



UNIVERSIDAD DE CUENCA

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO TEMPORAL DE LA
PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE CUENCA DURANTE EL PERÍODO
FEBRERO – JULIO DE 2014.**

Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniero Ambiental

AUTOR:

ADRIÁN ESTEBAN SUCOZHAÑAY CALLE

DIRECTOR:

ING. ROLANDO CÉLLERI ALVEAR, PhD

CUENCA – ECUADOR

FEBRERO 2015



RESUMEN

Debido a que la precipitación desempeña un papel fundamental en el funcionamiento de modelos hidrológicos urbanos, se vuelve indispensable el uso de información lo más cercana a la realidad, por lo que identificar la variabilidad espacio temporal de la precipitación es un paso importante para acercarnos a mejores resultados. El presente estudio analizó la variabilidad espacio temporal de la precipitación a partir de 8 sensores pluviométricos distribuidos en la ciudad de Cuenca a 2550 m s.n.m. durante el periodo lluvioso Febrero–Julio 2014. La distancia promedio entre sensores fue 5 km con una distancia máxima de 11.9 km. El estudio reveló que los sensores presentan una variación del 35.61% en el volumen acumulado de lluvia, encontrando dos zonas con características bien marcadas. La primera, se encuentra ubicada en el sensor CM, el cual mantiene las menores correlaciones en todas las escalas temporales analizadas y a su vez posee la menor cantidad de lluvia encontrada (289 mm). La segunda, se encuentra ubicada en el sensor QB, que presenta el mayor volumen de lluvia (442 mm) y mantiene las mejores correlaciones con las estaciones más cercanas, inclusive para la escala temporal de 5 min ($r > 0.4$), por lo que la precipitación ocurre de mayor manera, incrementando el riesgo a inundaciones. Los eventos extremos poseen mayormente una dirección preferencial de Este a Oeste con características altamente convectivas y con una variación en las intensidades máximas en 5, 30 y 60 minutos de 63, 23 y 18 mm/h respectivamente.

Palabras clave: Variabilidad espacio temporal; estructura espacial; correlación de Pearson; ciudad de Cuenca - Ecuador; eventos extremos.



ABSTRACT

Due rainfall plays a key role in the functioning of urban hydrological models, it becomes necessary the use of information close to reality, so identifying the spatio temporal rainfall variability is an important step to get better results. In the present study the spatio temporal rainfall variability was analyzed based on the records from 8 rain gauges distributed on the city of Cuenca at 2550 m a.s.l. during the rainy period February-July 2014. The average distance between stations was 5 km with a maximum distance of 11.9 km. The study revealed that the sensors show a variation of 35.61% in the accumulated volume of rain, finding two zones with well defined characteristics. The first is located in the CM sensor, which keeps the lower correlations in every temporal scale analyzed and has the least amount of rain found (289 mm). The second is located in the QB sensor which has the largest volume of rain (442 mm) and maintains the best correlations with the nearest stations, even for the temporal scale of 5 min ($r > 0.4$), therefore precipitation occurs in a major way increasing the risk of flooding. Extreme events mostly have a preferential direction from east to west with highly convective features and ranging in peak intensities at 5, 30 and 60 minutes from 63, 23 and 18 mm/h respectively.

Keywords: Spatial and temporal variability; spatial structure; Pearson correlation; city of Cuenca – Ecuador; extreme events.



ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
ÍNDICE	4
CLAUSULAS	6
AGRADECIMIENTO	8
1. Introducción.....	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Justificación.....	10
1.3 Objetivo	11
1.3.1 Objetivo general.....	11
1.3.2 Objetivos específicos	11
2. Marco Teórico	11
3. Materiales y Métodos	16
3.1 Área de estudio	16
3.2 Monitoreo del área de estudio de Febrero a Julio 2014	18
3.2.1 Diseño e instalación del sistema de monitoreo.....	18
3.2.2 Mantenimiento y control de calidad	19
3.2.3 Calibración de pluviómetros.....	19
3.3 Identificación de la estructura espacial de la precipitación.....	20
3.3.1 Patrones espaciales	20
3.3.2 Análisis de la distribución espacial del volumen acumulado de lluvia....	21
3.4 Análisis del comportamiento de tormentas.....	22
4. Resultados y Discusión	23
4.1 Monitoreo del área de estudio de Febrero a Julio 2014	23
4.2 Identificación de la estructura espacial de la precipitación.....	25
4.2.1 Patrones espaciales	25
4.2.1.1 Escala temporal de 10 días	26
4.2.1.2 Escala temporal diaria	26
4.2.1.3 Escala temporal horaria	28



4.2.1.4 Escala temporal de 5 minutos.....	29
4.2.2 Análisis de la distribución espacial del volumen acumulado de lluvia....	31
4.3 Análisis del comportamiento de tormentas.....	34
5. Conclusiones.....	38
6. Recomendaciones.....	39
REFERENCIAS.....	41
ANEXOS	44



Yo, Adrián Esteban Sucozhañay Calle autor de la tesis **"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE CUENCA DURANTE EL PERÍODO FEBRERO – JULIO DE 2014"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 18 de Febrero de 2015

Adrián Esteban Sucozhañay Calle

C.I: 0105103766



Yo, Adrián Esteban Sucozhañay Calle autor de la tesis **“ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE CUENCA DURANTE EL PERÍODO FEBRERO – JULIO DE 2014”**, 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 Ingeniero Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 18 de Febrero de 2015

Adrián Esteban Sucozhañay Calle

C.I: 0105103766



AGRADECIMIENTO

Quiero dejar constancia de mi profundo agradecimiento a todos quienes contribuyeron para el desarrollo del presente estudio. Mi reconocimiento especial al Ingeniero Rolando Céleri A. por el valioso aporte de conocimiento e ideas fundamentales para el desarrollo del proyecto. Al Ingeniero Ryan Padrón por toda la colaboración y asesoría realizada para el emprendimiento del estudio. Gracias al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca y al proyecto “Identificación de los procesos hidrometeorológicos que desencadenan crecidas extremas en la ciudad de Cuenca, a partir de la información suministrada por un radar de precipitación” por proveer el financiamiento y la información empleada para la investigación. Un agradecimiento especial a la Tercera Zona Militar, a ETAPA EP, a la Universidad de Cuenca, al Ingeniero Esteban Samaniego, a la Ingeniera Ana Elizabeth Ochoa y al Ingeniero Mario Córdova por permitir la instalación de los equipos de monitoreo en sus predios. Finalmente, quiero agradecer a mis familiares, amigos y colegas por el apoyo, consejos y comentarios que ayudaron a mejorar el estudio.

Adrián Esteban Sucozhañay Calle
Cuenca, Febrero de 2015



1. Introducción

1.1 Antecedentes

La precipitación a nivel mundial es comúnmente estudiada debido a que los seres vivos dependen de ella como fuente de agua dulce para los ecosistemas y por ende vital para la supervivencia de las especies que necesitan de este recurso. Sin embargo, la amplia variabilidad que la precipitación puede tener en diferentes puntos geográficos dificulta realizar su estimación correctamente.

En los últimos años, la preocupación por analizar el comportamiento de la precipitación se ha incrementado notablemente, debido a que esta variable tiene influencia directa en distintas aplicaciones ingenieriles que utilizan esta información, tales como, el diseño del alcantarillado pluvial de una ciudad (Berndtsson & Niemczynowicz, 1988; Vaes, Willems, & Berlamont, 2001). Por ejemplo, en ciudades como Bélgica y Holanda, los sistemas de alcantarillado han sido diseñados tomando en consideración el comportamiento de las tormentas tanto en el espacio como en el tiempo (Vaes, Clemens, Willems, & Berlamont, 2002), ayudando así a disminuir el riesgo de inundaciones urbanas.

En la Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de Ecuador, Cáceres, Núñez, Romero, & Viteri, (2011), plantean que la climatología nacional presenta una escala temporal y espacial poco adecuada y con mínimas consideraciones convectivas de la precipitación en los modelos climáticos del país. Es decir, el monitoreo de las variables meteorológicas todavía no es el indicado para responder a los efectos que producen las características geográficas y orográficas del país (Pourrut, Rovere, Romo, & Villacrés, 1995)

En los últimos años en el Ecuador se han desarrollado esfuerzos para incrementar el conocimiento sobre eventos naturales tales como la precipitación; lamentablemente, el estudio de la variabilidad de la lluvia aún es limitado (Abad, 2014; Buytaert, Céleri, Willems, Bièvre, & Wyseure, 2006; Céleri, Willems, Buytaert, & Feyen, 2007; Vallejo, 2014). Esta situación se agrava más cuando se trata de entender la dinámica de la precipitación en áreas pequeñas y altamente importantes como ciudades. Por ejemplo, de acuerdo a una consultoría realizada por el Grupo TYPASA (2004) financiada por la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP), para mejorar el diseño del alcantarillado pluvial en sectores problemáticos de la ciudad de Cuenca, se puede observar el uso del método racional americano para determinar los caudales de escorrentía. Sin embargo, su información se basa en un solo punto de monitoreo para toda la ciudad, dejando de lado el comportamiento cambiante de la precipitación que puede existir a lo largo de la urbe, lo cual puede producir en ciertos lugares flujos excesivos en el alcantarillado, teniendo como resultado daños físicos en las estructuras, inundaciones e inclusive hundimientos de suelo debido a la infiltración.



Uno de los principales limitantes para el estudio de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación es su nivel de complejidad. Esta es el resultado de una serie de factores físicos y químicos que determinan su ocurrencia; sin embargo, existen diferentes metodologías para estudiarla, entre ellas se encuentra el uso de índices estadísticos para identificar patrones en la precipitación mediante registros puntuales.

1.2 Justificación

En el Ecuador, el Plan Nacional para el Buen Vivir, en su objetivo tres, reconoce la gran vulnerabilidad del país ante amenazas naturales, entre estas las inundaciones, por lo que establece como política nacional “Garantizar la preservación y protección integral del patrimonio cultural y natural y de la ciudadanía ante las amenazas y riesgos de origen natural o antrópico” (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo [SENPLADES], 2013). Así mismo, en el objetivo siete se promueve la sostenibilidad ambiental, pretendiendo entre otros, garantizar la protección de la población, reconociendo a las obras de prevención como una herramienta útil para lograr este objetivo.

A nivel de ciudades como Cuenca, la falta de información sobre la precipitación puede ser más preocupante. En dicha ciudad es común la presencia del invierno en el segundo trimestre del año, lo cual trae consigo comúnmente grandes cantidades de lluvia e inclusive en algunas ocasiones la presencia de granizo (El Tiempo, 2014). Se ha podido observar que estas fuertes precipitaciones son las precursoras de algunos problemas para la ciudad y su población, como es el caso de inundaciones, desbordamientos de los ríos, deslaves, entre otros (Grupo TYPESA, 2004). Un claro ejemplo son las fuertes lluvias suscitadas en la ciudad el día 23 de Febrero del año 2013, que trajeron consigo inconvenientes en varios sectores, entre ellos, la inundación de varias viviendas debido al desbordamiento de la quebrada de El Salado, dejando como resultado pérdidas económicas e inclusive la muerte de un ciudadano en el sector de Huizhil (El Tiempo, 2013).

Estudios que analicen esta variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la ciudad no han sido realizados particularmente por la falta de una red de monitoreo apropiada, dejando la incertidumbre de la existencia de está en grandes proporciones. Por lo que, conociendo los objetivos del país y la necesidad de generar conocimiento, se vuelve indispensable proveer de información científica a las entidades encargadas del manejo de recursos naturales y de la gestión de riesgos.

Por lo tanto, es necesario desarrollar una investigación sobre el comportamiento tanto espacial como temporal de la precipitación dentro de la urbe de la ciudad de Cuenca, que cuente con la implementación de varios equipos pluviométricos para garantizar su solidez.

Los resultados obtenidos de esta investigación a más de aportar al conocimiento científico en el área, servirán de sustento para el desarrollo de nuevos modelos en



el diseño del sistema de alcantarillado de la ciudad. Esto contribuirá a la prevención de inundaciones, reducción de pérdidas materiales y humanas y a la generación de una cultura pro activa para el manejo de los recursos naturales. Además, es necesario mencionar que mantener este tipo de monitoreo puede aportar a mejorar el conocimiento de los posibles efectos del cambio climático a una pequeña escala espacial dentro de la urbe.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Analizar la variabilidad espacio temporal de la precipitación en la ciudad de Cuenca durante el periodo Febrero – Julio de 2014.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Monitorear la precipitación en la ciudad de Cuenca durante el periodo Febrero – Julio.
2. Identificar la estructura espacial de la precipitación.
3. Analizar el comportamiento de tormentas.

2 Marco Teórico

La precipitación es una variable meteorológica importante en el ciclo hidrológico del agua y puede definirse como el retorno del agua de la atmósfera a la superficie terrestre. La precipitación puede presentarse de diferentes maneras, ya sea en estado líquido como lluvia o estado sólido como nieve, lo cual dependerá de la temperatura a la que se encuentre la masa de aire.

