



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

ESTUDIO DEL CICLO DIARIO DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL PAUTE PARA VALIDACIÓN DE MODELOS REGIONALES DE CLIMA

Proyecto de graduación previo a la obtención del grado de Ingeniera Civil

Director:

Ing. Rolando Céleri Alvear, PhD

Autora:

Ana Carolina Iñiguez Espinoza

Cuenca – Ecuador

Noviembre de 2014



RESUMEN

La precipitación es uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico. El estudio de la variabilidad del ciclo diario de la precipitación es un aporte importante para la calibración de modelos de circulación global que realizan las proyecciones de cambio climático. Estos modelos tienen que ser verificados con datos actuales, lo cual hasta el momento no ha sido realizado ya que se desconoce la variabilidad de la lluvia en escalas temporales menores a un mes. Debido a que no hay estudios del ciclo diario en el Ecuador, el tema cobra gran importancia. Es por esto que el objetivo de este estudio es el análisis de la variabilidad del ciclo diario (escala temporal horaria) de la precipitación para la validación de Modelos Regionales de Clima. La cuenca del Paute fue escogida como zona de estudio debido a la importancia económica para el país. El análisis de 12 estaciones con series horarias de datos de un periodo de 56 meses desde enero de 2009 a agosto de 2013, mostró una alta variabilidad del ciclo diario a nivel mensual y estacional. La agrupación de los datos, obtenidos a partir del método de análisis clúster k-means, confirmó el comportamiento heterogéneo de la precipitación en la cuenca. El régimen, la ubicación y la elevación de las estaciones no influyen en el comportamiento del ciclo diario, por lo que la agrupación espacial no permite encontrar un patrón de comportamiento a lo largo de los periodos estacionales. Además se observó que el ciclo diario presente en las regiones con régimen BM1 y BM2, tiene una distribución de la precipitación diaria similar en los periodos estacionales analizados, variando mayormente en su magnitud. Se plantearon hipótesis para los procesos de precipitación observados: (i) lluvia convectiva durante la tarde, (ii) influencia de los flujos catabáticos en la presencia de precipitación a las primeras horas de la noche, y (iii) lluvia nocturna por la influencia de los Sistemas de Mesoescala Convectivos.

Palabras clave: Ciclo Diario de la precipitación; cuenca del Paute; procesos de precipitación; variabilidad de la precipitación.



ABSTRACT

Rainfall is one of the most important components of the hydrological cycle. The study of the variability of the diurnal cycle of precipitation is an important input for calibrating global circulation models that perform climate change projections. These models must be verified with current data, which so far has not been completed because the space-time variability of rainfall in lower time scales than a month is unknown. There are not studies of diurnal cycle in Ecuador, that why the subject deserves importance. Thus, the purpose of this study is the analysis of the rainfall daily cycle (hourly time scale) for the validation of Regional Climate Models (RCM). The Paute Basin was chosen because of its economic relevance for the country. Analysis of 12 rainfall station with hourly time series of 56 months from January 2009 to August 2013, showed a high variability of the diurnal cycle in monthly and seasonal level. The aggrupation of the data, studied with the cluster k-means analysis, confirmed the heterogenic behavior of rainfall in the basin. Regime, location and altitude of rainfall stations does not influence in the behavior of the daily cycle, and does not allow to find a relation with the patterns of behavior. It was also observed that the diurnal cycle in BM1 and BM2 regions, has a similar distribution of daily precipitation in seasonal periods analyzed, mostly varying in magnitude. Hypothesis were raised for the rainfall process observed: (i) convective rainfall during the afternoon, (ii) influence of Katabatic flows in the presence of rain during the early night, and (iii) nocturnal rain because of the influence of Mesoscale Convective Systems (MCS).

Key words: Rainfall daily cycle; Paute Basin; rainfall process; rainfall variability.



ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE	4
CLAUSULAS	6
AGRADECIMIENTO	8
DEDICATORIA	9
1. Introducción	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Justificación	12
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo General	12
1.3.2 Objetivos Específicos	13
2. Marco Teórico	13
3. Materiales y Métodos	17
3.1 Área de estudio y datos	18
3.2 Estudio de la variabilidad del Ciclo Diario	20
3.2.1 Obtención del ciclo diario de la precipitación	20
3.2.2 Normalización de los datos	21
3.2.3 Agrupamiento mediante el uso del Método de Análisis Clúster K-means	21
3.2.4 Agrupamiento de las estaciones a partir del régimen al que corresponden	21
3.3 Definición de hipótesis para los diferentes procesos de precipitación	22
4. Resultados y discusión	22
4.1 Obtención del ciclo diario de la precipitación	22
4.2 Estudio de la variabilidad del ciclo diario	25
4.2.1 Método de análisis clúster k-means	25
4.2.2 Agrupamiento de las estaciones según su régimen	31
4.3 Definición de hipótesis de los procesos de precipitación	32
5. Conclusiones	35
5.1 Conclusiones generales del estudio	35
5.2 Recomendaciones de estudios futuros	37



REFERENCIAS	38
ANEXOS	40
Anexo 1: Clústeres de los meses del año (excepto junio) y su mapa de ubicación en la cuenca de estudio.	40
Anexo 2: Clústeres pertenecientes a los periodos estacionales de MAM, JJA y SON con datos regulares de las estaciones en estudio.	51



Universidad de Cuenca

Fundada en 1867

Yo, Ana Carolina Iñiguez Espinoza, autora de la tesis “**ESTUDIO DEL CICLO DIARIO DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL PAUTE PARA VALIDACIÓN DE MODELOS REGIONALES DE CLIMA**”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **Ingeniera Civil**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 04 de Noviembre de 2014

Ana Carolina Iñiguez Espinoza
C.I: 0103899100



Universidad de Cuenca

Fundada en 1867

Yo, Ana Carolina Iñiguez Espinoza, autora de la tesis "**ESTUDIO DEL CICLO DIARIO DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL PAUTE PARA VALIDACIÓN DE MODELOS REGIONALES DE CLIMA**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 04 de Noviembre de 2014

Ana Carolina Iñiguez Espinoza
C.I: 0103899100



AGRADECIMIENTO

Quiero dejar constancia de mi agradecimiento a todos quienes contribuyeron para el desarrollo del presente estudio. Al Ingeniero Rolando Céleri Alvear por su brillante dirección, su constante aporte de conocimiento y su apoyo en la realización de este proyecto. Al Ingeniero Lenin Campozano por su ayuda en el desarrollo de la metodología para el análisis del ciclo diario y su relación con posibles procesos de formación de precipitación. Gracias a ETAPA por haber proporcionado los datos sin los cuales no se habría podido realizar esta investigación. Al Grupo de Ciencias de la Tierra y el Ambiente de la Universidad de Cuenca y todos sus integrantes que colaboraron en el proyecto.

Ana Carolina Iñiguez Espinoza,
Cuenca, noviembre de 2014



DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, con todo mi cariño y amor, quienes me han apoyado incondicionalmente para que yo pueda lograr mis sueños, y que con su ejemplo de lucha y constancia me han enseñado a no rendirme para alcanzar mis metas.

A mi hermana quien ha sido mi modelo a seguir y en la que confío siempre.

A mi abuelita Julia quien es parte fundamental de mi vida y ha estado pendiente de todos mis proyectos y logros.

Y a todos mis amigos con quienes cuento en todo momento.



1. Introducción

1.1 Antecedentes

La precipitación se define como el agua procedente de la atmósfera que se deposita sobre la superficie de la tierra. Es uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico y es la fuente principal de agua sobre la superficie terrestre (Aparicio Mijares, 1992). Su medición y análisis es la base para estudios sobre el manejo y uso del agua, además, en varios casos es la variable más importante para la modelación hidrológica (McCuen, 1998).

La precipitación a diferencia de otras variables atmosféricas como la temperatura del aire, radiación solar, presión del aire, humedad relativa, entre otras, está influenciada por estos mismos factores, lo que hace que la precipitación presente incertidumbres y su predicción no sea certera. La precipitación a nivel espacial tiene una alta variabilidad, afectada también por la influencia de corrientes atmosféricas, corrientes oceánicas globales y de mesoescala, la latitud de la zona en estudio, etc (McCuen, 1998).

Por este motivo la alta variabilidad de la precipitación y la influencia de otros factores sobre ella, es uno de los motivos por lo cual el estudio de la precipitación es importante para determinar pautas del comportamiento de la misma y vincularla a las demás variables atmosféricas. Además conocer su variabilidad espacial y temporal es un requisito clave para la gestión de cuencas hidrográficas, debido a la importancia de la precipitación en el ciclo hidrológico y como ésta puede presentarse en diferentes fenómenos.

La variabilidad espacio temporal de la lluvia en zonas de montaña como los Andes, es compleja. Además de la naturaleza imprevista de las precipitaciones, también se pueden ver influenciadas por la topografía irregular de la zona. La gran variabilidad en altitud, pendiente y aspecto puede aumentar la variabilidad de la lluvia a través de procesos tales como efectos barrera, sombras pluviométricas y corrientes de vientos fuertes determinados por la orografía (Buytaert, Célleri, Willems, Bièvre, & Wyseure, 2006)

La influencia de la cuenca del río Paute en la realidad socio-económica y política del Ecuador es altamente importante. Sus afluentes sirven como proveedores para los sistemas de agua potable y riego para las diferentes zonas de la provincia del Azuay y Cañar especialmente. Afluentes pertenecientes a la cuenca del Paute son fuentes de agua potable para la ciudad de Cuenca con alrededor de 500000 habitantes. De acuerdo con Buytaert, Célleri, et al. 2006, existen captaciones de agua que se encuentran sobre los 3000 m.s.n.m., en el límite inferior del páramo. Algunas de ellas son: Tomebamba (y su afluente Mazan) para la planta de agua potable de El Cebollar, Yanuncay para la planta de Sustag y Machángara para la planta de Tixán. El río Machángara desciende de la región del páramo de su mismo nombre. Los ríos Tomebamba y Yanuncay descienden del páramo del Parque Nacional El Cajas.

Las zonas agroecológicas en el Austro Ecuatoriano se ubican entre 600 y 3000 msnm. Más del 75% de la superficie total tiene una temporada de



crecimiento de como máximo 10 meses y por lo tanto se beneficia de riego. En el 25% de la superficie, la estación de crecimiento natural es 6 meses o menos (Buytaert, Célleri, Bièvre, et al., 2006). Estas zonas dependen social y económicamente del sistema de riego (Donoso Correa, 2002).

Además es aquí donde se encuentra el complejo de centrales hidroeléctricas más importante del país que generan en la actualidad alrededor del 40% de la capacidad instalada del país. El Sistema Hidroeléctrico Paute Integral es el aprovechamiento de los recursos hídricos para la generación de energía renovable. Contará con cuatro centrales Mazar, Molino, Sopladora y Cardenillo con la construcción de dos embalses, Mazar y Amaluza, con una capacidad de 2200 MW al finalizar su construcción esperada para el 2017, y estarán en capacidad de generar el 50% del potencial hidroeléctrico del país. En la actualidad, Mazar genera 170 MW y Paute 1100 MW; la central Sopladora generará 487 MW (desde noviembre del 2015) y Cardenillo 400 MW (última etapa del proyecto, inicio de operación posiblemente en el 2017) (Fuente: CELEC EP). También existen pequeñas plantas hidroeléctricas multifuncionales que se han construido para aprovechar los recursos hídricos, muchos de estos pequeños embalses multipropósito se utilizan como depósito de almacenamiento para sistemas de riego o producción de agua potable. Como ejemplo tenemos las plantas de energía Saucay y Saymirin, que son parte de un sistema que consta de dos embalses, El Labrado y Chanlúd, los mismos que son reservorios de suministro de agua a las mencionadas centrales eléctricas en serie (Buytaert, Célleri, Bièvre, et al., 2006).

El impacto del cambio climático en los sistemas hidrológicos tiene consecuencias en los recursos hídricos. Los cambios en el comportamiento de la lluvia están relacionados con la disponibilidad de agua y el cambio del comportamiento de la escorrentía. Del mismo modo, las demás variables atmosféricas sufrirán cambios afectando todo el ciclo hidrológico. Los modelos regionales de clima proporcionan información a una fina escala (Mora, Campozano, Cisneros, Wyseure, & Willems, 2014). Para proyectar el clima futuro es necesario que estos modelos estén calibrados con respecto a la lluvia actual, sin embargo aún se desconoce el comportamiento de la lluvia diaria e intradía (ciclo diario) que nos permita lograr una buena calibración.

El sur de los Andes Ecuatorianos presentan la mayor variabilidad de tiempo y clima, es por esto que es importante entender el comportamiento de la precipitación a pequeña escala en la región de la cuenca del Paute, para mejorar el manejo y gestión de los recursos hídricos, y poder realizar la validación de modelos regionales de clima.

La cuenca del Paute presenta en su extensión dos principales regímenes de lluvia, unimodal (UM) y bimodal (BM), que incluyen una sub clasificación (UM1, UM2, BM1, BM2) de acuerdo a (Célleri, Willems, Boutaert, & Feyen, 2007). Por consiguiente, en este estudio se identifica claramente las zonas y los regímenes de influencia, con el objeto de facilitar información para la gestión de los recursos hídricos de la cuenca. El análisis del ciclo diario representa una mayor profundización en el análisis de la precipitación y su comportamiento a lo largo



del año, de modo que se pueda definir los posibles procesos de precipitación y la hora de mayor influencia en relación al régimen al que corresponde.

Visto que no se han realizado estudios sobre el ciclo diario de la precipitación en la cuenca del Paute, es necesario entender la importancia de este documento, el mismo que permitirá tener un conocimiento más profundo del comportamiento de la lluvia a lo largo del día, en las diferentes zonas de la cuenca durante cada estación del año. Por lo que se podrán plantear hipótesis para la determinación de los diferentes procesos de generación de lluvia. Además al conocer el comportamiento del ciclo diario de la precipitación, se puede gestionar de mejor manera este recurso aprovechando su comportamiento y así mismo utilizar los resultados obtenidos para la validación de modelos regionales de clima que servirán para modelaciones futuras.

1.2 Justificación

La precipitación, es la principal fuente de agua para la superficie terrestre, causante de fenómenos y desastres naturales, y parte fundamental del desarrollo de los seres humanos. La complejidad de su comportamiento y desarrollo requiere un análisis profundo.

Actualmente se tiene un problema relacionado con las salidas de los modelos de proyecciones climáticas futuras para estudios de cambio climático. Estos modelos tienen que ser verificados con datos actuales, lo cual hasta el momento no ha sido realizado ya que se desconoce la variabilidad de la lluvia en escalas temporales menores a un mes. En vista de que este estudio nos muestra en detalle un análisis de la precipitación a escala de ciclo diario, permitirá la validación de los modelos con una alta precisión. Los mismos que admitirán, en un futuro, superar la falta de información terrestre para la obtención y validación de los modelos que sean requeridos.

Este estudio está enfocado al análisis del desarrollo de la precipitación a nivel diario con el fin de tener una base para el control y validación de modelos regionales de clima. Por consiguiente, se podrá realizar modelaciones con mejor escala y mayor precisión para así optimizar la gestión de los recursos teniendo el conocimiento de los procesos de precipitación dentro de la cuenca de estudio.

Este documento proporcionara una base de datos para mejor entendimiento de la precipitación, a organizaciones y entidades que controlan la gestión de los recursos hídricos de la cuenca. Además constituirá una pauta para el estudio del ciclo diario de la precipitación que puede ser estudiado en un futuro con mayor detalle y poderlo vincular a otras variables atmosféricas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Estudiar el ciclo diario de la precipitación en la cuenca del Paute para la validación de modelos regionales de clima.



1.3.2 Objetivos Específicos

1. Identificar la variabilidad espacial del ciclo diario en los diferentes regímenes de precipitación.
2. Definir hipótesis para los procesos de precipitación.

2. Marco Teórico

El Ecuador tiene una alta variabilidad de la precipitación en todo su territorio. La cuenca amazónica presenta una importante heterogeneidad espacial. La precipitación anual ($500 - 4000 \text{ mm año}^{-1}$) depende principalmente de la altitud y exposición a los vientos dominantes del este. También se presentan precipitaciones abundantes ($2000 - 3000 \text{ mm año}^{-1}$) en las zonas bajas de la Amazonia por debajo de los 2000 msnm. La elevación del aire húmedo cercano a las laderas de los Andes generan precipitaciones máximas ($4000 - 5000 \text{ mm año}^{-1}$) alrededor de los 900 – 1000 msnm; y en zonas ubicadas sobre los 2500 msnm la lluvia disminuye a menos de 500 mm año^{-1} ya que el ambiente es más seco. Sin embargo a altitudes similares, las variaciones de lluvia están relacionadas con la exposición de las estaciones a vientos del este. Estaciones ubicadas en una pendiente o un valle hacia el este registran el doble de precipitación que aquellas en un lugar protegido (Laraque, Ronchail, Cochonneau, Pombosa, & Guyot, 2007).

La costa ecuatoriana presenta un régimen de precipitación caracterizado por lluvia entre los meses de diciembre a mayo, con las mayores precipitaciones entre febrero y marzo. Los meses secos corresponden a junio hasta noviembre. En la costa norte la precipitación se presenta durante todo el año, en donde existen promedio de entre 100 – 200 mm mensuales de enero a junio. En la costa de la zona sur de Manabí y la Península de Santa Elena se aprecia un régimen pluviométrico más definido, con una época lluviosa desde diciembre a mayo y una época seca de junio a noviembre. La zona de la costa sur comprende parte sur de la provincia del Guayas y El Oro, muestra un régimen similar al anterior con precipitaciones escasas durante el verano (Gálvez & Regalado, 2007).

En el Valle de San Francisco, una pequeña cuenca ubicada en el sur de los Andes ecuatorianos, Fries et al., (2014) analiza imágenes de radar (Septiembre de 2006 a Agosto de 2007) y datos de estaciones terrestres (5 años: 2007 – 2012) para proporcionar mapas de precipitación de alta resolución. Los datos de viento también son estudiados debido a su influencia en la formación de la precipitación. Los resultados muestran que la distribución de las precipitaciones y su magnitud se definen generalmente por la dirección y velocidad del viento, además de la ubicación topográfica en relación con las principales barreras y caminos. Se presenta una principal estación lluviosa en la parte oriental durante junio y agosto, mientras que en la parte occidental la máxima precipitación se produce entre enero y marzo.

La presencia de fenómenos como el fenómeno del Niño, ligado a los años de excedencia de precipitación, afecta visiblemente la costa ecuatoriana. Los efectos de ENSO (El Niño Southern Oscillation – Oscilación del Sur de El Niño) pueden conducir a diferentes comportamientos en el clima de la región de los



Andes (Mora & Willems, 2012). Además también se observa una influencia más dominante en la región durante Diciembre-Febrero (DEF) e influencias en la Cordillera Oriental durante Junio-Agosto (JJA). La cordillera de los Andes representa una zona muy compleja para el estudio hidrológico, debido a su topografía.

