

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:**

**INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERAS AMBIENTALES**

**TEMA:**

**EVALUACIÓN DE LOS UMBRALES DE PRECIPITACIÓN EXTREMA, SUS  
CONEXIONES CON VARIABLES METEOROLÓGICAS LOCALES Y  
TELECONEXIONES CON OSCILACIONES OCEÁNICAS EN LA CIUDAD DE  
QUITO.**

**AUTORAS:**

**YULISSA FERNANDA ROMERO ANDRADE  
ERIKA VANESSA TOPÓN ANCHAPAXI**

**TUTOR:**

**MARÍA SHEILA FABIOLA SERRANO VINCENTI**

**Quito, septiembre del 2021**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotras, Yulissa Fernanda Romero Andrade con documento de identificación N° 070608083-5 y Erika Vanessa Topón Anchapaxi con documento de identificación N°172421235-0 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del trabajo de titulación intitulado: EVALUACIÓN DE LOS UMBRALES DE PRECIPITACIÓN EXTREMA, SUS CONEXIONES CON VARIABLES METEREOLÓGICAS LOCALES Y TELECONEXIONES CON OSCILACIONES OCEÁNICAS EN LA CIUDAD DE QUITO, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERAS AMBIENTALES, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autoras nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....  
Yulissa Fernando Romero Andrade  
070608083-5

.....  
Erika Vanessa Topón Anchapaxi  
172421235-0

Quito, septiembre de 2021

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTORA**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo Experimental, EVALUACIÓN DE LOS UMBRALES DE PRECIPITACIÓN EXTREMA, SUS CONEXIONES CON VARIABLES METEREOLÓGICAS LOCALES Y TELECONEXIONES CON OSCILACIONES OCEÁNICAS EN LA CIUDAD DE QUITO realizado por Yulissa Fernanda Romero Andrade y Erika Vanessa Topón Anchapaxi, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre de 2021



.....

María Sheila Fabiola Serrano Vincenti

CI. 1710267574

## **DEDICATORIA**

Este trabajo primero lo dedico a Dios, porque sin el hoy nada de esto sería posible, por permitirme culminar con esta etapa de mi vida que parecía tan interminable, porque sé que fue el quien me levantaba cuando sentía que no podía más.

A mi madre, la persona más importante en mi vida, por motivarme a cumplir cada una de mis metas y por elevar siempre una oración al cielo pidiendo a Dios que me cuide. A ella, que con todo el esfuerzo del mundo hoy me trajo hasta aquí.

A mi padre, por estar presente en cada uno de mis logros y fracasos. Por su apoyo incondicional, por velar y cuidar de mí y de mis hermanos siempre.

A mis hermanos y hermanas, por ser un pilar fundamental en mi vida. Por confiar en mí y estar siempre a mi lado apoyándome en todo momento sin importar lo difícil que fuese, ellos me enseñaron a ser perseverante y a luchar por cumplir mis sueños.

A mis tíos/as y a toda mi familia por echarme una mano siempre que lo necesite.

A mis amigos, a todos ellos, por su cariño y por los todos los gratos momentos compartidos.

Yulissa

Al Padre celestial ya que sin su bendición no habría podido cumplir ninguna meta, me dio las fuerzas necesarias para seguir y me guio por el camino correcto al igual que siempre ha sido mi bastón.

A mi querida madre Wilma, por ser una mujer increíble que me enseñó a luchar y ser buena persona a pesar de las circunstancias de la vida.

A mi padre Fausto, ya que siempre ha sido mi ejemplo de constancia y responsabilidad.

A mi hermana Karen, a quien le dedico en especial esta investigación como muestra de que el trabajo duro y la perseverancia puede vencer cualquier cosa.

A mis abuelitos Carlos y Laura, por siempre quererme y darme su bendición donde quiera que estén.

A mi enamorado Geovanny, por demostrarme que el trabajo dura trae su recompensando al final del día.

A mi tía Nancy, por tener mucha fe en mí y creer en mi potencial siempre.

A la MSc. Sheila Serrano, por ayúdame en este trabajo y ser una persona excepcional y un increíble ser humano.

A todos los profesores que formaron parte de mi vida universitaria ya que cada uno de ellos dejaron una enseñanza en mi vida.

Erika

## AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios porque sé que él me trajo hasta aquí, me dio fuerzas y valentía para afrontar cada prueba que se me cruzo en este camino, y así hoy alcanzar una de mis metas de vida.

A mis padres, a mis hermanos, y a toda mi familia que supo apoyarme en cada momento y que con sus palabras me inspiraron a seguir adelante siempre, gracias por su confianza. Ustedes son la mayor inspiración en mi vida.

A mi compañera de tesis Erika, una persona increíble y mi gran amiga. Por su apoyo incondicional, por el esfuerzo y dedicación que le puso a esta investigación, y por confiar en mí. ¡Gracias infinitas!

A las personas que hicieron que mi hogar no se sintiera tan lejos, gracias por regalarme un espacio en su familia, por el cariño que me brindaron siempre, los llevo en mi corazón.

A mis amigos, los de antes, los de ahora y los de siempre, por su amistad incondicional y sus buenos deseos hacia mí. En especial a Dayana, Lucero, Fabricio, Eddy, Andrés, Bismarck, Sandra, Amanda, Marlon, Henry con quienes eh compartido gratos momentos.

A nuestros compañeros Esteban y Karen, por apoyarnos en este trabajo de investigación.

A nuestra tutora, Sheila Serrano, una gran persona y extraordinaria profesional, por guiarnos y apoyarnos en este proceso de investigación. Y a los docentes de la carrera de

Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana por todos los conocimientos compartidos.

Y a todos los que creyeron en mí y de alguna u otra manera me motivaron a continuar. GRACIAS.

Yulissa.

Al terminar este trabajo quiero dar gracias en primera instancia a Dios ya que me ha dado la fortaleza y sabiduría necesaria para culminar un objetivo más en mi vida y por permitirme culminar esta etapa gozando de salud y energía.

A mí misma, por nunca rendirme pese a las dificultades y ser perseverante a lo largo de este camino.

A mis padres que han sido una guía fundamental en este camino, ya que siempre me apoyaron y nunca me cortaron las alas para salir adelante sino más bien me dieron todas las herramientas necesarias para cumplir mis sueños no me queda más que decirle un Dios les pague de todo corazón por todo lo que han hecho por mí.

A mi hermana que siempre ha estado en todo momento apoyándome y dándome ánimos para seguir, ya que ella también es un ejemplo de perseverancia.

A mi enamorado ya que siempre ha estado conmigo en los momentos buenos y malos dándome su mano de apoyo y alentándome siempre a seguir y nunca rendirme.

A mi amiga y compañera de investigación Yulissa, gracias por el conocimiento y dedicación brindada en todo este tiempo al igual que por las bonitas experiencias que hemos vivido a largo de toda esta etapa.

A todos mis amigos que tuve el agrado de conocer en la universidad en especial a, Evelin, Lucero, Sandra, Henry, Marlon, Andrés, David y Bismarck, por regalarme su conocimiento, tiempo y amistad.

A nuestros compañeros Esteban y Karen, por apoyarnos en este trabajo de investigación.

A la MSc. Sheila Serrano, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores. Y por compartir todos sus increíbles conocimientos en esta investigación.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por haberme brindando los conocimientos necesarios para ser una buena profesional.

Para finalizar no me queda más que decir gracias, a cada una de las personas que creyeron en mí y que formaron parte de esta bonita etapa de mi vida. Ya que siempre les llevare en mi corazón.

Erika

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTORA .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	viii
ÍNDICE DE CUADROS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUCCION .....	1
1.1. Problema .....	1
1.2. Delimitación.....	1
1.3. Pregunta de investigación.....	3
1.4. Objetivos General y Específicos.....	3
1.4.1. <i>Objetivo General</i> .....	3
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
1.5. Hipótesis.....	4
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	5
2.1. Meteorología y Climatología.....	5
2.2. Clima del Ecuador .....	5
2.3. Variables Climáticas.....	12
2.3.1. <i>Presión Barométrica</i> .....	12
2.3.2. <i>Temperatura</i> .....	13
2.3.3. <i>Viento</i> .....	13
2.3.4. <i>Humedad Relativa</i> .....	14
2.3.5. <i>Precipitación</i> .....	15
2.4. Precipitación en Ecuador.....	17
2.5. Precipitaciones Extremas.....	17
2.5.1. <i>Conexiones entre las Lluvias Extremas y las Oscilaciones Océánicas</i> .....	19

2.5.2.	<i>Comportamiento climático del Ecuador durante los eventos del Niño</i> .....	19
2.5.3.	<i>ONI (Oceanic Index for ENSO)</i> .....	20
2.5.4.	<i>Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)</i> .....	22
2.6.	Lluvias Extremas en la Ciudad de Quito .....	24
2.6.1.	<i>Causas de las Lluvias Extremas en Quito</i> .....	24
2.7.	Herramientas Utilizadas para el Análisis Climatológico .....	25
2.7.1.	<i>RStudio</i> .....	25
2.7.2.	<i>Wavelets</i> .....	25
2.7.3.	<i>WaveletComp</i> .....	25
2.7.4.	<i>Análisis de Wavelets de Series Univariadas</i> .....	26
2.7.5.	<i>Análisis de Wavelets de Series Bivariadas</i> .....	28
2.7.6.	<i>Interpolación de Kriging Utilizando ArcGIS</i> .....	30
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
3.1.	Área de Estudio .....	31
3.2.	Manejo de datos .....	33
3.3.	Obtención de Datos .....	37
3.4.	Transformación y Validación de Datos .....	37
3.5.	Control de Calidad.....	39
3.6.	Evaluación de Umbrales de Precipitación Extrema .....	41
3.6.1.	<i>Cálculo de Percentiles por Estación</i> .....	41
3.6.2.	<i>Representación Gráfica de los Percentiles 90 (lluvia fuerte) y 99 (lluvia extrema) Mediante la Herramienta de ArcGIS</i> .....	41
3.7.	Análisis Interanual, Estacional y de Ciclo Diurno de la Precipitación .....	41
3.8.	Determinación de la Correlación entre la Precipitación y las otras Variables Meteorológicas.....	42
3.9.	Análisis de Relación por Evento Extremo frente a otras Variables Meteorológicas .....	43
3.10.	Análisis de Wavelets en Correlación y Correlación Cruzada.....	45
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	47
4.1.	Histogramas de Frecuencia.....	47
4.3.	Representación Gráfica Mediante la Interpolación de los Percentiles 90 y 99 Obtenidos de Datos Horarios de las Estaciones de la REMMAQ .....	51
4.4.	Análisis Interanual, Estacional y de Ciclo Diurno de la Precipitación .....	53
4.4.1.	<i>Análisis Interanual</i> .....	53
4.4.2.	<i>Análisis Estacional</i> .....	58

4.4.3.	<i>Análisis de Ciclo Diurno</i> .....	63
4.5.	Correlaciones entre las Variables Meteorológicas: Precipitación, Temperatura, Dirección del Viento, Velocidad del Viento, Humedad Relativa y Presión. ....	66
4.5.1.	<i>Análisis de Eventos de Precipitación Extrema frente a Variables Climatológicas Locales</i> 69	
4.6.	Análisis Wavelets para ENSO .....	78
4.7.	Análisis Wavelets para PDO .....	80
4.8.	Discusión.....	81
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
5.1.	Conclusiones .....	86
5.2.	Recomendaciones.....	88
6.	BIBLIOGRAFIA.....	89
7.	ANEXOS .....	95

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Tabla 1</b> Ubicación de las estaciones utilizadas para la investigación.....	2
<b>Tabla 2:</b> Descripción de las estaciones a ser estudiadas .....	34
<b>Tabla 3</b> Porcentaje de datos validos por cada estación .....	38
<b>Tabla 4:</b> Eventos de lluvia extrema para cada estación de la REMMAQ e INAMHI. ....	44
<b>Tabla 5</b> Datos diarios de las estaciones del INAMHI .....	50
<b>Tabla 6</b> Datos horarios de las estaciones de la REMMAQ. ....	50
<b>Tabla 7</b> Descripción de las variables meteorológicas en relación a las horas antes del evento .....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.</b> Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).....	8
<b>Figura 3.</b> Interacciones de Corrientes marinas.....	9
<b>Figura 4.</b> Temperatura media anual.....	11
<b>Figura 5.</b> Precipitación Anual.....	12
<b>Figura 6.</b> Descripción de la formación de nubes. ....	15
<b>Figura 7.</b> Descripción de la formación de la precipitación. ....	16
<b>Figura 8.</b> Valores de la Temperatura superficial del mar (TSM) .....	21
<b>Figura 9.</b> Oceanic Index for ENSO (ONI) con años de fuerza de El Niño y La Niña durante los años de 1950-2015. ....	22
<b>Figura 10.</b> Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) .....	23
<b>Figura 11.</b> Ubicación de las estaciones de interés para el estudio.....	32
<b>Figura 12.</b> Diagrama de dispersión de la estación del Camal sin control de calidad.....	40
<b>Figura 13.</b> Diagrama de dispersión para la estación El Camal con control de calidad. ....	40
<b>Figura 14.</b> Estructura de datos para la obtención de gráficas de correlaciones de las variables meteorológicas .....	42
<b>Figura 15.</b> Histogramas de frecuencia para estaciones del INAMHI.....	47
<b>Figura 16.</b> Diagramas de frecuencia para estaciones de la REMMAQ. ....	48
<b>Figura 17.</b> Mapa de interpolación para el percentil 90 que marca las lluvias intensas de datos horarios (Estaciones de la REMMAQ).....	51
<b>Figura 18.</b> Mapa de interpolación para el percentil 99 que marca las lluvias extremas de datos horarios (Estaciones de la REMMAQ).....	51
<b>Figura 19.</b> Boxplots e histogramas por año de las estaciones del INAMHI.....	53
<b>Figura 20.</b> Boxplots e histogramas por año para las estaciones de la REMMAQ. ....	55
<b>Figura 21.</b> Boxplots e histogramas por mes para estaciones del INAMHI. ....	58
<b>Figura 22.</b> Boxplots e histogramas por mes para estaciones de la REMMAQ.....	60
<b>Figura 23.</b> Boxplots e histogramas por hora.....	63
<b>Figura 24.</b> Gráficos de las correlaciones de la estación Tumbaco y los Chillos de la REMMAQ. ..	66
<b>Figura 25.</b> Gráficos de las correlaciones de la estación Belisario y Carapungo de la REMMAQ. ...	66
<b>Figura 26.</b> Gráficos de las correlaciones de la estación Cotocollao y El Camal de la REMMAQ. ..	67
<b>Figura 27.</b> Gráficos de los dos eventos extremos de la estación de Belisario (REMMAQ). ....	69
<b>Figura 28.</b> Gráficos de los dos eventos extremos de la estación de Carapungo (REMMAQ). ....	70
<b>Figura 29.</b> Gráficos de los dos eventos extremos de la estación Cotocollao (REMMAQ).....	71
<b>Figura 30.</b> Gráficos de los dos eventos extremos de la estación El Camal (REMMAQ). ....	72
<b>Figura 31.</b> Gráficos de los dos eventos extremos de la estación Los Chullos (REMMAQ).....	73
<b>Figura 32.</b> Gráficos de los dos eventos extremos de la estación Tumbaco (REMMAQ). ....	74
<b>Figura 33.</b> Gráficas de la correlación cruzada y análisis univariado de ENSO para la estación de Izobamba (INAMHI). ....	78
<b>Figura 34.</b> Gráficas de la correlación cruzada y análisis univariado de PDO para la estación de Izobamba (INAMHI) .....	80