Este proceso inicia cuando el vapor de agua en el aire alcanza el punto de saturación mediante el aumento de humedad o disminución de temperatura, lo cual da paso a la condensación o sublimación de gotas o cristales de agua respectivamente, que van adquiriendo el peso suficiente para vencer la fuerza ascendente que los mantiene en suspensión en la atmósfera y para posteriormente precipitar (Casas & Alarcón, 1999).

Si bien el párrafo anterior explica brevemente cómo se produce la precipitación en una masa de aire, existen varios factores como la temperatura, la altitud, el relieve, entre otros, que determinan su ocurrencia. La compleja dinámica de estos factores produce diferentes mecanismos de generación de lluvia (Casas & Alarcón, 1999; R. Rodríguez, Capa, & Lozano, 2004), entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Masas de aire frontales.- Este mecanismo se produce por la convergencia de dos masas de aire que se encuentran a diferentes temperaturas llamadas frente cálido y frente frío. La convergencia de estos dos frentes produce que el aire frío se mueva por debajo del aire caliente haciendo que



este ascienda en la atmósfera hasta encontrar temperaturas más bajas que permitan que ocurra la precipitación.

- Convección.- Este mecanismo sucede cuando existen temperaturas altas en la superficie produciendo que el aire ascienda rápidamente, se generen nubes del tipo cumulus y alcancen alturas elevadas. Las nubes convectivas por lo general son las precursoras de lluvias muy fuertes y de corta duración.
- Efectos orográficos.- Este mecanismo se produce cuando las elevaciones de la superficie terrestre se interponen en el movimiento de las masas de aire, lo cual genera que el aire ascienda, reduciendo sus temperaturas y produciendo precipitación. La precipitación generada por este efecto se desarrolla comúnmente en el barlovento de las montañas; sin embargo, es necesario mencionar que de acuerdo a las condiciones de las masas de aire, estas pueden generar precipitaciones en el sotavento.

En este contexto, la precipitación está relacionada directamente a diferentes factores, lo cual produce a su vez que posea características únicas en diversas partes del mundo (Krajewski & Ciach, 2003). Además, debido a la gran incidencia que la precipitación tiene en distintas aplicaciones, se vuelve indispensable la medición y estudio de esta variable meteorológica (Berndtsson & Niemczynowicz, 1988).

Primero, es necesario mencionar la unidad encargada de expresar la precipitación, la cual corresponde a los milímetros de lluvia (mm). Esta unidad, si bien no es una unidad volumétrica puede ser transformada en una, debido a que un milímetro de lluvia equivale a la altura de un milímetro (mm) que formará un litro (lt) de agua esparcido en un metro cuadrado (lt/m^2) (R. Rodríguez et al., 2004).

Existen diferentes maneras de medir la precipitación, entre las cuales tenemos el uso de registros puntuales (i.e. Goodrich, Faurès, Woolhiser, Lane, & Sorooshian, 1995). Esta forma de medir la precipitación consiste en el uso de diversos instrumentos que registran el volumen de agua que ha caído en un punto determinado de la superficie terrestre. Este método ha sido ampliamente utilizado debido a su sencillez, a sus bajos costos comparados con otras tecnologías y que además nos brinda una medida real de la precipitación que ha caído en un punto específico. Sin embargo, el uso de registros puntuales para estudios que necesiten información de la precipitación dentro de un área determinada, puede generar gran incertidumbre, debido a la variabilidad espacial de la precipitación.

A lo largo de la historia han existido diferentes equipos que tienen la capacidad de registrar la precipitación puntual, entre los cuales tenemos los colectores, pluviógrafos, pluviómetros y disdrómetros. Estos pueden variar notablemente en tecnología, precisión, costos y variables registradas, siendo el disdrómetro el que mejor características posee pero a su vez siendo el más costoso (Padrón, 2013).

El pluviómetro de balancín es un equipo diseñado para la medición de la precipitación, el cual registra la cantidad de lluvia en un determinado momento de



tiempo. Este pluviómetro consiste en un cilindro cuyo extremo superior posee un embudo que desemboca en un balancín ubicado en el interior del cilindro, que a su vez está conectado a una microcomputadora llamada data logger.

El proceso por el cual el equipo registra la precipitación es el siguiente: el agua proveniente de la precipitación es recolectada por el embudo el cual dirige las gotas de agua al balancín interior. Aquí, el agua es almacenada hasta llegar a un volumen determinado que puede soportar un reservorio del balancín, por lo que posteriormente se desequilibra y cae, chocando con un contacto eléctrico que envía una señal de pulso al data logger, el mismo que se encarga de almacenar la hora en la que se produce el contacto. Una vez que el reservorio cae, este drena el contenido de agua y provoca que el otro reservorio del balancín se levante, permitiendo que el proceso se repita (Padrón, 2013). Es importante mencionar que el volumen que el reservorio del balancín puede soportar dependerá de las características del equipo y es llamado resolución del equipo, cuya medida es expresada en milímetros de lluvia (mm). Las resoluciones comúnmente utilizadas pueden ir aproximadamente desde los 0.1 hasta los 0.5 mm para equipos pluviométricos y resoluciones muy pequeñas de 0.001 mm en el caso de los disdrómetros.

Actualmente, debido al desarrollo de la tecnología existen nuevas formas de monitorear y estudiar la precipitación, como es el uso de radares. Los radares nos permiten obtener mayor información espacial y temporal de la precipitación tanto vertical como horizontalmente; sin embargo, pueden resultar costosos y necesitan ser sometidos a diferentes estudios para mejorar su funcionamiento, así como contar con una buena red pluviométrica para calibrar los registros del radar (Pedersen, Jensen, Christensen, & Madsen, 2010).

Una vez explicado cómo se obtiene información de la precipitación, existen diferentes maneras de estudiar y analizar su comportamiento. Uno de los métodos más sencillos es el uso de series de tiempo, el cual consiste en determinar y analizar la secuencia de las observaciones de la precipitación que han ocurrido en un determinado intervalo de tiempo durante el periodo de estudio. Las series de tiempo resultan muy útiles, ya que nos dan un primer acercamiento de los patrones de la precipitación que se dan en un punto específico, sin embargo, necesitan de otras técnicas para conocer su comportamiento dentro de toda un área de estudio.

Antiguamente la estimación de la precipitación para una área determinada, era considerada como la extrapolación de lo medido en un punto; lo cual conducía a generar errores que no eran tomados en cuenta en el desarrollo de modelos hídricos que usen esta fuente de datos, debido a que la precipitación de acuerdo a la zona de estudio puede variar notablemente en el espacio (Berndtsson & Niemczynowicz, 1988; Goodrich et al., 1995). Por tal motivo es necesario considerar actualmente que la precipitación se puede presentar de manera diferente en distintos puntos de un área, como también la variabilidad de esta en el tiempo.



Krajewski & Ciach (2003) en su estudio realizado en Brasil, Florida, Iowa, Oklahoma y Guam, han demostrado que de acuerdo a la escala temporal y espacial en la que se analicen los datos de precipitación se puede determinar diferentes patrones, reportando además, la relación existente entre la distancia entre dos puntos y la probabilidad de encontrar características similares en la precipitación. Demostrando de esta manera que mientras más nos alejamos de un punto en el espacio, las características de esta variable cambian notablemente inclusive para distancias menores al kilómetro.

Goodrich et al. (1995), a partir de su estudio realizado en una microcuenca en Arizona reportó que la variabilidad de la precipitación también se da en pequeñas escalas espaciales. Esta afirmación ha creado gran controversia debido a la práctica común de utilizar un solo pluviómetro para la representación de la lluvia para toda una cuenca. Las conclusiones de su estudio revelan que el gradiente de precipitación es de 1.2 mm en 100 m como promedio, es decir que cada 100 m la lluvia puede aumentar o disminuir 1.2 mm, teniendo una variabilidad del 4 al 14 % en 100 m. Demostrando al mismo tiempo el efecto que pueden tener las tormentas convectivas de la zona.

La incertidumbre en los datos de lluvia como bien se mencionó anteriormente no solo viene dada por el espacio que un equipo puede representar, sino por el desarrollo de la precipitación en el tiempo. Padrón (2013) en su estudio de la variabilidad temporal de la lluvia en la microcuenca del río Zhuruca y a 85 km al sur de la ciudad de Cuenca, determina diferentes características de la zona mediante el uso de distintas escalas temporales. Sus resultados demuestran que de acuerdo a la escala temporal utilizada se puede observar diferentes características de la estructura de la precipitación, que a su vez pueden obedecer a distintos procesos de generación de lluvia.

El estudio de la variabilidad de la precipitación es muy importante debido a que nos permite identificar características del comportamiento de esta variable meteorológica. Jebari, Berndtsson, Uvo & Bahri (2007), regionalizan los patrones de precipitación en su área de estudio mediante el uso de la correlación inter estación, funciones ortogonales y clustering. La aplicación de escalas temporales finas desde un minuto hasta un día permitió la desagregación de los patrones encontrados con la finalidad de observar características de fenómenos que se desarrollan a escalas pequeñas.

Otra manera de identificar patrones en la precipitación es presentada por Martín-Vide (2004) mediante el uso del índice de concentración (ci). El índice de concentración evalúa la relación entre el porcentaje de días de lluvia con el porcentaje del volumen acumulado, sin embargo está limitado a una resolución temporal diaria.

A pesar de que la variabilidad de la precipitación es tradicionalmente estudiada para su correcta caracterización, también es utilizada para evaluar el



funcionamiento de radares de lluvia, los cuales constituyen una herramienta útil para una mejor representación de la distribución espacial de la precipitación. Pedersen et al. (2010), en su afán de evaluar la variabilidad espacial en una novena parte de un pixel de radar de 500 m², demostró que la precipitación puede variar significativamente, presentando un coeficiente de variación del volumen acumulado de lluvia entre 1 y 26% en diferentes eventos.

Las zonas urbanas no están exentas de esta variabilidad; el efecto que esta tiene está directamente relacionado con el diseño del drenaje pluvial. Por ejemplo, el estudio realizado por E. Rodríguez et al. (2008), en la ciudad de Bogotá en un área de 1.2 km² ha demostrado la variabilidad de la precipitación a pequeña escala en la urbe. Este estudio analizó un evento de lluvia con 14 pluviómetros de balancín ubicados de forma dual mediante tres métodos de interpolación de diferente dificultad (inverso de la distancia, interpolación polinomial y a la interpolación mediante kriging) dando como resultados una variación del 15% de la precipitación total y una variación del 75% para intensidades máximas en una escala temporal de 15 minutos. Además, pone a consideración que no necesariamente una mejor técnica de interpolación refleja resultados superiores comparándolas con otras de menor grado de dificultad.

Esfuerzos para determinar una resolución espacial y temporal óptima de la precipitación para aplicaciones urbanas se han realizado tomando en consideración el tiempo de respuesta que tiene una microcuenca urbana y métodos geoestadísticos (Berne, Delrieu, Creutin, & Obled, 2004). Los resultados de Berne et al. (2004) reportaron una resolución de 5 min y 3 km para cuencas de 1000 ha y de 3 min y 2 km para cuencas de 100 ha. Sin embargo, el mismo autor pone a discusión que estos resultados están fuertemente influenciados por los factores climáticos propios del Mediterráneo y que el uso de esta información debe ser exclusivamente para eventos con características semejantes a los estudiados.

Emmanuel, Andrieu, Leblois, & Flahaut (2012) mediante el uso de imágenes de radar de la ciudad de Francia, pone en conocimiento diferentes tipos de lluvia, que a su vez llegan a poseer diversas estructuras internas en la tormenta. El estudio resulta de gran interés, ya que parte del uso de la desviación estándar del volumen diario de lluvia y de un análisis de componentes principales (PCA) de la precipitación para determinar y separar las distintas estructuras de la lluvia; para terminar con un estudio geoestadístico de los variogramas climatológicos. Este estudio, al igual que el de Berne et al. (2004) determina una distancia y tiempo de decorrelación para cada tipo de lluvia, sin embargo, difiere de este autor al establecer relaciones diferentes entre la resolución espacial y temporal, así, la resolución puede abarcar intervalos menores a los 5 km y 5 min hasta 17 km y 15 min dependiendo de cada tipo de evento.

Estudios que analicen el comportamiento de la precipitación específicamente en nuestra área de estudio es reducido (i.e. Vallejo, 2014); sin embargo, a nivel de cuenca hidrográfica existen mayores esfuerzos para estudiar esta variable (i.e. Abad, 2014; Buytaert et al., 2006; Célleri et al., 2007)



Célleri et al. (2007) en su estudio realizado en la cuenca del río Paute establece la existencia de diferentes estructuras en los patrones de lluvia. Los autores recopilaron y analizaron información mensual de 23 estaciones utilizando la correlación de Pearson con lo que identificaron cuatro zonas con diferentes características. Las 2 primeras zonas corresponden a un régimen unimodal ubicado en las zonas altas de la cuenca y las otras 2 a un régimen bimodal ubicado en las partes bajas. La diferencia entre las zonas de cada régimen se da debido al volumen de lluvia que ocurre en cada una.