La zona perteneciente a la cuenca del Paute, ha sido el origen de varios estudios, debido a su importancia económica y social a nivel nacional. La variabilidad espacial de la cuenca es muy alta, según (Buytaert, Céleri, Willems, et al., 2006). En este estudio se demuestra una alta correlación entre estaciones a menos de 4000m de distancia, sin embargo la precipitación media puede variar más de un 25% dentro de este rango, con fuertes tendencias regionales con un aumento de las precipitaciones de suroeste a noreste.

La variación histórica de la precipitación de la cuenca del Paute es diversa, según D. E. Mora & Willems, (2012). En este estudio se examina anomalías observadas en datos de precipitación mensual y temperatura de 25 y 16 estaciones, respectivamente, durante principios de 1960 a 1990. Muestra la dependencia de la variación de la precipitación, a parte de la elevación, en factores como la orientación, pendiente y régimen hidrológico.

Con respecto a la variabilidad temporal, en su estudio, Celleri et al. 2007, determinó que las estaciones con régimen unimodal se encuentran cerca de la salida de la cuenca, con un solo pico de lluvias en junio o julio. Sin embargo, un análisis más detallado de estas estaciones, mostró como resultado una variación considerable en la magnitud, llegando así a una sub clasificación como UM1 a la zona más cercana a la salida de la cuenca: la media oscila entre 2900 – 3400 mm; y otra zona UM2 donde la media se encuentra entre 1100 – 1600 mm. Las estaciones bimodales, por el contrario, presentan picos en abril y octubre. Las estaciones situadas en la parte central de la cuenca o la Depresión Interandina, bajo los 3000 msnm, corresponden a la sub clasificación BM1, con una estación seca entre junio y agosto, y con rangos medios anuales de precipitación de 660 a 1100 mm. El régimen BM2, es determinado en las estaciones situadas en los altos flancos oriental y occidental de la cuenca, sobre los 3000 msnm, en zonas de transición entre la depresión interandina y las cuencas del Amazonas y Pacífico. Estas presentan una estación seca menos pronunciada durante Junio – Agosto y una segunda precipitación relativamente débil durante Octubre. Su precipitación media anual varía entre 1000 y 1800 mm.

El ciclo diario de precipitación ha recibido poca atención por autores en Sudamérica. Para Mapes et al. 2003 la región determinada para su estudio es la correspondiente a la dependiente de los elementos geográficos agudos como las costas y montañas, ubicadas en el noroeste de América del Sur y parte de América Central. Particularmente estudian la zona de los valles de Colombia, y continua a América Central donde la cordillera de los Andes atraviesa el territorio determinando por brechas notables en el Canal de Panamá, el Lago de Nicaragua y el Golfo de Tehuantepec. Trabajaron con datos satelitales e imágenes infrarrojas de nubosidad fría. Los resultados demuestran que en el ciclo diario de la precipitación, en general, la lluvia sigue el paso del sol, con la convección en desarrollo sobre la tierra durante la tarde, la misma que se notó



mayormente en las zonas costeras, el estrecho istmo de América Central y la Amazonía. Sin embargo, se presentaron otros patrones de comportamiento en el ciclo diario. En efecto, la presencia de lluvia nocturna pudo ser notada en los valles de Colombia y sobre el Lago de Maracaibo. También se observa una convección en la madrugada en altamar, que parece ser activado por una ola de refrigeración después de la media noche (B. Mapes, Warner, & Xu, 2003). El ciclo diurno presentado en este estudio representa los datos satelitales durante la temporada de julio a septiembre del año 2000.

La determinación del ciclo diario realizado por Mapes et al. 2003, con datos satelitales e imágenes infrarrojo, se basó en el Método usado GPI (GOES Precipitation Index) que consiste en es un algoritmo de estimación de la precipitación. La técnica GPI estima lluvias tropicales usando temperatura de la parte superior de las nubes como el único predictor. Sin embargo los datos GPI proporcionan una representación tardía del ciclo diurno.

Otro estudio del ciclo diario en la zona de los Andes se encuentra en Poveda et al. (2005), donde el ciclo diurno de precipitación en los Andes Tropicales de Colombia es caracterizado con observaciones a largo plazo, con datos horarios de tasas de precipitación de 51 pluviómetros con información de 22 y 28 años. Las observaciones indican la presencia de variaciones estacionales diurna (24h) y ciclos semidiurnos (12h), siendo estos últimos muy variables en el espacio. En toda la extensión territorial estudiada por Poveda et al. 2005, se identificaron 3 patrones de comportamientos de la precipitación: máximos de precipitaciones predominantes en la tarde; máximas alrededor de la media noche, o durante la tarde, o ambos, y máximas alrededor de la media noche. Ubicados en el noreste y oeste de Colombia, el flanco occidental de los Andes centrales y en el flanco oriental de la Cordillera Central, respectivamente. En cuanto a la elevación, no encontraron evidencia de una relación con la hora de precipitación máxima.

En este estudio la variabilidad de interanual del ciclo diario es determinada a partir de la cuantificación del mismo durante los años de influencia de El Niño y La Niña (conocidos como años ENSO). La variabilidad intra-anual del ciclo diurno es investigada por discriminación de acuerdo con la fase de la oscilación de Madden-Julian (OMJ). El ciclo diurno de precipitación promedio se estimó para las fases del este, del oeste, y neutrales de la OMJ (Poveda et al., 2005). El ciclo diario es estudiado a partir de isolíneas interpoladas que representa el porcentaje total de la precipitación diaria. Además se trabajó con tasas de precipitación por hora y sus acumulados para el ciclo diurno medio de precipitación durante El Niño, La Niña y años normales. Así mismo se determinaron índices de precipitación medios para el análisis de las fases OMJ.

El ciclo diario de la precipitación en regiones del sur del Ecuador, son influenciados y modificados por la complejidad del terreno de la Cordillera de los Andes (Trachte, Rollenbeck, & Bendix, 2010). Este estudio fue realizado en el Sur del Ecuador y la cuenca del Amazonas de Perú adyacente con imágenes satelitales utilizadas para (i) identificar casos con nube nocturna fría y (ii) verificar los resultados simulados. Además los patrones de nube fueron identificados en base a temperaturas IR (infrarrojo). Se utilizaron imágenes de la noche del 12 de octubre a 13 de octubre del 2009. A esta zona se le atribuye un comportamiento



complejo del ciclo diario, en donde la formación de nubes convectivas en el trópico por la tierra está dominado por el ciclo diario de la radiación solar, con un máximo de precipitaciones en la tarde (B. E. Mapes et al., 2003).

De acuerdo a (Trachte et al., 2010) la generación de los sistemas de meso escala convectivos (MCS - Mesoscale Convective Systems), en la región del sureste del Ecuador, pueden ser relacionados a la formación de lluvia durante la madrugada. Estos MCS se deben a la interacción entre el aire de drenaje nocturno desde las laderas y los valles andinos, y el aire húmedo y cálido de la cuenca del Amazonas, formando un frente frío local que resulta en una desestabilización atmosférica interior. El estudio formula también la hipótesis de que la formación de una nube nocturna puede deberse a la interacción de un flujo catabático con la forma cóncava del sistema de drenaje de los Andes en relación con el aire caliente húmedo de la Amazonía, causando la elevación de compresión y ésta induce la formación de la nube nocturna cerca del final de la tarde (Trachte et al., 2010)

En el estudio realizado por Buytaert, Celleri, et al. (2006), en 12 pluviómetros ubicadas en la zona alta de la cuenca del Paute en las microcuencas: Mazan, Soroche, Huagrahuma y Ningar. Se analizó la variabilidad temporal y espacial de la lluvia, incluyendo un estudio preliminar del ciclo diario. Los resultados indican la presencia de un pico durante horas de la tarde en la distribución de las precipitaciones a nivel del ciclo diario, determinado para una sola estación ubicada en el páramo en la microcuenca Huagrahuma. Para ambientes de montaña esto es muy común, debido a que los páramos son conocidos por los cambios repentinos en el clima y las altas fluctuaciones de temperatura diurna, que se conoce comúnmente como “verano todos los días e invierno todas las noches” (Hedberg, 1964). La alta amplitud diurna de la temperatura es el resultado de la gran radiación solar en las regiones montañosas tropicales. Por lo tanto, las mañanas suelen ser libre de nubes y con un cielo despejado. Por la tarde, la entrada de energía en la atmósfera inferior induce elevación convencional y orográfica, trayendo una mayor cobertura de nubes con lluvia y niebla. Durante la noche, el cielo se empieza a despejar nuevamente (Luteyn, 1999) .

A partir de las series de tiempo del 2001-2005, el promedio multianual de dichos datos permite el análisis de la variación intradía en las precipitaciones de un pluviómetro perteneciente a la microcuenca de Huagrahuma (Buytaert, Céleri, Willems, et al., 2006).

La tendencia del comportamiento del ciclo diario es común para las diferentes zonas de la cordillera de los Andes antes mencionadas, sin embargo, es necesario profundizar el análisis para determinar un patrón de comportamiento dentro de la cuenca en estudio y plantear hipótesis sobre su origen.

En los estudios reportados, los análisis se realizaron con el uso de imágenes satelitales (ej.: B. E. Mapes et al., 2003 y Trachte et al., 2010) o por estudios con datos medidos en tierra (ej.: Buytaert, Céleri, Willems, et al., 2006). Los estudios con datos medidos en tierra tienen una mayor importancia por sobre los satelitales, debido a la necesidad de los datos satelitales de una validación



previa, además de analizar la zona de estudio a una escala determinada. Por lo tanto los datos terrestres son mejores para el análisis del ciclo diario por su escala de estudio. La variabilidad del ciclo diario estudiado en Colombia por Poveda et al., (2005), utiliza sensores distribuidos en todo el país, por lo que se aprecia un comportamiento casi global del ciclo diario en la zona. La variabilidad del ciclo diario en zonas más reducidas sigue siendo un vacío de conocimiento, que es necesario para profundizar la comprensión de procesos de generación de lluvia.

Específicamente, el análisis estacional del ciclo diario en la cuenca del Paute ha sido estudiado para tres regímenes de precipitación, UM, BM y TM (Camposano et al. Publicación en progreso), siendo TM el régimen de transición entre UM y BM. Para estaciones BM y TM durante DEF, MAM y SON, se evidencia incrementos de precipitación durante la tarde y primeras horas de la noche (1200-2000 hora local), con un máximo alrededor de las 1600 hora local, atribuyendo esta precipitación a procesos convectivos. Para BM y TM durante JJA la inhibición de la actividad convectiva durante la tarde es atribuida a el estado de subsidencia atmosférica de durante JJA sumada a bajas temperaturas características de esta época, siendo un factor importante para la época seca de estos regímenes. Por lo tanto la precipitación para BM y TM durante JJA se espera que sea de tipo advectivo y de convección local (shallow convection). Por otro lado para estaciones del régimen UM el máximo de precipitación se presenta alrededor de media noche todo el año, atribuyendo como posibles causas de esta precipitación a la interacción de tres factores, (i) flujos catabáticos, (ii) sistemas de mesoescala convectivos, (iii) la ubicación de este régimen mayoritariamente sobre la región de Sistema de ocurrencia andino (banda de nubes y precipitación en la parte este cordillera de los Andes). Debido a que TM es una transición entre BM y UM, se espera que también reciba parte de las influencias del régimen UM. Sin embargo este estudio no analiza la variación mensual del ciclo diario, y limita el análisis a promedios por régimen, sin considerar un estudio específico por estación, necesario en zonas de alta variabilidad espacial y temporal de precipitación como la cuenca del Paute.

En consecuencia, el análisis del ciclo diario todavía requiere una profundización en su estudio, en donde se puedan determinar la variabilidad espacial y temporal del mismo. Además es necesario identificar la existencia o no de patrones de comportamiento y la influencia de la orografía.

Por lo tanto, este estudio pretende profundizar el conocimiento sobre el ciclo diario de la precipitación en la cuenca del Paute, para comprender a fondo el comportamiento de la precipitación y relacionarla con el espacio y el tiempo en el que se desenvuelve.

3. Materiales y Métodos

Este capítulo está estructurado de la siguiente manera: La sección 3.1 presenta el área de estudio y los datos a ser analizados. La sección 3.2 abarca los métodos que nos permiten analizar la variabilidad del ciclo diario y en la sección 3.3 se describe la manera en la cual se identificarán diferentes hipótesis para definir los procesos de precipitación.

3.1 Área de estudio y datos

La región de estudio corresponde a la cuenca del Paute (Figura 1), la misma que cuenta con un área aproximada de 6442 km². Se ubica en la región austral del Ecuador, en los Andes Centro Sur, entre la cordillera Oriental (límite este) y Occidental (límite oeste), entre los nudos de Curiquingue (límite norte) y de Portete (límite sur) (Donoso Correa, 2002).

El relieve irregular de la cuenca, presenta pendientes entre 0° a 20° (el 10% de la superficie total de la cuenca aproximadamente), hasta zonas con pendientes mayores a los 60°. El 50% del total del área de la cuenca pertenece a áreas fuertemente escarpadas con pendientes entre 30° y 60°. La elevación de la cuenca varía en el rango de los 500 m s.n.m. a 4600 m s.n.m. (UMACPA, 1995).

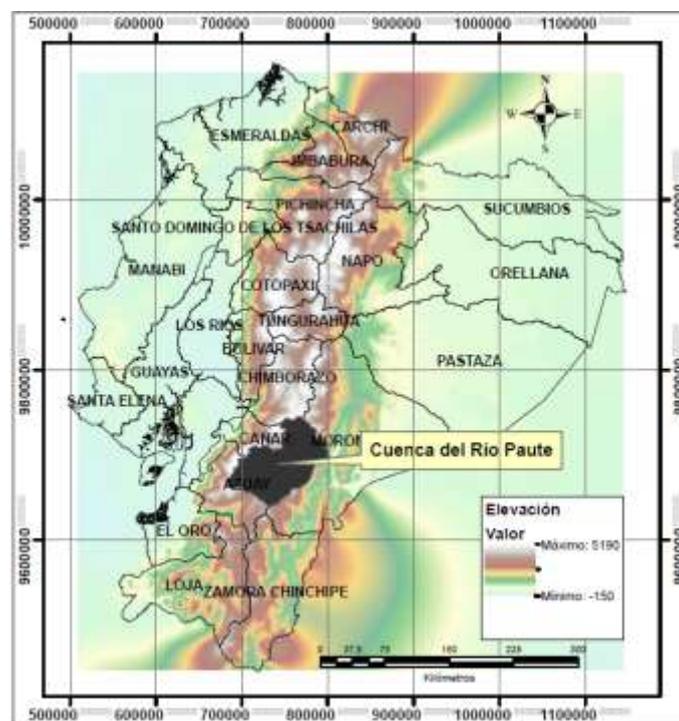


Figura 1: Ubicación de la cuenca del Paute con respecto al Ecuador

El clima de la zona de estudio es altamente variable. El patrón climático en la cordillera occidental se encuentra influenciado por el régimen de la costa del Pacífico por el oeste, y las masas de aire continentales del Atlántico y tropicales del este (Buytaert, Céleri, Willems, et al., 2006). Debido a esto y a otros factores como los orográficos, la variabilidad espacial y temporal de la precipitación de la cuenca es muy alta.

Datos de 12 estaciones correspondientes a ETAPA (Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca), ubicadas en la cuenca del Paute fueron utilizados en este estudio. Todos los pluviómetros son de tipo balancín con resolución de 0.5mm. Los datos de los pluviómetros se agregaron para contar con series horarias para el análisis del ciclo diario. En total se tuvo disponible un periodo de estudio de 56 meses de

Enero del 2009 a Agosto del 2013. Los datos fueron entregados y garantizada su calidad por la empresa ETAPA.

Las estaciones corresponden a regímenes BM1 y BM2 según Celleri, Willems, Boutaert, & Feyen (2007), presentadas en la Figura 2. El detalle de cada estación, su nombre y elevación correspondiente se muestra en la Tabla 1.

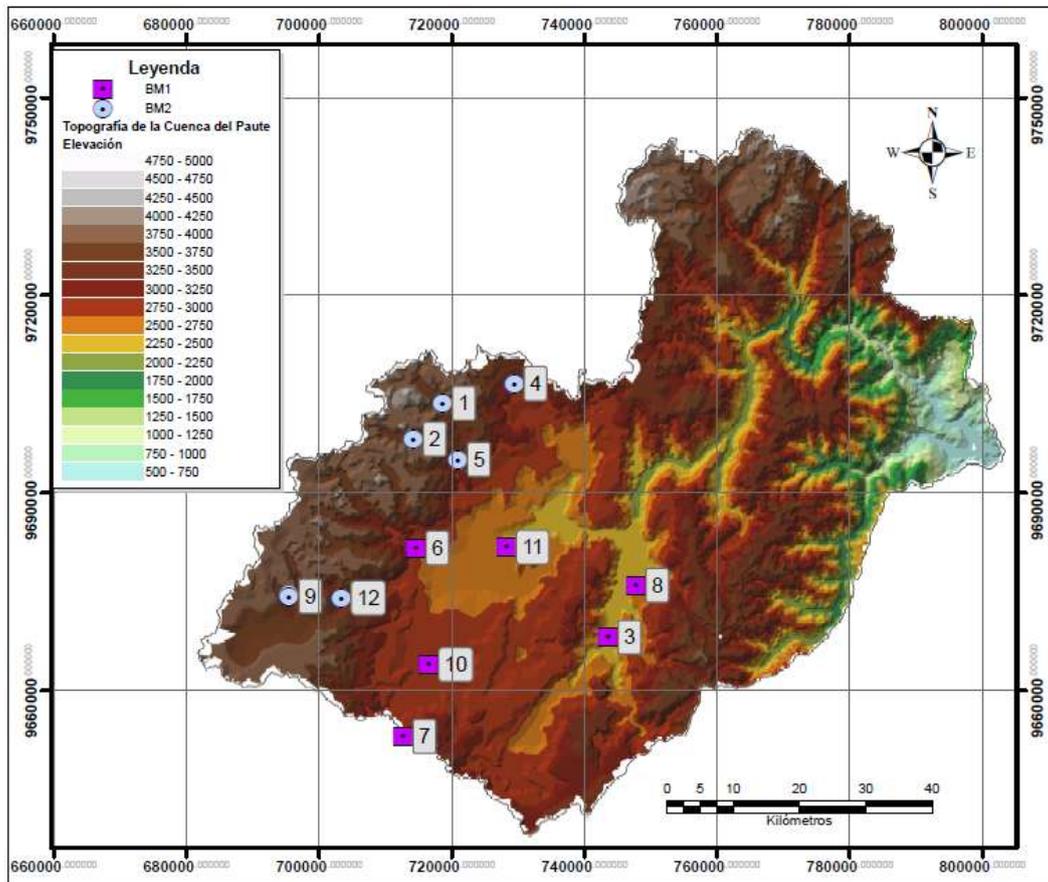


Figura 2: Cuenca del Paute y las estaciones en estudio. Fuente: ETAPA EP.



