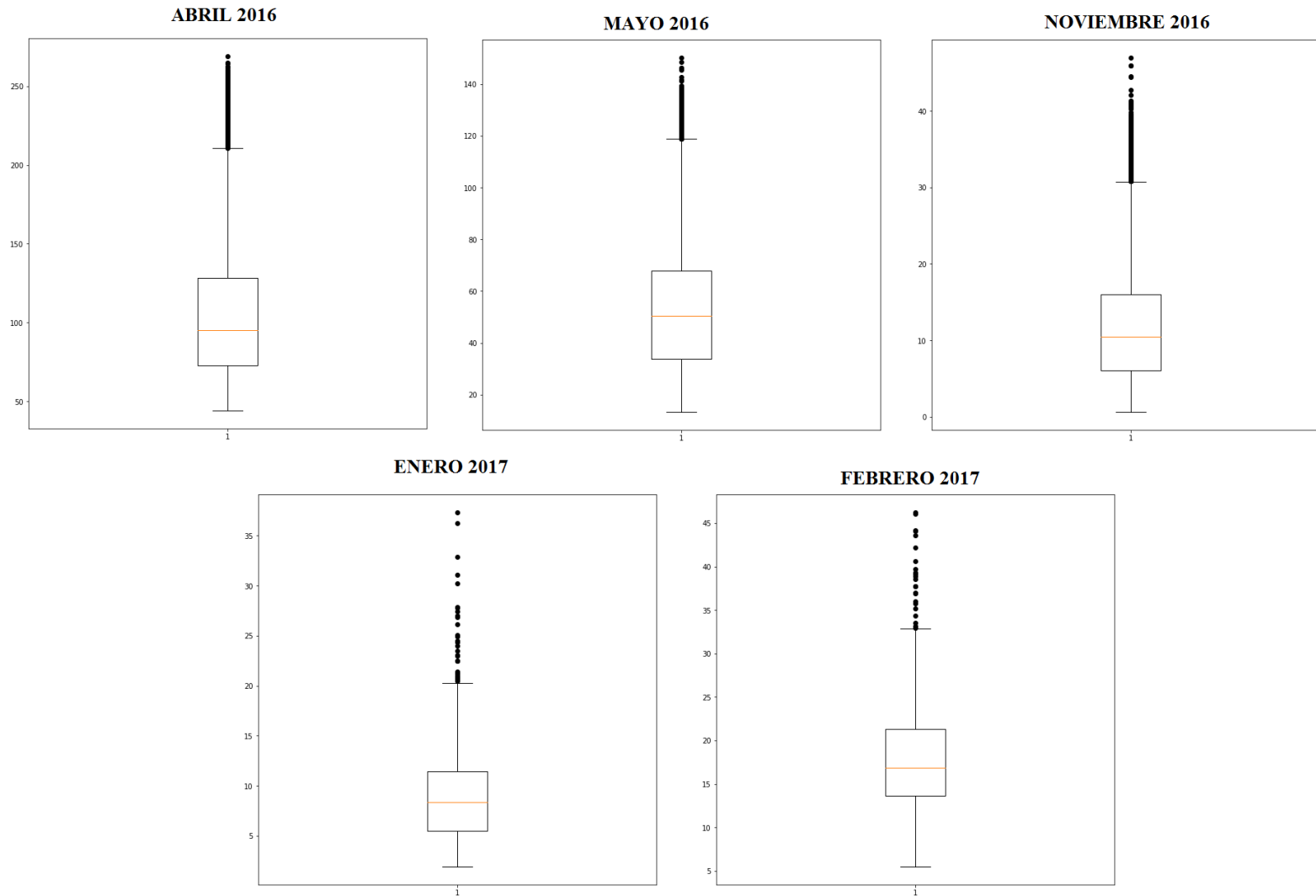


Figura A2 2. Diagramas de cajas y bigotes Subcuenca del Yanuncay.