Según Abad (2014), la cuenca del Paute posee características topográficas y orográficas que afectan notablemente a la distribución de la precipitación en el área. Este estudio determinó una baja correlación entre la precipitación mensual y anual con variables topográficas, sin embargo, al utilizar índices orográficos la correlación aumenta notablemente, indicando que la relación entre la precipitación y factores topográficos y orográficos de la zona presentan relaciones erráticas que deberán ser evaluadas de mejor manera en estudios con escalas temporales y espaciales más finas.

La precipitación a pequeña escala espacial ha sido analizada por Buytaert et al. (2006) en la parte bimodal de la cuenca del Paute, encontrando la incidencia de la precipitación diaria a escalas inferiores a los 4 km. A pesar de encontrar una buena correlación a estas distancias, la variabilidad del promedio del volumen diario de lluvia en cuencas pequeñas de aproximadamente 2 km² de superficie puede ser superior al 25%, sugiriendo al efecto topográfico como responsable de estos valores.

En consecuencia, el presente estudio será desarrollado a través de una serie de actividades y metodologías acorde a estudios precedentes relacionados a nuestra temática. Así, el estudio partirá de la recopilación de información para su posterior análisis estadístico y la obtención de conclusiones acerca de patrones espaciales y temporales de la precipitación.

3 Materiales y Métodos

3.1 Área de estudio

El presente estudio será desarrollado en la ciudad de Cuenca perteneciente al cantón Cuenca de la provincia del Azuay, ubicada en la región seis de la República del Ecuador. Es una de las ciudades más importantes del país debido a su desarrollo poblacional y económico. Su población es de 331000 habitantes y su superficie alcanza los 70 km². Además, fue declarada en 1999 Patrimonio Cultural de la UNESCO debido a su riqueza arquitectónica y su diversidad cultural.

La ciudad se localiza en la parte centro sur del país, en un valle del callejón interandino de la cordillera de los Andes, a 2550 m s.n.m. Debido a su característica de valle, se encuentra cerca de varias formaciones rocosas entre la



que destaca el macizo del Cajas ubicado aproximadamente a 30 km al oeste de la ciudad.

Hidrológicamente la ciudad se encuentra ubicada en la parte alta de la cuenca del río Paute, cuyo caudal es afluente del río Amazonas que a su vez desemboca en el Océano Atlántico. La cuenca del río Paute se extiende desde la divisoria de aguas continentales y posee relieves muy irregulares que van desde la cota de los 500 m s.n.m. hasta los 4600 m s.n.m., presentando diferentes pisos climáticos con vegetación y características muy variadas.

La ciudad de Cuenca está atravesada por cuatro ríos provenientes de las subcuencas del Machangara, Tarqui, Tomebamba y Yanuncay, convirtiéndola en una ciudad rica en recursos hídricos. Es importante mencionar que la abundancia de este recurso hídrico se debe en su mayoría a la existencia de ecosistemas de alta montaña llamados páramos, cuyas características biofísicas y climáticas regulan y proveen de estos recursos aguas abajo (Llambí et al., 2012).

El clima en la zona de estudio está influenciada por el régimen de la costa del Pacífico por el oeste y mayormente por masas de aire continentales y tropicales del Atlántico por el este (Buytaert et al., 2006). Según el estudio realizado por Célleri et al. (2007), la ciudad de Cuenca se encuentra localizada en una zona donde la distribución de la precipitación presenta una estructura bimodal, en la cual su estación seca ocurre entre los meses de Junio a Agosto; con una media anual de 660 mm a 1100 mm.

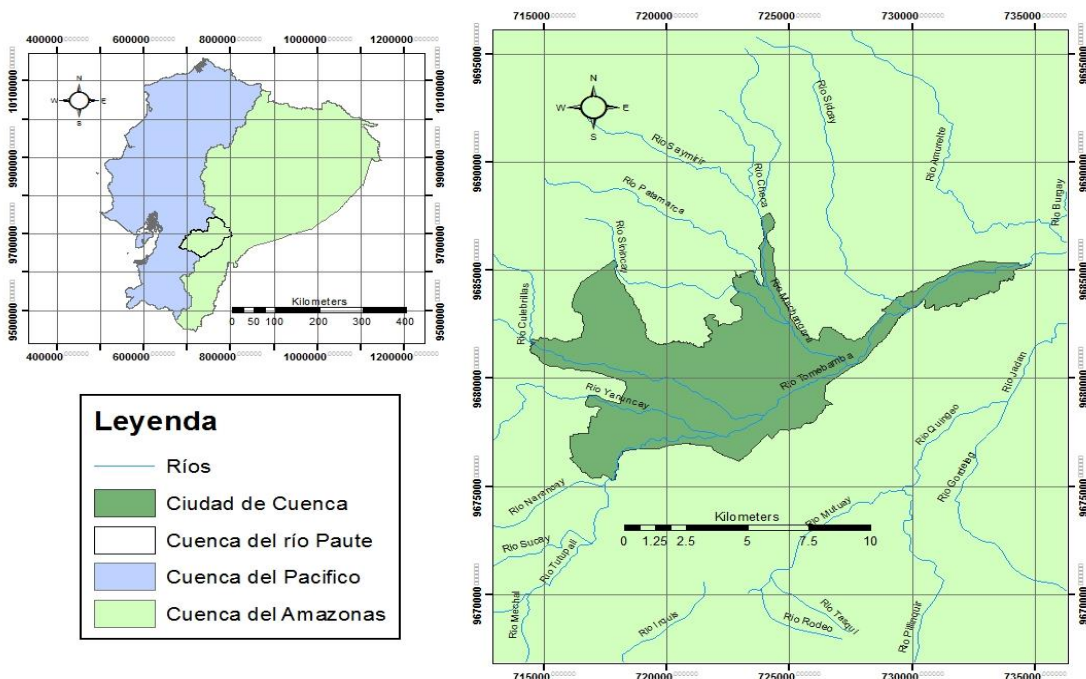


Figura 1. Ubicación del área de estudio



3.2 Monitoreo del área de estudio de Febrero a Julio 2014

El primer paso para el desarrollo de este estudio fue el levantamiento de información de precipitación, para lo cual se implementó un sistema de monitoreo en la área de estudio. Este objetivo abarcó el diseño e instalación del sistema de monitoreo, el mantenimiento y control de calidad y la calibración de los equipos pluviométricos. Estos pasos se encuentran explicados en las secciones 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3 respectivamente.

3.2.1 Diseño e instalación del sistema de monitoreo

El diseño del sistema de monitoreo consistió en determinar los puntos de monitoreo y el espaciamiento necesario entre cada equipo para responder a los objetivos de nuestro estudio, por lo que se tomó a consideración que el monitoreo debe responder a las necesidades que un área urbana puede presentar.

De acuerdo al alcance económico del proyecto el número de puntos monitoreados fueron ocho, los cuales cuentan con un equipo pluviométrico por punto. Los equipos instalados tienen la tecnología de balancín, indicada previamente en la sección 2. Estos son siete de marca Davis y uno de marca Texas, los cuales poseen una resolución de 0.2 mm y 0.1 mm respectivamente.

Para determinar la distancia entre cada pluviómetro se procedió a revisar la literatura correspondiente al tema, la cual según Berne et al. (2004) y Emmanuel et al. (2012) indican que la distancia adecuada para estudios en una cuenca urbana y a pequeña escala puede ir desde los 3 km hasta los 5 km y desde los 5 km hasta los 17 km respectivamente.

Además de los aportes bibliográficos, la distribución espacial que presentan los equipos en nuestro estudio fue realizada de acuerdo a la observación de mapas de la ciudad, a sectores de interés determinados a partir del conocimiento previo de la observación directa de la variabilidad espacial de la lluvia, a la factibilidad de instalación de los equipos e intentando abarcar la mayor área posible. La factibilidad mencionada anteriormente hace referencia a la facilidad de gestionar el permiso correspondiente para la instalación de los equipos y la seguridad que el lugar puede brindar.

Por lo tanto, tomando en cuenta estas consideraciones y que no existen recomendaciones previas en nuestra área de estudio, la distancia entre cada punto de monitoreo puede ir desde los 2 km hasta los 4 km aproximadamente, lo cual concuerda con otros estudios semejantes (Berne et al., 2004; Buytaert et al., 2006; Pedersen et al., 2010).

Una vez determinados los puntos de monitoreo, los equipos fueron emplazados en cada lugar tomando las siguientes consideraciones para mejorar su validez: 1) Los equipos deben estar alejados de objetos o estructuras que obstaculicen la caída de lluvia en una relación de 1:2, es decir por cada metro de altura que posee el



obstáculo el equipo debe estar alejado 2 m de este, 2) La altura a la que debe estar el pluviómetro del suelo es de 1.5 m y 3) El equipo debe estar nivelado. Estas consideraciones fueron obtenidas de los manuales de los equipos y de estudios como el de Goodrich et al. (1995) y Pedersen et al. (2010).

3.2.2 Mantenimiento y control de calidad

Según Padrón (2013) y Pedersen et al. (2010), el mantenimiento rutinario es un elemento fundamental para mejorar la confiabilidad de los datos, por lo que en este estudio se realizó el mantenimiento y descarga de los equipos cada tres o cuatro semanas para intentar evitar una pérdida de datos masiva por un posible mal funcionamiento de los equipos.

De igual manera, se llevó un control de calidad a la información recopilada para evitar el ingreso de valores erróneos a la base de datos con los que posteriormente se trabajó. Este control de calidad se basó en el uso de una bitácora de campo, la cual nos permitió corregir o eliminar datos que se producían en el momento de manipular el equipo para realizar su descarga o mantenimiento.

3.2.3 Calibración de pluviómetros

Además de estos procedimientos para aumentar la calidad de los datos, fuentes bibliográficas como Padrón (2013), Pedersen et al. (2010) y E. Rodríguez et al., (2008) indican la importancia de calibrar los equipos pluviométricos debido al desgaste o fallas que estos pueden tener. Teniendo en cuenta estos aportes, se procedió a realizar una calibración estática a todos los equipos con la finalidad de obtener un factor de corrección (f_c) (ecuación 1) para cada uno de ellos. A continuación se procederá a explicar brevemente esta metodología, sin embargo, para mayor información del procedimiento se puede dirigir al estudio realizado por Padrón (2013).

$$f_c = \frac{Vol\ real\ (ml) - Vol\ nominal\ (ml)}{Vol\ nominal\ (ml)} \quad (1)$$

Donde, el volumen nominal corresponde a la transformación de la resolución del equipo en mm de lluvia a ml (ecuación 2) y el volumen real corresponde a los valores obtenidos de la calibración estática.

$$Vol\ nominal\ (ml) = \frac{Área\ de\ recolección\ del\ pluviómetro\ (cm^2) \times Resolución\ (ml)}{10000\ cm^2} \quad (2)$$

La calibración estática consiste en determinar el volumen real de agua al cual el balancín se desequilibra y cae. Este procedimiento se realizó cinco veces para cada balancín del pluviómetro mediante una micropipeta de resolución de 0.001 ml, para posteriormente obtener un promedio de estas observaciones.



Una vez obtenido el factor de corrección de cada equipo, este fue utilizado para corregir cada registro de nuestra base de datos mediante la ecuación 3.

$$Vol\ real\ (mm) = Resolución\ (mm) \times (1 + fc) \quad (3)$$

3.3 Identificación de la estructura espacial de la precipitación

Varios estudios alrededor del mundo demuestran la gran variabilidad que puede presentar la precipitación a diferentes escalas espaciales y temporales (Andrés, Tomás, & de Pablo, 2000; Goodrich et al., 1995; Krajewski & Ciach, 2003; Pedersen et al., 2010). Investigaciones que analicen esta variabilidad específicamente en nuestra área de estudio aún no han sido registradas; sin embargo, se ha podido encontrar algunos estudios que analizan diferentes aspectos del comportamiento de la precipitación a una escala espacial de la cuenca del Paute, concluyendo que existe una gran variabilidad en la precipitación de la zona (Abad, 2014; Buytaert et al., 2006; Célleri et al., 2007).

Para identificar la estructura espacial de la precipitación en este estudio se utilizó la correlación de Pearson (r), la cual es descrita en la sección 3.3.1. Esta metodología ya fue utilizada por Célleri et al. (2007) en la cuenca del río Paute dando buenos resultados para encontrar patrones espacio temporales de la precipitación.

Posteriormente, en la sección 3.3.2, se complementó este estudio mediante un análisis de la distribución espacial del volumen acumulado de lluvia, para lo que se utilizó el coeficiente de variación (cv), el cual permite evaluar la variabilidad espacial que presenta la precipitación (Pedersen et al., 2010; E. Rodríguez et al., 2008).

3.3.1 Patrones espaciales

El análisis de patrones espaciales se realizó mediante el uso del coeficiente de correlación de Pearson a cuatro escalas temporales con el fin de acercarnos a estudios previos como el de Célleri et al. (2007) y a recomendaciones dadas tanto por Berne et al. (2004) y Emmanuel et al. (2012).