Tabla 1: Estaciones de precipitación de la cuenca del Paute, su ubicación, régimen y la subcuenca correspondiente. Fuente: ETAPA EP - UMACPA, 1995

Número	Nombre	Coordenadas UTM WGS84		Altura ms.n.m.	Subcuenca
		X	Y		
1	Chanlúd Empresa Eléctrica	718613	9703587	3485	Machángara
2	El Labrado	714225	9698193	3426	Machángara
3	Gualaceo D.J. Pamar	743598	9668104	2311	Santa Bárbara
4	La Esmeralda	729429	9706623	3171	Burgay
5	Machángara D.J. Chulco (Saucay)	720890	9695101	2972	Machángara
6	Matadero en Sayausí	714638	9681657	2526	Tomebamba
7	Portete	712681	9653063	3174	Tarqui
8	Punguhuayco Chordeleg	747782	9675991	2451	Santa Bárbara
9	Soldados ETAPA	695451	9674348	3538	Yanuncay
10	Tarqui D.J. Cumbe	716532	9663964	2630	Tarqui
11	Ucubamba en ETAPA	728249	9681785	2430	Cuenca
12	Yanuncay Pucán	703349	9674079	3000	Yanuncay

En la Tabla 1 se presentan las estaciones en estudio. La ubicación con respecto a la cuenca está determinada a partir de la subdivisión realizada por la UMACPA, 1995 en el “Proyecto de conservación y Manejo de la Cuenca del Paute”. Tanto los archivos en formato shape de la cuenca, como la altura y coordenadas de las estaciones fueron proporcionados por la empresa ETAPA.

3.2 Estudio de la variabilidad del Ciclo Diario

La cuenca del Paute presenta una alta variabilidad espacial y temporal de precipitación, determinada a escala mensual en otros estudios previos (Célleri et al., 2007 y Buytaert et al., 2006). En la sección 3.2.1 se explica la forma de obtención del ciclo diario de cada estación y en la sección 3.2.2 su normalización. A continuación, la variabilidad del ciclo diario de la precipitación en la cuenca, fue analizada de dos maneras. En la sección 3.2.3 se indica el primer procedimiento realizado partir del método de análisis clúster k-means y en la sección 3.2.4 de acuerdo al régimen como indica el estudio de Célleri et al., (2007). Se realizaron estos dos análisis para corroborar si las estaciones con similar ciclo diario de la lluvia tienen el mismo agrupamiento encontrado con datos mensuales por Célleri et al. (2007).

3.2.1 Obtención del ciclo diario de la precipitación

El ciclo diario se lo analiza horariamente, para el cual se seleccionó el tiempo de estudio, en su periodo de 24 horas, en un tiempo corrido de 0700 – 0700 hora local, para captar mejor la precipitación observada durante las horas de la tarde y la madrugada, tal como lo trabajan otros autores como Poveda et al., 2005.



Los valores horarios del ciclo diario se calcularon con el promedio horario multianual, lo cual es el procedimiento común y como ya ha sido realizado por otros autores que trabajaron con datos en la zona de estudio (Buytaert, Célleri, Willems, et al., 2006).

Sin embargo también es de interés conocer si existe una variación en el ciclo diario a lo largo del año. Para realizar este estudio en detalle, a partir de los datos horarios se obtuvo el promedio horario multianual estacional de cada uno de los pluviómetros: Diciembre – Enero – Febrero (DEF), Marzo – Abril – Mayo (MAM), Junio – Julio – Agosto (JJA) y Septiembre – Octubre – Noviembre (SON). Así mismo se obtuvo el promedio horario multianual mensual para analizar el comportamiento del ciclo diario mes a mes.

3.2.2 Normalización de los datos

Los datos de precipitación obtenidos a partir del procedimiento descrito en la sección 3.2.1 a nivel estacional y mensual de las estaciones analizadas, fueron normalizados utilizando la fórmula del Estocástico, con el cual se obtendrá un nuevo comportamiento del ciclo diario de cada estación acotado entre 0 y 1, que se comporta de forma similar al original. La ventaja de este método es aumentar la sensibilidad de los datos manteniendo el mismo comportamiento inicial.

3.2.3 Agrupamiento mediante el uso del Método de Análisis Clúster K-means

El agrupamiento de las estaciones se realizó con el método de análisis clúster k-means, usando la ayuda del software MATLAB R2013b. Es un método iterativo que consiste en dividir los datos correspondientes al ciclo diario de cada una de las estaciones, una matriz de 12x24 (12 estaciones en estudio y 24 horas del día), en un número k de clúster especificado previamente. Se determinó para cada una de las escalas de tiempo analizadas (mensual y estacional) el valor de k requerido a partir de ensayos con un rango de valores de k (2 – 7). El software internamente, determina la suma mínima de las distancias euclidianas entre el centroide del clúster encontrado y los objetos pertenecientes a ellos. Además de este factor, se determina la silueta de los clústeres encontrados para una mejor apreciación. Finalmente se escoge el valor de k adecuado a partir de estos dos parámetros.

El método clúster k-means fue aplicado para los datos normalizados a escala mensual y estacional.

3.2.4 Agrupamiento de las estaciones a partir del régimen al que corresponden

Para el análisis de la variabilidad de las estaciones en estudio, se agruparon de acuerdo a la clasificación realizada por Célleri et al. (2007). Como se observa en la Tabla 2, las estaciones corresponden a regímenes bimodales 1 y 2.



Tabla 2: Régimen de las estaciones de precipitación de la cuenca del Paute. (Célleri et al., 2007)

Nombre	Régimen
Gualaceo D.J. Pamar Matadero en Sayausí Portete Punguhuayco Chordeleg Tarqui D.J. Cumbe Ucubamba en ETAPA	BM1
Chanlúd Empresa Eléctrica El Labrado La Esmeralda Machángara D.J. Chulco (Saucay) Soldados ETAPA Yanuncay Pucán	BM2

A partir de esta agrupación por regiones de la cuenca, se determinó el ciclo diario promedio de los pluviógrafos, es decir, el promedio del ciclo diario estacional de las estaciones con régimen BM1 y así mismo para las estaciones BM2.

3.3 Definición de hipótesis para los diferentes procesos de precipitación

En estudios anteriores, varios autores ya han identificado posibles procesos causantes de lluvia en distintas horas del día. Trachte, Rollenbeck, & Bendix, (2010) presenta dos procesos: (i) el análisis del flujo catabático, el mismo que puede provocar la presencia de precipitación durante las primeras horas de la noche (1900 a 2300 HL) y (ii) analiza los sistemas de mesoescala convectivos (MCS) y determina presencia de lluvia durante la madrugada (0000 a 0500 HL). Por otra parte en Aparicio Mijares, (1992) se explica el proceso de la lluvia convectiva (1600 a 1800 HL), el mismo que se ha determinado también en zonas de alta montaña por Buytaert et al., (2006) y Fries et al., (2014).

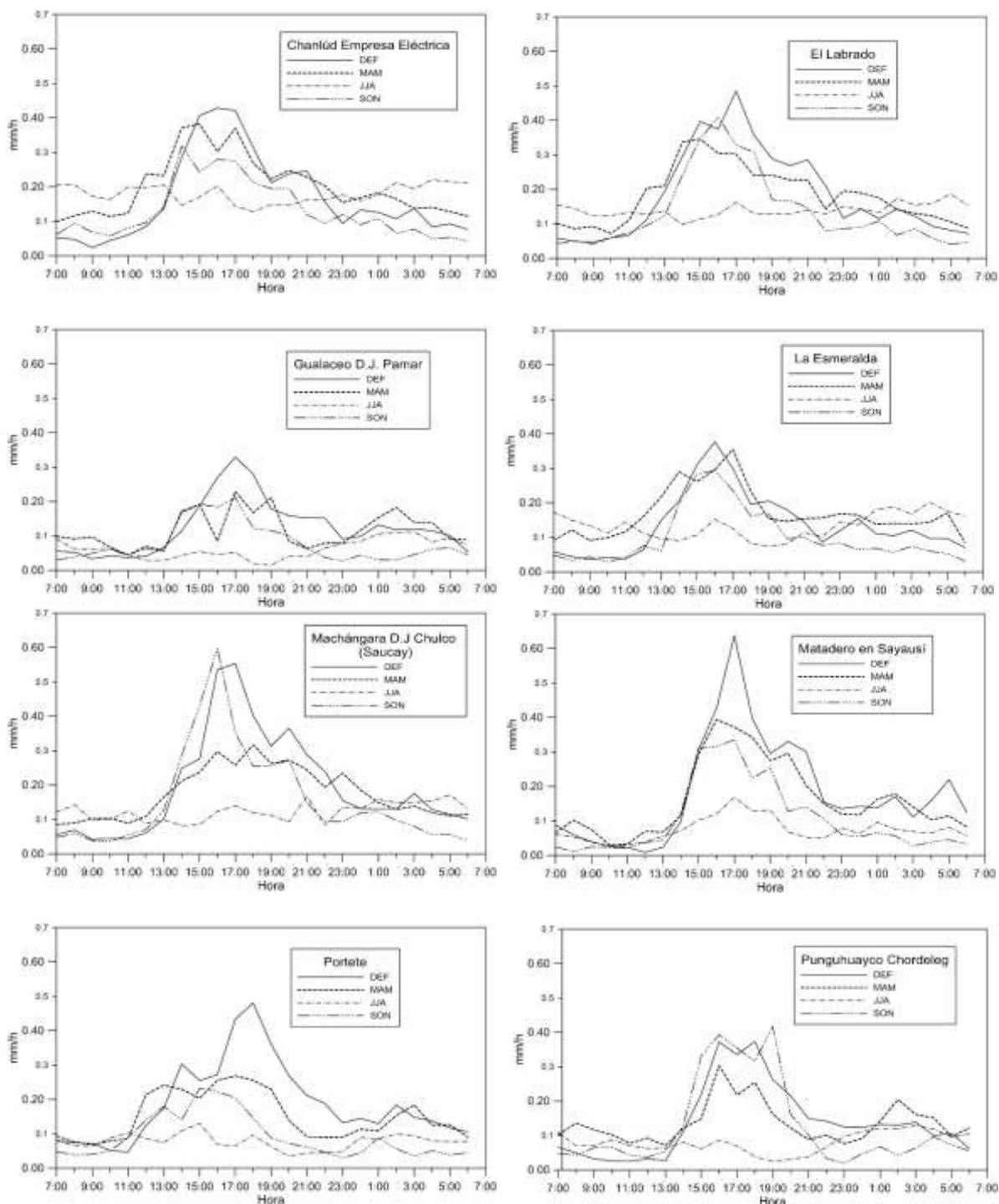
En este estudio se comparó en forma preliminar los datos obtenidos en la sección 3.2.4 y los estudios de procesos de generación de lluvia para determinar y proponer hipótesis sobre los procesos de precipitación presentes en el ciclo diario de las estaciones de la cuenca del Paute, los mismos que en futuras investigaciones deberán ser estudiados con mayor profundidad.

4. Resultados y discusión

4.1 Obtención del ciclo diario de la precipitación



Mediante el procedimiento descrito en la sección 3.2.1 se obtuvo el ciclo diario de la precipitación de las estaciones descritas en la Tabla 1. Los resultados presentados en la Figura 3 muestran el comportamiento del ciclo diario de las estaciones en cada periodo estacional del año.



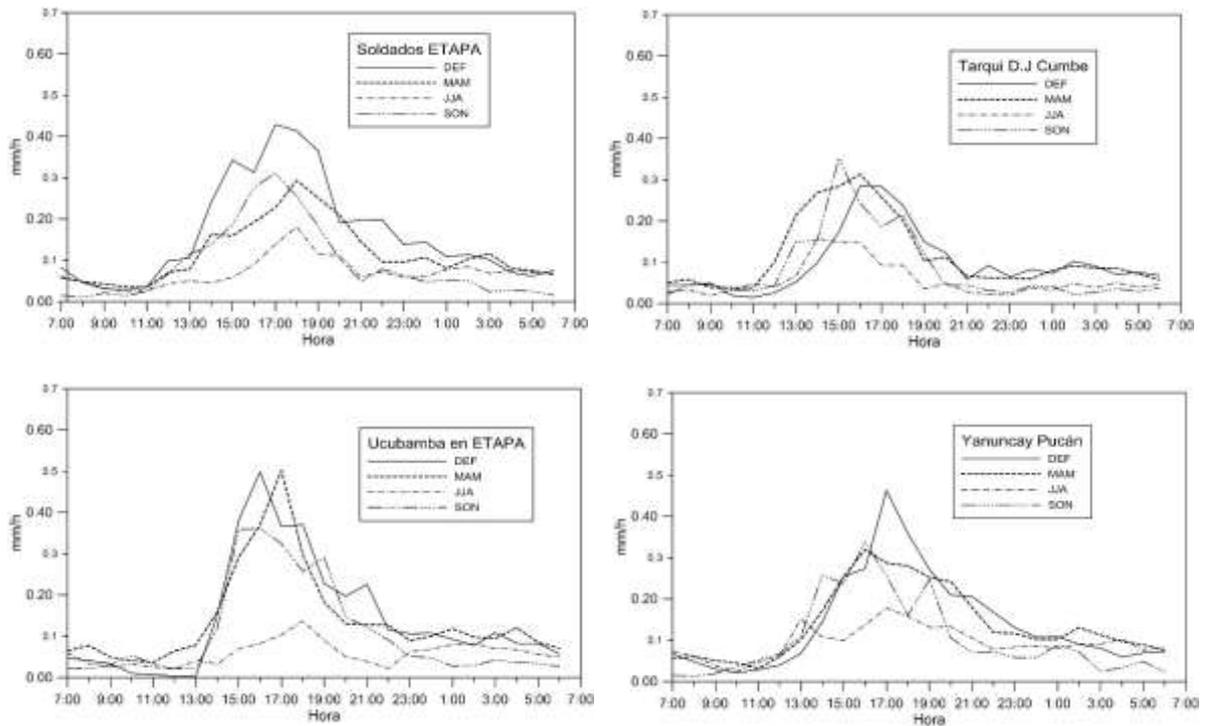


Figura 3: Ciclo diario de la precipitación de las estaciones en estudio a nivel estacional: Diciembre – Enero – Febrero (DEF), Marzo – Abril – Mayo (MAM), Junio – Julio – Agosto (JJA) y Septiembre – Octubre – Noviembre (SON).

En la Figura 3 se observan que los valores máximos de precipitación en todos los pluviómetros analizados en el periodo estacional de DEF ocurre durante la tarde (entre 1600 y 1800 hora local). Para MAM, JJA y SON las estaciones que presentan la máxima precipitación durante la tarde corresponden al 83%, 33% y 67%, respectivamente.

Tabla 3: Variación entre los picos de precipitación máxima durante los periodos estacionales y la hora de ocurrencia

	Máximo			Mínimo		
	Estación	mm/hora	Hora	Estación	mm/hora	Hora
DEF	Matadero en Sayausí	0.638	1700	Tarqui D.J. Cumbe	0.284	1600
MAM	Ucubamba en ETAPA	0.502	1700	Gualaceo D.J. Pamar	0.229	1700
JJA	Chanlúd Empresa Eléctrica	0.221	0400	Gualaceo D.J. Pamar	0.113	0300
SON	Machángara D.J. Chulco (Saucay)	0.598	1600	Gualaceo D.J. Pamar	0.212	1700

En la Tabla 3 se presenta la variación de máximos en las diferentes estaciones: durante DEF se encuentra desde $0.638 \text{ mm hora}^{-1}$ en la estación de Matadero en Sayausí hasta $0.284 \text{ mm hora}^{-1}$ en Tarqui D.J. Cumbe, presente en la tarde (1600 a 1800 HL). Durante MAM la estación con mayor precipitación dentro de los máximos analizados corresponde a Ucubamba en ETAPA con $0.502 \text{ mm hora}^{-1}$ hasta la estación Gualaceo D.J. Pamar con $0.229 \text{ mm hora}^{-1}$, ocurrida en la tarde entre las 1600 y 1800 HL. Para JJA existe un descenso en la magnitud de la precipitación de $0.221 \text{ mm hora}^{-1}$ en Chanlúd Empresa



Eléctrica hasta la estación Gualaceo D.J. Pamar con $0.113 \text{ mm hora}^{-1}$, en las estaciones mencionadas la hora de precipitación máxima se dio en la madrugada (0000 a 0500 HL). Finalmente estos valores nuevamente ascienden en SON con una variación de $0.598 \text{ mm hora}^{-1}$ en Machángara D.J. Chulco (Saucay) hasta $0.212 \text{ mm hora}^{-1}$ en Gualaceo D.J. Pamar, presente durante horas de la tarde (1600 y 1800 HL). La presencia de máximos entre horas de la tarde es esperada para estaciones de ambiente de montaña debido al ascenso de aire húmedo y cálido presente por la variación de temperatura, el mismo que produce un movimiento vertical por la elevación de la presión en la parte inferior de la zona trayendo una mayor cobertura de nubes con lluvia y niebla. Sin embargo existen estaciones donde se observan picos de menor magnitud durante las primeras horas de la noche (1900 a 2300 HL) y la madrugada (0000 a 0500 HL).

4.2 Estudio de la variabilidad del ciclo diario

4.2.1 Método de análisis clúster k-means

En la sección 3.2.3 se explicó la aplicación del método de agrupamiento de datos clúster k-means. Para la aplicación de este método se realizó la normalización previa de los datos a nivel estacional y mensual.

A partir de los datos normalizados se realizó el análisis de las estaciones, para el cual, aplicando el método de análisis clúster k-means y la comprobación con los parámetros definidos en la sección 3.2.3, se determinó el ifactor para el cual se obtiene el mejor agrupamiento ($k=4$) para los datos estudiados en las dos escalas temporales (mensual y estacional).

Como ejemplo, en la Figura 4 se presentan los clústeres del mes de junio con datos normalizados, con el fin de identificar la hora de mayor influencia en el ciclo diario. Los clústeres del resto de meses del año y su mapa de ubicación en la cuenca se presentan en el Anexo 1.