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1</b> Versión implementada en WaveletComp.....	26
<b>Ecuación 2</b> Transformada de ondas de Morlet.....	27
<b>Ecuación 3</b> Amplitud local .....	27
<b>Ecuación 4</b> Espectro de potencia de la ondícula .....	27
<b>Ecuación 5</b> Transformada de ondas cruzadas de dos series de tiempo ( $Xt$ ) y ( $Yt$ ) .....	28
<b>Ecuación 6</b> Potencia wavelet de dos series en el dominio de tiempo – frecuencia.....	28
<b>Ecuación 7</b> Fórmula para la obtención de una imagen del espectro de potencia de ondas cruzadas	29
<b>Ecuación 8</b> Coherencia de Fourier.....	29
<b>Ecuación 9</b> Coherencia de la ondícula.....	30
<b>Ecuación 10</b> Formula general para interpolación .....	30

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO A</b> Script para la realización de boxplots.....	95
<b>ANEXO B</b> Script para la realización de histogramas.....	95
<b>ANEXO C</b> Script para el cálculo de cuartiles y percentiles .....	96
<b>ANEXO D</b> Script para el cálculo de correlaciones .....	96
<b>ANEXO E</b> Script del análisis univariado mediante Wavelets.....	97
<b>ANEXO F</b> Script del análisis bivariado mediante Wavelets .....	97

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo determinar los umbrales de precipitación extrema en la Ciudad de Quito y así mismo evaluar la relación y correlación frente a otras variables meteorológicas locales y tele conexiones con oscilaciones oceánicas, a través del uso de análisis estadísticos y la función Wavelets. Para este análisis se consideraron datos de precipitación, humedad relativa, temperatura, velocidad del viento, dirección del viento y presión atmosférica de 9 estaciones meteorológicas. Seis pertenecen a la REMMAQ, de donde se tomaron en cuenta 16 años de datos horarios que van desde el 2004 hasta el 2020. Y tres pertenecen al INAMHI, donde se consideraron 39 años de datos diarios que van desde 1980 hasta el 2019. Para el manejo de los datos se utilizaron scripts de RStudio y comandos del programa Excel. Así mismo con ayuda de la herramienta ArcGis, se realizó una regionalización de valores de precipitación intensa P90 extrema P99 mediante la interpolación de Kriging. A nivel temporal, los meses de mayor precipitación son: marzo-abril. Y las horas del día en la que más se registran lluvias son entre las 16:00h y 18:00h. Se encuentra que los valores de lluvia intensa varían entre 2.7mm/h y 4.2mm/h, y la lluvia extrema varía entre 9.9mm/h y 16.4mm/h, las zonas de Quito más vulnerables son Valle de los Chillos y el Sur de la Ciudad. Al analizar casos de estudio de los eventos más intensos en Quito, se evidencia la naturaleza fuertemente convectiva de la lluvia que, se relaciona con la disminución de la presión atmosférica, aumento de la velocidad de viento y cambio de dirección del viento. Al estudiar su comportamiento frente a oscilaciones oceánicas se evidenció que existe una influencia de la oscilación ENSO, pero sólo en períodos intensos. Así la precipitación presenta un comportamiento que depende de la época del año, y la hora del día, por lo que con esta investigación se busca aportar el entendimiento de la misma en

la ciudad de Quito y así a futuro mediante modelos de predicción se ayude a prevenir desastres que afecten a la población y a su entorno.

**Palabras clave:** Meteorología, climatología, INAMHI, REMMAQ, umbrales, precipitación, correlación, análisis climático.

## ABSTRACT

The present study aims to determine the thresholds of extreme precipitation in the city of Quito and also to evaluate the relationship and correlation with other local meteorological variables and tele connections with ocean oscillations, through the use of statistical analysis and Wavelets. For this analysis, precipitation, relative humidity, temperature, wind speed, wind direction and atmospheric pressure data from 9 weather stations were considered. Six belong to the REMMAQ, which took into account 16 years of hourly data ranging from 2004 to 2020. And three belong to INAMHI, where 39 years of daily data ranging from 1980 to 2019 were considered. RStudio scripts and Excel commands were used to manage the data. Also with the help of the ArcGis tool, a regionalization of intense precipitation values P90 extreme P99 was performed by Kriging interpolation. On a temporal level, the months of greatest precipitation are: March-April. And the hours of the day in which most rains are recorded are between 16:00h and 18:00h. It is found that the values of intense rain vary between 2.7mm/h and 4.2mm/h, and the extreme rain varies between 9.9mm/h and 16.4mm/h, the most vulnerable areas of Quito are Valle de Los Chillos and the South of the City. When analyzing cases of study of the most intense events in Quito, the strongly convective nature of rain is evidenced, which is related to the decrease of atmospheric pressure, increase of wind speed and change of wind direction. When studying its behavior in the face of ocean oscillations, it was evident that there is an influence of the ENSO oscillation, but only in intense periods. Thus precipitation presents a behavior that depends on the time of year, and the time of day, so this research seeks to contribute the understanding of the same in the city of Quito and so in the future through prediction models help prevent disasters that affect the population and its environment.

**Key words:** Meteorology, climatology, INAMHI, REMMAQ, thresholds, precipitation, correlation, climate analysis

# 1. INTRODUCCION

## 1.1. Problema

Quito es una de las ciudades que se ubica a lo largo de la Cordillera Occidental, rodeada de volcanes y sobre una planicie con fallas geológicas, esto hace que sea vulnerable frente a algunos riesgos, siendo la lluvia extrema el de mayor riesgo de desastre. En la última década los umbrales de precipitación han variado de una manera importante a causa del cambio climático, que exagera la presencia de eventos extremos de precipitación (Pendergrass et al., 2017). Sin embargo, aún es escaso el conocimiento de la dinámica de eventos de lluvia en la capital del Ecuador, no sólo en lo que se refiere a la descripción de estos umbrales de precipitación, sino también cómo se relacionan con otras variables meteorológicas locales como, presión, humedad, temperatura, dirección del viento y velocidad del viento, así como sus teleconexiones con las oscilaciones oceánicas como el Fenómeno del Niño.

Es por eso que se ha visto la necesidad de estudiar su comportamiento, objetivo principal del presente trabajo. Ya que los estudios referentes a los umbrales de precipitación extremos, las conexiones con las variables meteorológicas locales al igual que la teleconexiones con oscilaciones oceánicas son de suma importancia.

## 1.2. Delimitación

La presente investigación se ubicará en la Ciudad de Quito, Provincia de Pichincha, en diferentes sectores de la ciudad, como se indica en la Tabla 1.

Para este trabajo de investigación se consideraron datos que están dentro del período de 1980 hasta 2020 de 9 estaciones meteorológicas para variables locales como: precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento al igual que

presión atmosférica de fuentes oficiales como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) y de igual manera para las oscilaciones oceánicas se consideran fuentes secundarias oficiales con la paginas virtual del NOAA.

**Tabla 1**

*Ubicación de las estaciones utilizadas para la investigación*

<b>Estación Meteorológica</b>	<b>Dirección</b>
La Tola	Calle Francisco y Arturo Coronel
Iñaquito	Edificio Lancas, en el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)
Izobamba	Av. Atacazo
Belisario	Av. América, sobre la terraza del Edificio administrativo del colegio San Gabriel
Carapungo	Edificio Andinatel
Cotocollao	Calle Ignacio Loyola y Alfonso del Hierro, en el museo Cotocollao
El Camal	Sobre las terrazas del Hospital Patronato Municipal San José del Sur
Los Chillos	Sobre la terraza del Andinatel, en la calle Gaspar del Carvajal
Tumbaco	Sobre la terraza de Andinatel y Av. Ilaló vía al Tingo.

*Nota.* Elaborado por, Romero y Topón.

### **1.3. Pregunta de investigación**

La pregunta de investigación del presente estudio, se centra en conocer cuáles serán los umbrales de precipitación extrema en la ciudad de Quito, definidos por los percentiles 90 y 99. Así, como conocer la ubicación geográfica para determinar las zonas más expuestas a estos eventos. Asimismo, se quiere conocer las relaciones de estos eventos extremos con las demás variables meteorológicas, y sus posibles teleconexiones con oscilaciones oceánicas, como la del Fenómeno del Niño y la Oscilación Decadal del pacífico (PDO).

### **1.4. Objetivos General y Específicos**

#### ***1.4.1. Objetivo General***

- Evaluar los umbrales de precipitación extrema en la Ciudad de Quito y sus conexiones con otras variables meteorológicas locales y tele conexiones con oscilaciones oceánicas, como la del Niño, a través del análisis estadístico y Wavelets.

#### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- Establecer los umbrales de precipitación extrema a través del análisis del comportamiento estadístico de la precipitación y la precipitación lluviosa extrema a través del uso de percentiles altos (90, 95, 99) sobre datos diarios.
- Evaluar las relaciones y correlaciones entre los valores umbrales de precipitación y otras variables meteorológicas como presión, temperatura, vientos y humedad. A través del análisis de las series de tiempo antes y después de los eventos lluviosos extremos.

- Evaluar las relaciones y correlaciones entre los valores umbrales de precipitación con otras oscilaciones oceánicas como El Niño, La Niña, Oscilación Decadal del Pacífico, entre otras. A través del análisis de Wavelets en correlación y correlación cruzada.

### **1.5. Hipótesis**

- Los valores de lluvia determinan los umbrales de precipitación intensa y extrema que corresponden a los percentiles P90, P99.
- Los eventos extremos tienen relación con las variables meteorológicas, y sus posibles teleconexiones con oscilaciones oceánicas, como la del Fenómeno del Niño y PDO.

## **2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **2.1. Meteorología y Climatología**

La meteorología es científica y técnica, encargada del análisis y pronóstico de diferentes fenómenos que se generan en la atmósfera, para este tipo de estudios se suelen emplear parámetros tales como precipitaciones, viento o temperatura del aire, humedad y presión atmosférica, las cuales van a variar dependiendo el caso o estudio que se vaya a realizar al igual que varían dependiendo del espacio y tiempo (Aguera Benito, 2004).

Por otra parte, la climatología puede estudiar las variaciones del clima a través del tiempo, mediante la utilización de la información obtenida de observaciones acerca de parámetros meteorológicos anteriormente mencionados (Madrigal, 2016).

Ambas definiciones son fundamentales para entender los umbrales de precipitación extrema en el área de estudio.

### **2.2. Clima del Ecuador**

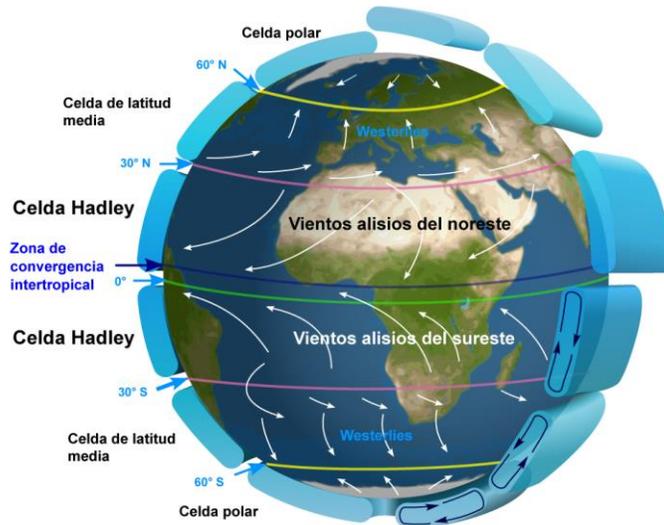
El Ecuador es un país que está ubicado sobre la línea ecuatorial, posee poca estacionalidad a lo largo del año. Tiene dos estaciones que corresponden a húmeda o invierno y seca o verano (Andrade, 2007). Es conveniente mencionar que las estaciones no son las misma en cada región ya que son variadas. En la Costa la temporada de invierno inicia en el mes de diciembre hasta mayo, en cuanto al verano tiene su inicio en el mes de junio hasta noviembre. En la Sierra el período lluvioso tiene lugar entre los meses de octubre-mayo y la época seca va de junio a septiembre (Pourrut y Pierre, 1983). En cuanto a la Amazonía existen diferencias ente el norte y sur, en la Amazonía norte que corresponde a la provincia de Sucumbíos, la presencia de las precipitaciones inicia desde el mes marzo hasta noviembre mientas que la época seca se da entre los meses de diciembre a febrero. En

el resto de la Amazonía, el comportamiento estacional es parecido al de la Sierra (Varela y Ron, 2019).

Es importante saber que el clima está dado por la posición con relación a dos factores importantes como agua y masas de aire. Se puede mencionar que en la zona ecuatorial la misma que posee una radiación solar alta, lo cual produce que las masas de aire húmedo asciendan y como resultado tiende a que se produzca la lluvia al momento en el que la temperatura disminuye (Pourrut y Pierre, 1983). Esto da origen a una precipitación alta y una presión atmosférica baja alrededor del mundo. El aire después de perder su humedad se direcciona al norte y sur, estos descienden en terrenos subtropicales y este aire seco tiende a producir un estado desértico a 30° de latitud (Andrade, 2007). Finalmente, el aire regresa a la zona ecuatorial capturando humedad, al llegar al Ecuador este contiene humedad y el ciclo se reinicia (Vincenti et al., 2012). Es importante saber que este patrón de circulación forma la Celda Harley. Cabe mencionar que en cada hemisferio existe una celda, desde los 0° hasta los 30° (Ver Figura 1). Dichas celdas van a producir disminución de la presión atmosférica e incremento de la precipitación a 0° de latitud al igual que alta presión atmosférica y baja precipitación a 30° (Varela y Ron, 2019).

**Figura 1.**

*Ubicación latitudinal de las Celdas Hadley.*

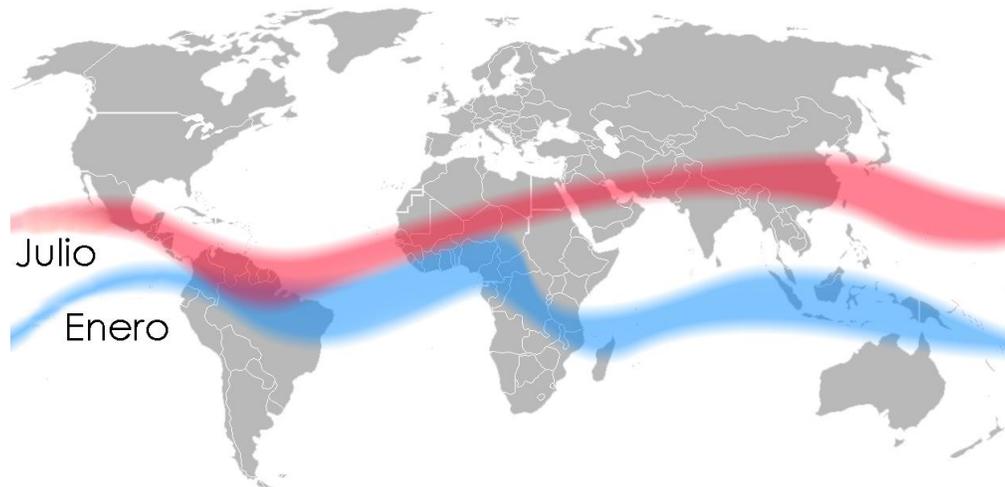


*Nota.* Ubicación latitudinal de las Celdas Hadley y patrones de movimiento de masas de aire provenientes de norte y sur, con relación a la línea ecuatorial. Tomado de Kaidor. Licencia CC BY-SA 3.0, con modificaciones.

La zona de convergencia intertropical (ZCIT) o también conocida como zona de bajas presiones (Ver figura 2). Se mueve a lo largo del año y eso influencia la estacionalidad de la lluvia en el Ecuador (Villacis y Marrero, 2017). Se puede mencionar que la ZCIT toma rumbo hacia el centro del continente americano en el mes de julio produciendo sequias tanto en la Sierra y Costa. La ZCIT regresa al Ecuador en el mes de enero ocasionando lluvias a ambas regiones (Varela y Ron, 2019).