Para esta parte del estudio se contó con información desde Febrero a Julio de 2014 de los ocho puntos monitoreados en la sección 4.1, abarcando de esta forma tanto el inicio como el fin de la principal época lluviosa de la zona (Célleri et al., 2007). Es necesario mencionar que de toda la base de datos utilizada existe un 15.46% de datos faltantes; sin embargo, este inconveniente no impidió la aplicación del coeficiente de Pearson en el estudio. Esto se debe a que este coeficiente trabaja a partir de un par de datos, por lo que si no existe información en un periodo de tiempo, este lapso no es considerado.

Las series de tiempo con las que se trabajó fueron elaboradas a partir de la agregación de los registros de precipitación. Esta agregación fue desarrollada



agrupando los registros cada 5 minutos, cada hora, cada día y cada 10 días, dando como resultado cuatro diferentes escalas temporales, a las cuales se aplicó el coeficiente de Pearson.

El coeficiente de Pearson es un índice que nos permite medir el grado de covarianza entre dos variables o poblaciones linealmente relacionadas, por lo que aplicado a la meteorología, nos permite evaluar el grado de relación entre dos registros de lluvia (Buytaert et al., 2006; Célleri et al., 2007; Habib & Krajewski, 2001). Este coeficiente de Pearson está definido por la ecuación 4.

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \times s_y} \quad (4)$$

Dónde:

r = Coeficiente de correlación de Pearson

s_{xy} = Covarianza de x y y

s_x = Desviación estándar de x

s_y = Desviación estándar de y

Este coeficiente puede tomar valores entre 1 a -1, siendo 0 una relación nula y los valores de 1 y -1 una relación perfecta. El signo que puede tomar este índice únicamente representa la dirección de la relación, es decir, si el signo es positivo la relación es directamente proporcional y si es negativo la relación es inversamente proporcional.

3.3.2 Análisis de la distribución espacial del volumen acumulado de lluvia

Si bien el coeficiente de Pearson evalúa el comportamiento de la distribución de dos variables o poblaciones, este coeficiente no refleja en sus resultados la magnitud que estas variables o poblaciones presentan. Por ejemplo, si un evento de lluvia ocurre de forma similar en dos puntos, el coeficiente de Pearson puede ser elevado, sin embargo, la cantidad de lluvia que ocurre en estos dos puntos puede ser muy diferente, por lo que fue conveniente complementar este estudio con un análisis de la distribución espacial del volumen acumulado de lluvia.

La información utilizada para este análisis comprenderá el periodo de Abril a Julio de cinco puntos monitoreados. Esta información es más reducida que la utilizada en la sección 3.3.1 debido a que esta metodología necesita información sin vacíos de datos para poder llegar a conclusiones sólidas.

Este análisis se realizó mediante la observación directa de la base datos y aplicando el coeficiente de variación al volumen acumulado de lluvia. La aplicación de este coeficiente para medir la variabilidad espacial del volumen de lluvia ha sido utilizado con anterioridad en estudios como el de Pedersen et al. (2010) y E. Rodríguez et al. (2008).



El coeficiente de variación fue aplicado a este estudio debido a que nos permite encontrar una relación entre la media y la variabilidad de la variable (ecuación 5). La magnitud que este coeficiente puede presentar varía entre 0 y 1, los cuales a su vez pueden ser expresados en porcentaje. Es importante mencionar que valores altos y bajos de este coeficiente expresan alta heterogeneidad y homogeneidad de la variable respectivamente.

$$cv = \frac{s}{|\bar{x}|} (5)$$

Dónde:

cv = Coeficiente de variación

s = Desviación estándar de la variable

$|\bar{x}|$ = Media

3.4 Análisis del comportamiento de tormentas

En esta sección del estudio se analizó los eventos extremos ocurridos durante el periodo Febrero – Julio. Para realizar este objetivo en primer lugar se seleccionó los eventos a ser analizados mediante el valor máximo observado para cada estación en una curva de excedencia a una escala temporal de 5 minutos. Se escogió esta escala temporal debido a que al tratarse de un área de estudio urbana, la precipitación se convierte rápidamente en escorrentía (Berne et al., 2004; Emmanuel et al., 2012) y a la común práctica de usar escalas temporales finas al momento de estudiar eventos específicos de lluvia (i.e. Pedersen et al., 2010; E. Rodríguez et al., 2008)

Debido a que nuestro análisis será tanto espacial como temporal, se consideró como la duración del evento desde el primer al último dato de lluvia registrado por cualquier estación. Es decir, si el primer valor de un evento en el área de estudio se registra en la estación CM y el último valor en la estación QB, la duración del evento será el tiempo que transcurrió desde el primer valor en CM hasta el último valor en QB.

Según Padrón (2013) un evento se declara finalizado cuando haya transcurrido un lapso de 30 minutos en el que no exista un registro de lluvia; sin embargo, debido a que la intención de este análisis se centra en los valores extremos de lluvia que un evento puede presentar, el lapso de 30 minutos será reducido a 15 minutos. De esta forma se evitó extender de manera excesiva los eventos de lluvia.

Una vez identificados y delimitados los eventos, estos fueron analizados a través de series de tiempo en las cuales se evaluó el desarrollo del evento en cada estación. Esto permitió observar ciertas características que presentan los eventos extremos en el área de estudio.



Como se puede observar tanto en la figura 2 y la tabla 1, la distancia mínima y máxima entre sensores es de 1.2 y 11.9 km, respectivamente. La altitud puede variar entre 2476 hasta 2655 m s.n.m., es decir, hay un desnivel máximo de 179 m.

Los resultados de la calibración estática se presentan en la tabla 2, donde se encuentra el factor de corrección utilizado para cada equipo. Los factores de corrección encontrados son variados, sin embargo, se puede observar valores superiores al 10% de error. Estos errores pueden resultar significativos al momento de compararlos con la precisión que el manual indica para cada equipo, siendo esta de 4% y 1% para intensidades menores a 50 mm/h para el equipo Davis y Texas respectivamente.

Tabla 2. Resultados de la calibración estática

Código	Vol. real del tip (ml)	Vol. teórico del tip (ml)	Vol. real tip del (mm)	Resolución (mm)	Factor de corrección / tip (mm)	Factor de corrección / tip (%)
BE	4.7167	4.2765	0.2206	0.2	0.0206	10.29%
CA	4.2700	4.2765	0.1997	0.2	-0.0003	-0.15%
CE	4.1633	4.2765	0.1947	0.2	-0.0053	-2.65%
CM	4.2000	4.2765	0.1964	0.2	-0.0036	-1.79%
UC	4.7857	4.2765	0.2238	0.2	0.0238	11.91%
UA	4.2964	4.2765	0.2009	0.2	0.0009	0.47%
ZM	4.1958	4.2765	0.1962	0.2	-0.0038	-1.89%
QB	5.2500	4.7144	0.1114	0.1	0.0114	11.36%

La información obtenida en este objetivo se puede apreciar en la figura 3, en el cual se presenta el periodo de tiempo existente de información para cada punto monitoreado.

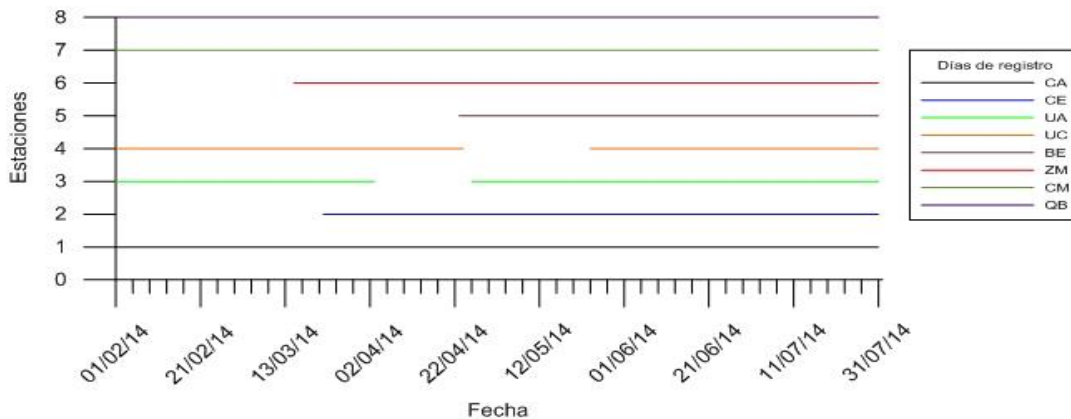


Figura 3. Periodo de información



Como se puede observar en la figura 3, la base de datos presenta vacíos, los cuales se produjeron por retrasos en los permisos para la instalación de los equipos y a errores en su funcionamiento. En la tabla 3 se presenta el porcentaje de datos perdidos para cada punto monitoreado.

Tabla 3. Porcentaje de vacío de datos

Código	Porcentaje de vacío de datos (%)
CA	0.00
CE	27.07
UA	12.71
UC	16.02
BE	44.75
ZM	23.20
CM	0.00
QB	0.00

4.2 Identificación de la estructura espacial de la precipitación

4.2.1 Patrones espaciales

En la sección 3.3.1 se explicó la aplicación del coeficiente de correlación de Pearson a diferentes escalas temporales para la identificación de patrones espaciales en el área de estudio.

En la tabla 4 se observa la distribución de los valores de Pearson, los mismos que se reducen notablemente al disminuir la escala temporal analizada. Estos valores están presentados en porcentaje y clasificados en diferentes rangos de Pearson.

Tabla 4. Porcentaje de valores de Pearson para cada escala temporal

Rangos de Pearson	Porcentaje de valores (%)			
	Escala 5 min	Escala 1 h	Escala 1 d	Escala 10 d
0 - 0.2	25.00	0.00	0.00	0.00
0.2 - 0.4	50.00	14.29	0.00	0.00
0.4 - 0.6	25.00	42.86	17.86	0.00
0.6 - 0.8	0.00	42.86	35.71	3.57
0.8 - 1	0.00	0.00	46.43	96.43

A partir de los datos obtenidos en la sección 4.1 se elaboró una matriz con todos los valores de Pearson obtenidos para cada par de estaciones (Anexo 1). A continuación, son discutidos uno por uno los resultados obtenidos para cada



escala temporal y su respectivo correlograma. Los valores fueron analizados de acuerdo a su magnitud y su ubicación.

4.2.1.1 Escala temporal de 10 días

En la figura 4 se observa que los valores de Pearson son cercanos a 1, con un promedio de 0.93 para una escala temporal de 10 días, siendo su valor más bajo 0.78 entre las estaciones CE y CM. Los valores obtenidos en esta escala temporal representan una alta correlación, con resultados casi perfectos como es el caso de las estaciones QB – ZM con $r = 0.99$. Estos resultados son similares a los obtenidos por Célleri et al. (2007) en la zona bimodal (BM1) de la cuenca del Paute en la que se encuentra nuestra área de estudio. Es importante destacar que el estudio de Célleri et al. (2007) fue realizado a una escala temporal mensual, encontrando valores de Pearson superiores a los 0.6. A causa de esto podemos mencionar que el comportamiento de la precipitación en nuestra área de estudio a escalas temporales superiores a los 10 días es altamente homogéneo, debido a que responde a los mismos patrones estacionales.

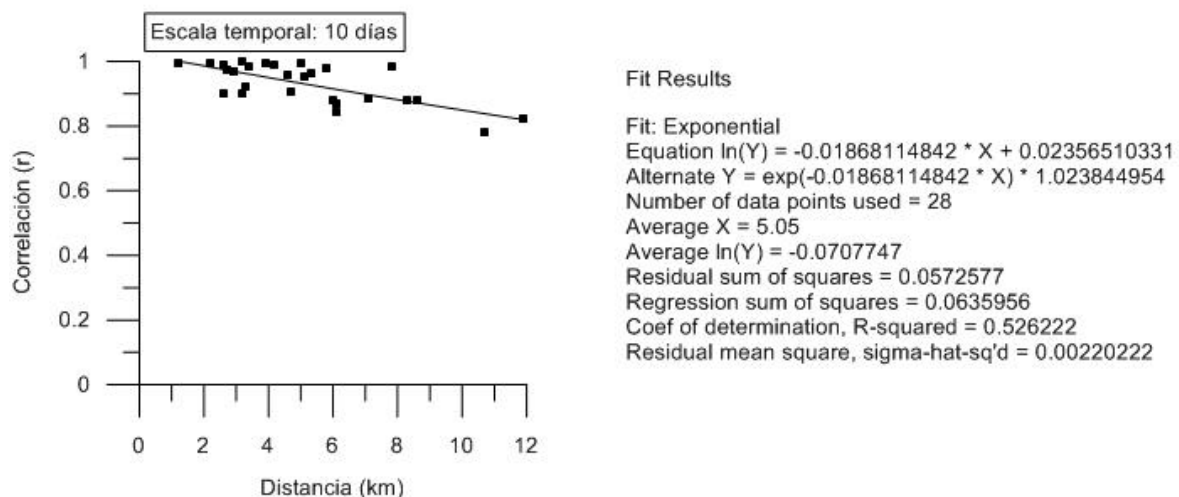


Figura 4. Correlograma a escala temporal de 10 días

4.2.1.2 Escala temporal diaria

De acuerdo al correlograma que se aprecia en la figura 5 a una escala temporal diaria, los valores de Pearson pueden variar entre 0.96 y 0.52, con un promedio de 0.76.