JUNIO

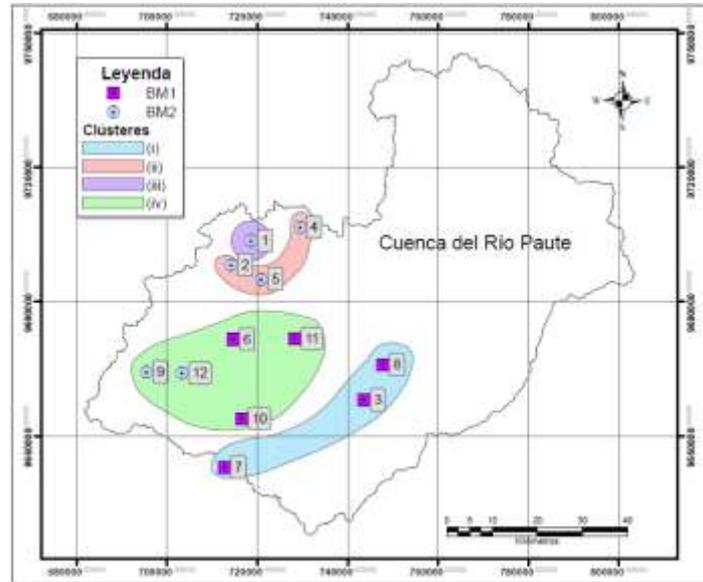
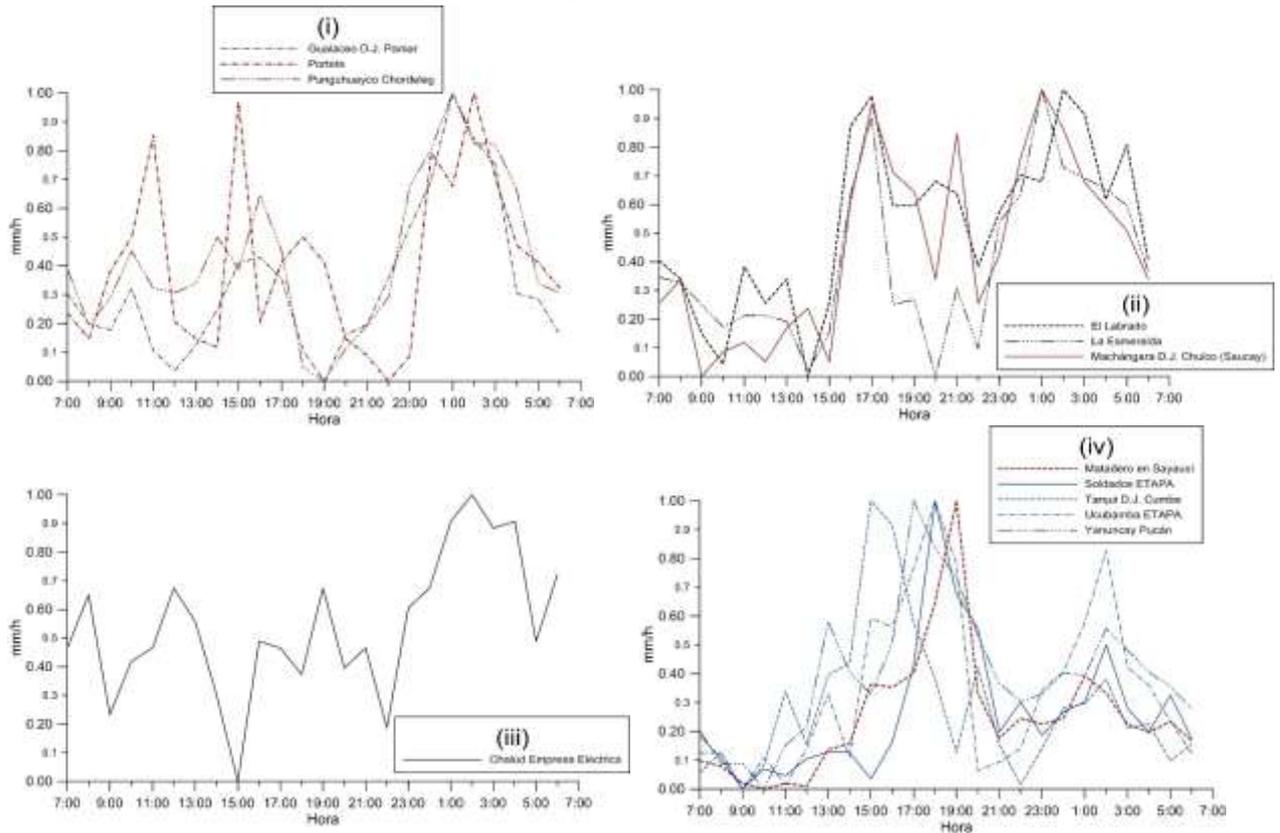


Figura 4: Clústeres del mes de junio para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

En la Figura 4 se observan el agrupamiento de las estaciones según el comportamiento del ciclo diario. Como se puede apreciar, la interpretación de estos datos no resulta una tarea fácil. Es particularmente raro el comportamiento de Chanlúd Empresa Eléctrica que no se parece a las estaciones muy cercanas como El Labrado y Machángara D.J. Chulco (Saucay). La presencia de



precipitación durante horas de la tarde y la madrugada es visible, particularmente para los clústeres II y IV.

La influencia presente en la madrugada se observa en ascenso desde el mes de abril hasta junio (Anexo 1). Sin embargo el comportamiento del ciclo diario durante los todos meses del año presenta una variabilidad muy alta por lo que su análisis es complejo. Es posible que la escala mensual sea una escala muy fina para este estudio ya que los patrones de precipitación temporal se confunden: es decir, los procesos sinópticos o de mesoescala no se producen en el mismo mes cada año. Por lo tanto para estudiar la escala mensual se requiere de un estudio más profundo con el uso de métodos más complejos lo que sobrepasa los objetivos de la presente tesis.

El análisis de la variabilidad a nivel estacional se realizó según la sección 3.2.3 para el cual usando los datos normalizados de las estaciones, se obtuvo el promedio horario multianual estacional, con el que se realizó el análisis con el método clúster k-means con el valor para la agrupación de $k=4$. Los resultados son presentados en la Tabla 4 y Figura 5.

Como se observa en la Figura 5 junto con los resultados de la Tabla 4, la distribución espacial de las estaciones agrupadas según sus periodos estacionales, no presenta un mismo patrón de comportamiento que se desarrolle durante todo el año, sino que cambia cada trimestre. A partir de estos resultados se encuentra que el régimen, la ubicación y la elevación de cada estación no son parámetros que influyan en el agrupamiento obtenido con el método clúster. Esto nos indica la alta variabilidad espacial de la lluvia en la cuenca a escala horaria y su alta dinámica estacional.



Tabla 4: Agrupación de las estaciones según su periodo estacional.

Clústeres de Agrupación con k=4

DEF	i	Chanlúd Empresa Eléctrica		El Labrado		Soldados ETAPA	
	ii	La Esmeralda					
	iii	Portete					
	iv	Gualaceo D.J. Pamar	Machángara D.J. Chulco (Saucay)	Matadero en Sayausí	Punguhuayco Chordeleg	Tarqui D.J. Cumbe	Ucubamba en ETAPA
MAM	i	Punguhuayco Chordeleg					
	ii	Chanlúd Empresa Eléctrica	La Esmeralda	Portete		Tarqui D.J. Cumbe	Ucubamba en ETAPA
	iii	Gualaceo D.J. Pamar					
	iv	El Labrado	Machángara D.J. Chulco (Saucay)	Matadero en Sayausí		Soldados ETAPA	Yanuncay Pucán
JJA	i	Gualaceo D.J. Pamar		La Esmeralda		Punguhuayco Chordeleg	
	ii	Portete					
	iii	Chanlúd Empresa Eléctrica		El Labrado		Machángara D.J. Chulco (Saucay)	
	iv	Matadero en Sayausí	Soldados ETAPA	Tarqui D.J. Cumbe		Ucubamba en ETAPA	Yanuncay Pucán
SON	i	El Labrado	La Esmeralda	Machángara D.J. Chulco (Saucay)		Soldados ETAPA	Yanuncay Pucán
	ii	Gualaceo D.J. Pamar		Portete		Tarqui D.J. Cumbe	
	iii	Matadero en Sayausí		Punguhuayco Chordeleg		Ucubamba en ETAPA	
	iv	Chanlúd Empresa Eléctrica					

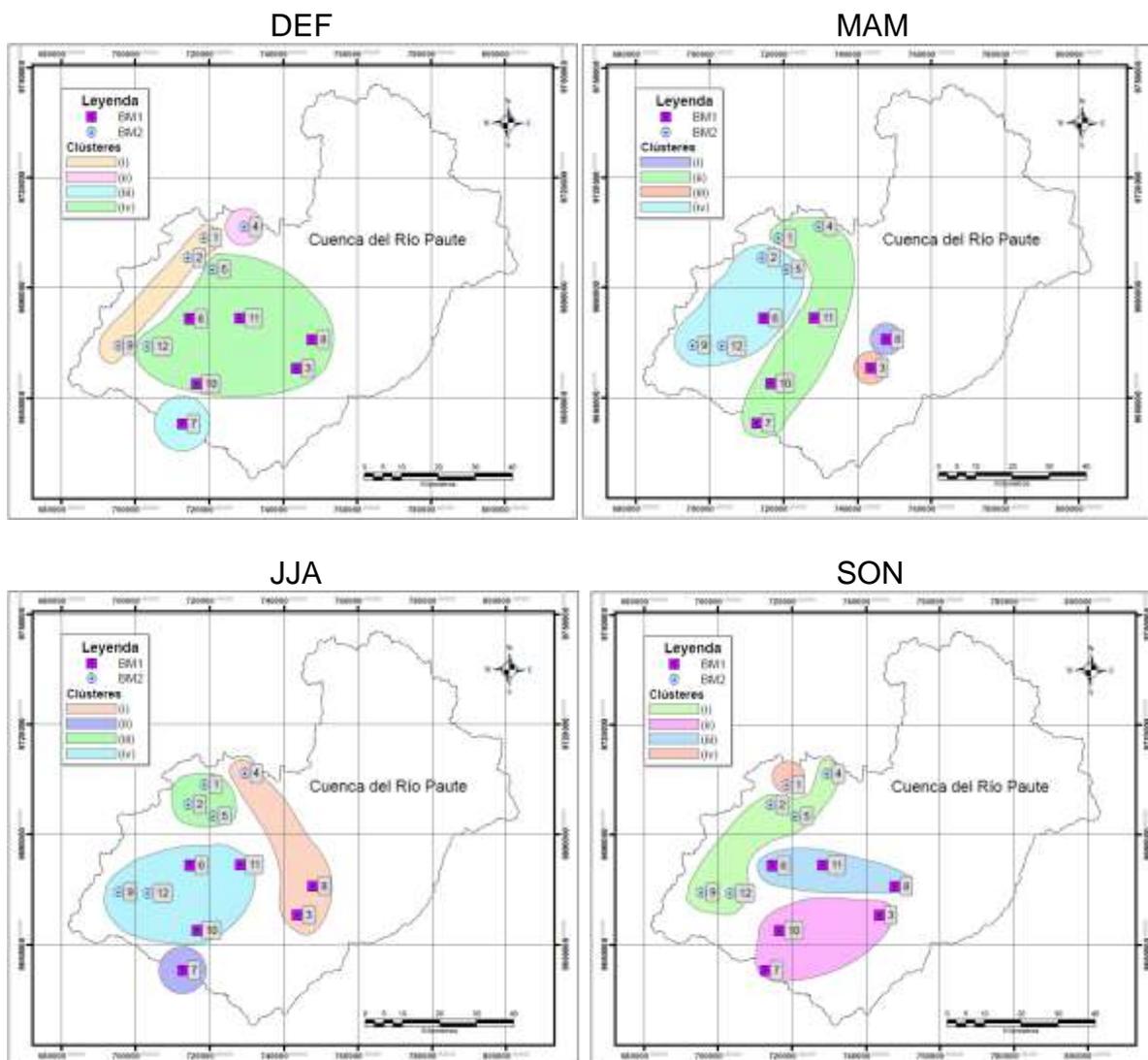


Figura 5: Mapa con las zonas agrupadas después del análisis con el método clúster k-meas para cada periodo estacional.

Como ejemplo, en la Figura 6 se puede observar el comportamiento de los cuatro clústeres pertenecientes a DEF. Los demás periodos estacionales se muestran en el Anexo 2.

DEF

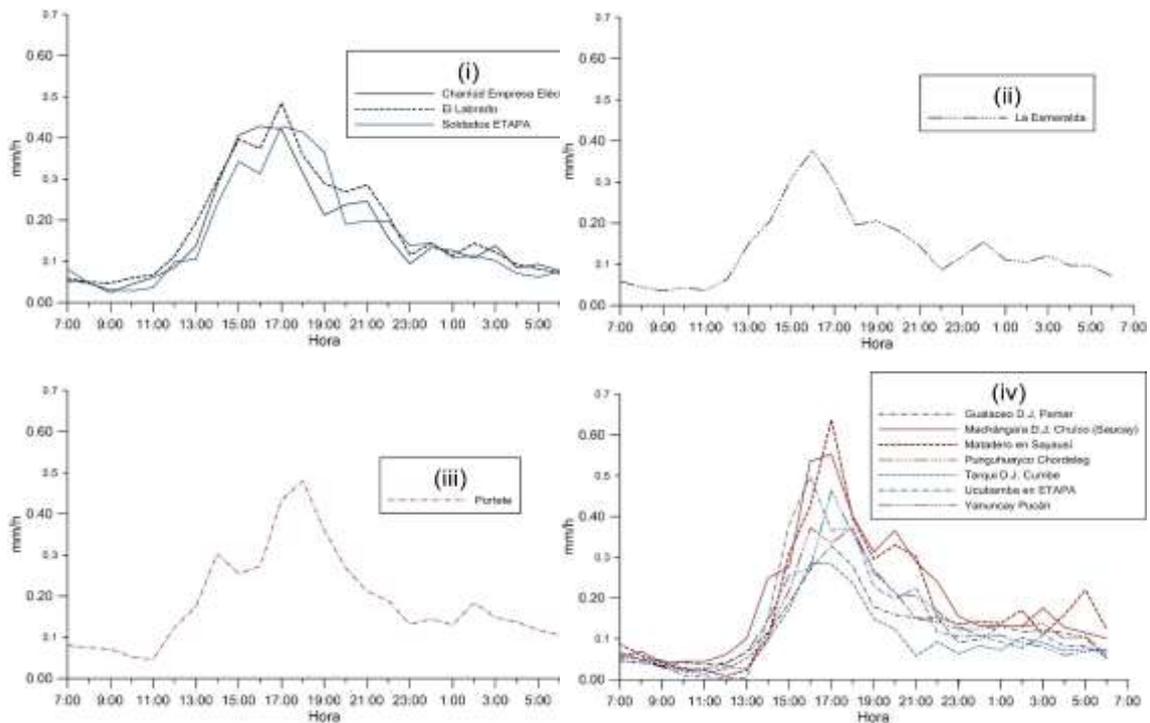


Figura 6: Clústeres pertenecientes a DEF con datos regulares de las estaciones en estudio.

Las estaciones pertenecientes a los grupos generados por el clúster, se comportan de forma similar en el ciclo diario, la obtención de los clústeres se obtuvo a partir de datos normalizados, pero los resultados se presentan con datos regulares. En la Figura 6 se observan picos similares en su comportamiento diario aunque difieran en su magnitud, como es el caso para el clúster IV, el máximo pico de precipitación encontrado en la estación Matadero en Sayausí en 0.55 veces mayor al máximo de la estación Tarqui D.J. Cumbe. Los clústeres obtenidos no tienen una correlación con el régimen de la zona a la que pertenecen.

El análisis estacional presenta también una alta variabilidad. La ubicación de los clústeres en los diferentes periodos estacionales, es independiente del régimen al que pertenecen y su ubicación, a excepción de los clústeres obtenidos durante SON en donde el comportamiento del ciclo diario coincide con el régimen de las estaciones. Para DEF las estaciones de Soldados ETAPA y Yanuncay Pucán se encuentran en grupos diferentes, a pesar de su cercanía (7.9 km aprox.) y tener el mismo régimen. Así mismo en MAM la presencia de los clústeres I y III, pertenecientes a las estaciones Punguhuayco Chordeleg y Gualaceo D.J. Pamar, están ubicados a una corta distancia (8.4 km aprox.) y corresponde al mismo régimen sin embargo se comportan de manera diferente en su ciclo diario (Anexo 2). Durante JJA se presenta el caso del clúster I, en donde las estaciones de Punguhuayco Chordeleg y Gualaceo D.J. Pamar (BM1) se encuentran a 40 km aproximadamente de la estación La Esmeralda (BM2) además de pertenecer a diferentes regímenes.

4.2.2 Agrupamiento de las estaciones según su régimen

En cuanto al método usado para el estudio de la variabilidad del ciclo diario en la cuenca, explicado en la sección 3.2.4, se clasifican las estaciones según el régimen al que pertenecen, BM1 y BM2 como se observa en la Tabla 2.

Se determinó el promedio estacional de las estaciones pertenecientes al régimen BM1 y BM2. En la Figura 7 se presentan los resultados.

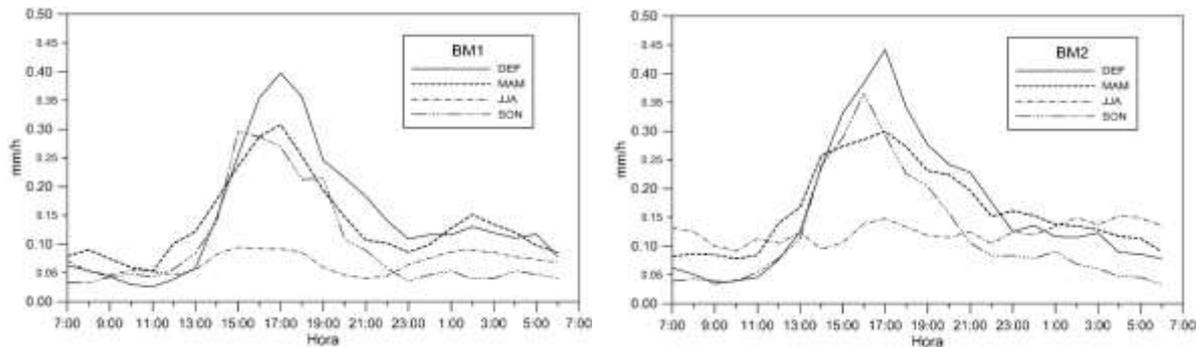


Figura 7: Promedio estacional por régimen del ciclo diario.

En la Figura 7 se observan picos durante las horas de la tarde (1600 a 1800 HL) para las estaciones pertenecientes al régimen BM1 en los periodos estacionales de DEF y MAM. En SON el pico máximo se presenta un poco más temprano (1500 HL). Durante JJA el pico máximo ocurre durante la tarde, sin embargo la variabilidad del ciclo diario durante este periodo estacional es muy bajo y se observan picos de semejante magnitud (diferencia del 5,8%) durante horas de la madrugada (0000 a 0500 HL). La presencia de picos máximos del ciclo diario se observan para las estaciones BM2 durante la tarde en DEF, MAM y SON (máxima 0.44 mm hora⁻¹ en DEF). En JJA debido a la baja variabilidad presente en este periodo estacional, se observa un comportamiento del ciclo diario semejante durante todo el día, la hora máxima ocurre en la madrugada (0000 a 0500 HL) y se observa una diferencia con el pico presente durante horas de la tarde del 3,1%. El ciclo diario se comporta de manera similar para las dos regiones, sin embargo la región perteneciente al régimen BM2 presenta mayor cantidad de precipitación durante todos los periodos estacionales. Lo que se espera debido a la agrupación realizada de las estaciones según su régimen.