**Figura 1.**

*Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).*



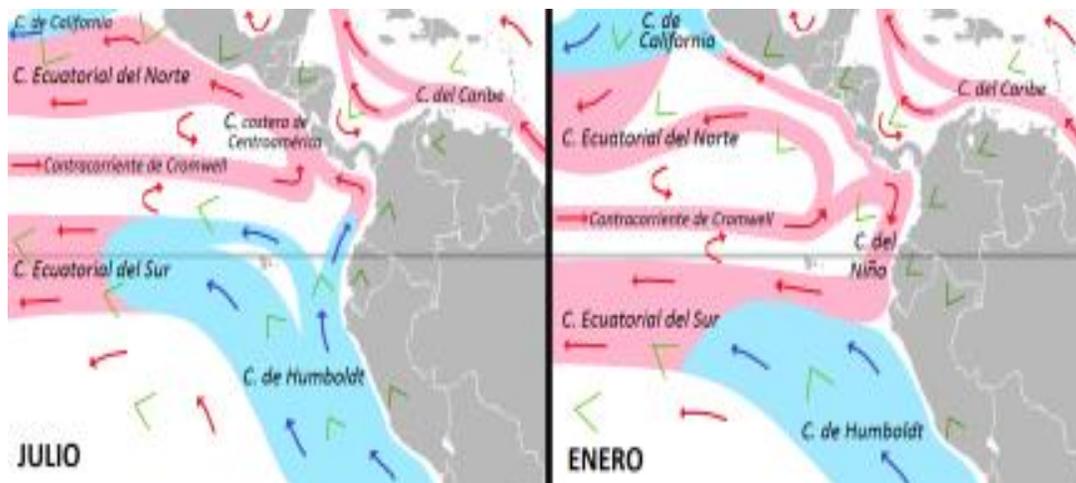
*Nota.* Ubicación promedio de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en los meses de julio y enero.

Modificado de Mats Hallding.

Cabe mencionar que las corrientes marinas influyen sobre el clima del Ecuador. La corriente fría de Humboldt comienza en el océano Antártico y atraviesa las costas del sur de América (Figura 3), pasando por Ecuador, para luego ir, frente a las costas de Manabí, con destino hacia las Islas Galápagos (Amestoy, 1999). Una de las razones puede ser por la falta de evaporación que posee el agua a tan bajas temperaturas, esto produce aridez en la región Costa. La corriente cálida de El Niño se origina en el norte (Golfo de Panamá) y baña anualmente las costas ecuatorianas entre los meses de abril y diciembre, esto da paso a la época húmeda y cálida (Aguar et al., 2011). En consecuencia, en ciclos de 3 a 7 años, sus efectos se incrementan generando el fenómeno de El Niño (presencia de aguas con alta temperatura y menos salinas), esto incrementa los días de fuertes lluvias en el Ecuador durante los primeros meses del año (Varela y Ron, 2019).

**Figura 2.**

*Interacciones de Corrientes marinas.*



*Nota.* Correlación de corrientes marinas presente en la costa oeste del sur de América en los meses de julio y enero. Tomado de Kaidor. Licencia CC BY-SA 3.0, con modificaciones.

Un factor relevante que influyen en el clima son los relieves ya que estos cumplen el papel de barreras ante el desplazamiento de las masas de aire. Cabe mencionar que uno de los efectos que puede presentar la topografía es la sombra de lluvia o también conocida como sombra pluviométrica la cual causa sequias en las zonas interandinas del país (García Romero et al. 2007).

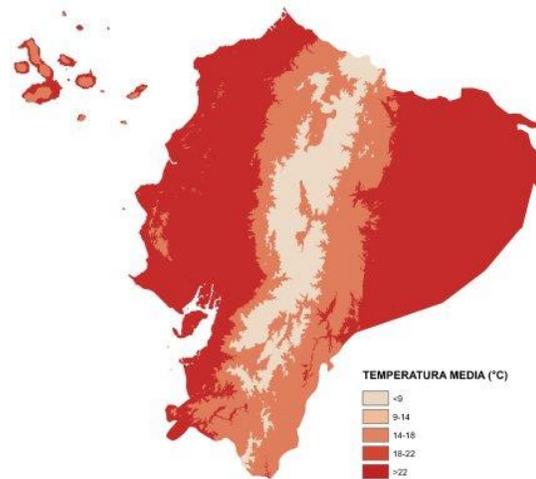
Por otro lado, el aire seco tiende a aumentar su temperatura y desciende llegando hacia los valles interandinos y produciendo suelos arenosos o parcialmente desérticos como en el caso de Pomasqui y la Mitad del mundo. Es por esto que el flanco de una montaña con dirección al valle interandino posee una temperatura más elevada que el sitio que se encuentra de manera contraria a una misma montaña (Figura 4) (Coch, 2017). Un ejemplo

de lo mencionado se puede observar en el viaje por carretera de Santo Domingo a Quito ya que las masas de aire húmedo y caliente procedentes del océano Pacífico se elevan en la cordillera Occidental y se enfrían en las zonas correspondientes a Santo Domingo y Tandapi ocasionando bosques nublados y precipitaciones (Varela y Ron, 2019).

Al perder la humedad el aire se dirige al valle interandino que corresponde al sector de Alóag-Machachi, en la hoya de Guayllabamba, donde el clima tiende a ser más cálido y seco (Figura 5). Dicho cambio también se puede observar en el camino desde los Bancos hacia Quito, en el cual se observa bosques nublados con abundantes lluvias (Mindo-Nanegalito) (Yupa, 2019). Lo mismo ocurre en la cordillera Oriental, en el camino de la Virgen-Papallacta en el cual sus condiciones climáticas son húmedas, se pasa por los valles secos de Cumbayá-Tumbaco-Pifo (Muñoz et al., 2010). Lo mencionado anteriormente confirma que existe influencia del relieve en el clima. Se puede decir que el Ecuador por el relieve que posee presenta distintos tipos de clima como son climas tropicales, subtropicales, temperados, subtemperados y de páramo (Varela y Ron, 2019).

**Figura 3.**

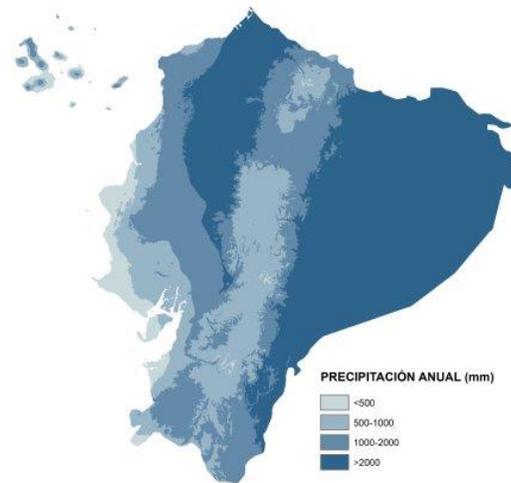
*Temperatura media anual.*



*Nota.* Rangos de temperatura media anual registrados en el Ecuador. Las zonas más calientes corresponden a las partes bajas de la Costa, Oriente y Galápagos. Las zonas más frías representan los páramos andinos en la Sierra. Fuente capas digitales de variables bioclimáticas: WorldClim – Global Climate. Data versión.

## Figura 4.

### *Precipitación Anual.*



*Nota.* Precipitación anual registrada en el Ecuador. Las zonas con más lluvia están en las estribaciones de los Andes. Las zonas más secas en los valles interandinos y la región costa centro y sur. Fuente: WorldClim - Global Climate Data versión 1.4 (12).

## 2.3. Variables Climáticas.

### 2.3.1. *Presión Barométrica*

Se define como la presión causada por la masa de aire sobre un determinado espacio, sus unidades de medida son (mmHg) o (hPa) (Andrades y Muñoz, 2012). Depende de distintas variables climáticas, pero cabe mencionar que tiene una relación directa con la altitud (Peña, 2019). Se puede notar los cambios de presión fácilmente, cuando se está expuesto a una presión alta se sufre de cansancio, mientras que con una presión baja se puede notar cierta ligereza en el cuerpo y en algunos casos se tiende a respirar con dificultad (Centro Nacional de Metrología, n.d.).

### **2.3.2. Temperatura**

La temperatura es definida como la cantidad de calor que está presente en una masa de aire en un lugar determinado (Moreno, 2009). Entre las variables que influyen directamente con la temperatura, se tiene a la latitud y la continentalidad. Con respecto a la latitud se relaciona con la posición de la zona de interés, ya que mientras más se aleja de la línea equinoccial el valor de la insolación varia. La continentalidad está relacionada directamente con la inercia térmica de las masas de agua (Gómez y Macchione, 2009).

Su unidad es grados centígrados (°C) y se mide con ayuda de un instrumento conocido como termómetro (Andrades y Muñoz, 2012). Cabe mencionar que en el Ecuador la variabilidad de la temperatura es evaluada de manera diaria, mensual y anual. Dicha variación de la temperatura se puede presenciar mediante isotermas, las mismas que facilitan la observación de distribuciones espaciales y temporales (Barros y Troncoso, 2010). En el caso de las zonas costeras la amplitud térmica es baja, mientras que en las zonas internas se dan variaciones térmicas más altas (Serrano et al., 2020).

### **2.3.3. Viento**

Se define al viento como el movimiento horizontal del aire, que se da mediante el desplazamiento que inicia en las sitios donde hay mayor presión hasta los sitios de menor presión (Peltre, 1989). El viento tiene velocidad y dirección y su unidad de medida es (m/s) o (km/h). Cabe mencionar que la dirección del viento se analiza mediante la rosa de los vientos, la misma va en sentido norte siguiendo las manecillas del reloj (Barros y Troncoso, 2010).

Según Mamani (2011) la velocidad del viento se da por el grado del mismo y la turbulencia del aire, lo que permite la remoción de vapor donde se transfiere grandes

cantidades de aire hacia la superficie. Esta variable tiene relación con la evapotranspiración, ya que si el aire sobre la superficie no es reemplazado por un aire más seco se reduce la cantidad de vapor de agua que se puede remover y así mismo se disminuye la evapotranspiración (Saenz, 1905).

#### **2.3.4. Humedad Relativa**

Se define conforme Peña (2019) como el vapor de agua que se encuentra en la atmósfera y esta relaciona directamente con la temperatura esto se debe a que el aire frío contiene menor temperatura y como tal menor humedad mientras que el aire con mayor temperatura posee mayor humedad. También se puede decir que el vapor de agua se mantiene en la atmósfera por la saturación, para luego producir la precipitación (tanto en forma líquida como sólida), su fuente primaria o permanente son los océanos (Moreno, 2009).

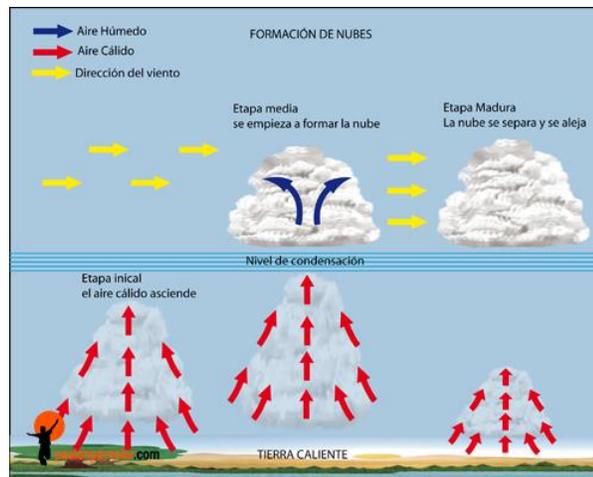
La humedad se puede expresar como una variable climatológica absoluta, específica o relativa. La humedad absoluta toma en cuenta la masa de agua que existe en una unidad de volumen, sus unidades se dan en: (g/Kg, g/m<sup>3</sup>, Pa, KPa o mmHg). La humedad específica define la cantidad de agua en estado gaseoso disponible en un Kg de aire húmedo (g/Kg). Mientras que la humedad relativa está relacionada con el porcentaje entre el peso del vapor de agua que existe (Barros y Troncoso, 2010). Para poder comparar los valores de humedad relativa, se deben tener datos de mediciones realizadas a la misma hora (Zúñiga López y Crespo, 2021).

### 2.3.5. Precipitación

Para que se produzca la precipitación, la humedad del aire tiene que sobrepasar el punto de saturación, luego de este proceso ocurre la condensación y se forman pequeñas gotas densas que dan origen a las nubes que en su mayoría son de forma vertical. Las gotas en estado sólido aumentan de tamaño y gracias al decrecimiento de temperatura pasan de estado gaseoso a líquido y por efecto de la fuerza de gravedad empiezan a caer dando lugar a la lluvia ( Ver Figura 6) (Zúñiga López y Crespo, 2021). En cuanto a la intensidad de la lluvia generalmente se determina en (mm/unidad de tiempo), por lo cual, dependiendo del estudio necesario se puede hablar de (mm/año), (mm/mes), (mm/día) o (mm/hora) (Álvarez y Montaña, 2017).

**Figura 5.**

*Descripción de la formación de nubes.*



*Nota.* Formación de las nubes en la cual la etapa inicial empieza con aire cálido el cual asciende, dando paso a la etapa media, en la cual se empieza a formar la nube, finalmente la etapa madura en la que la nube se separa y se aleja (Almorox y Garcia, 1992).

Dos factores importantes que influyen en la precipitación son la temperatura y el grado de condensación (Catalá , 1977). Es por eso que cuando la diferencia de temperatura que existe entre dos masas de aire es enorme, se produce una condensación considerable y con gran rapidez. Cabe mencionar que el agua no siempre se va a precipitar en forma líquida si no también puede ser en forma de granizo o nieve (Martín y Quirantes, n.d.). Las gotas se clasifican en chubascos o también conocidos como lluvia y llovizna (Figura 7). Por último, se puede mencionar que la lluvia básicamente va a depender de tres variables meteorológicas las mismas que son: humedad, temperatura y presión (Barry, 1985).

**Figura 6.**

*Descripción de la formación de la precipitación.*



*Nota.* Fases de la lluvia. (Ordoñez, 2011)

## **2.4. Precipitación en Ecuador**

El comportamiento del clima en Ecuador es bastante irregular y afecta a factores como la niebla, alturas pluviométricas y a la temperatura (Pourrut, 1995). Así mismo causa alteraciones en el comportamiento multianual, y en cierta forma se considera como el responsable del retardo o adelanto del ciclo lluvioso y de la misma manera de sequía que lo antecede (Villacrés et al., 2016).

Según varios estudios referentes a la escala interanual se pueden reconocer dos principales fenómenos que afectan a la lluvia, el primero se relaciona con el fenómeno ENSO (presencia de aguas menos salinas, con altas temperaturas) y el segundo se enlaza con períodos de casi dos años (Martelo, 1998). Cuando en el Pacífico tropical las aguas son más templadas a lo normal se conoce como El Niño, y cuando ocurre lo contrario donde las aguas son más frías a lo normal se conoce como la Niña. Esto produce una alteración en la circulación de la atmósfera cálida y en el clima de distintos lugares del mundo (Grimm, 2015).

## **2.5. Precipitaciones Extremas**

El cambio climático exige ampliar varias cosas una de ellas son los conocimientos sobre las alteraciones a nivel espacial y temporal sobre los umbrales de precipitación extrema, en la actualidad existe evidencia de que, las lluvias extremas más intensas y frecuentes se dan como consecuencia del cambio climático (Serrano y Basile, 2012).