Es importante dar a conocer que la mayoría de valores de Pearson a una escala diaria son superiores a 0.7 (67.8% de los valores) y únicamente los coeficientes de la estación CM son aproximados a 0.5, por lo que la precipitación diaria ocurre de manera similar en la mayor parte del área de estudio a excepción del extremo este de la ciudad donde se encuentra ubicada la estación CM.

Además, se observa que a distancias inferiores a los 4 km la correlación es muy elevada, con valores superiores a los 0.79, por lo que se puede concluir que la mayoría de eventos presenta esta escala espacial. Estos resultados ya han sido reportados por Buytaert et al. (2006) en la zona bimodal de la cuenca del Paute.

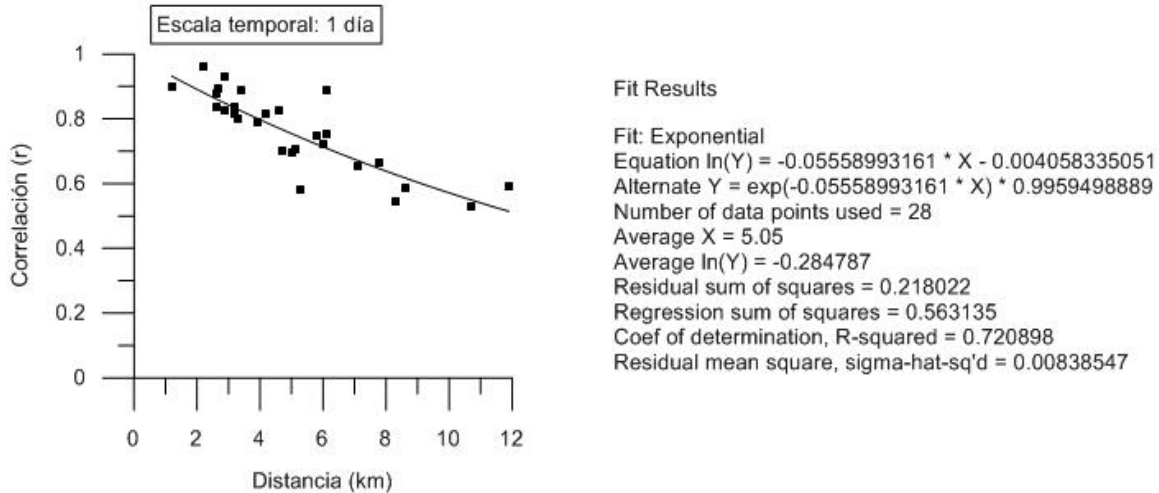


Figura 5. Correlograma a escala temporal diaria

Teniendo en cuenta únicamente valores altos de Pearson (mayores a 0.8) se puede identificar que estos se encuentran distribuidos de una manera especial. Como se puede visualizar en el figura 6, existen tres relaciones: La primera se encuentra en la parte oeste de la ciudad, donde las estaciones CA, CE y QB poseen en promedio un $r = 0.81$. La segunda se encuentra en la parte oeste-centro cuyas estaciones QB, CE, UA y UC tienen un promedio de $r = 0.87$. La tercera se localiza en el centro de la ciudad entre las estaciones UA, UC, ZM y BE con un promedio de $r = 0.87$.

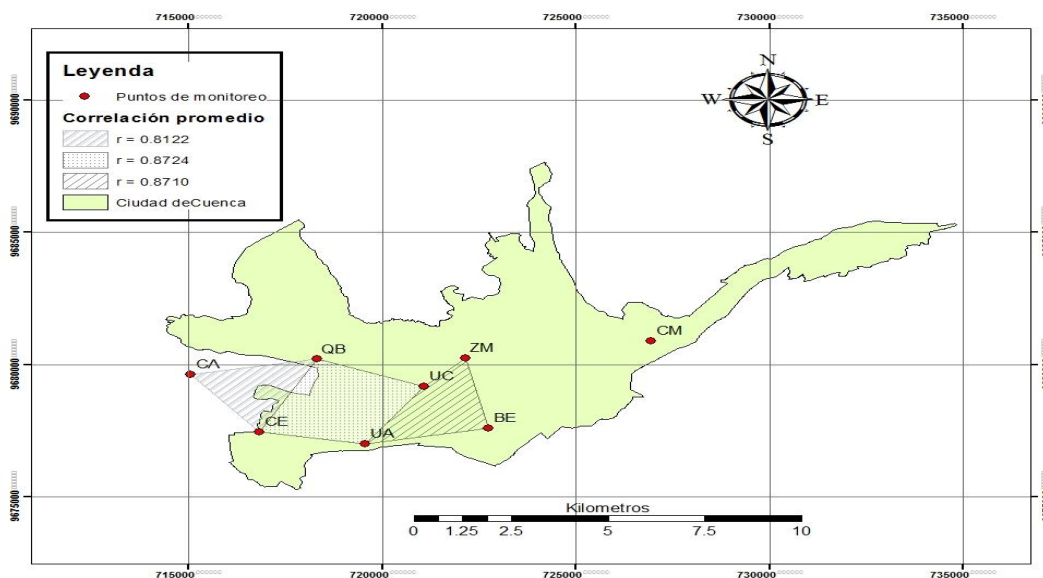


Figura 6. Correlaciones diarias superiores a 0.8



Las relaciones encontradas agrupando los valores altos de Pearson presentan una distancia inferior a 4 km referida anteriormente. Esta escala espacial que pueden tomar las tormentas se atribuye a efectos topográficos típicos que presenta la cuenca del Paute, debido a que la presencia de relieves muy irregulares modifica la humedad que entra en la cuenca de tal manera que produce estas características en la parte alta de la cuenca.

4.2.1.3 Escala temporal horaria

Esta escala temporal horaria nos demuestra que la precipitación se comporta de manera más errática a escalas más finas. Esto se debe a que si bien su correlación es todavía aceptable en la mayor parte del área de estudio, con valores de r superiores a 0.4 en el 85.7% de los casos, únicamente el 42.8% son superiores a 0.6.

La figura 7 se observa que los valores de Pearson a una escala temporal horaria disminuyen notablemente al compararlos con escalas superiores. La correlación horaria presenta valores que van desde los 0.22 hasta 0.79 con un promedio de 0.55.

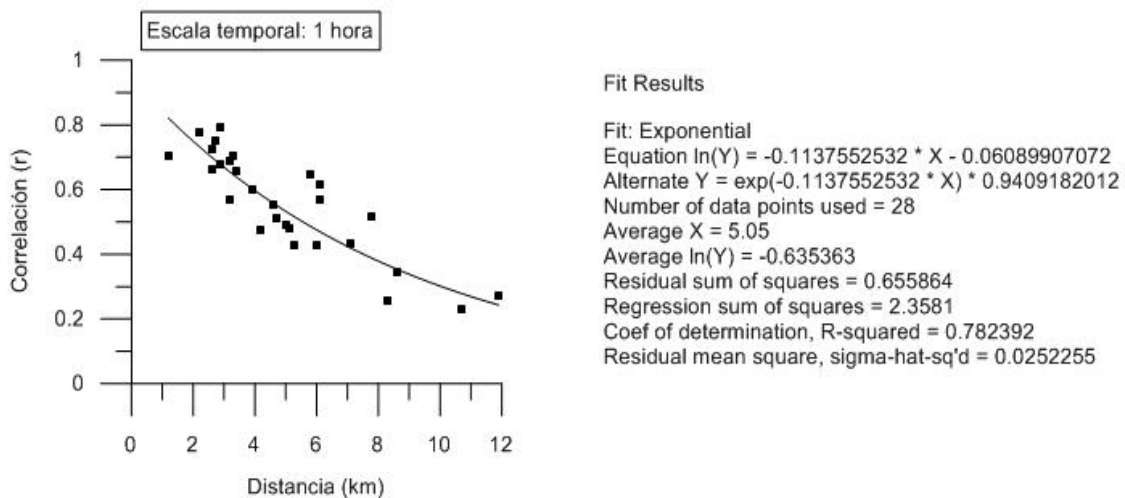


Figura 7. Correlograma a escala temporal horaria

Las relaciones encontradas a una escala diaria desaparecen parcialmente, debido a que: 1) No existen valores de Pearson superiores a 0.8, 2) Los mayores valores de Pearson (mayores a 0.7) a esta escala horaria delimitan una única zona entre las estaciones ZM, UC y BE (figura 8) y 3) La correlación entre estaciones distanciadas a 8 km es muy baja, por lo que es poco probable que la lluvia caiga simultáneamente en dos lugares separados por esta distancia.

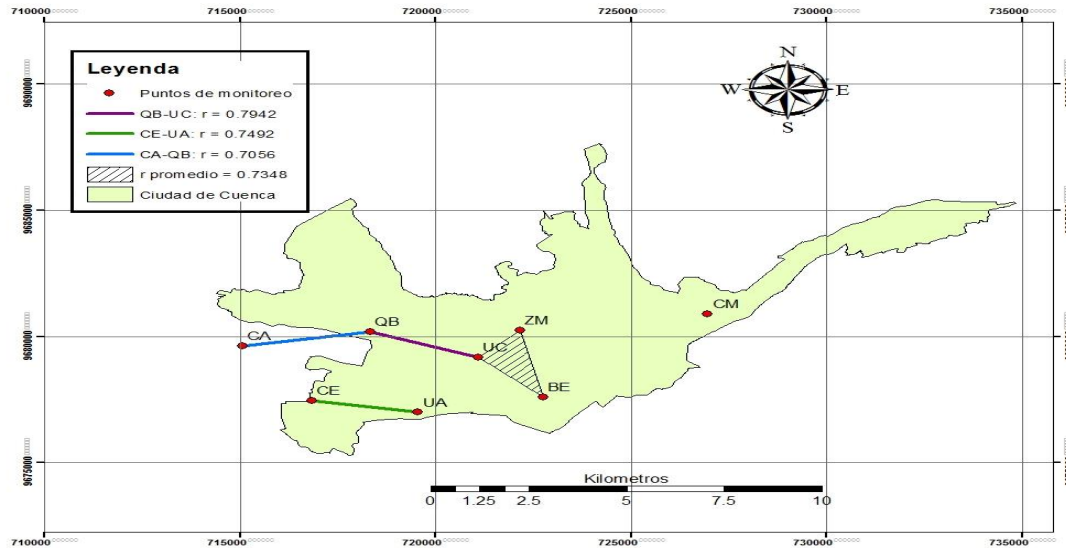


Figura 8. Correlaciones horarias superiores a 0.7

De acuerdo a las figuras 7 y 8, se observa que las mayores correlaciones se presentan a distancias menores a los 3 km. Estos resultados nos indican que la mayoría de celdas de lluvia que entran a la ciudad se desarrollan a la misma hora del día a una distancia inferior a los 3 km. Esta disminución en la escala espacial comparada con los 4 km encontrados en la escala temporal diaria se debe a que: 1) Los efectos del viento como la dinámica interna de la celda de lluvia, provocan que una misma celda de lluvia traslade cada hora la mayoría de su precipitación en distancias homogéneas de 3 km, lo cual nos permite inferir que la mayoría de las tormentas presentan velocidades inferiores a los 3 km/h; y 2) Puede existir eventos de corta duración (inferior a 1 h) que se den a escalas inferiores a los 3 km.

4.2.1.4 Escala temporal de 5 minutos

Por otro lado, no se pudo determinar la existencia de patrones a una escala temporal de 5 minutos, debido a que el 75% de los valores de Pearson están por debajo de 0.4. El promedio de la correlación en el área a esta escala es de 0.28 y sus valores fluctúan entre 0.51 y 0.09

Observando el correlograma de la figura 9 se puede concluir que la distribución de datos de lluvia a intervalos de 5 min es muy variable, demostrándonos que si bien la mayoría de eventos suceden a escalas de 3 a 4 km las intensidades subhorarias (5 min) pueden a ser muy variables en el espacio.