En la Tabla 5 se presentan la hora de los picos máximos de precipitación para las estacionalidades.



Tabla 5: Hora de precipitación máxima.

	Estación	Hora pico	Máximo
BM1	DEF	17:00	0.397
	MAM	17:00	0.308
	JJA	15:00	0.094
	SON	15:00	0.296
BM2	DEF	17:00	0.442
	MAM	17:00	0.300
	JJA	04:00	0.152
	SON	16:00	0.366

En la Tabla 5 y la Figura 7 se observa que las horas picos se presentan mayormente durante la tarde, aunque para JJA del régimen BM2 se presente a horas de la madrugada. Así mismo se observa la presencia de un pico durante las 0200 HL de MAM de la región BM1. El ciclo diario de la precipitación presenta una variabilidad muy baja en JJA para las regiones BM1 y BM2. Mientras que en DEF es donde el ciclo diario más variabilidad alcanza en los regímenes en estudio.

La variación estacional del ciclo diario por régimen, para los regímenes BM1 y BM2, concuerdan con los resultados obtenidos por (Camposano et al., paper in progress). Sin embargo dicho análisis para el régimen UM no se ha podido corroborar por falta de datos.

4.3 Definición de hipótesis de los procesos de precipitación

Para la determinación de las diferentes hipótesis de los procesos de precipitación se siguió el procedimiento explicado en la sección 3.3. Los resultados de los picos correspondientes a los tres fenómenos descritos se observan en la Tabla 6 y la Figura 8.

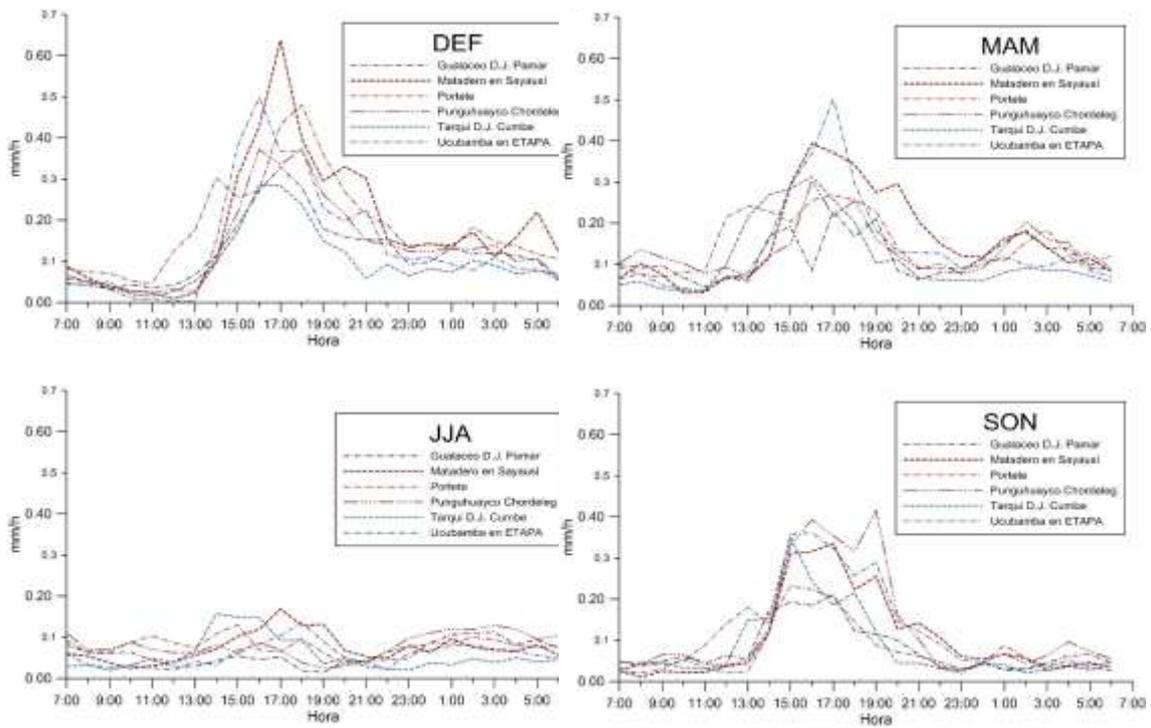


Tabla 6: Estaciones clasificadas según su régimen y la presencia de los picos en el ciclo diario.

		Picos - Hora Local											
		DEF			MAM			JJA			SON		
		1600 a 1800	1900 a 2300	0000 a 0500	1600 a 1800	1900 a 2300	0000 a 0500	1600 a 1800	1900 a 2300	0000 a 0500	1600 a 1800	1900 a 2300	0000 a 0500
BM1	Gualaceo D.J. Pamar	1700	-	-	1700	1900	0200	-	-	0300	1700	-	-
	Matadero en Sayausí	1700	2000	0500	1700	2000	0200	1700	-	-	1700	1900	-
	Portete	1800	-	0200	1700	-	0300	-	-	-	-	-	0100
	Punguhuayco y Chordeleg	1600 y 1800	-	-	1600 y 1800	-	0200	-	-	0300	1600	1900	0400
	Tarqui D.J. Cumbe	1600	-	-	1600	-	-	-	-	-	1800	-	-
	Ucubamba en ETAPA	1600 y 1800	2100	-	1700	-	-	1800	-	-	1600	1900	-
BM2	Chanlúd Empresa Eléctrica	1600	2100	0300	1700	-	-	-	-	0400	1700	2000	-
	El Labrado	1700	2100	-	1700	2100	-	-	-	0500	1600	-	0100
	La Esmeralda	1600	-	0000	1700	-	0500	-	-	0400	1600	1900	-
	Machángara D.J. Chulco (Saucay)	1700	2000	0300	1600 y 1800	2300	-	-	-	0500	1600	2000	-
	Soldados ETAPA	1700	2200	-	1800	-	-	1800	-	-	1700	-	-
	Yanuncay Pucán	1700	-	-	1600	2000	0200	1700	-	-	1600	1900	0100



BM1



BM2

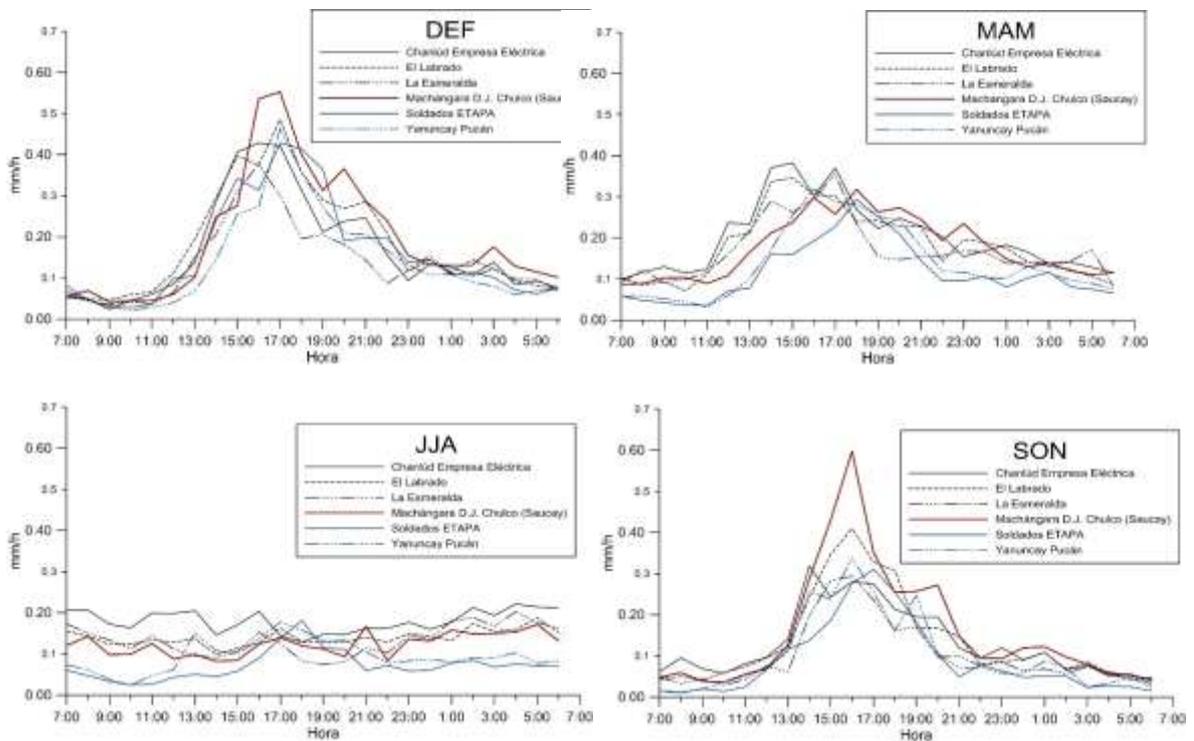


Figura 8: Graficas del ciclo diario para el régimen BM1 y BM2



En la Figura 8 se observa el comportamiento del ciclo diario en cada periodo estacional para las estaciones BM1 y BM2. La Tabla 7 muestra los picos observados a diferentes horas del día. La presencia de precipitación durante la tarde, primeras horas de la noche y la madrugada se pueden deber a diversos procesos de precipitación en la cuenca. Los cuales fueron presentados en la sección 3.3.

Para el régimen BM1, la precipitación observada durante horas de la tarde en DEF se puede deber a la influencia de la lluvia convectiva presente por la gran radiación solar durante las mañanas, que provoca una entrada de energía en la atmosfera que atrae mayor cobertura de nubes con lluvia y niebla. En MAM se observa lluvia durante la madrugada, a excepción de las estaciones Tarqui D.J. Cumbe y Ucubamba en ETAPA, lo cual puede deberse a los Sistemas de Mesoescala Convectivos (MCS), que provocan la presencia de nubes nocturnas formado a partir del frente frío local que resulta de una desestabilización atmosférica. Durante SON la presencia de lluvia durante las primeras horas de la tarde se observa en las estaciones de Matadero en Sayausí, Punguhayco Chordeleg y Ucubamba en ETAPA, puede atribuirse a la generación de nubes nocturnas por la presencia de flujos catabólicos.

Las estaciones pertenecientes al régimen BM2, en DEF presentan picos máximos durante horas de la tarde, producido probablemente por la lluvia convectiva. La presencia de picos durante las primeras horas de la noche en las estaciones de Machángara D.J. Chulco (Saucay) (en DEF y SON) y durante SON en Yanuncay Pucán, puede ser generado por la influencia de flujos catabólicos. Las estaciones del régimen BM2 no presentan precipitación durante la madrugada.

Los estudios previos realizados en el norte de Sudamérica muestran resultados similares sobre los procesos de precipitación, al tener presencia de precipitación durante la tarde, presentes en el flanco occidental de los Andes centrales de Colombia y en las zonas costeras y el estrecho istmo de América Central, a pesar de que los sistemas más grandes se desarrollan sobre la Amazonia. Y en la madrugada la lluvia nocturna se observa en la costa y tiende a propagarse fuera de la tierra durante de la madrugada e inicios de la mañana, la convección nocturna también se produce en los valles de Colombia y sobre el Lago de Maracaibo.

5. Conclusiones

5.1 Conclusiones generales del estudio

Este estudio tuvo por objeto determinar la variabilidad del ciclo diario de la precipitación en la cuenca del Paute considerando distintas escalas temporales (mensuales y estacionales) para la validación de Modelos Regionales de Clima. Esto se realizó calculando el promedio horario multianual estacional (DEF, MAM, JJA, SON) y mensual. Para el estudio se contó con datos instantáneos de lluvia de 12 estaciones de ETAPA ubicadas en la zona media y alta de la cuenca del paute. Luego de normalizar los datos, se aplicó el método de análisis clúster k-means (k=4) con el cual se determinó cuatro agrupaciones para cada periodo



estacional y mes a mes. Además se analizó la variabilidad de la cuenca analizando el comportamiento del ciclo diario según el régimen al que pertenecen las estaciones en estudio (BM1 y BM2).

Al estudiar el ciclo diario a escala mensual se encontró una alta variabilidad entre estaciones. Por ello no se pudo establecer un patrón de comportamiento. Esta alta variabilidad puede deberse a que la escala mensual es muy fina para este estudio; es decir, el comportamiento mensual varía por la influencia de los procesos sinópticos o de mesoescala que no se producen siempre el mismo mes de cada año. Es por esto que para estudiar la variabilidad del ciclo diario a escala mensual se requiere el uso de métodos más complejos que no se incluyen en el objetivo de esta tesis.

El análisis estacional nos permite observar la alta variabilidad de la cuenca. El ciclo diario se comporta de manera diferente en todas las estaciones según el periodo estacional analizado, su distribución espacial no muestra patrones de comportamiento a lo largo del año. Por consiguiente se concluye que el régimen, la ubicación y la elevación son factores que no influyen en el comportamiento del ciclo diario a escala estacional. Aunque estos resultados no son los esperados, la dinámica del ciclo diario puede cambiar por periodos estacionales y es independiente de su régimen anual.

El comportamiento estacional del ciclo diario, analizado separadamente para las estaciones pertenecientes a los regímenes BM1 y BM2 presenta una alta variabilidad durante DEF. Mientras que para JJA la variabilidad del ciclo diario es muy baja para las dos regiones. La hora de mayor influencia de precipitación se presenta durante la tarde en las estaciones con régimen BM1 en DEF, MAM y JJA, aunque en este periodo (JJA) se observe un comportamiento semejante a lo largo del día. En SON el pico máximo se presenta una hora antes del rango determinado como tarde, a las 1500 HL. Se observa un mayor volumen de precipitación para las estaciones BM2, sobre todo durante JJA, en donde el máximo de precipitación se observa en la madrugada. Para los demás periodos estacionales (DEF, MAM y SON) la influencia de la lluvia convectiva en la zona es notable, debido a la presencia de picos máximos de precipitación durante horas de la tarde (1600 a 1800 HL).

Los diferentes posibles procesos de precipitación presentes en la cuenca del Paute fueron determinados a partir de las hipótesis observadas en la revisión bibliográfica. La lluvia convectiva a horas de la tarde (1600 a 1800 HL) se observa en las estaciones con regímenes BM1 y BM2, durante DEF, MAM y SON. Para JJA se observa un comportamiento más homogéneo para las dos regiones. El flujo catabático puede generar la presencia de lluvia durante las primeras horas de la noche, que se observa en la región BM1 durante SON. Los picos observados durante la madrugada, especialmente en la región BM1 en MAM, pueden ser debidos a la presencia de los Sistemas de Mesoescala Convectivos.



5.2 Recomendaciones de estudios futuros

La tesis abordó algunos aspectos de la variabilidad del ciclo diario de la precipitación en la cuenca del Paute. Sin embargo, aún queda mucho por investigar sobre la precipitación a esta escala temporal (horaria).

El análisis del ciclo diario de la precipitación a partir del promedio horario multianual estacional presenta complicaciones al momento de analizar los patrones de comportamiento espacial, debido a que el promedio se ve afectado por extremos, por lo que se recomienda para estudios futuros realizar un análisis a partir de los eventos presentados a escala horaria.

Este estudio se realizó a partir de estaciones ubicadas en la región perteneciente al régimen bimodal, por lo que presenta un comportamiento semejante del ciclo diario con una variación en la magnitud de precipitación diaria según sea BM1 o BM2. Se recomienda realizar un análisis con estaciones que pertenezcan a regímenes UM para determinar el comportamiento del ciclo diario de esta zona.

Los clústeres obtenidos a escala estacional, muestran un comportamiento semejante durante algunos trimestres. Por ejemplo el clúster I (Chanlúd Empresa Eléctrica, El Labrado y Soldados ETAPA) en DEF, es semejante al clúster III (Chanlúd Empresa Eléctrica, El Labrado y Machángara D.J. Chulco (Saucay)) presente en JJA. Mientras que en otros periodos se comportan diferente. Por lo que se cree que es necesario identificar la influencia de la entrada de humedad del Pacífico y del Atlántico/Amazonas hacia la zona de estudio. Además la ampliación de la zona de estudio podría proporcionar información sobre el comportamiento en los límites de la cuenca y su influencia en la precipitación a escala horaria en toda la cuenca.

Las hipótesis para los procesos de precipitación son basadas en estudios realizados por otros autores (Trachte, Rollenbeck, & Bendix (2010), (Buytaert, Céleri, Willems, Bièvre, & Wyseure (2006), Fries et al. (2014), Campozano et al., (paper in progress)), por lo que es necesario analizar otras variables (temperatura del aire, radiación solar, presión del aire, humedad relativa, entre otras) para la determinación de la influencia de los procesos de precipitación mencionados o si se puede deber a otros fenómenos presentes en la cuenca del Paute, como la influencia de la lluvia amazónica.



REFERENCIAS

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (Primera Ed.). México D.F.: Editoria Limusa S.A.
- Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B. De, Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53–72. doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.002
- Buytaert, W., Célleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & 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.
- Campozano, L., Célleri, R., Trachte, K., Bendix, J., & Samaniego, E. (n.d.). Rainfall and clouds dynamics in the Andes: Southern Ecuador case study.
- Célleri, R., Willems, P., Boutaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316–3327.
- Donoso Correa, M. E. (Universidad de C. (2002). “*La Cuenca del Río Paute: Diagnostico y Propuesta de Manejo Integral. Políticas de Desarrollo Agropecuario.*”
- Fries, A., Rollenbeck, R., Bayer, F., Gonzalez, V., Oñate-Valivieso, F., Peters, T., & Bendix, J. (2014). Catchment precipitation processes in the San Francisco valley in southern Ecuador: combined approach using high-resolution radar images and in situ observations. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 126(1-2), 13–29. doi:10.1007/s00703-014-0335-3
- Gálvez, H., & Regalado, J. (2007). Características de las Precipitaciones, la Temperatura del Aire y los Vientos en la Costa Ecuatoriana. *Acta Oceanográfica Del Pacífico*, 14.
- Hedberg, O. (1964). Features of Afroalpine plant ecology. *Acta Phytogeographica Suecica*, 49, 1–144.
- Laraque, a., Ronchail, J., Cochonneau, G., Pombosa, R., & Guyot, J. L. (2007). Heterogeneous Distribution of Rainfall and Discharge Regimes in the Ecuadorian Amazon Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 8(6), 1364–1381. doi:10.1175/2007JHM784.1
- Luteyn, J. L. (1999). Páramos: A Checklist of Plant Diversity, Geographical Distribution, and Botanical Literature. *The New York Botanical Garden Press*. New York.