Existen varias características que definen a las precipitaciones, una de ellas es que la intensidad depende de varios agentes atmosféricos, además posee una aparente distribución espacial irregular y baja frecuencia temporal que inducen a peligros naturales generalmente de tipo geomorfológico como, por ejemplo: cambios en los cauces de un río,

transformación de la erosión superficial, desplazamientos de masa, entre otros. Estos peligros naturales afectan de manera directa la población e infraestructuras (Pendergrass et al., 2017; Gómez y Macchione, 2009 ).

Según el CRED (Oficina de Asistencia para Casos de Desastre en el Extranjero) entre 1900 y 2001 en todo el mundo se reconoce que alrededor de 7 millones de personas se ven perjudicadas por inundaciones.

En el Ecuador cerca de un 35% de sus habitantes viven en regiones que son tendentes a inundarse, a lo largo de la historia se ha comprobado que existe influencia del fenómeno del Niño en las lluvias, provocando un comportamiento inusual (Seidel et al., 2015). Algunos de los eventos de lluvia extrema donde se dio un incremento de la precipitación que superara los valores auténticos se dieron en el año 2017 entre los meses de febrero y marzo, estas precipitaciones se dieron en zonas que ya habían sido afectadas por el sismo de 2016. Estas lluvias extremas afectaron intensamente al suelo, causando activación de sucesos erosivos caracterizados por ser periódicos, evolutivos e inalterables (Pacheco et al., 2019).

Las lluvias extremas ocasionan daños tanto en la social como en lo económico, ya que según su intensidad causa efectos nocivos en ciertas zonas que presentan mayor vulnerabilidad (Muñoz et al., 2010). Es importante identificar las lluvias extremas en 24 horas, de tal modo que se pueda cubrir las regulaciones y exigencias de proyectos hidráulicos que se desarrollan con el fin de prevenir desastres a causa de posibles inundaciones, avalanchas y deslaves (Brignardello, 1997).

### ***2.5.1. Conexiones entre las Lluvias Extremas y las Oscilaciones Oceánica***

En el Ecuador el comportamiento climático tiende a ser afectado por fenómenos oceánicos y atmosféricos que tienen lugar en el Océano Pacífico intertropical, dentro de los más conocidos tenemos: ciclo ENSO (El Niño / La Niña), oscilación Madden / Julian (MJO), tele conexiones (Espinoza, 1996). En la zona costera es donde se produce mayormente un cambio en la climatología, ya que se evidencia un exceso de lluvia en algunos años de acuerdo a estudios realizados, donde se considera que la causa principal es la ubicación ribereña y cercana al océano que hace que el fenómeno del Niño se exprese con mayor fuerza (Moreno et al., 2007).

### ***2.5.2. Comportamiento climático del Ecuador durante los eventos del Niño***

El Fenómeno del Niño es un claro ejemplo de las demostraciones climáticas más duras que se dan en los ecosistemas litorales de nuestro país, es posible evidenciarlo a lo largo de la historia ya que la temperatura del océano ha sufrido un aumento en los últimos años y de la misma manera ocurre con las precipitaciones (Corporación Andina de Fomento, 2000).

Algunos de los sucesos más relevantes tuvieron lugar en el siglo XX, fueron aproximadamente 28 sucesos de El Niño y 19 sucesos de la Niña. Cuatro de estos sucesos considerados de magnitud débil se dieron en los años de 1931, 1932, 1973 y 1976 con una variación de la temperatura acumulada de 3° y 5°C, y de precipitación de 100 a 390 mm; también se dieron sucesos considerados de mediada y moderada magnitud en los años 1926, 1932, 1951, 1953, 1958 y 1972 donde la variación de temperatura fue entre 5° y 12° C y una variación de la precipitación entre 400 a 790mm. ; los eventos de El Niño considerados de magnitud fuerte presentaban variaciones de temperatura entre 12° y 20°C y

de precipitación entre 1100 y 1500mm (Corporación Andina de Fomento, 2000). Asimismo según estudios realizados por el INAMHI y criterios técnico-científico internacionales se han identificado eventos extremadamente fuertes en los años 1983 y 1998, con variaciones de temperatura de inclusive 35°C y variaciones en la precipitación que superaban los 2630 mm (Valiente, 1998).

Otra de las causas de las fuertes precipitaciones en Ecuador es debido a la transición del anticiclón del Pacífico Sur en dirección al suroeste generado por el fenómeno del Niño que provoca un agotamiento de los vientos alisios y aumento en la temperatura de las aguas superficiales del Pacífico tropical oriental, que se combina con la ubicación irregular austral que posee el frente ecuatoriano y la ZCIT (zona de convergencia intertropical) (Corporación Andina de Fomento, 2000).

Según la Corporación Andina de Fomento (2000) el fenómeno del Niño afecta con menor magnitud a regiones situadas a más de 1000 - 1500 msnm de la red montañosa conocida como la Cordillera de los Andes.

### **2.5.3. ONI (*Oceanic Index for ENSO*)**

Este índice crea un promedio de un conjunto de datos generando una escala mensual, en este caso se involucran valores irregulares de la temperatura de la superficial del mar en la zona media del Pacífico (conocida como el área Niño 3-4) (Hidalgo, 2017). Donde El Niño se da cuando los valores ONI son superiores o iguales a +0.5°C, mientras que La Niña se presenta cuando los valores ONI son inferiores o iguales a -0.5°C, como se aprecia en la figura 9, durante un ciclo de 5 años para los dos casos (Barrera y Pérez, 2016).

En la figura 8 se indica que para el caso de períodos de temperatura superficial del mar (TSM) que estén por debajo de lo normal los valores se colorean con azul, mientras que los que están por encima de lo normal se muestran en color rojo (National Weather Service, 2019).

**Figura 7.**

*Valores de la Temperatura superficial del mar (TSM)*

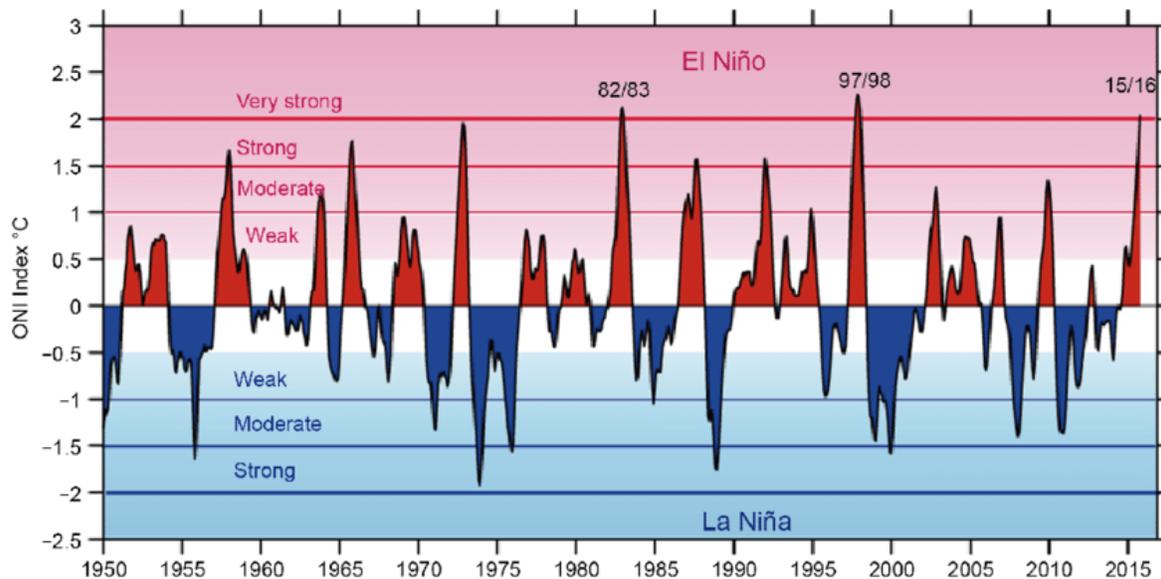
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1950	-1.5	-1.3	-1.2	-1.2	-1.1	-0.9	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8
1951	-0.8	-0.5	-0.2	0.2	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2	1.0	0.8
1952	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1
1953	0.4	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
1954	0.8	0.5	0.0	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.8	-0.9	-0.8	-0.7	-0.7
1955	-0.7	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-1.1	-1.4	-1.7	-1.5
1956	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4
1957	-0.2	0.1	0.4	0.7	0.9	1.1	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.7
1958	1.8	1.7	1.3	0.9	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6
1959	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0

*Nota.* Valores de los períodos de TSM, donde DJF = diciembre, enero, febrero; JFM = enero, febrero, marzo; FMA = febrero, marzo, abril; MAM = marzo, abril, mayo; AMJ = abril, mayo, junio; MJJ = mayo, junio, julio; JJA = junio, julio, agosto; JAS = julio, agosto, septiembre; ASO = agosto, septiembre, octubre; SON = septiembre, octubre, noviembre; OND = octubre, noviembre, diciembre; NDJ = noviembre, diciembre, enero.

Fuente: (National Weather Service, 2019).

**Figura 8.**

*Oceanic Index for ENSO (ONI) con años de fuerza de El Niño y La Niña durante los años de 1950-2015.*



*Nota.* Fuente: (Hafez, 2016)

#### **2.5.4. Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)**

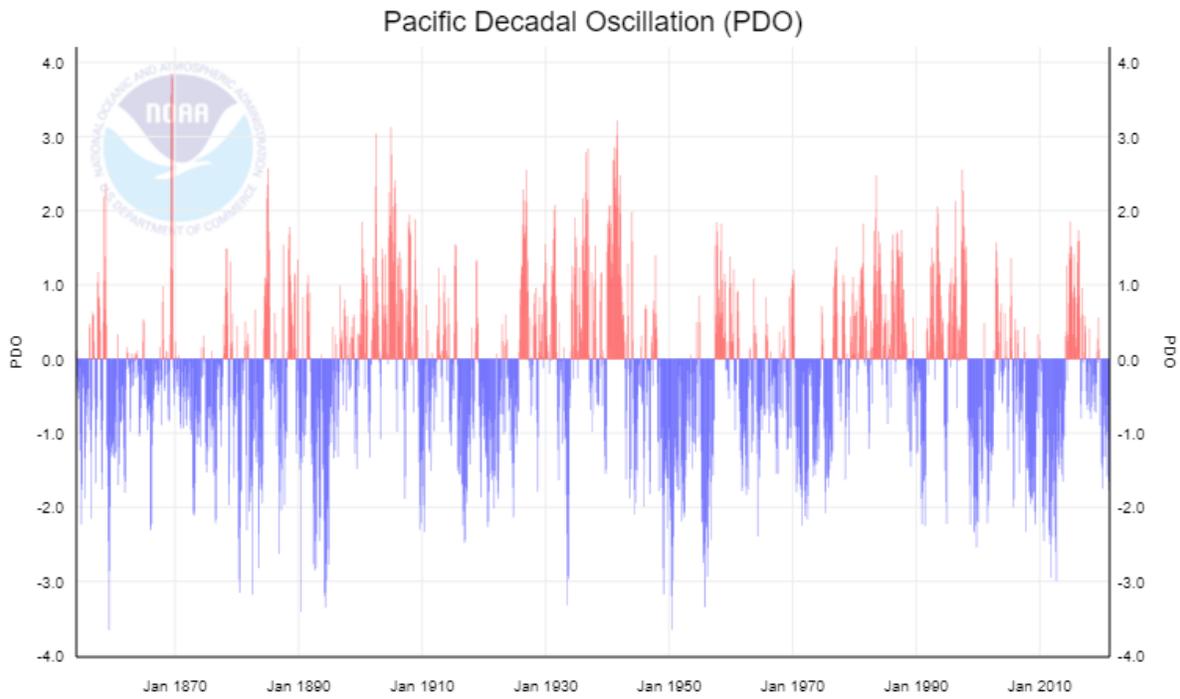
La PDO es un patrón de variabilidad climática del Pacífico que aparece principalmente en temporadas invernales, representa la irregularidad de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Océano Pacífico por un período extenso (González et al., 2020). Los patrones de la PDO (Ver figura 10) están dados por las amplias variaciones que se dan en el extremo del océano Pacífico y también en el clima de América del Norte (NOAA, 2021).

La comprensión teórica del PDO tiene un grado de complejidad elevado, pero sin embargo gracias a la información y a pronósticos climáticos de varias investigaciones se la ha ido mejorando, uno de los principales logros es el conocimiento de que los cambios de la

TSM causan alteraciones en el clima de Norteamérica alterando principalmente a patrones de viento (Milán, 2012).

**Figura 9.**

*Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)*



*Nota.* Fuente: (NOAA, 2021)

## **2.6. Lluvias Extremas en la Ciudad de Quito**

Los valores de las lluvias extremas en Quito se establecen mediante valores de precipitación diaria , que están relacionados directamente con la naturaleza orográfica predominada por el callejón interandino, que hace subir las masas cálidas de aire hacia las elevadas capas de la atmósfera para luego producir la condensación (Santillán y Zamora, 2021).

En cuanto a su estacionalidad, la temporada lluviosa en Quito, tiende a elevarse específicamente en los meses de marzo-abril-mayo y también en septiembre-octubre-noviembre, esto quiere decir que se produce una bimodalidad, que es característica de la región Sierra (Serrano et al., 2016).

### ***2.6.1. Causas de las Lluvias Extremas en Quito***

El contraste de la temperatura es la causa básica del proceso de convección, que produce que el aire que se encuentra en la superficie terrestre se caliente, otras de las causas se pueden dar por el enfriamiento de las capas superiores (Venegas, 2020). Esto se produce con la ayuda del volcán Pichincha el mismo que posee una altura de 4680 (msnm) y rodea a la ciudad de Quito, esto hace que se existan la presencia de precipitaciones de distinta magnitud (Chávez, 1994).

## **2.7. Herramientas Utilizadas para el Análisis Climatológico**

### **2.7.1. RStudio**

RStudio es un entorno de programación que sirve como una herramienta de análisis estadísticos, esto se puede realizar con la ayuda de la creación de nuevas librerías o programas pequeños que se pueden utilizar o disponer dentro del mismo (Mark P.J, 2012). Además de esto mediante el software de automatización se puede realizar un sin número de estudios entre ellos avances científicos gracias a la adquisición de resultados con relación al tiempo (Méndez, 2018).

### **2.7.2. Wavelets**

La teoría de Wavelets u ondeletas, se basan en las series de Fourier, se utilizan para la representación de datos periódicos como el clima el cual puede presentar variaciones o discontinuidades abruptas (Mancero y Mosquera, 2015). El objetivo primordial de la metodología wavelet es estudiar fenómenos periódicos en series de tiempo, principalmente en presencia de posibles cambios de frecuencia a lo largo del tiempo (Castro , 2015).

### **2.7.3. WaveletComp**

Es un paquete de RStudio que utiliza wavelet, se usó la (versión 1.1). Posee un diseño de tal forma que la teoría de ondeletas y sus aplicaciones se ven como una extensión de la estadística (Percival y Walden, 2000). Según Schmidbauer (2018) una de las características de WaveletComp, es la amplitud para reconstruir series de tiempo relacionadas a una variedad de restricciones potenciales, en cuanto a las series de tiempo ayuda a rectificar la potencia de la ondícula.

#### 2.7.4. *Análisis de Wavelets de Series Univariadas*

Para el estudio de la estructura de frecuencia de series de tiempo univariadas y bivariadas WaveletComp utiliza la ondícula de Morlet (Georgiou y Kumar, 1994). La transformación se puede separar en su parte real y su parte imaginaria, proporcionando así información sobre la amplitud local y la fase instantánea de cualquier proceso periódico a lo largo del tiempo (Aguilar et al., 2011). La wavelet de Morlet,  $(\psi(t))$  está dada por la Ecuación 1:

##### **Ecuación 1**

*Versión implementada en WaveletComp.*

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (1)$$

Donde ( $\omega$ ) es la frecuencia angular o también conocida como tasa de rotación en radianes por unidad de tiempo, se establece en 6, que es el valor preferido en la literatura ya que hace que la ondícula de Morlet sea aproximadamente analítica, mientras que ( $t$ ) es el tiempo (Georgiou y Kumar, 1994). Una revolución es igual a  $2\pi$  (radianes); por lo tanto, el período (o frecuencia inversa) medido en unidades de tiempo es igual a  $\frac{2\pi}{6}$  (Schmidbauer, 2018).