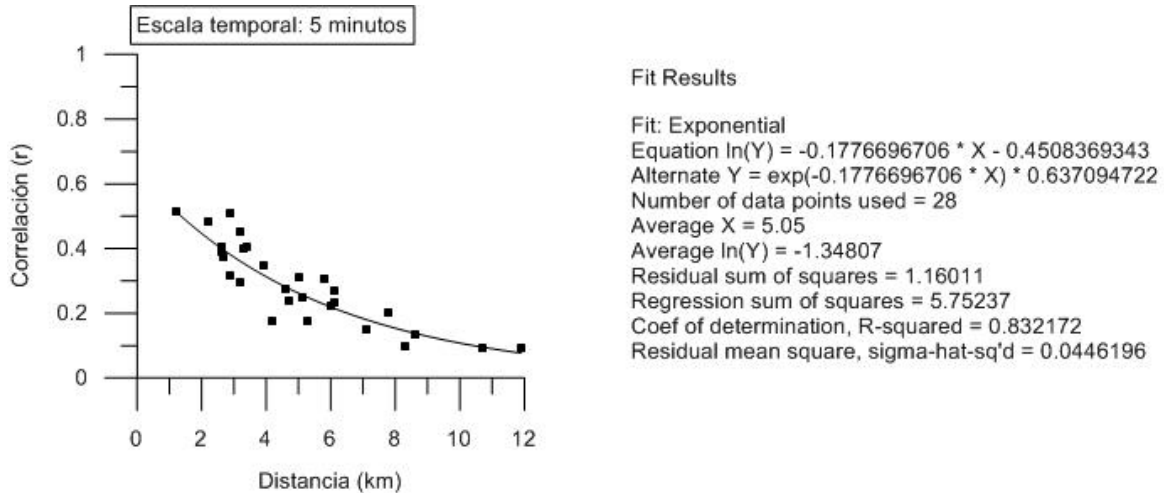


Figura 9. Correlograma a escala temporal de 5 minutos

En la figura 10 se presenta los 7 pares de estaciones que poseen los valores más altos de Pearson para esta escala (entre 0.4 y 0.6). Se observa que la estación QB mantiene una correlación aceptable con 4 estaciones cercanas a ella (CA, CE, UA y UC). Debido a esto, existe la posibilidad que el sector en el que se encuentra la estación QB ocurra lluvias provenientes de diferentes direcciones. Por otro lado, la zona delimitada por las estaciones ZM, UC y BE nos brinda la posibilidad de inferir que algunos eventos descargan su contenido de lluvia con intensidades similares en este sector.

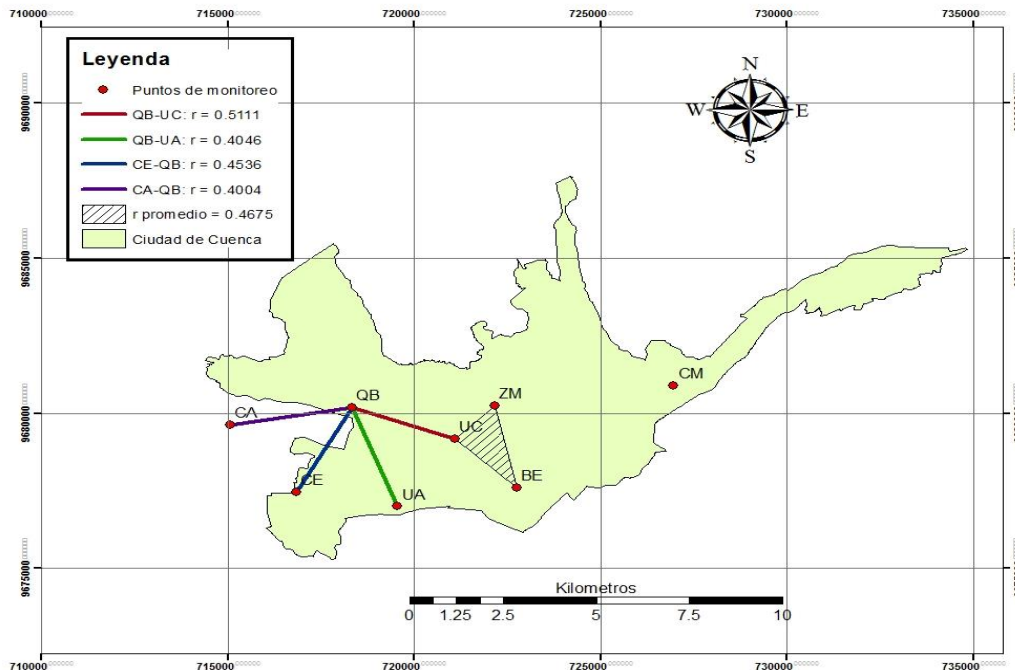


Figura 10. Correlaciones superiores a 0.4 para registros cada 5 minutos



Por otro lado, si a pesar de encontrar patrones específicos indicados en el párrafo anterior, es poco probable que en el área de estudio ocurra de manera simultáneamente lluvia de igual intensidad a distancias inferiores al 1 km debido a que la mayoría de correlaciones son inferiores a 0.4 y se encuentran distribuidos aleatoriamente en toda el área de estudio

Una vez analizadas todas las escalas temporales a las que fue aplicado Pearson, es notoria la existencia de una estación en particular que repetidamente posee las correlaciones más bajas. Para visualizar de mejor manera esta característica, se promediaron los valores de Pearson de cada estación (tabla 5).

Tabla 5. Valores promedio de Pearson para cada estación

Estación	Promedio de los valores de Pearson			
	Escala 5 min	Escala 1 h	Escala 1 d	Escala 10 d
CA	0.23	0.50	0.71	0.92
CE	0.29	0.59	0.77	0.92
QB	0.37	0.61	0.79	0.95
ZM	0.29	0.57	0.78	0.95
UA	0.28	0.55	0.79	0.95
UC	0.38	0.65	0.87	0.93
BE	0.31	0.59	0.76	0.99
CM	0.16	0.38	0.63	0.87
Promedio de cada escala	0.29	0.56	0.76	0.93

En la tabla 5 se observa que la estación CM ubicada al extremo Este de nuestra área de estudio siempre presenta los valores más bajos de correlación, este efecto puede ser debido a que esta estación es la que más alejada se encuentra del resto. Sin embargo, tomando en cuenta este aspecto podemos concluir que la estación presenta patrones diferentes al resto del área de estudio.

4.2.2 Análisis de la distribución espacial del volumen acumulado de lluvia

De acuerdo a lo indicado en la sección 3.3.2, se procedió a realizar un análisis del volumen acumulado de lluvia del periodo Abril - Julio de acuerdo a la observación de sus valores y a su grado de variabilidad mediante el coeficiente de variación (cv).

En la figura 11 se presenta la distribución del volumen acumulado de lluvia de las estaciones CA, CE, QB, ZM y CM.

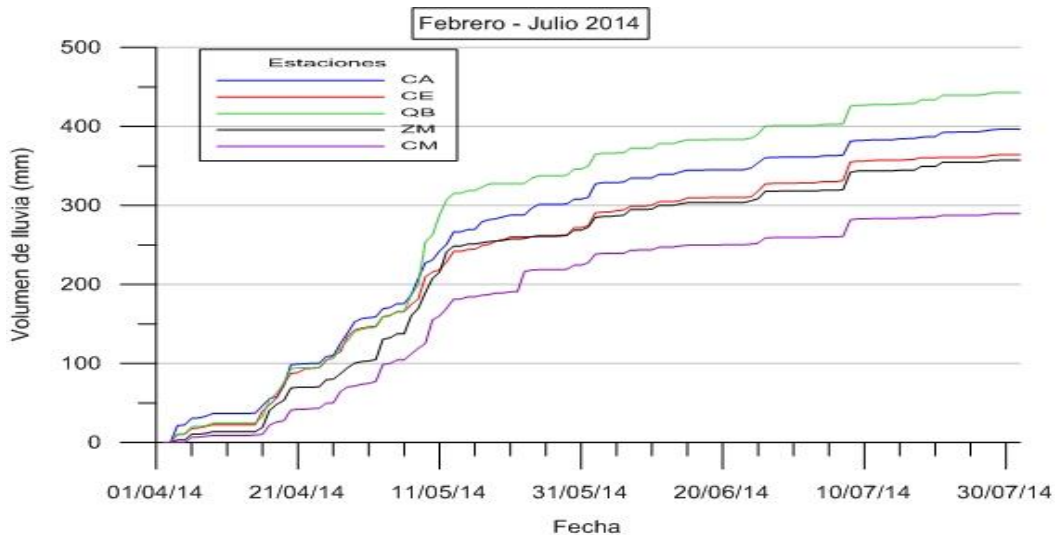


Figura 11. Volumen acumulado de lluvia para el periodo Abril – Julio de las estaciones CA, CE, QB, ZM y CM

De acuerdo al comportamiento de la curva del volumen acumulado de lluvia de las 5 estaciones (figura 11) se aprecia que estas se comportan de manera similar, lo cual fue corroborado por los altos coeficientes de correlación entre estaciones, sin embargo, su volumen fluctúa entre 289 y 442 mm (35.61%). Es importante observar que la mayor diferencia se da entre las estaciones QB y CM, las cuales se encuentra ubicadas en el extremo Oeste y Este de la ciudad respectivamente, con una distancia entre estaciones de 8.6 km. La estación CA ubicada al Oeste de la ciudad presenta el segundo valor más alto de lluvia (396 mm) y las estaciones CE y ZM ubicadas al oeste y centro de la ciudad presenta valores más reducidos (364 y 357 mm respectivamente).

Una vez observados estos valores de lluvia acumulada, es notoria la presencia de mayor cantidad de precipitación en la parte Oeste de la ciudad. Esta característica puede ocurrir debido al efecto orográfico que produce la presencia del macizo del Cajas en esta dirección, la cual se hace más notoria desde las zonas ubicadas cerca de la estación QB. Las nubes provenientes del Este, al encontrarse con la parte baja del macizo del Cajas comienzan a acumularse de mayor manera en la zona Oeste de la ciudad, produciendo el aumento de humedad en las nubes, las cuales posteriormente precipitan.

Antes de cuantificar la variación del volumen acumulado de lluvia mediante el coeficiente de variación, se observó que la distribución de los datos cambia en determinados periodos de tiempo, por lo que se procedió a separar en dos el periodo de estudio. Los dos periodos obtenidos se presentan en la figura 12.

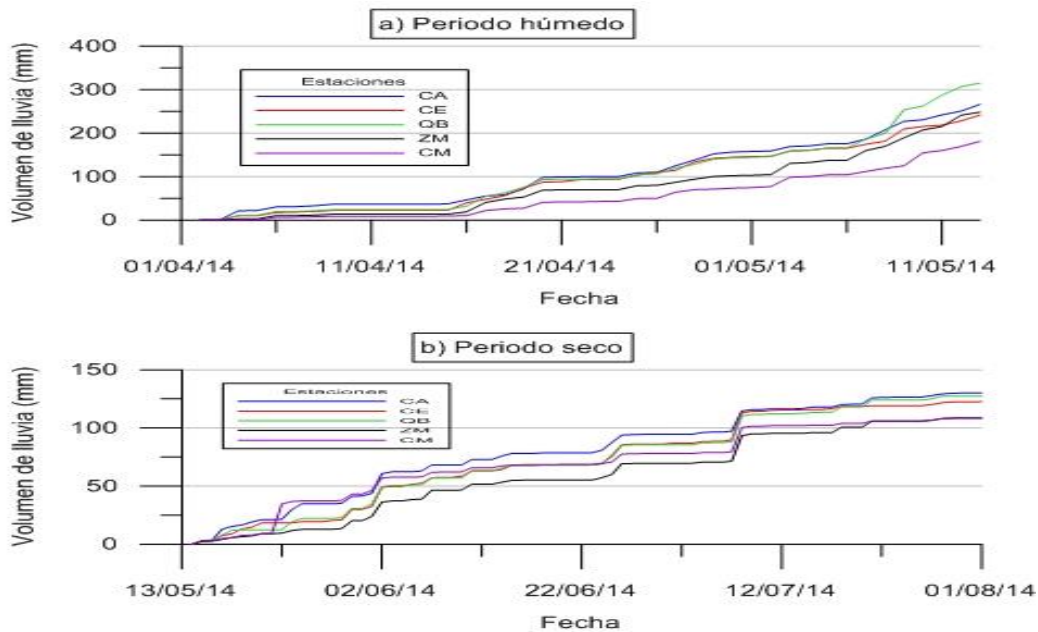


Figura 12. Volumen acumulado de lluvia para el periodo: a) Húmedo, entre 01/04/2014 y 13/05/2014 y b) Seco, entre 13/05/2014 y 31/07/2014

En la figura 12 se observa que el periodo húmedo es donde ocurre la mayor cantidad de precipitación (valores entre 181 y 315 mm) en comparación con el periodo seco (valores entre 108 y 130 mm). Esta diferencia entre periodos se debe al cambio estacional que se presenta en la zona de estudio (Céleri et al., 2007).

En la tabla 6 se presenta el coeficiente de variación expresado en porcentaje, tanto para cada periodo de tiempo como para el periodo completo de estudio.

Tabla 6. Coeficiente de variación

Periodos analizados	Cv (%)
Periodo húmedo (01/04/2014 - 13/05/2014)	19.24
Periodo seco (13/05/2014 - 31/07/2014)	8.73
Periodo completo (Abril - Julio)	15.19

Como se puede observar en la tabla 6, el área de estudio presenta una variación del 15.19% en su volumen acumulado de lluvia en el periodo de Abril a Julio, el cual es debido a efectos orográficos mencionado anteriormente. Sin embargo, se observa que una mayor variación (19.21%) se da en el periodo húmedo en comparación con el periodo seco (8.73%). De acuerdo a las curvas presentadas en la figura 12, existe mayor variación en el periodo húmedo debido a que los eventos de lluvia se distribuyen en diferente cantidad para cada estación, lo que

nos lleva a concluir que los meses lluviosos son los que se encuentra más afectados por la convectividad de las zonas aledañas.