- Mapes, B. E., Warner, T. T., Xu, M., & Negri, A. J. (2003). Diurnal Patterns of Rainfall in Northwestern South America. Part I: Observations and Context. *Monthly Weather Review*, 131(5), 799–812.
- Mapes, B., Warner, T., & Xu, M. (2003). Diurnal Patterns of Rainfall in Northwestern South America. Part III: Diurnal Gravity Waves and Nocturnal Convection Offshore. *Monthly Weather Review*, 131(5), 830–844.
- McCuen, R. H. (Department of C. E. of M. (1998). *Hydrologic Analysis and Design* (Second Edi.). New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Mora, D. E., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., & Willems, P. (2014). Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 631–648. doi:10.5194/hess-18-631-2014
- Mora, D. E., & Willems, P. (2012). Decadal oscillations in rainfall and air temperature in the Paute River Basin — Southern Andes of Ecuador, 267–282. doi:10.1007/s00704-011-0527-4
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., ... Alvarez, J. F. (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228–240.
- Trachte, K., Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2010). Nocturnal convective cloud formation under clear - sky conditions at the eastern Andes of south Ecuador. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(24), 1–15.
- UMACPA. (1995). *Proyecto de Conservación y Manejo de la Cuenca del Río Paute*. Cuenca.

ANEXOS

Anexo 1: Clústeres de los meses del año (excepto junio) y su mapa de ubicación en la cuenca de estudio.

Como se explicó en la sección 4.2.1, la obtención de los cuatro clústeres del ciclo diario de la precipitación a partir del método de análisis clúster k-means, son presentados en su análisis mes a mes, junto con el mapa de ubicación dentro de la cuenca.

ENERO

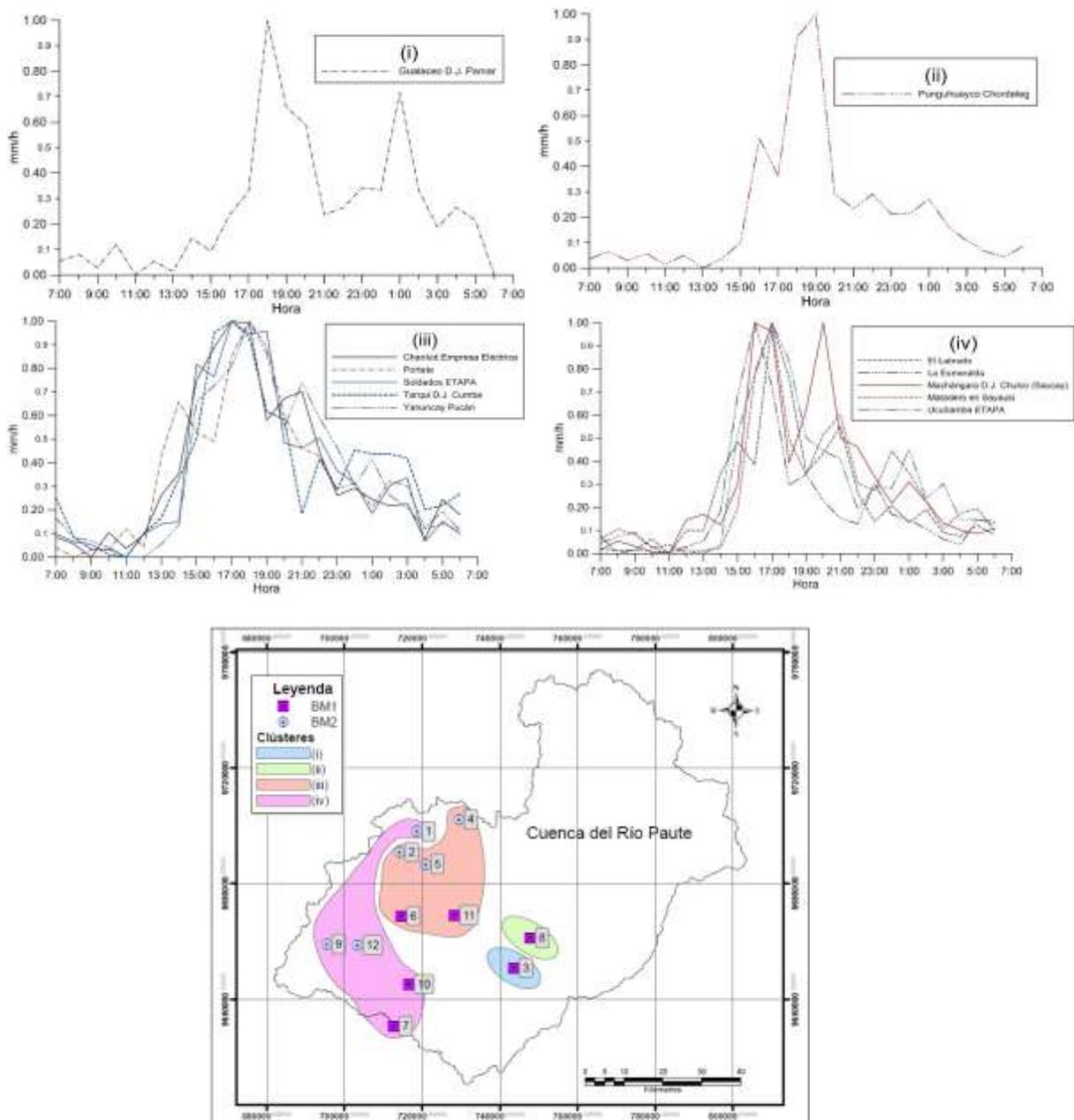


Figura 9: Clústeres del mes de enero para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

FEBRERO

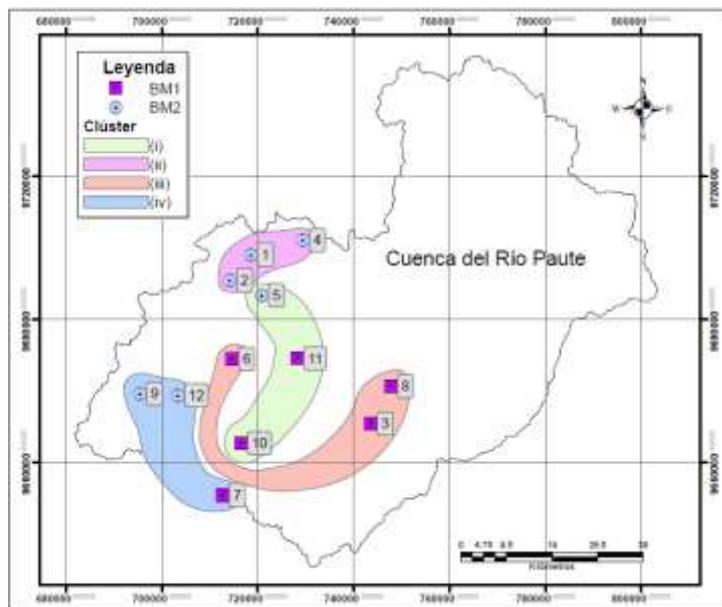
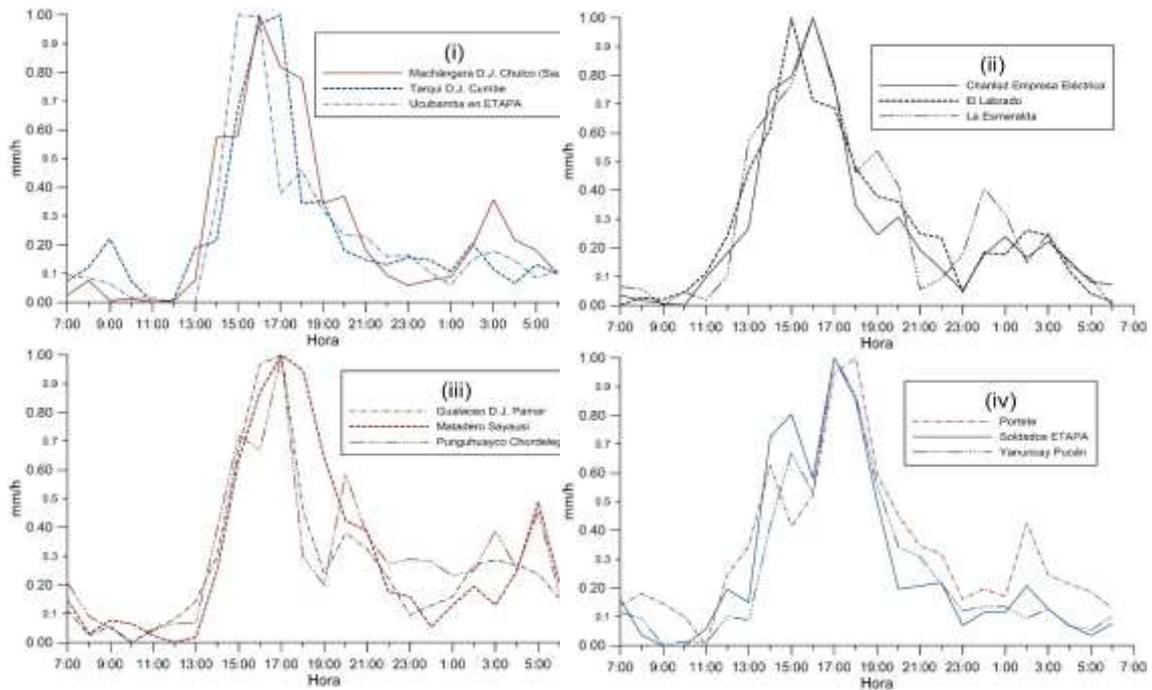


Figura 10: Clústeres del mes de febrero para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

MARZO

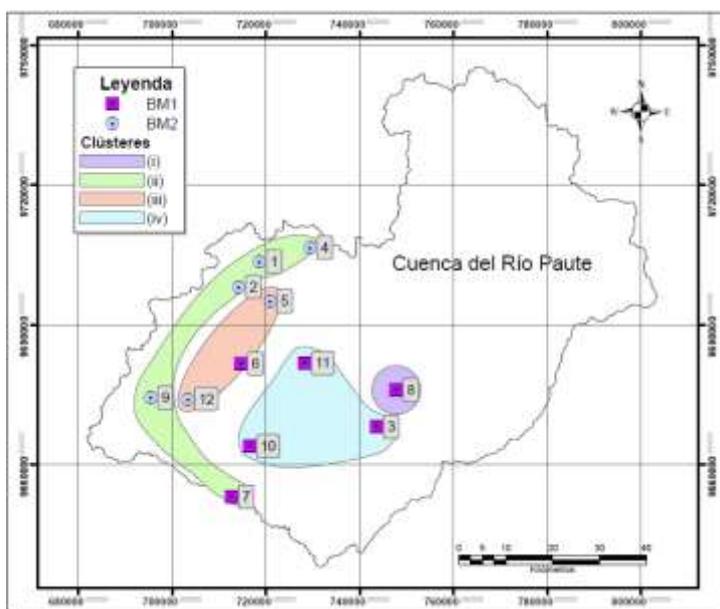
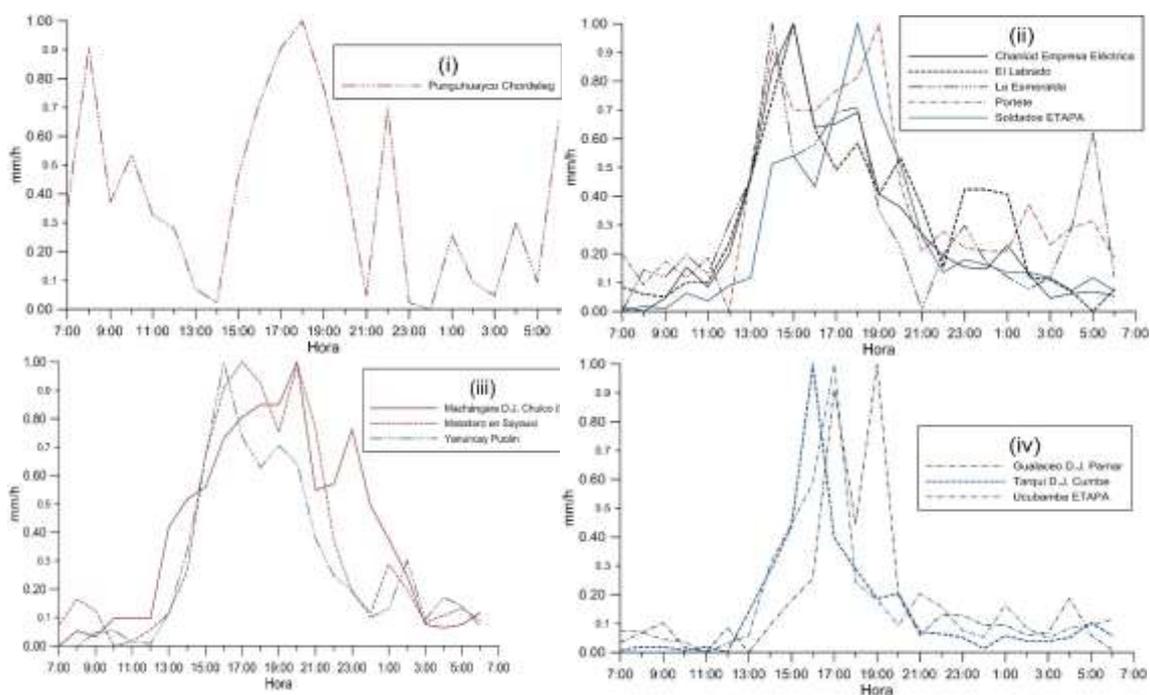


Figura 11: Clústeres del mes de marzo para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

ABRIL

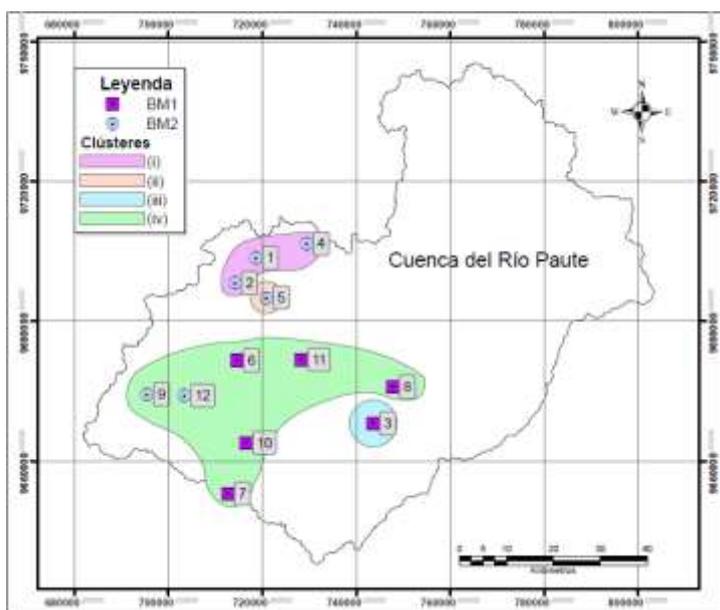
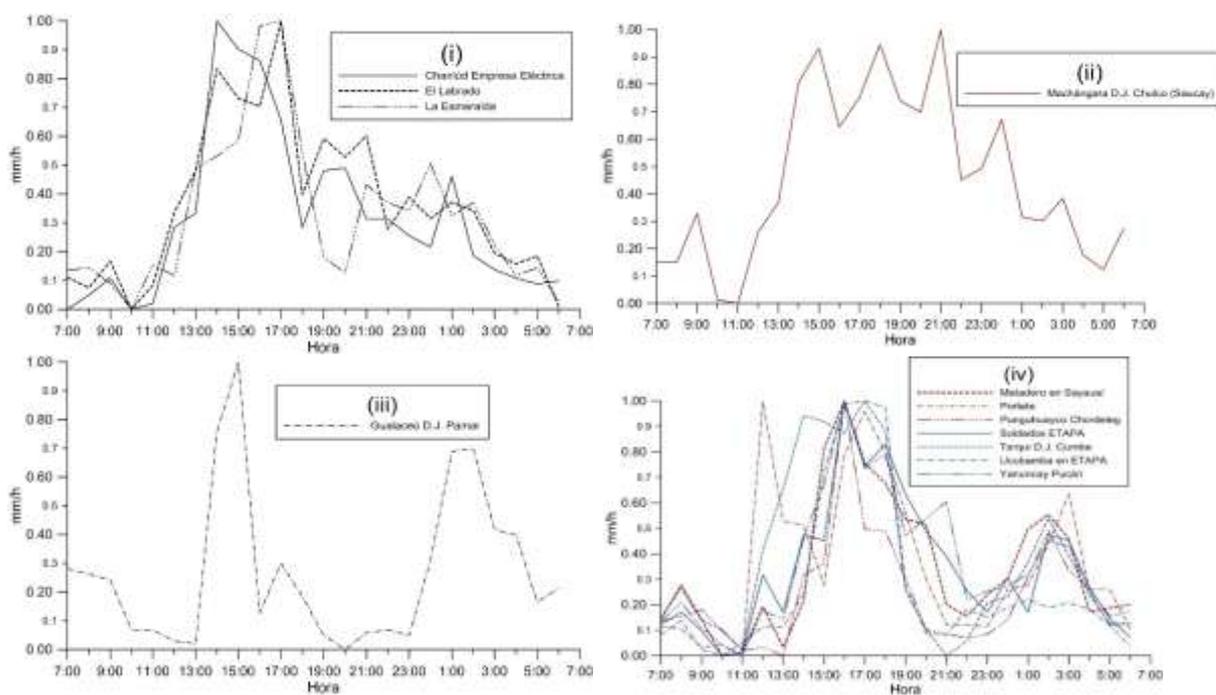


Figura 12: Clústeres del mes de abril para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