A continuación, en la Ecuación 2 se puede observar su implementación en WaveletComp. La transformada de ondas de Morlet de una serie de tiempo ( $X_t$ ) se conoce como la convolución de la serie con un conjunto de hijas de la ondícula generadas por la ondícula madre por traducción en el tiempo por  $\tau$  y escalando por  $s$ , como se muestra a continuación (Gencay y Selcuk, 2000).

## Ecuación 2

*Transformada de Ondas de Morlet.*

$$Wave(\tau, s) = \sum_t x_t \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) \quad (2)$$

Donde “ $\tau$ ” es el tiempo de localización, y “ $s$ ” es la elección del conjunto de escalas.

La escala mínima se fija a través de la elección del período mínimo de interés mediante el factor de conversión  $\frac{6}{(2\pi)}$  el mismo que da resultados consistentes para ondas sinusales de frecuencia conocida. WaveletComp utiliza algoritmos de Transformada Rápida de Fourier siguiendo la metodología ilustrada por (Torrence y Compo, 1998). La amplitud local de cualquier componente periódico de la serie de tiempo bajo investigación y cómo evoluciona con el tiempo, se puede recuperar del módulo de su transformada de ondículas, como se observa en la ecuación 3 (Carmona y Torresani, 1998).

## Ecuación 3

*Amplitud local.*

$$Ampl(\tau, s) = \frac{1}{s^{\frac{1}{2}}} \cdot |Wave(\tau, s)|. \quad (3)$$

Donde el cuadrado de la amplitud se interpreta como densidad de energía de la ondícula de tiempo-frecuencia y se denomina espectro de potencia de la ondícula representado en la Ecuación 4 (Gencay y Selcuk, 2000).

## Ecuación 4

*Espectro de potencia de la ondícula.*

$$Power(\tau, s) = \frac{1}{s} \cdot |Wave(\tau, s)|^2 \quad (4)$$

### 2.7.5. *Análisis de Wavelets de Series Bivariadas*

Según Schmidbauer (2018) los conceptos de análisis de ondas cruzadas permiten comparar el contenido de frecuencia de dos series de tiempo y también ayuda a obtener conclusiones sobre la sincronización de la serie en ciertos períodos y rangos de tiempo.

Por otro lado en la Ecuación 5, determina la transformada de ondas cruzadas de dos series de tiempo ( $X_t$ ) y ( $Y_t$ ), con las respectivas transformaciones de ondícula  $Wave.x$  y  $Wave.y$ , descompone los espectros en cuadratura de Fourier en el dominio de tiempo-frecuencia o también denominado escala de tiempo (Georgiou y Kumar, 1994).

#### **Ecuación 5**

*Transformada de ondas cruzadas de dos series de tiempo ( $X_t$ ) y ( $Y_t$ ).*

$$Wave.xy(\tau, s) = \frac{1}{s} \cdot Wave.x(\tau, s) \cdot Wave.y * (\tau, s) \quad (5)$$

El módulo se puede interpretar como potencia de ondas cruzadas en el dominio de tiempo – frecuencia (Ver Ecuación 6) (Torrence y Compo, 1998).

#### **Ecuación 6**

*Potencia wavelet de dos series en el dominio de tiempo – frecuencia.*

$$Power.xy(\tau, s) = |Wave.xy(\tau, s)| \quad (6)$$

En consecuencia, WaveletComp facilita una imagen del espectro de potencia de ondas cruzadas en el dominio del período de tiempo de forma predeterminada (Liu et al., 2007). Las líneas para la cresta de la potencia de ondas cruzadas se pueden agregar al gráfico, así como información sobre la sincronización de las dos series en términos del avance de fase instantáneo o local de cualquier componente periódico de ( $X_t$ ) con respecto

al componente correspondiente de ( $Y_t$ ), esto se puede ver en la Ecuación 7 (Schmidbauer, 2018).

#### **Ecuación 7**

*Fórmula para la obtención de una imagen del espectro de potencia de ondas cruzadas.*

$$\text{Angle}(\tau, s) = \text{Arg}(\text{Wave.}xy(\tau, s)) \quad (7)$$

Cabe indicar que cuando se transforma a un ángulo en el intervalo  $[-\pi, \pi]$ . Un valor absoluto menor que  $\frac{\pi}{2}$  indica que las dos series se mueven en fase, refiriéndose al tiempo instantáneo como origen del tiempo y a la frecuencia, mientras que el signo de la diferencia de fase indica qué serie es la principal en esta relación (Percival y Walden, 2000).

En concordancia, la coherencia de Fourier (Ver Ecuación 8), calcula la correlación cruzada que existe dentro de dos series de tiempo dependiendo de la frecuencia (Carmona y Torresani, 1998).

#### **Ecuación 8:**

*Coherencia de Fourier*

$$\text{Coherency} = \frac{s\text{Wave.}xy}{(s\text{Power.}x * s\text{Power.}y)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

Así, en la analogía con la noción de coherencia de Fourier y el coeficiente de determinación en estadística, la coherencia de la ondícula viene dada por la fórmula (ver Ecuación 9) (Georgiou y Kumar, 1994).

**Ecuación 9:**

*Coherencia de la ondícula*

$$Coherence = \frac{|sWave. xy|^2}{(sPower.x*sPower.y)} \quad (9)$$

**2.7.6. Interpolación de Kriging Utilizando ArcGIS**

ArcGIS es un sistema utilizado a nivel mundial, que permite publicar información geográfica visible. Este sistema realiza muchas funciones como recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir toda la información geográfica que existe (ESRI, 2021). Además, permite: establecer y dirigir bases de datos geográficas, determinar problemas con análisis espacial, imaginar aplicaciones que se basen en mapas. Tiene como beneficios: perfeccionar la resolución de problemas, uso eficiente de los recursos, motivar la colaboración entre instituciones, entre otros (ESRI, 2021).

La interpolación de Kriging pondera los valores medidos circundantes con el fin de obtener una predicción de una ubicación, se basa en la siguiente ecuación (National Weather Service, 2019):

**Ecuación 10:**

*Formula general para interpolación*

$$\hat{Z}(S_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (10)$$

Donde:

- $Z(s_i)$ : es la valoración calculada en la ubicación i
- $\lambda_i$ : es una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i.
- $S_o$  : indica la posición de la predicción
- $N$ : numero de valores calculados

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Área de Estudio**

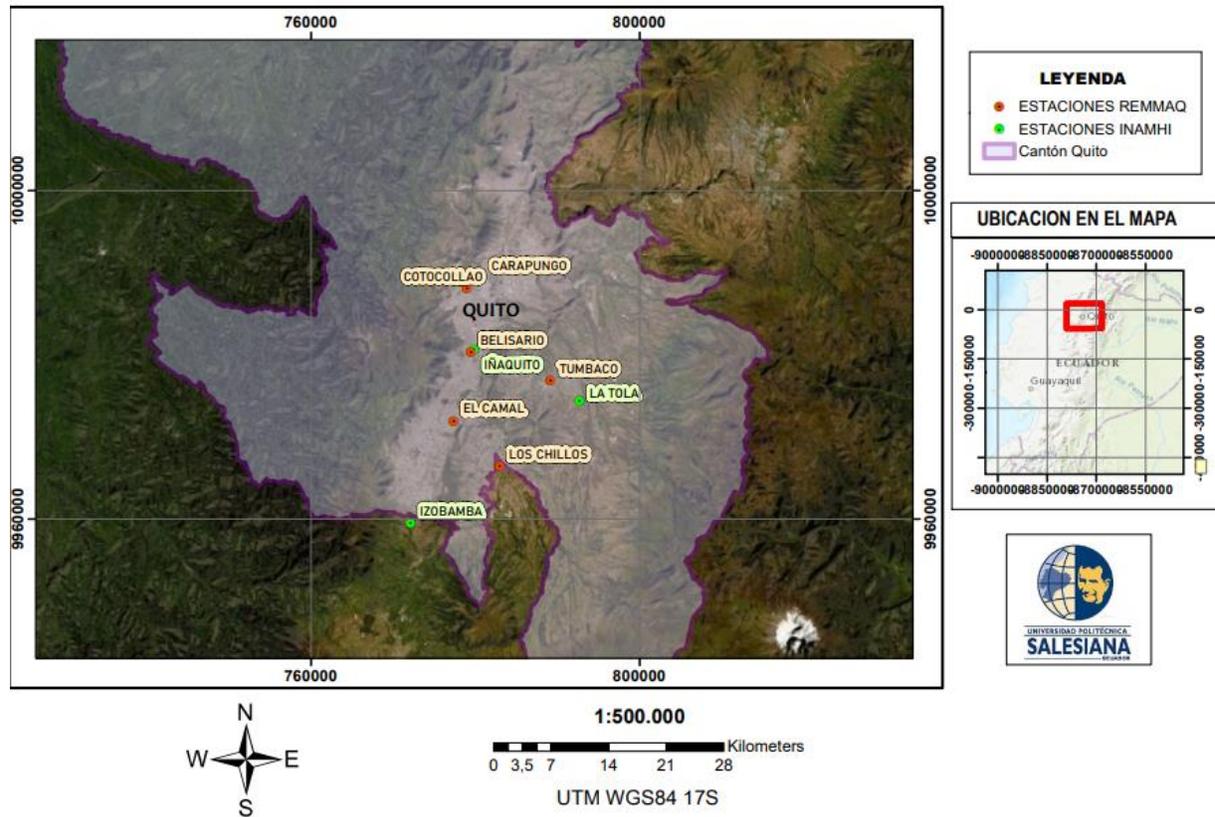
Las estaciones meteorológicas consideradas para este estudio están ubicadas en la Provincia de Pichincha Cantón Quito con Latitud: -0.225219, Longitud: -78.5248 0° y una altura de 2850 m (Castro y Rosales, 2013). La ciudad de Quito está situada entre la ladera interandina de la Cordillera Occidental, rodeada por el volcán Pichincha y el Atacazo (Pourrut, 1995).

Su ubicación hace que sea vulnerable a ciertos factores de riesgo entre los que sobresalen; erupciones volcánicas, sismos, existencia de fallas geológicas, y más (Fernández, 1996). Los riesgos mencionados anteriormente tienen menor probabilidad de ocurrencia, a diferencia de las lluvias extremas que ocurren con mayor frecuencia y persistencia, que al combinarse con las pendientes altas que posee de la ciudad da como resultado procesos erosivos que causan inundaciones, deslizamientos de tierra y saturación del sistema de alcantarillado (Villacis, 2017).

Para el presente estudio se consideraron 9 estaciones (Figura 8), las mismas que se mencionan a continuación: La Tola, Iñaquito, Belisario, Izobamba, Carapungo, Cotocollao, Los Chillos, El Camal y Tumbaco. Cabe mencionar que el área del proyecto ha sido seleccionada considerando el número de estaciones que dispone dicho Cantón al igual que el número de datos que posee cada estación.

Figura 10.

Ubicación de las estaciones de interés para el estudio



Nota. Área de estudio y ubicación exacta de las estaciones. Elaborado por: Romero y Topón.

### **3.2. Manejo de datos**

Para realizar el presente estudio se recolectaron datos de las siguientes instituciones: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y también los datos proporcionados por la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ). Al inicio del estudio se consideró un total de 12 estaciones, dentro de las cuales 3 son monitoreados por el INAMHI (Izobamba, Iñaquito y la Tola), y los 9 restantes son monitoreadas por el REMMAQ (Belisario, Centro, Carapungo, Cotocollao, El Camal, Guamaní, Los Chillos, San Antonio y Tumbaco).

De todas las estaciones anteriormente mencionadas solo se han tomado en cuenta 9 estaciones y las 3 estaciones restantes (Guamaní, San Antonio y El Centro) fueron eliminadas ya que existía un déficit de datos, que no permitía realizar el respectivo estudio. En la tabla 2 se detalla las características geográficas de las estaciones a ser utilizadas en esta investigación, aquí se describe el código, nombre de la estación, variables, longitud, latitud, fechas entre otros (Tabla 2).

**Tabla 2:***Descripción de las estaciones a ser estudiadas*

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>	<b>INAMHI/REMMAQ</b>
M0002	La Tola	Precipitación				1/3/1980	31/12/2019	INAMHI
		Humedad				1/1/1988	31/12/2019	
		Temperatura	0° 13' "54.44"'''' S	78° 22' "13.56"'' W	2480m	1/1/1988	31/12/2019	
		Viento				1/1/1988	31/12/2019	
M0024	Iñaquito	Precipitación				1/3/1980	31/12/2019	INAMHI
		Humedad				1/1/1988	31/12/2019	
		Temperatura	0° 0' "41.89"'''' S	78° 29' "15.83"'' W	2789m	1/1/1988	31/12/2019	
		Viento				1/1/1988	31/12/2019	
M0003	Izobamba	Precipitación				1/3/1980	31/12/2019	INAMHI
		Humedad				1/1/1988	31/12/2019	
		Temperatura	0° 21' "57.33"'''' S	78°33' "18.46"'' W	3058m	1/1/1988	31/12/2019	
		Viento				1/1/1988	31/12/2019	

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>	<b>INAMHI/REMMAQ</b>
		Precipitación				1/1/2004	31/10/2020	
		Humedad				1/1/2004	31/10/2020	
M5037	Belisario	Temperatura	0°10'48" S	78°29'24" W	2835m	1/1/2004	31/10/2020	REMMAQ
		Viento				1/1/2004	31/10/2020	
		Presión				1/1/2004	31/10/2020	
		Precipitación				1/1/2004	31/10/2020	
		Humedad				1/1/2004	31/10/2020	
M5036	Carapungo	Temperatura	0°5'54" S	78°26'50" W	2660m	1/1/2004	31/10/2020	REMMAQ
		Viento				1/1/2004	31/10/2020	
		Presión				1/1/2004	31/10/2020	
		Precipitación				1/1/2004	31/10/2020	
		Humedad				1/1/2004	31/10/2020	
M5035	Cotocollao	Temperatura	0°6'28" S	78°29'50" W	2739m	1/1/2004	31/10/2020	REMMAQ
		Viento				1/1/2004	31/10/2020	
		Presión				1/1/2004	31/10/2020	

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>	<b>INAMHI/REMMAQ</b>
		Precipitación				1/01/2004	31/10/2020	
		Humedad				1/1/2004	31/10/2020	
M5038	El Camal	Temperatura	0°15'00" S	78°30'36" W	2840m	1/1/2004	31/10/2020	REMMAQ
		Viento				1/1/2004	31/10/2020	
		Presión				1/1/2004	31/10/2020	
		Precipitación				1/1/2004	31/10/2020	
		Humedad				1/1/2004	31/10/2020	
M5041	Los Chillos	Temperatura	0°18'00" S	78°27'36" W	2453m	1/1/2004	31/10/2020	REMMAQ
		Viento				1/1/2004	31/10/2020	
		Presión				1/1/2004	31/10/2020	
		Precipitación				1/1/2004	31/10/2020	
		Humedad				1/1/2004	31/10/2020	
M5040	Tumbaco	Temperatura	0°12'36" S	78°24'00" W	2331m	1/1/2004	31/10/2020	REMMAQ
		Viento				1/1/2004	31/10/2020	
		Presión				1/1/2004	31/10/2020	

*Nota.* Datos geográficos de cada estación, se describe, longitud, latitud, fuente, código y altitud. Se debe tomar en cuenta que las estaciones del INAMHI, no cuentan con los datos de presión ya que los mismo no fueron facilitados por dicha institución. Elaborado por, Romero y Topón.