4.3 Análisis del comportamiento de tormentas

Debido a que la zona de estudio presenta intensidades muy elevadas (desde 50.29 mm/h hasta 113.02 mm/h en 5 minutos) y a la gran importancia de estas intensidades en la generación de escorrentía en la urbe, se presenta en la figura 13 la intensidad máxima encontrada a diferentes escalas temporales para cada estación durante el periodo Febrero – Julio de 2014.

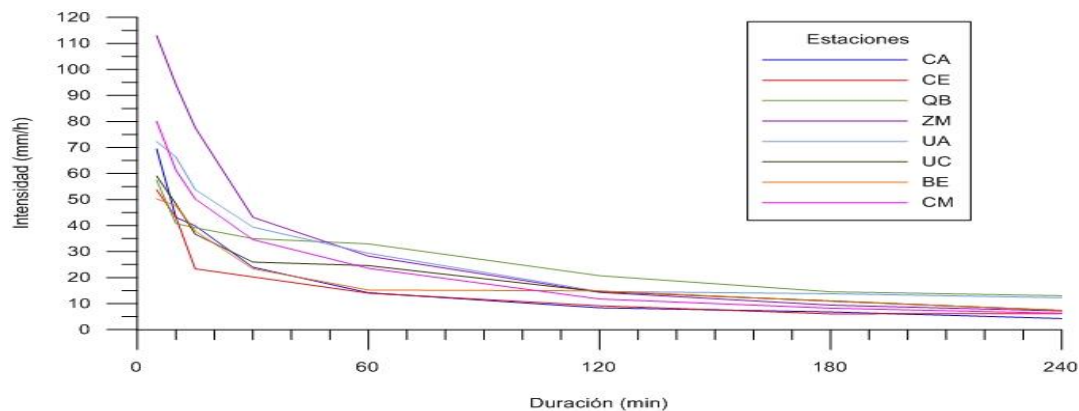


Figura 13: Intensidades máximas para intervalos de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180 y 240 min

En la figura 13 se observa que las intensidades máximas para una duración inferior a los 15 min presentan grandes diferencias en sus valores que pueden ir desde los 62.73 mm/h en 5 min hasta 54.33 mm/h en 15 min. Esta gran variación en las intensidades máximas se debe principalmente a un evento extremo ocurrido en la estación ZM el 15/03/2014; sin embargo, al omitir los valores de la estación ZM persiste una variación significativa con diferencias que pueden ir desde los 30.48 mm/h hasta los 25.55 mm/h.

Por otra parte, la diferencia entre las intensidades máximas para una duración superior a los 30 min son inferiores a los 22.91 mm/h. Es importante notar que a partir de los 180 min esta diferencia es mínima, con un valor aproximado a los 8 mm/h.

Si bien estos resultados pertenecen a un corto periodo de tiempo, reflejan de manera preliminar que las intensidades máximas en el área de estudio pueden variar significativamente, lo cual resulta muy importante al momento de evaluar el sistema de alcantarillado pluvial.

Como se indicó en la sección 3.4, se elaboraron las curvas de excedencia para cada estación a una escala temporal de 5 minutos, sin embargo, debido a la gran cantidad de registros con valores 0 (entre 96 y 97% de los datos), se procedió a tomar en cuenta únicamente los valores superiores a 0 para la gráfica.

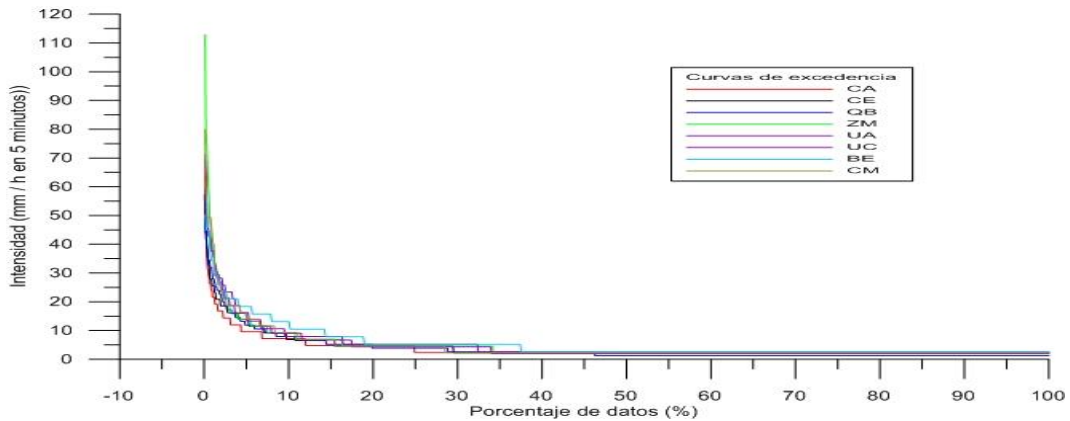


Figura 14. Curvas de excedencia para intervalos de 5 minutos para valores superiores a 0 mm

En la figura 13 se observa que los eventos de lluvia presentan valores inferiores a 6 mm/h en 5 minutos aproximadamente entre el 80 y 87% de los casos, lo que indica que la mayoría de la lluvia es moderada y baja, sin embargo, existen valores muy altos lo que puede sugerir la presencia de celdas de lluvia altamente convectivas.

En la tabla 7 se presenta los eventos seleccionados a partir de la máxima intensidad en 5 minutos registrada para cada punto monitoreado (ver sección 3.4), conjuntamente con su duración y el volumen máximo registrado.

Como se observa en la tabla 7 los eventos seleccionados ocurren en fechas diferentes debido a que las máximas intensidades en 5 minutos (figura 14) registradas para cada estación no se desarrollan en un mismo evento de lluvia a excepción de las estaciones QB y UA que presentan sus intensidades máximas en un mismo evento. La nomenclatura utilizada para identificar los eventos seleccionados hace referencia a la estación en la que se registró la mayor intensidad; por ejemplo el evento E-CA, es el evento seleccionado a partir de la máxima intensidad en 5 minutos registrada en la estación CA.

Tabla 7. Eventos de lluvia seleccionados

Eventos	Duración	Fecha	Vol. Max. (mm)
E-CA	1h 20min	03/04/2014	14.38
E-CE	1h 35min	02/05/2014	23.15
E-QB-UA	3h 20min	08/05/2014	53.12
E-ZM	1h 30 min	15/03/2014	28.65
E-UC	3h 25 min	16/04/2014	16.12
E-BE	3h 20 min	11/05/2014	32.65
E-CM	2h 35min	25/03/2014	24.75



En la figura 15 se presenta las series de tiempo para cada evento seleccionado anteriormente. Debido a vacíos de datos en los registros, existen ciertas estaciones que no presentan información para determinado evento. De acuerdo a lo que se observa en la figura 15 se puede identificar diferentes patrones en los eventos extremos seleccionados.

El primer patrón encontrado se da en los eventos E-CA y E-ZM (figura 15 (a, b)). En estos eventos se puede observar que en una única estación se presenta los valores más altos de lluvia, lo que nos indica la presencia de celdas muy localizadas de lluvia que pueden ser atribuidas a efectos altamente convectivos provenientes de zonas aledañas.

Las figuras 15 c, d y e, presentan el segundo patrón encontrado. Estos eventos se producen con altos valores de lluvia en diferentes estaciones, con la particularidad que los valores de una estación se solapan con la estación continua. De esta manera, los eventos empiezan en la estación CM y avanzan a las estaciones centrales, para posteriormente reducir su intensidad en las estaciones ubicadas al oeste de la ciudad. Este patrón nos da un claro entendimiento del movimiento que pueden presentar los eventos de lluvia.

Para finalizar, los eventos E-QB-UA y E-BE (figura 15 (e y f)), presentan patrones más aleatorios que el resto. En el evento E-QB-UA se observa que el evento inicia en la estación UA el cual posteriormente se traslada al noroeste a las estaciones QB, CE y CA, sin embargo, una vez el evento empieza a decaer en la estación QB, se produce otro pico de lluvia tanto en la estación ZM, BE y QB, lo cual puede indicar la ocurrencia de diferentes focos de lluvia en un mismo evento, debido a la entrada de más humedad al sistema, presentando características convectivas y estratiformes a la vez. .

Por otro lado, el evento E-BE presenta características similares al primer patrón discutido, sin embargo, la presencia de lluvia con bajas intensidades que unen a los dos picos de lluvia ubicados en las estaciones UA y BE puede ser el resultado de una celda constante de lluvia con diferentes focos parecido a lo presentado en el párrafo anterior.

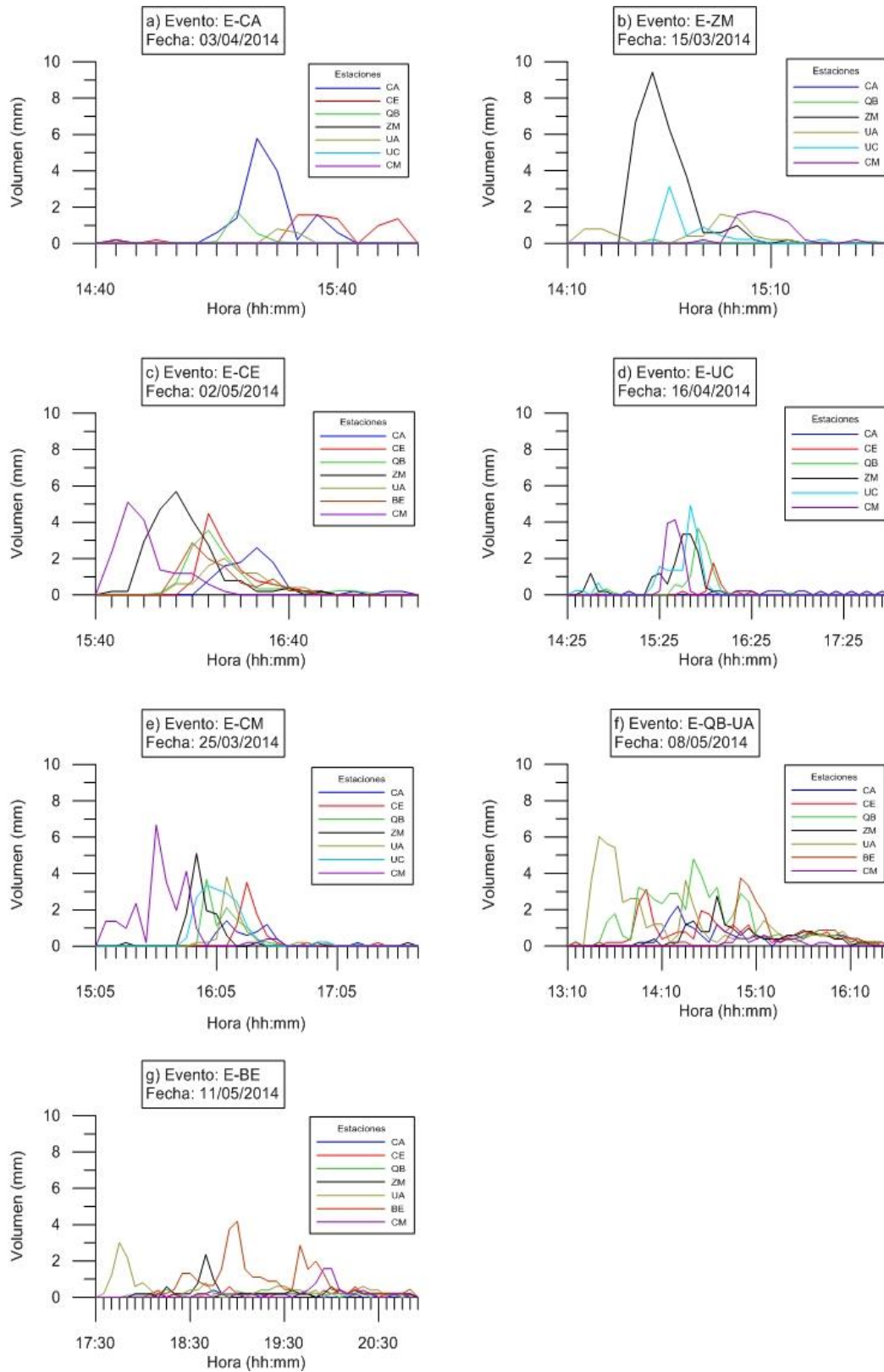


Figura 15. Distribución de los eventos de lluvia seleccionados a intervalos de 5 minutos



5 Conclusiones

Este estudio tuvo por objeto analizar la variabilidad espacio temporal de la precipitación en la ciudad de Cuenca durante el periodo Febrero – Julio de 2014.

En primer lugar se obtuvo información de este periodo de tiempo mediante la implementación de un sistema de monitoreo que consistió en la instalación de 8 equipos pluviométricos con tecnología de balancín. Posteriormente se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para encontrar patrones espaciales a diferentes escalas temporales (5 min, 1h, 1d, 10d). Por otro lado, se cuantificó la variabilidad espacial de la precipitación mediante la observación de su volumen acumulado y su coeficiente de variación. Finalmente se determinó eventos extremos para identificar diferentes patrones en su distribución.