MAYO

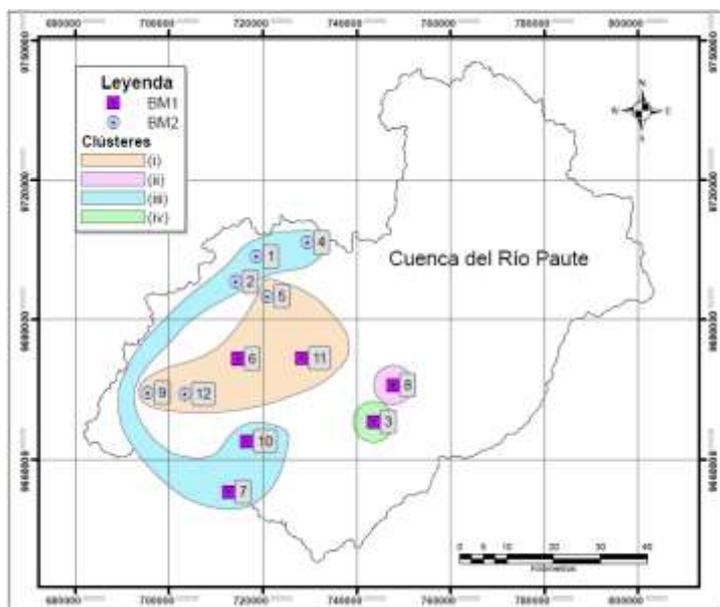
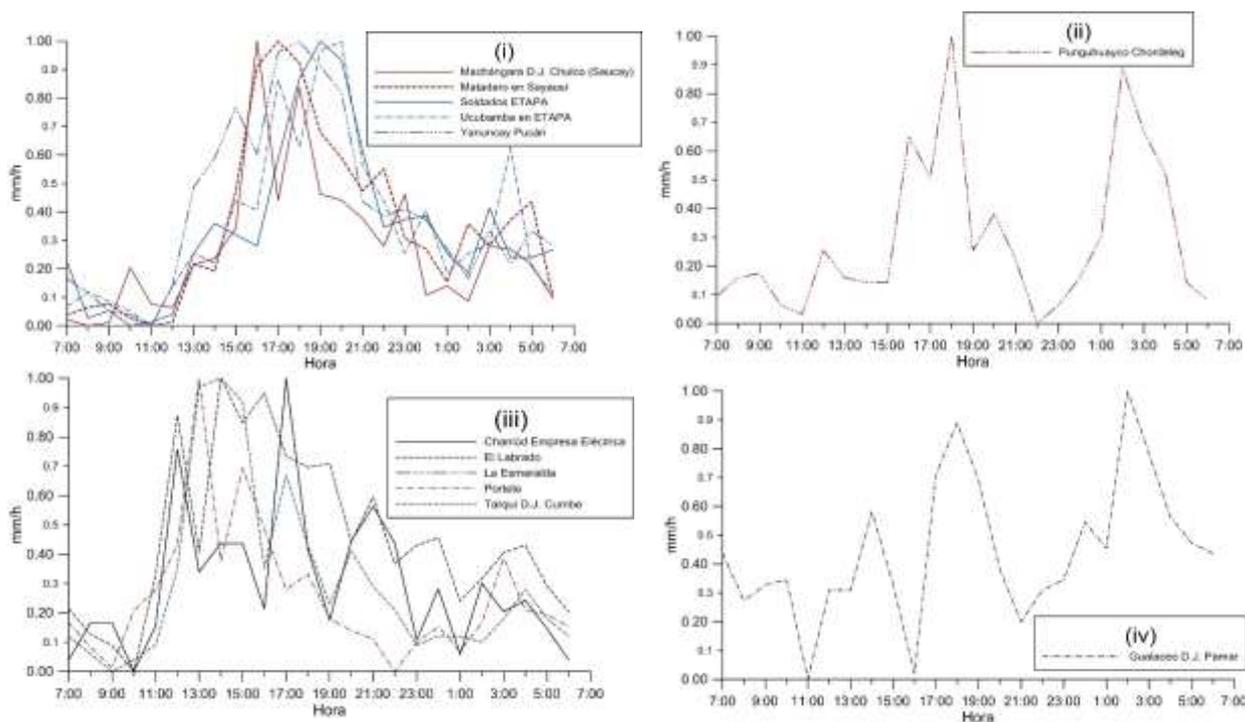


Figura 13: Clústeres del mes de mayo para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

JULIO

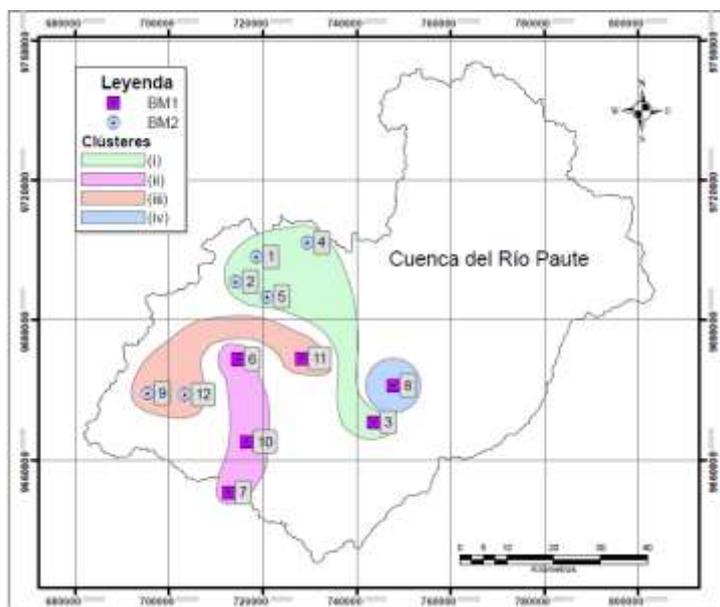
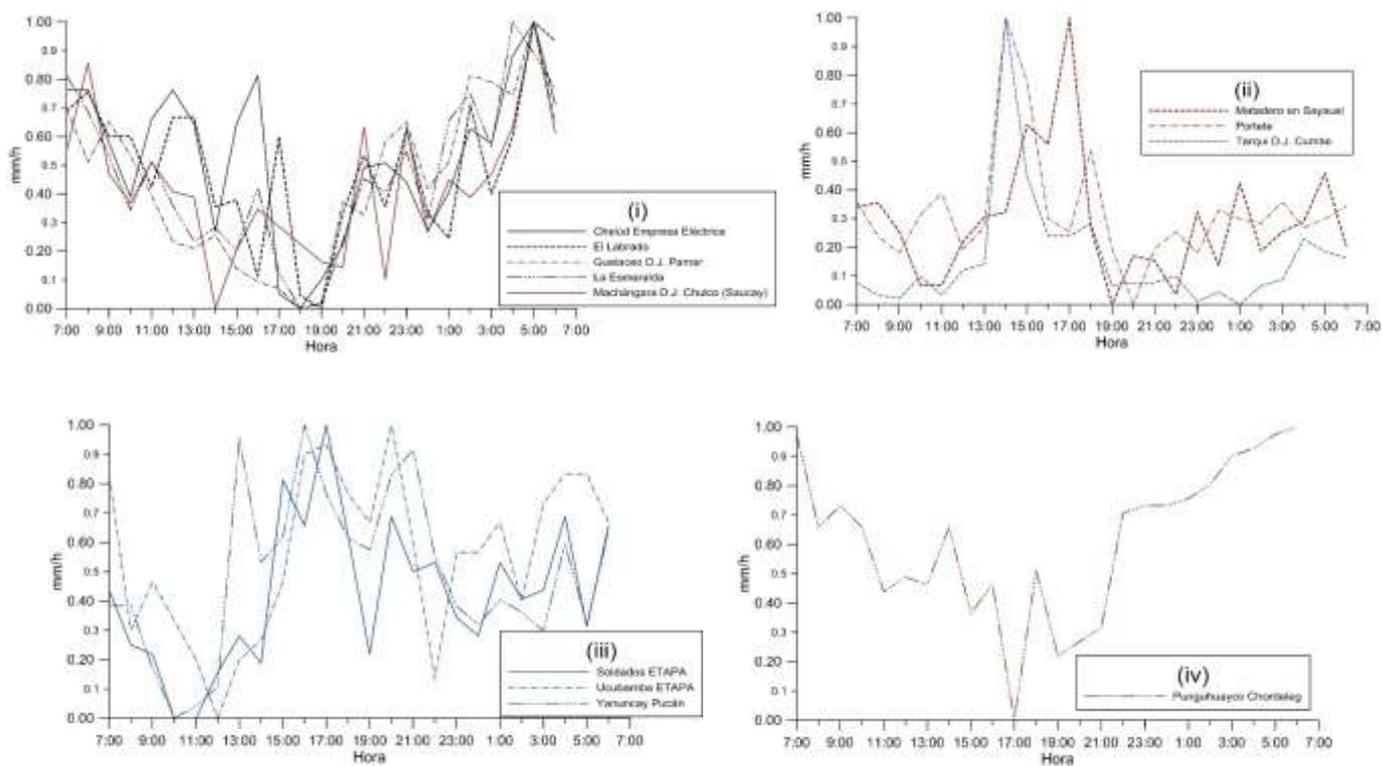


Figura 14: Clústeres del mes de julio para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

AGOSTO

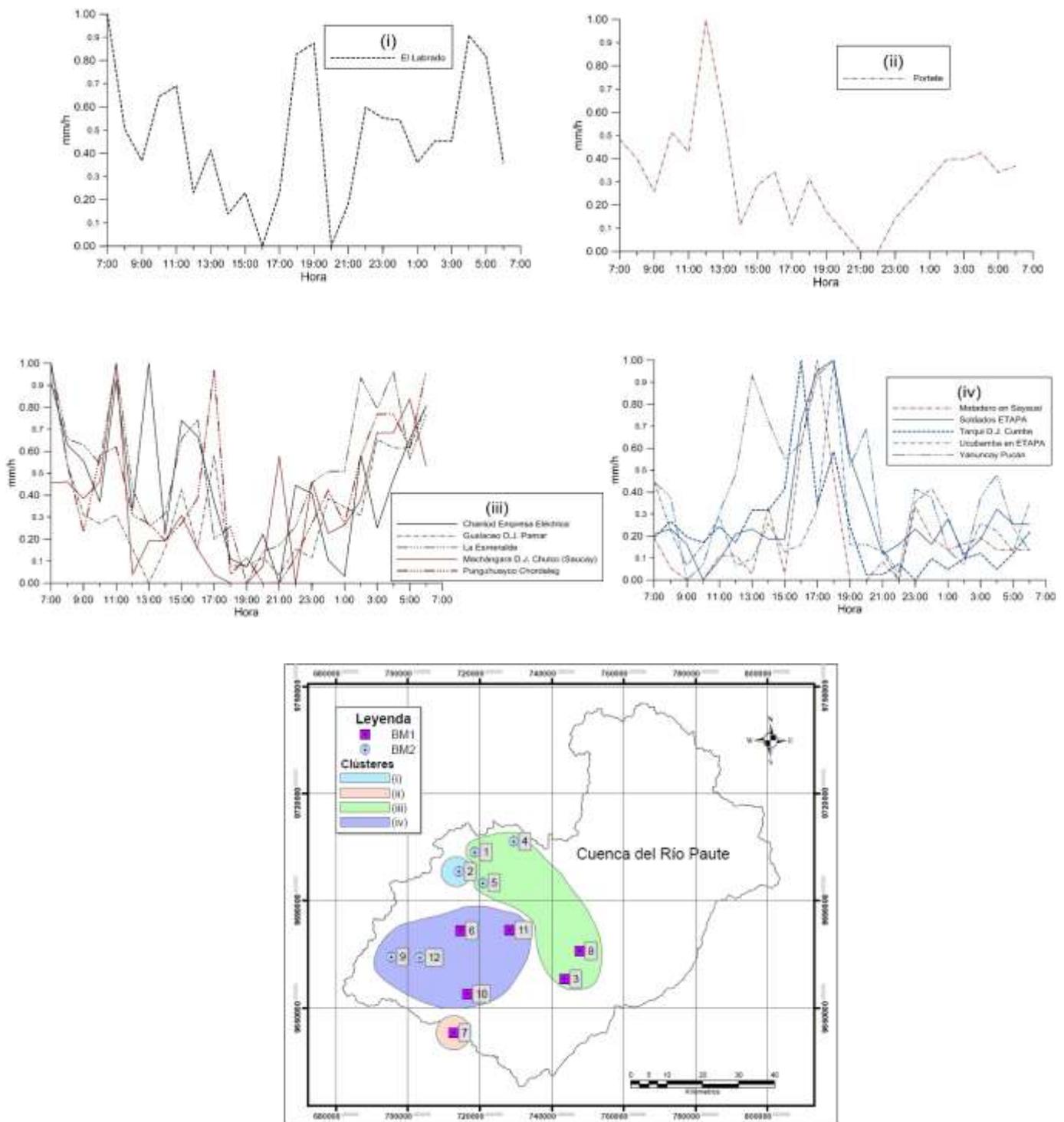


Figura 15: Clústeres del mes de agosto para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

SEPTIEMBRE

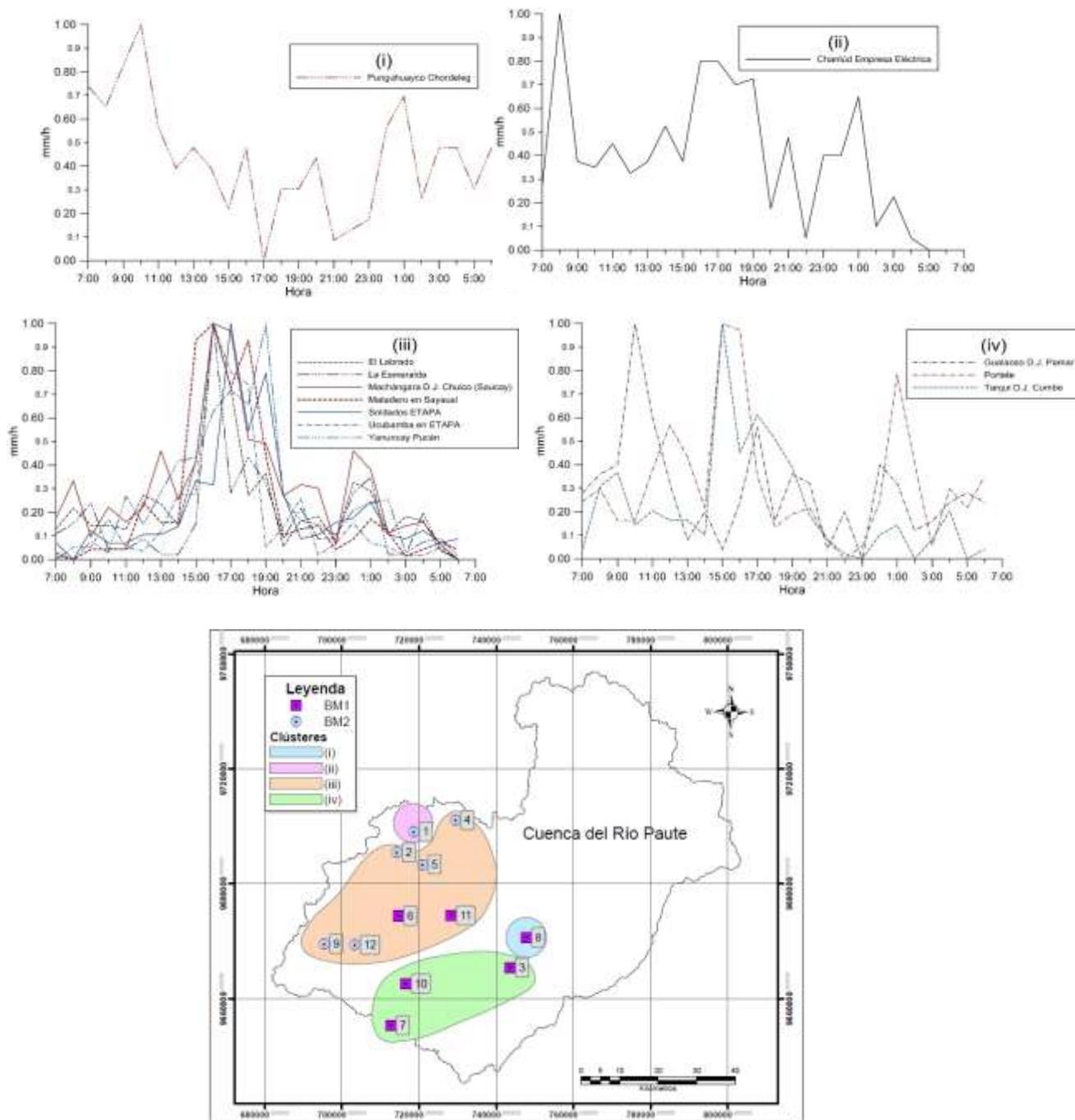


Figura 16: Clústeres del mes de septiembre para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

OCTUBRE

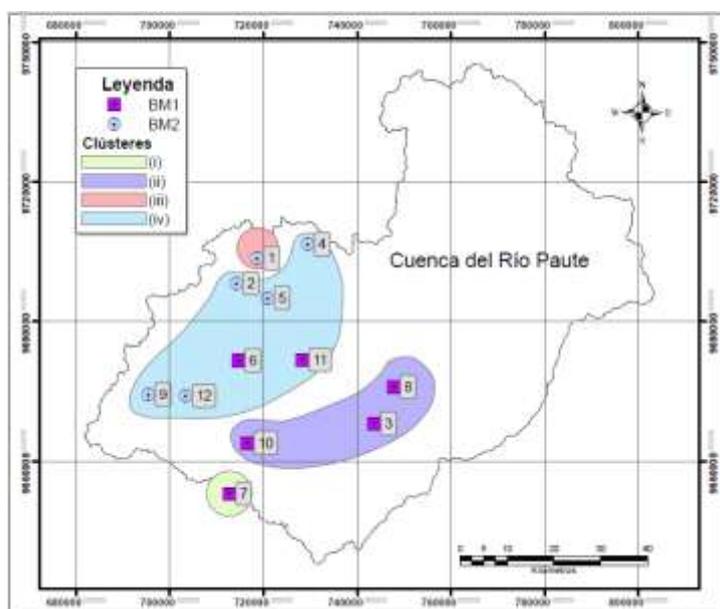
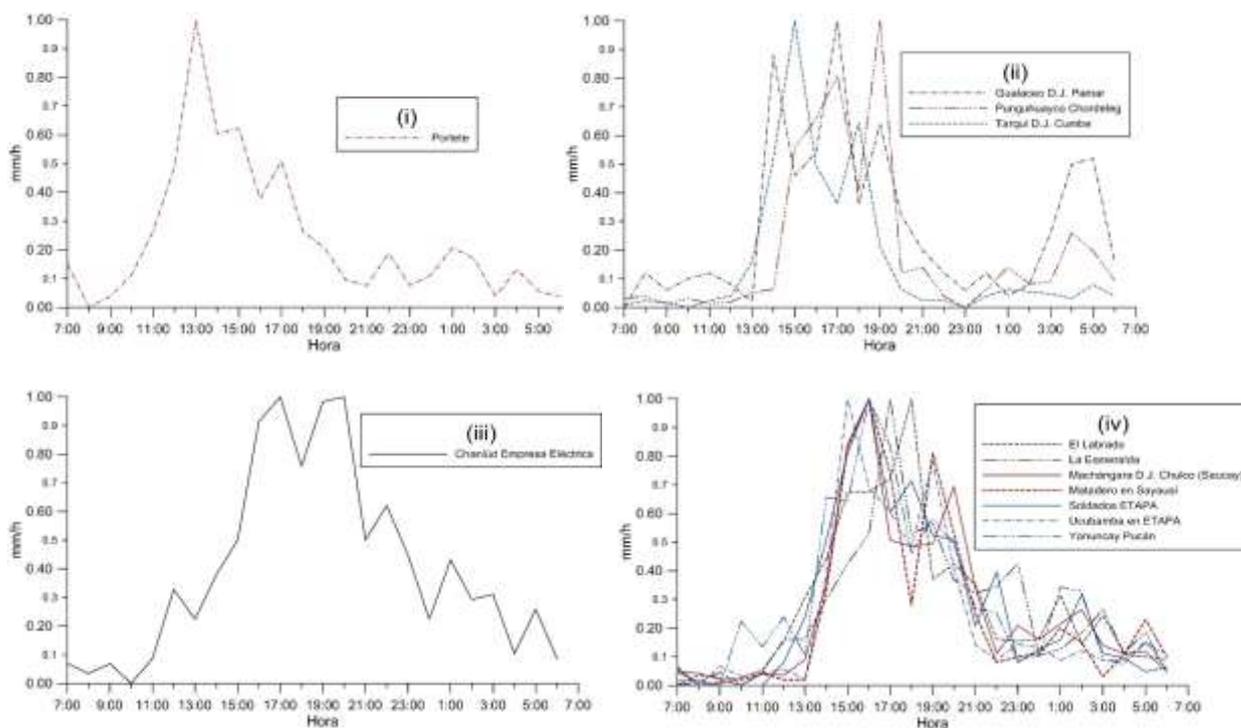