### **3.3. Obtención de Datos**

Para esta investigación se consideraron dos fuentes principales; El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), de donde se obtuvieron datos diarios de las siguientes variables meteorológicas: temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación, recorrido del viento, humedad relativa. Al igual que de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ), de donde se tomaron datos horarios de precipitación, temperatura media, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento y presión.

Además, se obtuvieron bases de datos de tesis anteriores, donde los datos de humedad relativa, temperatura, presión, dirección y velocidad de viento ya contaban con control de calidad en su mayoría.

Para el caso del análisis mediante Wavelets, los datos de El Niño - Oscilación Sur (ENSO) se adquirieron de una base de datos disponible en la siguiente página web: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/climwx.shtml>. Y los datos de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) se obtuvieron de la base de datos histórica disponibles en el siguiente link: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>.

### **3.4. Transformación y Validación de Datos**

Con los datos disponibles se procedió a ordenar los datos del INAMHI que se encontraban en formato de texto, y se tuvo que transformar a formato xlsx, para que los mismos puedan ser identificados en el programa de R Studio, mientras que los datos de la REMMAQ se encontraban en formato xlsx, y solo se tuvo que aumentar al archivo ciertas columnas que tomarían el nombre, de fecha, año, día y hora. Considerando que la

precipitación es la variable con mayor relevancia para nuestra investigación se realizó un análisis estadístico para determinar el porcentaje de datos válidos por estación (Ver tabla 3). Donde se visualizó que la estación del El Camal, requiere de un control de calidad.

**Tabla 3**

*Porcentaje de datos validos por cada estación*

<b>Estación</b>	<b>% Datos válidos</b>
Izobamba	100%
Iñaquito	100%
La Tola	100%
Belisario	100%
Carapungo	100%
Cotocollao	100%
El Camal	93,18%
Los Chillos	100%
Tumbaco	100%

*Nota.* Descripción del porcentaje de datos validos de cada estación, se puede observar que es su mayoría tienen un porcentaje del 100% excepto la estación del Camal. Elaborado por, Romero y Topón.

### **3.5. Control de Calidad**

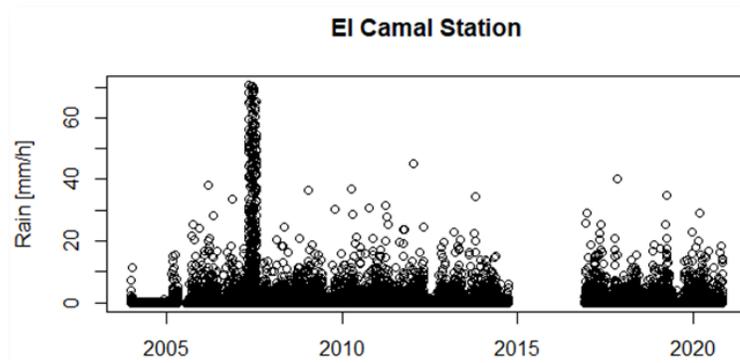
Al realizar los diagramas de dispersión con ayuda de la herramienta RStudio se evidencia que a comparación de las demás gráficas se veía un problema recurrente en tres estaciones cuyos nombres son, Centro, Guamaní y San Antonio, dicho problema es la falta de datos, cabe mencionar que en la Estación Centro solo se disponían datos desde el 21/06/2018 hasta 31/10/2020, de la misma forma en la Estación Guamaní se disponían datos desde 19/09/2008 hasta 31/10/2020 y de igual manera en la Estación San Antonio se disponían datos desde 23/03/2017 hasta 31/10/2020. Dichos datos no eran suficientes para ser representados mediante gráficas de series y percentiles, por lo cual como ya se mencionó anteriormente en la sección de “datos recopilados” se procedió a eliminar las tres estaciones del estudio.

En el resto de estaciones, los datos no presentaban dificultades, a excepción de la estación del Camal. La cual presentaba datos inconsistentes, los mismos que pudieron ser a causa de una falla de la estación la cual pudo haber estado dañada, averiada o el sensor estaba apagado (y a causa de esto no se registraron datos del año 2004, 2015 y 2016) (Ver figura 12). Para controlar estas inconsistencias en los datos se procedió a eliminar datos para las siguientes fechas en el año 2004: datos desde el 01/02/2004 hasta 31/12/2004. En el año 2005 se eliminaron datos de todo el mes de enero. Y finalmente, en el año 2007 se eliminaron datos con fallas desde el 01/04/2007 hasta el 31/07/2007 (Ver figura 13).

Para las demás variables no se realizó un control de calidad, ya que no presentaban ningún tipo de inconsistencia.

**Figura 11.**

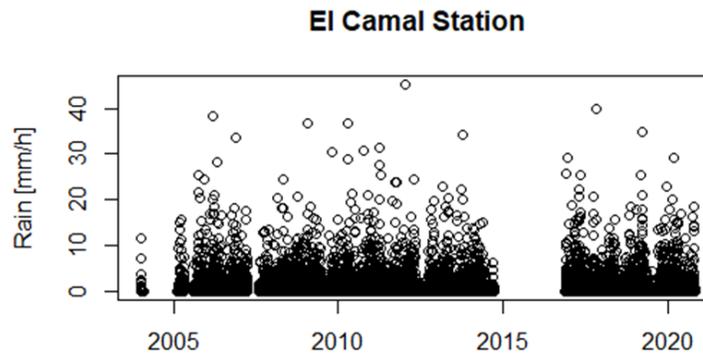
*Diagrama de dispersión de la estación del Camal sin control de calidad.*



*Nota.* Gráfica de dispersión, donde los años 2004, 2005 y 2007 tienen inconvenientes los cuales deben ser corregidos para poder proceder con el estudio, caso contrario podría traer problemas. Elaborado por, Romero y Topón.

**Figura 12.**

*Diagrama de dispersión para la estación El Camal con control de calidad.*



*Nota.* Se eliminaron datos del año 2007 específicamente de los meses de abril, mayo, junio y julio y del año 2004, también se eliminaron datos desde febrero hasta diciembre. En el control se eliminaron datos del año 2005 para el mes de enero. Elaborado por, Romero y Topón.

### **3.6. Evaluación de Umbrales de Precipitación Extrema**

#### **3.6.1. Cálculo de Percentiles por Estación**

En esta sección, en las tablas 5 y 6 se muestran los percentiles P90, P95 y P99, también se presenta los cuartiles Q1, Q2, Q3, la media, mínimo, máximo y la data por estación. Cuyo cálculo se realizó con ayuda de la herramienta RStudio mediante scripts. Cabe mencionar que se tiene datos diarios y horarios.

#### **3.6.2. Representación Gráfica de los Percentiles 90 (lluvia fuerte) y 99 (lluvia extrema) Mediante la Herramienta de ArcGIS**

Se realizaron mapas para representar a los percentiles 90 y 99 solo para las estaciones de la REMMAQ que disponían de datos horarios. Se utilizó la herramienta ArcGis mediante el ArcToolbox que contiene herramientas de interpolación IDW (Distancia inversa ponderada) y Spline, para nuestro estudio se implementó la interpolación “Kriging”, que es uno de los métodos de interpolación que se basan en fórmulas matemáticas específicas que logran obtener como resultado la uniformidad de un área. (*Empirical Bayesian Kriging*, n.d.).

### **3.7. Análisis Interanual, Estacional y de Ciclo Diurno de la Precipitación**

Para este análisis se utilizó los datos con su respectivo control de calidad. Primero se procedió a realizar, el cálculo de los percentiles, cuartiles, promedios y también a graficar los percentiles y las series mediante una herramienta de programación llamada R Studio (Ver tabla 5 y 6).

Cabe mencionar que la distribución de la lluvia no es normal o Gaussiana (Ver Figura 15 y 16), sino más bien es Exponencial e inclusive hay referencias que indican que es gamma o log-normal (Serrano et al., 2020). Es decir, que la frecuencia de los eventos

pequeños es mayor y existen pocos eventos muy grandes, pero que son muy significativos. Bajo este contexto, se presentan dos gráficas: los boxplots, que permiten ver los eventos extremos y se marcan los cuartiles los cuales son muy resistentes a estos eventos extremos. Asimismo, se presentan histogramas, que permiten conocer la lluvia acumulada en cada variable, lo cual es diferente a la cantidad de lluvia de los eventos extremos. Los mismos se presentan en las figuras 19-23.

### 3.8. Determinación de la Correlación entre la Precipitación y las otras Variables

#### Meteorológicas.

Para este proceso, los datos de cada una de las variables meteorológicas obtenidas de la REMMAQ se ordenaron para cada estación en un documento de Excel como se muestra en la figura 14, para luego mediante la utilización del programa RStudio obtener las correlaciones.

**Figura 13.**

*Estructura de datos para la obtención de gráficas de correlaciones de las variables meteorológicas.*

PRECIPITACION	TEMPERATURA	DIRECCION DEL VIENTO	VELOCIDAD DEL VIENTO	HUMEDAD RELATIVA	PRESION
0,1	8,19	305,85	0,47	93,1	726,69
0,1	8,36	8,02	0,62	93,12	726,96
1,3	13,22	87,83	1,53	77,47	726,57
0,2	12,59	132,01	1,67	82,88	725,46
0,1	13,04	105,05	1,7	81,25	725,12
6,1	10,09	135,51	1,44	94,01	726,86
4,2	9,73	113,76	1,03	95,52	727,06
3,5	9,29	133,35	1,17	95,76	728,02
1,9	8,95	153,01	1,08	96,01	728,72
1,5	8,63	106,16	1,26	95,51	728,76
0,5	7,91	156,55	1,55	96,17	728,27
0,3	7,85	169,11	0,96	96,98	727,08
1,5	11,83	154,48	1,73	84,75	725,12

*Nota.* Formato de datos en archivo Excel utilizado para obtener las correlaciones de las variables meteorológicas mediante la implantación del programa RStudio. Elaborado por, Romero y Topón.

El script utilizado en este paso se detalla en el anexo D.

### **3.9. Análisis de Relación por Evento Extremo frente a otras Variables Meteorológicas**

En este punto se identifican 3 principales eventos lluviosos por cada estación., teniendo así un total de 27 eventos, los mismos que se muestran en la tabla 4. Pero es importante aclarar que para su análisis solo se consideraran los eventos de las estaciones de la REMMAQ, ya que solo se puede realizar este proceso con datos horarios, es decir solo se consideraran 12 eventos.

**Tabla 4:***Eventos de lluvia extrema para cada estación de la REMMAQ e INAMHI.*

<b>Estación</b>	<b>Magnitud del evento(mm/h)</b>	<b>Fecha de ocurrencia</b>	<b>Hora de ocurrencia</b>
	84,5	25 de marzo del 2009	
Izobamba	71,4	14 de diciembre del 2004	
	66,8	10 de mayo de 1985	
	75	15 de mayo del 2017	
Iñaquito	71,6	31 de agosto del 1996	Las estaciones del INAMHI no disponen de datos horarios
	60,3	10 de febrero del 2005	
	79,2	05 de abril de 1981	
La Tola	74,6	03 de marzo del 2019	
	68	11 de noviembre de 1993	
	55,9	28 de febrero del 2019	21:00
Belisario	47,9	26 de diciembre del 2009	14:00
	40,3	26 de junio del 2017	21:00
	37,4	02 de mayo del 2009	15:00
Carapungo	33,8	23 de octubre del 2016	21:00
	33,4	14 de julio del 2011	18:00
	34,1	25 de marzo del 2017	14:00
Cotocollao	33,1	21 de abril del 2008	23:00
	32	17 de junio del 2012	15:00
	45,2	09 de enero del 2012	17:00
El Camal	40	02 de noviembre del 2017	14:00
	38,3	20 de marzo del 2006	15:00

<b>Estación</b>	<b>Magnitud del evento(mm/h)</b>	<b>Fecha de ocurrencia</b>	<b>Hora de ocurrencia</b>
	45,5	12 de noviembre del 2010	17:00
Los Chillos	44,8	27 de abril del 2017	17:00
	43,7	31 de agosto del 2010	16:00
	40,4	23 de marzo del 2015	16:00
Tumbaco	37,7	15 de abril del 2016	16:00
	31,2	17 de abril del 2020	16:00

*Nota.* Eventos de lluvia extrema más significativos de cada estación, se describe también la magnitud y la fecha de ocurrencia. Elaborado por, Romero y Topón.

Para analizar el comportamiento del evento extremo, se realizó una gráfica junto con las demás variables meteorológicas 24 horas antes y 24 horas después de cada uno de estos eventos, este comportamiento se lo puede observar en las figuras 24,25,26, 27,28 y 29.

### **3.10. Análisis de Wavelets en Correlación y Correlación Cruzada.**

Se puede mencionar que para llevar a cabo el análisis de Wavelets se utilizó el paquete WaveletComp de RStudio (Schmidbauer, 2018). En primer lugar, se realizó un análisis univariado utilizando el script presentado en el anexo E, y también se elaboró la correlación cruzada o conocida como análisis bivariado que se puede observar en el anexo F.

El pretratamiento de la información que será analizada a través de WaveletComp, incluye el reemplazo de valores vacíos (NAs) y la normalización de los mismos. También hay que tomar en cuenta que los valores que se va a utilizar son los promedios mensuales,

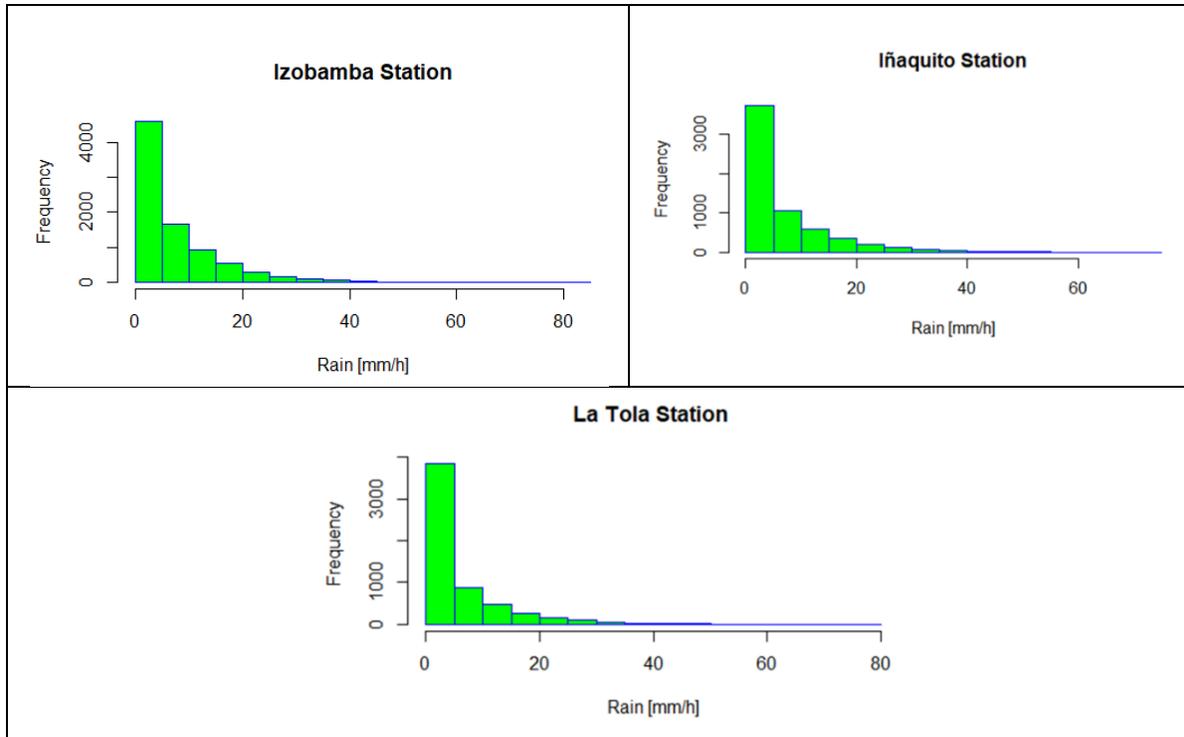
tanto para el índice ONI y PDO. Un punto importante para llevar a cabo dicho análisis es que todos los datos estén completos.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Histogramas de Frecuencia

Figura 14.