Como se esperaba, al disminuir la escala de agregación temporal de los datos (de 10 días a 5 minutos) se presenta un notable descenso en los valores de correlación. De esta manera, la escala diaria y de 10 días presentan correlaciones muy aceptables con un r promedio de 0.76 y 0.93 respectivamente; sin embargo, para la escala horaria y de 5 minutos las correlaciones disminuyen drásticamente con un r promedio de 0.56 y 0.29 respectivamente. Estos resultados indican que para datos de lluvia con una escala temporal superior a la diaria un solo equipo pluviométrico puede ser representativo en el área de estudio; sin embargo, para escalas temporales inferiores a la diaria resulta necesaria una mayor densidad de equipos.

A escalas superiores a los 10 días el comportamiento de la precipitación es altamente homogéneo ($r > 0.77$), por lo que la zona se ve afectada por los mismo patrones estacionales durante este periodo del año. La desagregación de la escala temporal de 10 días a escalas inferiores nos brindó la posibilidad de encontrar diferentes tipos de lluvias en el área de estudio. La escala temporal diaria identificó 2 patrones. El primero se encuentra en una escala espacial de 8 km con correlaciones mayores a 0.6, el cual demuestra los efectos convectivos a mesoescala y la forma de valle que presenta el área; el segundo se encuentra en una escala espacial de 4 km con correlaciones mayores a 0.8, el cual obedece a los efectos típicos que produce la orografía de toda la cuenca del Paute. A su vez, la escala horaria reporta correlaciones superiores a 0.7 a distancias inferiores a los 3 km, lo que demuestra: 1) Eventos de corta duración a una escala espacial inferior a los 3 km y 2) El movimiento de las tormentas es inferior a los 3 km/h. De igual manera, a una escala temporal de 5 min la correlación máxima encontrada fue de 0.5 a una distancia de 1 km, lo cual es el producto de celdas de lluvia convectivas aisladas.

Si bien la correlación de los eventos puede ser muy elevada a escalas superiores a la diaria, el área presenta una diferencia de 35.61% en el volumen acumulado de lluvia, con un coeficiente de variación de 15.19% durante el periodo Abril – Julio 2014, que en mayor parte se debe a la presencia de la época lluviosa en este periodo (cv del periodo húmedo = 19.23%).



La mayor diferencia de volumen encontrado es de 153 mm entre las estaciones CM (ubicada al Este) y QB (ubicada al Oeste), lo cual concuerda con las menores correlaciones encontradas para la estación CM en todas las escalas temporales analizadas, por lo que es posible determinar que esta zona del área de estudio presenta patrones diferentes.

Además, la mayor cantidad de lluvia encontrada en la estación QB hace notorio un mayor efecto orográfico en la precipitación a partir de esta zona; lo cual, agregando las correlaciones aceptables ($r > 0.4$, a una escala temporal de 5 min) encontradas para esta estación con las estaciones más cercanas, convierte a esta área en un punto con mayor ocurrencia de lluvia, que a su vez, aumenta el riesgo a inundaciones.

Por otra parte, los eventos extremos analizados presentaron 3 a 4 formas de distribuirse en el área de estudio, 1) Los eventos del 03/04/2014 y 15/03/2014 se presentan con valores muy altos de lluvia (picos de 69.4 y 113 mm/h en 5 minutos respectivamente) en un solo punto de la ciudad, típico de efectos convectivos, 2) Los eventos 02/05/2014, 16/04/2014 y 25/03/2014 inician en la estación CM y paulatinamente se trasladan a las estaciones cercanas en dirección Oeste, lo cual demuestra movimiento de tormentas hacia la ciudad, y 3) Los eventos 08/05/2014 y 11/05/2014 presentan características más aleatorias, sin embargo, la entrada de lluvia en los dos casos se da por la parte sur de la ciudad (estación UA) que posteriormente se expande y genera nuevos picos de lluvia propio de tormentas con características convectivas y estratiformes a la vez.

Estos resultados dan a conocer que a pesar de mantener patrones generales en la mayor parte del área de estudio pertenecientes a los efectos orográficos y topográficos típicos de la cuenca hídrica del Paute; los relieves que bordean la ciudad pueden generar gran variabilidad en los eventos, tanto en intensidades como la dirección en la que entran a la ciudad.

6 Recomendaciones

La tesis abordó el análisis de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en la ciudad de Cuenca, sin embargo se necesita de mayores esfuerzos para caracterizar la zona de estudio adecuadamente.

Este estudio se realizó durante el periodo Febrero – Julio, sin embargo como se presentó en los resultados la mayor variación en el volumen acumulado de lluvia se da en el periodo lluvioso, por lo que se recomienda ampliar el periodo de estudio y analizar cómo afecta en la correlación los cambios estacionales.

El uso del coeficiente de correlación de Pearson nos da un primer acercamiento a la relación existente de la precipitación en el espacio, sin embargo, es importante fijar la distancia en que la variable presenta características diferentes para



determinar patrones espaciales con mayor precisión, por lo que se recomienda el uso de técnicas geostatísticas en posteriores estudios.

Los resultados observados en los patrones espaciales de la precipitación nos demuestran que se debe tener cuidado al momento de realizar cualquier estudio con datos de lluvia, debido a que de acuerdo a la escala temporal en que se trabaje, los datos pueden ser representativos hasta ciertas distancias.

Por otro parte, se recomienda aumentar el área de cobertura del monitoreo debido a que: 1) La estación CM ubicada al este de la ciudad presenta características notablemente diferentes, por lo que es de interés validar y determinar el área que se encuentra influenciada por estas características; y 2) Como se observó en los eventos extremos, la precipitación puede empezar en diferentes zonas de la ciudad, por lo que se recomienda identificar específicamente la procedencia de esta humedad.

Los resultado a una escala temporal intradiaria presentan una alta variabilidad en la zona, por lo que se recomienda realizar un análisis específico de la variabilidad de las intensidades, ya que es un factor indispensable para modelos hidrológicos urbanos.



REFERENCIAS

- Abad, I. O. (2014). *Estimación de precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográfica*. Universidad de Cuenca.
- Andrés, M., Tomás, C., & de Pablo, F. (2000). Spatial patterns of the daily non-convective rainfall in Castilla y León (Spain). *International Journal of Climatology*, 20, 1207–1224.
- Berndtsson, R., & Niemczynowicz, J. (1988). Spatial and temporal scales in rainfall analysis - some aspects and future perspectives. *Journal of Hydrology*, 100, 293–313.
- Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J.-D., & Obled, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 166–179. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.002
- Buytaert, W., Céleri, 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. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.02.031
- Cáceres, L., Núñez, A., Romero, R., & Viteri, S. (2011). Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático.
- Casas, M. C., & Alarcón, M. (1999). *Meteorología y clima* (p. 155).
- Céleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space – time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21, 3316–3327. doi:10.1002/hyp
- El Tiempo. (2013, March 27). Graves inundaciones en Cuenca dejan al menos un muerto. Retrieved September 08, 2014, from <http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/93711-graves-inundaciones-en-cuenca-dejan-al-menos-un-muerto/>
- El Tiempo. (2014, January 28). Fuerte lluvia y granizada en Cuenca. Retrieved September 08, 2014, from <http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/136853-fuerte-lluvia-y-granizada-en-cuenca/>
- Emmanuel, I., Andrieu, H., Leblois, E., & Flahaut, B. (2012). Temporal and spatial variability of rainfall at the urban hydrological scale. *Journal of Hydrology*, 430-431, 162–172. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.02.013



- Goodrich, D. C., Faurès, J.-M., Woolhiser, D. A., Lane, L. J., & Sorooshian, S. (1995). Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. *Journal of Hydrology*, 173(1–4), 283–308. doi:10.1016/0022-1694(95)02703-R
- Grupo TYPASA. (2004). *Estudios y Diseños Finales de los Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento para la Ciudad de Cuenca (Ecuador). II ETAPA. ANÁLISIS Y SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE ESCORRENTIA PLUVIAL INCONTROLADA EN LA CIUDAD DE CUENCA .*
- Habib, E., & Krajewski, W. F. (2001). Estimation of Rainfall Interstation Correlation. *Journal of Hydrometeorology*, 2(1984), 621–629.
- Jebari, S., Berndtsson, R., Uvo, C., & Bahri, A. (2007). Regionalizing fine time-scale rainfall affected by topography in semi-arid Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 52(6), 1199–1215. doi:10.1623/hysj.52.6.1199
- Krajewski, W. F., & Ciach, G. J. (2003). An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. *Hydrological Sciences - Journal - Des Sciences Hydrologiques*, 48(April), 151–162.
- Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., De Bievre, B., Borja, P., & Ochoa, B. (2012). *Páramos Andinos. Ecología, hidrología y suelos de páramo.*
- Martin-Vide, J. (2004). Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, 24(8), 959–971. doi:10.1002/joc.1030
- Padrón, F. (2013). *Análisis de la estructura de la lluvia de páramo.* Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/519>
- Pedersen, L., Jensen, N. E., Christensen, L. E., & Madsen, H. (2010). Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. *Atmospheric Research*, 95(4), 441–454. doi:10.1016/j.atmosres.2009.11.007
- Pourrut, P., Rovere, O., Romo, I., & Villacrés, H. (1995). Clima del Ecuador. In P. Pourrut (Ed.), *El agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía* (pp. 13–26). Quito, Ecuador: Corporación Editora Nacional. Colegio de Geógrafos del Ecuador. Estudios de geografía. Retrieved from <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010014827>
- Rodríguez, E., Camacho, L., Villarreal, J., Jiménez, A., Santos, A. C., & Duarte, M. del P. (2008). Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en una microcuenca urbana, Bogotá, Colombia. *Cuadernos de Geografía -*



Revista Colombiana de Geografía, 17, 139–153. Retrieved from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/viewFile/10924/11582>

- Rodríguez, R., Capa, Á., & Lozano, A. (2004). Meteorología y Climatología. In *Meteorología y Climatología*.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2013). Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017.
- Vaes, G., Clemens, F., Willems, P., & Berlamont, J. (2002). Design Rainfall for Combined Sewer System Calculations: Comparison between Flanders and the Netherlands. In *Global Solutions for Urban Drainage* (pp. 1 – 16). Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40644\(2002\)245](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40644(2002)245)
- Vaes, G., Willems, P., & Berlamont, J. (2001). Rainfall input requirements for hydrological calculations. *Urban Water*, 3(1-2), 107–112. doi:10.1016/S1462-0758(01)00020-6
- Vallejo, C. (2014). *Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5494>

**ANEXOS**

Como se explicó en la sección 4.2.1 se obtuvo una matriz de Pearson para cada escala temporal analizada las cuales se presentan a continuación en la tabla 8, 9, 10 y 11.

Tabla 8. Matriz de Pearson con escala temporal de 10 días

Estaciones	CA	CE	QB	ZM	UA	UC	BE	CM
CA	1							
CE	0.9671	1						
QB	0.9191	0.8998	1					
ZM	0.8848	0.8694	0.9946	1				
UA	0.9519	0.9749	0.9830	0.9874	1			
UC	0.8776	0.9571	0.9674	0.9922	0.9030	1		
BE	0.9821	0.9779	0.9935	0.9910	0.9985	0.9925	1	
CM	0.8247	0.7785	0.8810	0.9078	0.8811	0.8429	0.9613	1

Tabla 9. Matriz de Pearson con escala temporal de 1 día

Estaciones	CA	CE	QB	ZM	UA	UC	BE	CM
CA	1							
CE	0.8238	1						
QB	0.7972	0.8158	1					
ZM	0.6555	0.7506	0.7910	1				
UA	0.7035	0.8929	0.8898	0.8177	1			
UC	0.7220	0.8275	0.9315	0.8990	0.8774	1		
BE	0.6643	0.7499	0.6928	0.8354	0.8358	0.9608	1	
CM	0.5915	0.5262	0.5841	0.6986	0.5421	0.8881	0.5813	1

Tabla 10. Matriz de Pearson con escala temporal de 1 hora

Estaciones	CA	CE	QB	ZM	UA	UC	BE	CM
CA	1							
CE	0.6791	1						
QB	0.7056	0.6892	1					
ZM	0.4351	0.5694	0.5981	1				
UA	0.4814	0.7492	0.6580	0.4766	1			
UC	0.4252	0.5548	0.7942	0.7014	0.6626	1		
BE	0.5138	0.6445	0.4920	0.7263	0.5665	0.7770	1	
CM	0.2736	0.2296	0.3464	0.5118	0.2562	0.6165	0.4256	1



Tabla 11. Matriz de Pearson con escala temporal de 5 minutos

Estaciones	CA	CE	QB	ZM	UA	UC	BE	CM
CA	1							
CE	0.3163	1						
QB	0.4005	0.4537	1					
ZM	0.1486	0.2331	0.3489	1				
UA	0.2461	0.3734	0.4046	0.1746	1			
UC	0.2246	0.2761	0.5111	0.5138	0.3878	1		
BE	0.2031	0.3046	0.3088	0.4050	0.2973	0.4838	1	
CM	0.0916	0.0923	0.1364	0.2368	0.0999	0.2673	0.1751	1