Figura 17: Clústeres del mes de octubre para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

NOVIEMBRE

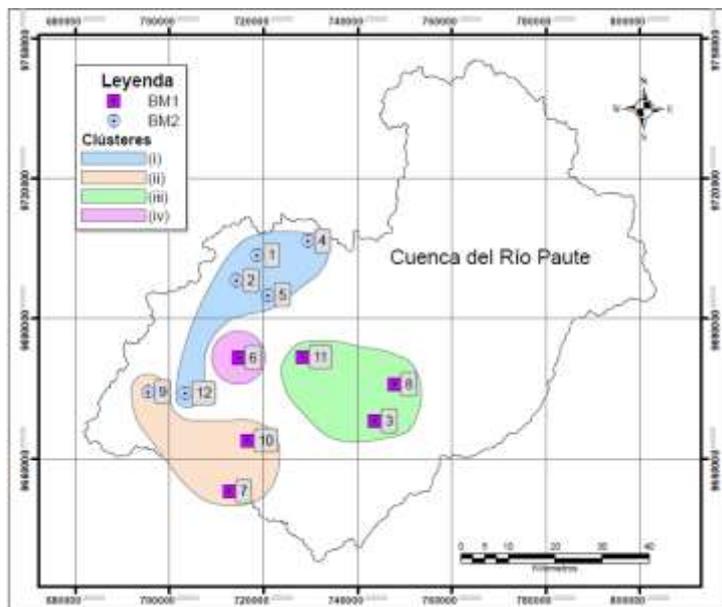
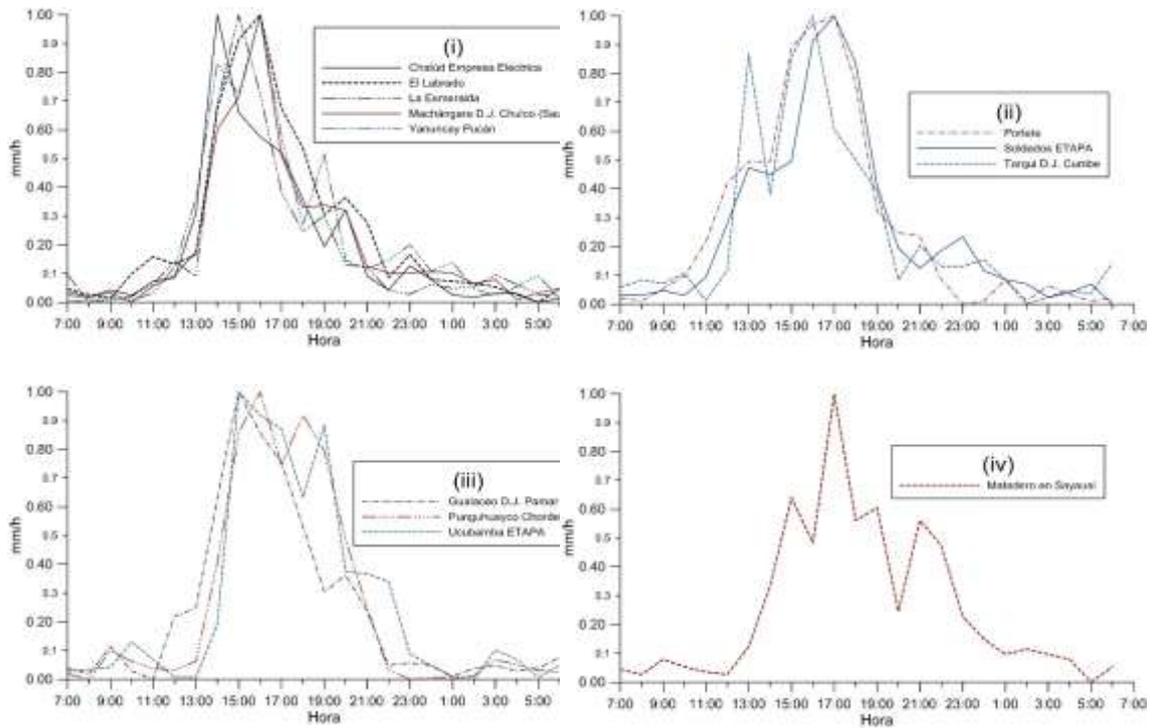


Figura 18: Clústeres del mes de noviembre para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

DICIEMBRE

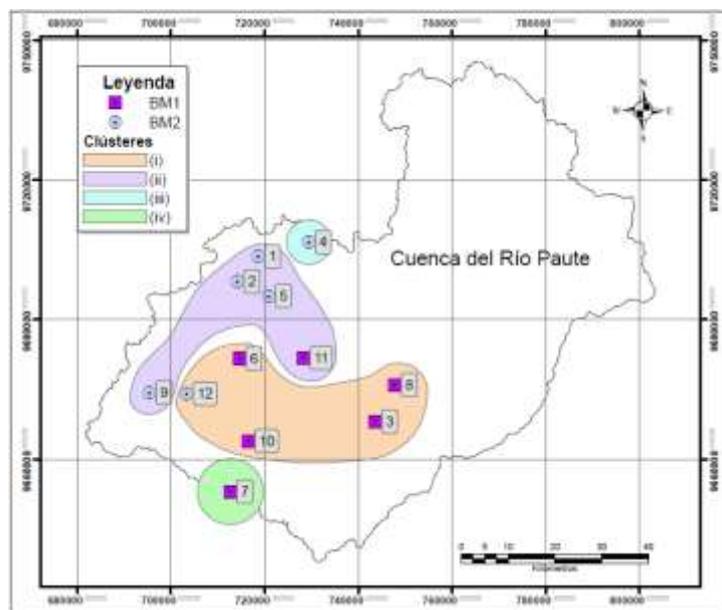
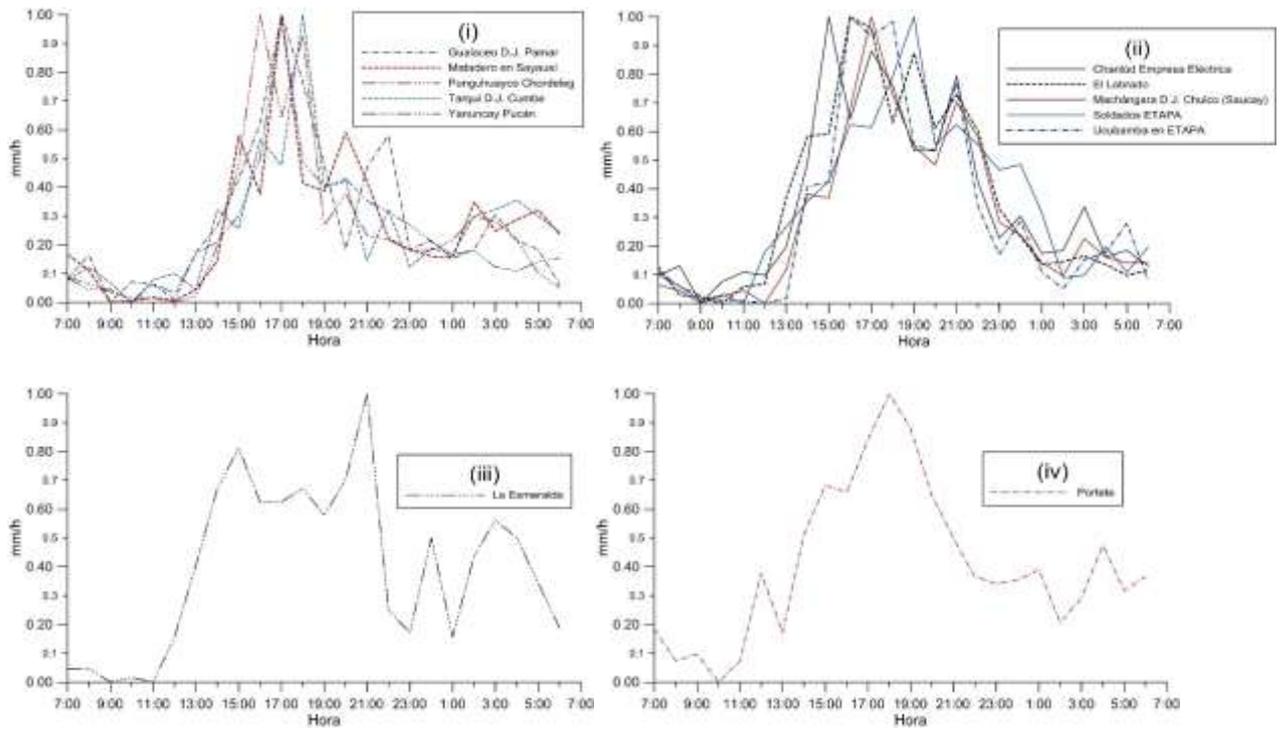


Figura 19: Clústeres del mes de diciembre para las estaciones en estudio con datos normalizados y mapa de ubicación.

Anexo 2: Clústeres pertenecientes a los periodos estacionales de MAM, JJA y SON con datos regulares de las estaciones en estudio.

En la sección 4.2.1 se presentaron los clústeres pertenecientes al periodo estacional de DEF, a continuación se muestran los clústeres obtenidos para los demás periodos estacionales.

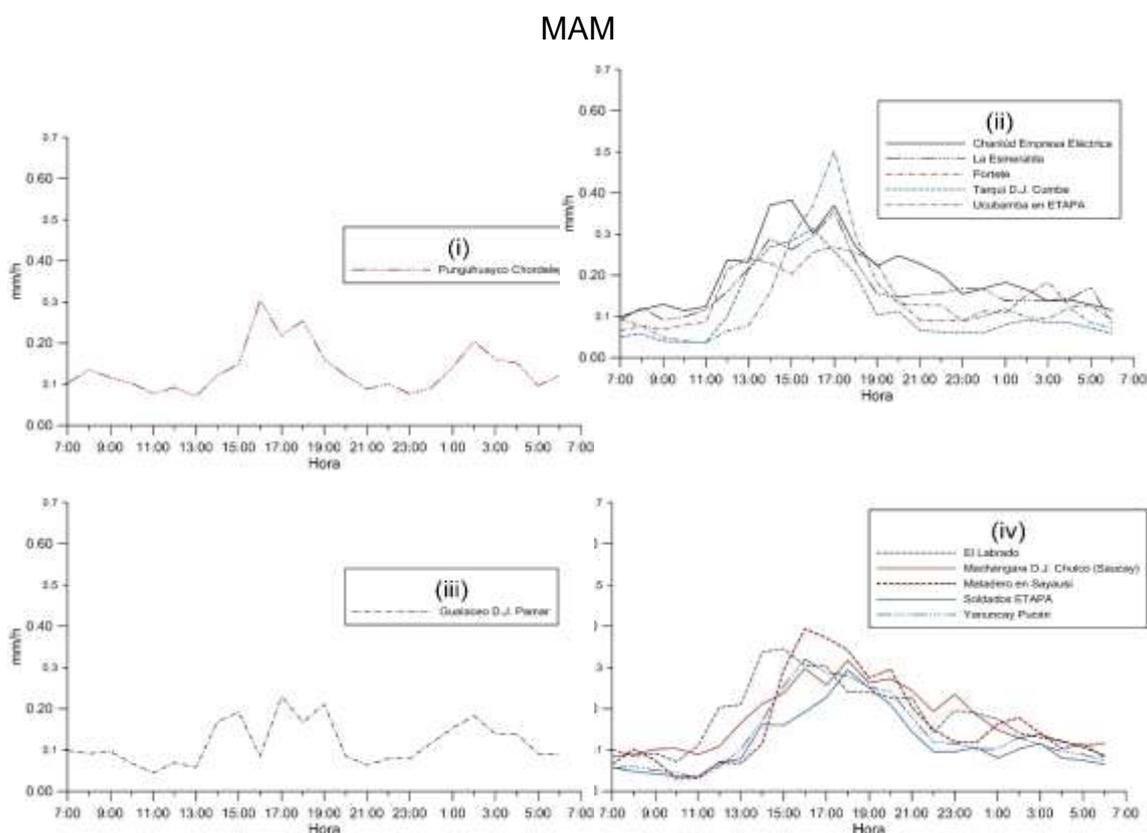


Figura 20: Clústeres pertenecientes a MAM con datos regulares de las estaciones en estudio.

JJA

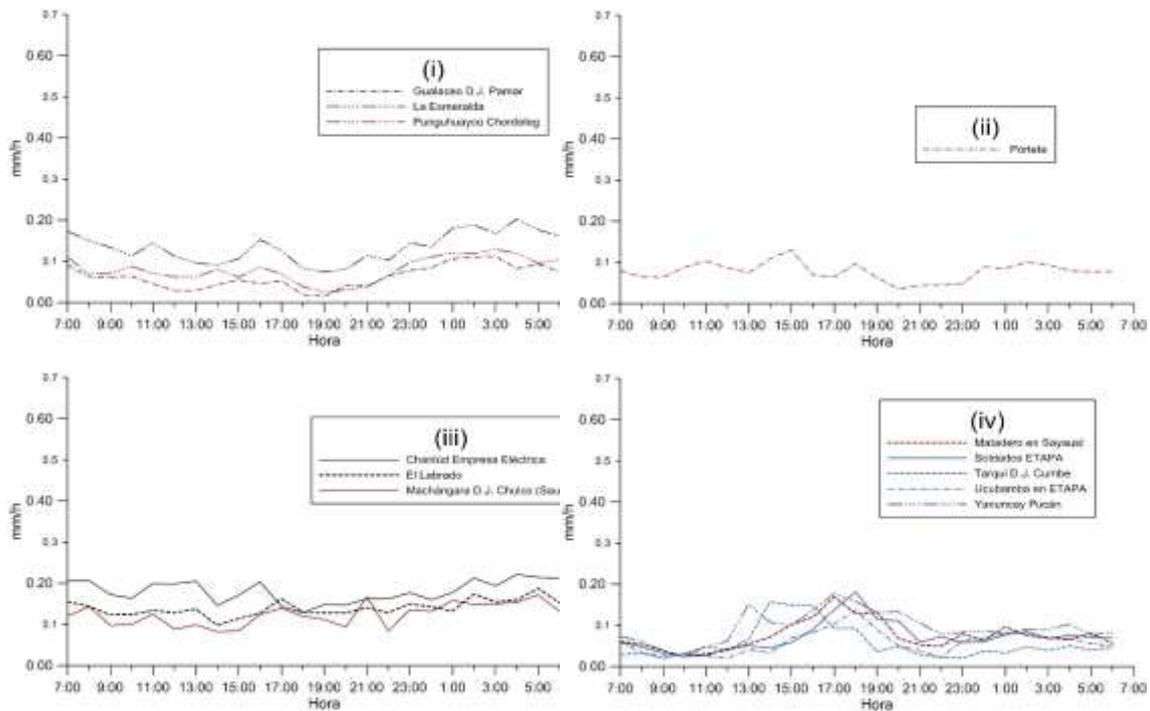


Figura 21: Clústeres pertenecientes a JJA con datos regulares de las estaciones en estudio.

SON

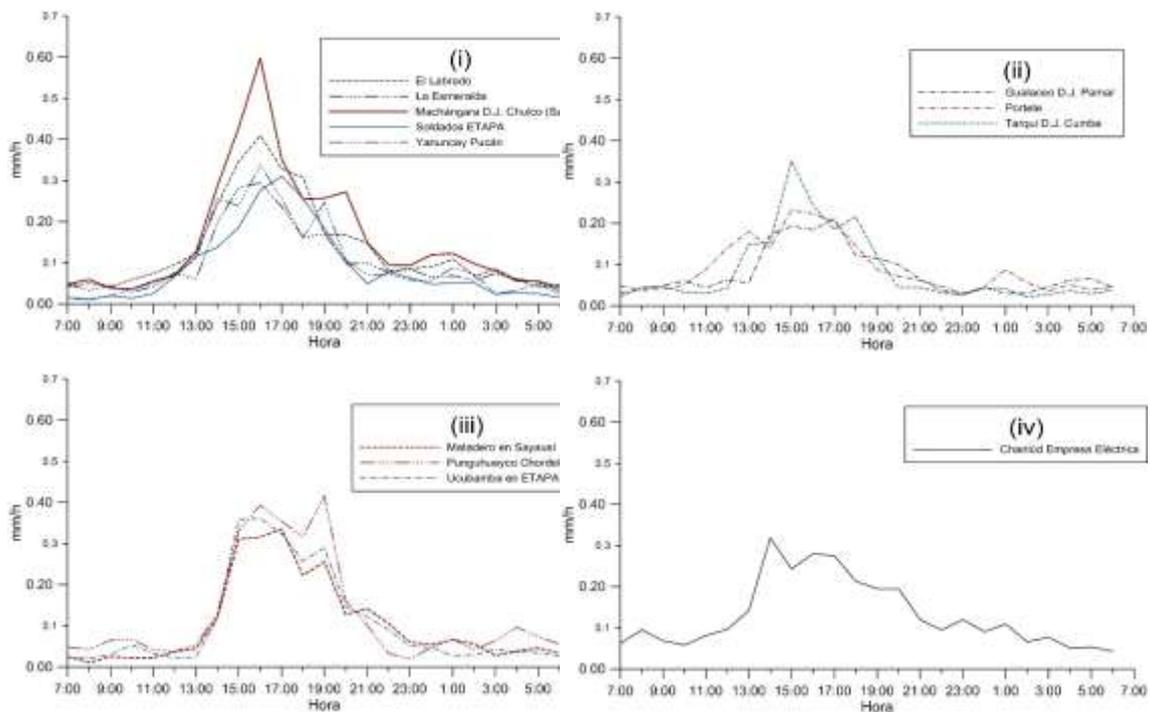


Figura 22: Clústeres pertenecientes a SON con datos regulares de las estaciones en estudio.