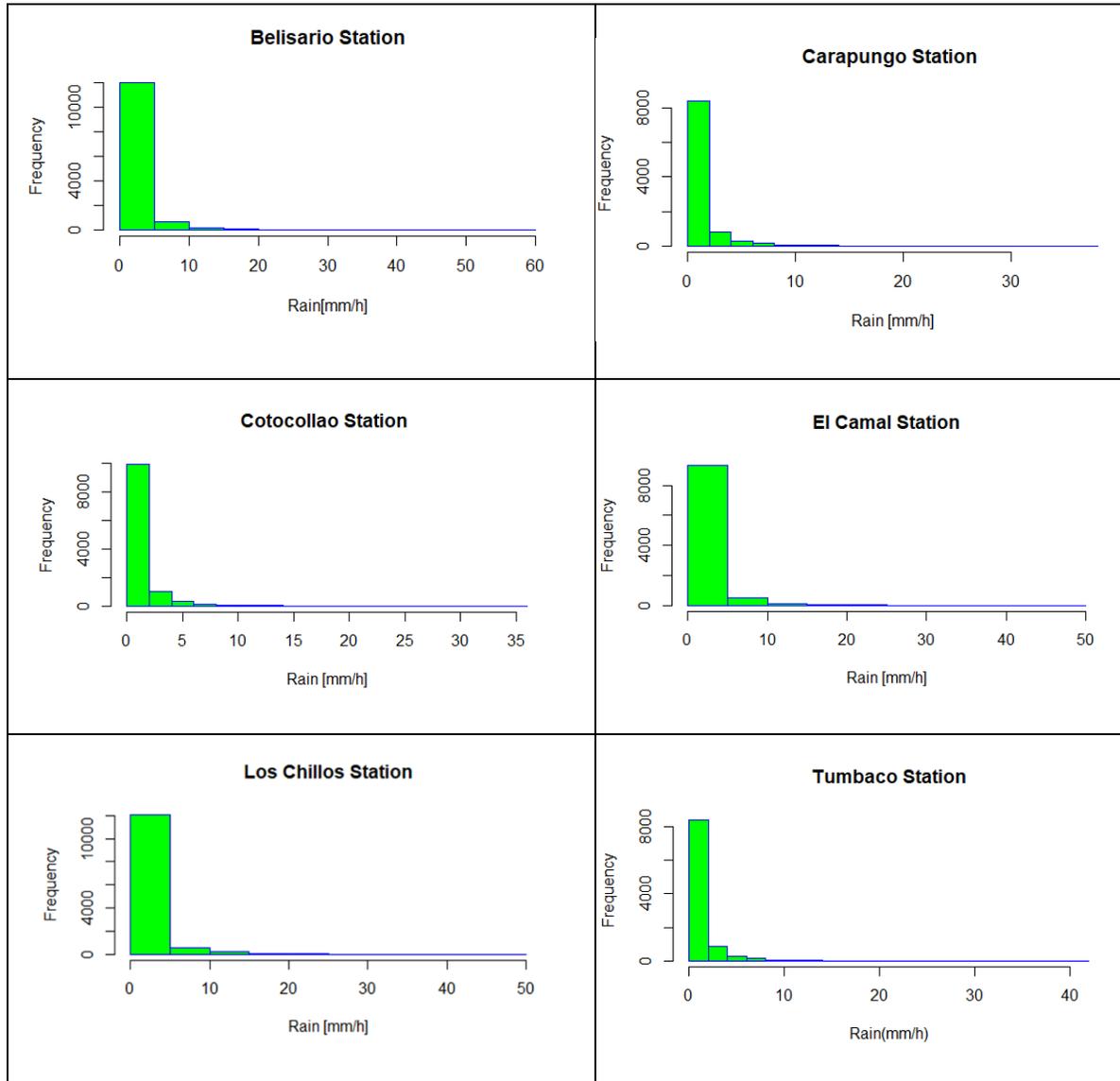
*Histogramas de frecuencia para estaciones del INAMHI*



*Nota.* Elaborado por, Romero y Topón.

**Figura 15.**

*Diagramas de frecuencia para estaciones de la REMMAQ.*



*Nota.* Elaborado por, Romero y Topón.

En la figura 15 y 16 se representan los datos acumulados de cada estación tanto del INAMHI como de la REMMAQ. Mediante las cuales se puede decir que la distribución de lluvia no es normal y se asemeja a una distribución exponencial, log-normal o gamma como lo menciona Serrano-Vincenti et al., (2020) en su investigación . Por lo tanto, estas distribuciones se caracterizan por tener muchos eventos pequeños y pocos muy grandes, no cuentan con un promedio o desviación estándar definido que sea característico de esta distribución, ya que, al aparecer un nuevo evento de gran magnitud, los estadísticos de la distribución se moverían considerablemente, tal como se puede evidenciar en las figuras 15 y 16 al igual que en las tablas 5 y 6

Cabe mencionar que no por ser un valor grande deba ser tratado como un outlier o que deba ser eliminado, sino al contrario, es necesario estudiar estos eventos extremos que le dan la forma a la distribución. Es así que en este tipo de análisis se priorizará el uso de cuartiles los cuales son *resistentes* y *robustos* a los diferentes tipos de distribución.

## 4.2. Cálculo de Percentiles

**Tabla 5**

*Datos diarios de las estaciones del INAMHI.*

<b>DATOS DIARIOS</b>										
<b>Estación (mm/día)</b>	<b>Min</b>	<b>Q1</b>	<b>Q2</b>	<b>Q3</b>	<b>P90</b>	<b>P95</b>	<b>P99</b>	<b>Max</b>	<b>No. datos</b>	<b>Promedio</b>
Izobamba	0,1	1,2	4,1	10	17,5	22,8	35	85,5	8344	6,91
Iñaquito	0,1	0,8	3,3	9,4	17,8	24	38	75	6244	6,631
La Tola	0,1	0,7	2,4	7,9	15,8	22,1	37	79,2	5845	5,76

*Nota.* Resultados de cuartiles, percentiles, media, máximo y mínimo de cada estación del INAMHI. Elaborado por, Romero y Topón.

**Tabla 6**

*Datos horarios de las estaciones de la REMMAQ.*

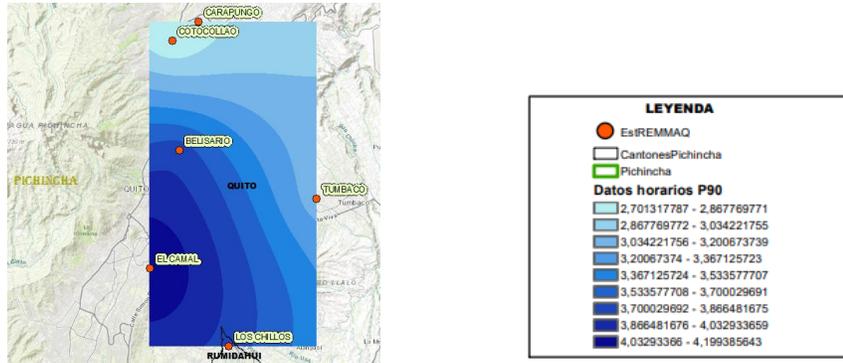
<b>DATOS HORARIOS</b>										
<b>Estación (mm/día)</b>	<b>Min</b>	<b>Q1</b>	<b>Q2</b>	<b>Q3</b>	<b>P90</b>	<b>P95</b>	<b>P99</b>	<b>Max</b>	<b>No. datos</b>	<b>Promedio</b>
Belisario	0,1	0,1	0,5	1,6	3,8	5,9	13,28	55,9	12820	1,45
Carapungo	0,1	0,1	0,4	1,2	2,8	4,7	10,67	37,4	9825	1,13
Cotocollao	0,1	0,1	0,4	1,1	2,7	4,3	9,9	34,1	11581	1,07
El Camal	0,1	0,2	0,6	1,8	4,2	6,8	15,5	45,2	10117	2,412
Los Chillos	0,1	0,1	0,4	1,5	3,8	6,7	16,4	45,5	12991	1,55
Tumbaco	0,1	0,1	0,4	1,2	3,1	5,1	13	40,4	9976	1,25

*Nota.* Resultados de los cuartiles, percentiles, media, máximo y mínimo de cada estación de la REMMAQ. Elaborado por, Romero y Topón.

### 4.3. Representación Gráfica Mediante la Interpolación de los Percentiles 90 y 99 Obtenidos de Datos Horarios de las Estaciones de la REMMAQ

Figura 16.

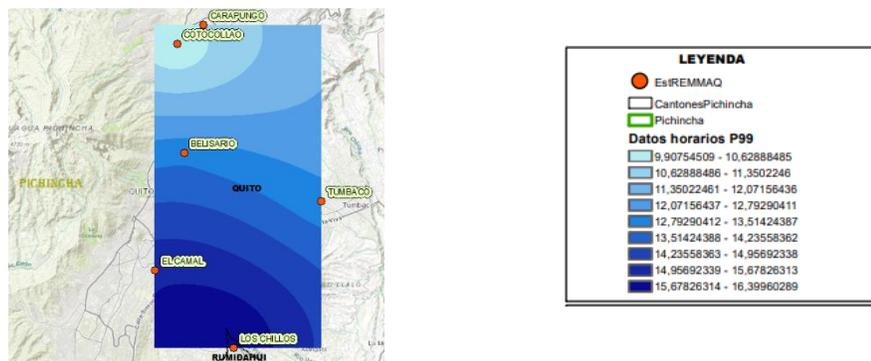
Mapa de interpolación para el percentil 90 que marca las lluvias intensas de datos horarios (Estaciones de la REMMAQ)



Nota. Interpolación mediante la metodología Kriging del percentil 90, que representa la precipitación fuerte para las estaciones de la REMMAQ. Elaborado por, Romero y Topón.

Figura 17.

Mapa de interpolación para el percentil 99 que marca las lluvias extremas de datos horarios (Estaciones de la REMMAQ)



Nota. Interpolación mediante la metodología Kriging del percentil 99, que representa la precipitación extrema para las estaciones de la REMMAQ. Elaborado por, Romero y Topón.

En la Figura 17, se puede apreciar que las lluvias intensas (aquellas que superan el percentil 90), de los datos estudiados tienen intensidades que van desde 2.7 a 2.9 mm/h en el norte de Quito: que corresponden a los sectores de Cotocollao y Carapungo. Mientras que, en el Sur de Quito, estas lluvias duplican su valor, logrando valores entre 4.0 a 4.2 mm/h en la estación de El Camal. Para el caso del sur oriente de la Ciudad de Quito las lluvias alcanzan valores que van desde 3.7 a 3.9 mm/h en la estación de Los Chillos y de igual manera ocurre en el sector de Belisario. En el lado oriental de Quito, se registran lluvias con intensidades de 3 a 3.2 mm/h en la estación de Tumbaco (Serrano Vincenti et al., 2012),

Por otro lado, la lluvia extrema (Sobre el percentil 99), representado en la figura 18 ha registrado su mayor intensidad en el Valle de los Chillos con intensidades de 15.7 a 16.4 mm/h, siendo éste el sector más afectado por las lluvias extremas. Esta magnitud decrece hasta lograr los valores de 9.9 y 10.6 mm/h en los sectores de Carapungo y Cotocollao. En el caso de los sectores de Belisario y Tumbaco las lluvias alcanzan valores de 12.8 a 13.5 mm/h. Para el sector sur de Quito las lluvias registran valores que van desde 14.9 a 15.7 mm/h en la estación de El Camal.

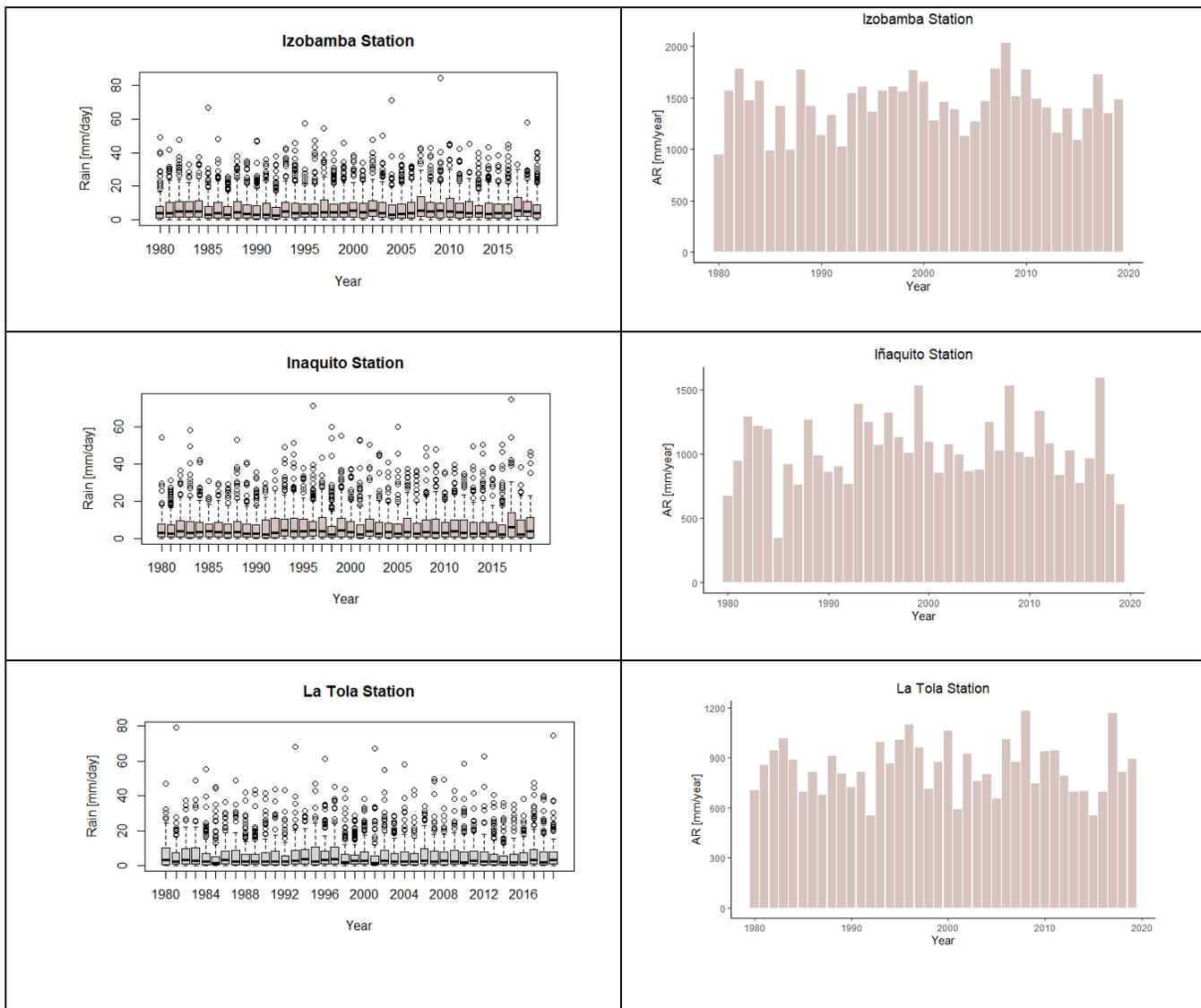
## 4.4. Análisis Interanual, Estacional y de Ciclo Diurno de la Precipitación

### 4.4.1. Análisis Interanual.

A continuación, se analizará el comportamiento interanual por estación, tanto con boxplots e histogramas de lluvia acumulada.

Figura 18.

*Boxplots e histogramas por año de las estaciones del INAMHI.*



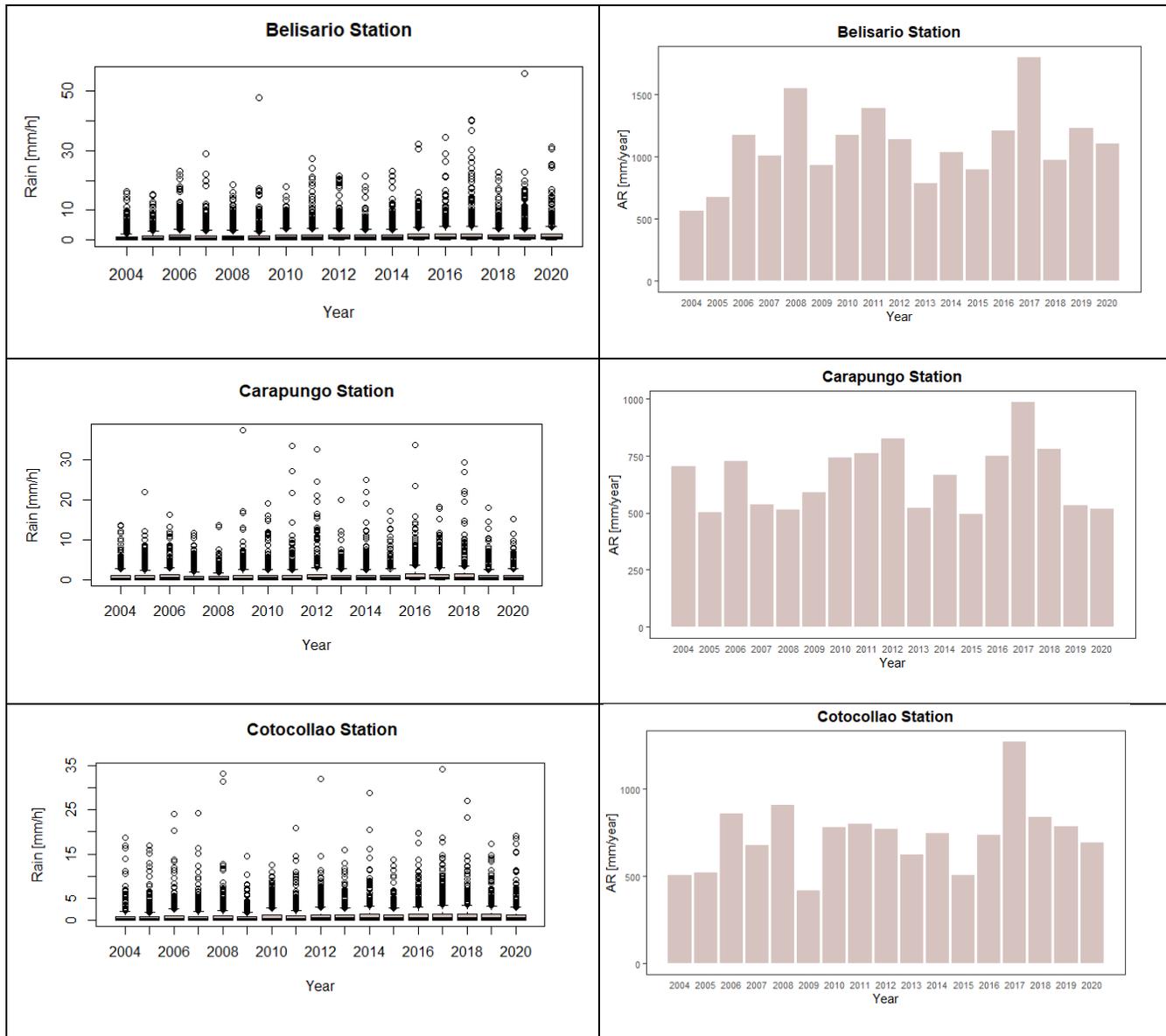
*Nota.* Boxplots e histogramas que representan el comportamiento interanual por cada estación. Los datos de las estaciones del INAMHI tienen resolución diaria. Elaborado por, Romero y Topón.

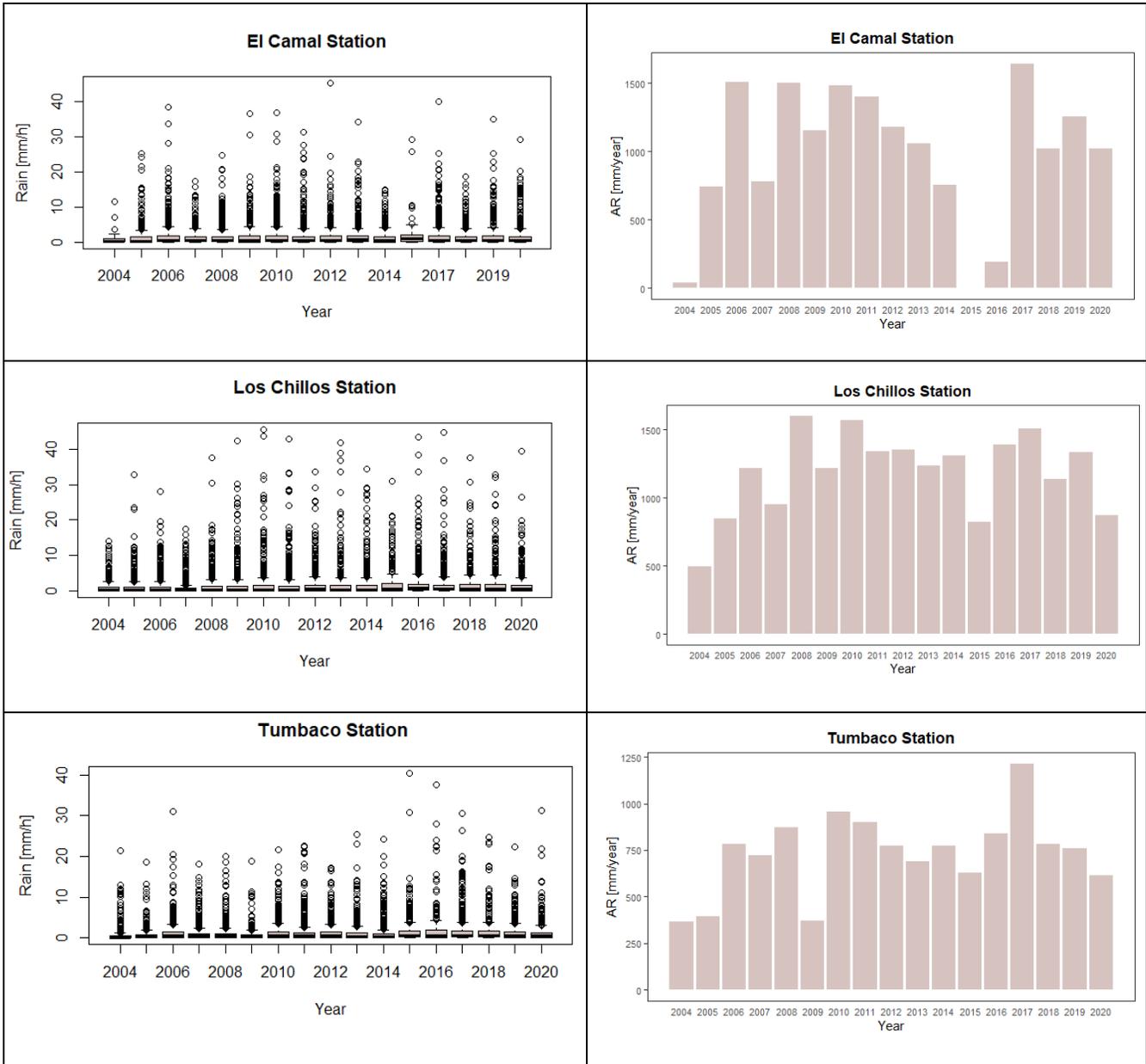
En la figura 19, se analizó la serie del INAMHI que va de 1980 al 2019 cubriendo 39 años de datos. Donde se observó que para las estaciones de: Izobamba y La Tola, el año más lluvioso fue 2008, mientras que para la estación de Iñaquito el año más lluvioso fue el 2017 como lo menciona en (Pacheco et al., 2019). El año menos lluvioso para la Estaciones Iñaquito fue el año 1985, en el caso de La Tola el año menos lluvioso fue 1992 y en Izobamba se dio en el año 1980 de acuerdo con la investigación de (Serrano et al., 2016).

Al analizar los eventos extremos se observó que no existe correspondencia directa entre la ocurrencia de un año lluvioso (es decir, en el que la lluvia acumulada es alta) con respecto a los años que presentan un evento extremo excepto para la estación de Iñaquito. En el caso de la estación Izobamba los dos eventos extremos más grandes ocurrieron en 2009 con 84.5 mm/día y en 2004 con 71.4 mm/día, pero al analizar el histograma de lluvia acumulativo no fueron los años más lluviosos. Al igual que para la estación de La Tola donde los eventos extremos ocurrieron en el año 1981 con 79.2 mm/día y en el año 2019 con 74.6 mm/día. Ocurre lo mismo con la estación de Iñaquito, los eventos extremos se registraron en el año 2017 con 75 mm/día y en el año 1996 con 71.6 mm/día que coincide con la investigación de (Barry, 1985). El mismo que indica que las lluvias extremas o torrenciales sobrepasan los 60 mm/h.

**Figura 19.**

*Boxplots e histogramas por año para las estaciones de la REMMAQ.*





*Nota.* Boxplots e histogramas que representan el comportamiento interanual por cada estación. Los datos de las estaciones de la REMMAQ tienen resolución horaria. Nótese que, en la estación del Camal, están incompletos los datos del año 2004, 2015 y 2016. Elaborado por, Romero y Topón.

Al analizar la figura 20 que representa las estaciones de la REMMAQ donde la serie comprende los datos desde el año 2004 al 2020, cubriendo 16 años de datos. Se puede observar que, para las estaciones de Belisario, Carapungo, Cotocollao, El Camal y Tumbaco el año más lluvioso fue 2017 que coincide con la investigación de (Pacheco et al., 2019). En el caso de la estación de Los Chillos el año más lluvioso fue el 2008. Mientras que el año menos lluvioso para las estaciones de Cotocollao y Tumbaco fue el 2009, para la estación de Belisario se dio en el año 2004 al igual que para la estación de Los Chillos como lo menciona (Gómez y Macchione, 2009).

En el caso de la estación El Camal el año menos lluvioso sucedió en 2016, cabe mencionar que en esta estación se eliminaron datos del año 2007 específicamente para el mes de abril, mayo, junio y julio, mientras que, del año 2004 se eliminaron datos desde febrero hasta diciembre, finalmente para el año 2005 se eliminaron los datos del mes de enero, el año que no se tuvo datos fue el 2015, por otro lado, los años que tuvieron menor número de datos fueron, 2004 y 2016. Para finalizar la estación de Carapungo el año menos lluvioso fue en el año 2015.

Se puede decir que si existe correspondencia directa entre la ocurrencia de un año lluvioso con respecto a los años que presentan un evento extremo en algunas de las estaciones. Ya que para la estación de Belisario los dos más grandes eventos extremos ocurrieron: el primero en 2009 con 47.9 mm/h y el segundo en 2019 con 55.9 mm/h. En el caso de la estación de Carapungo los eventos extremos se presentan en el año 2009 con 37,4mm/h y en el año 2016 con 33.8 mm/h. En la estación de Cotocollao ocurre lo mismo, los eventos extremos se dieron en el año 2008 con 33.1mm/h y en el año 2017 con 34.1mm/h. Y sucede lo mismo con las otras tres estaciones: El Camal con eventos extremos

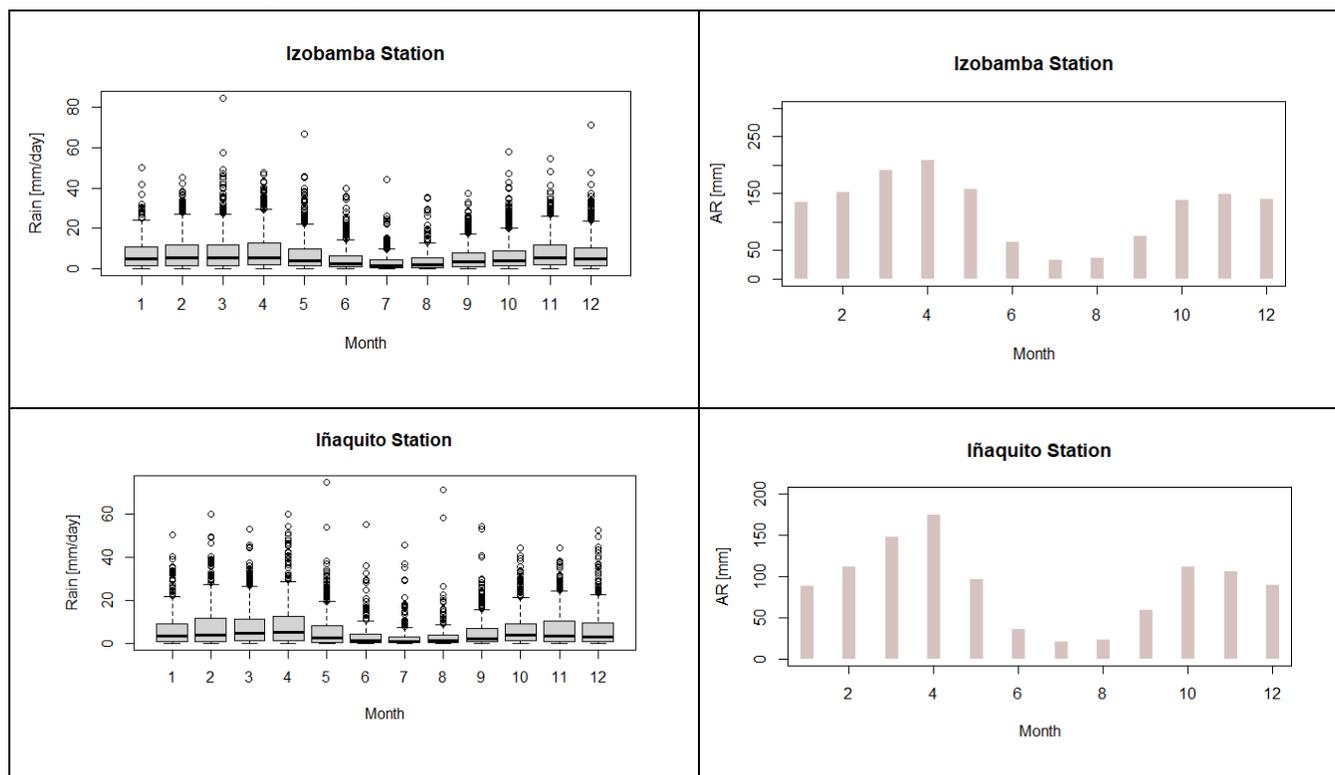
en el año 2012 con 45,2 mm/h y en el año 2017 con 40mm/h, Los Chillos presenta eventos extremos en el año 2010 con 45,5 mm/h y en el año 2017 con 44,8mm/h y la estación de Tumbaco con eventos extremos en el año 2015 con 40,4 mm/h y en el año 2016 con 37,7 mm/h que coinciden con las siguientes investigación (Villacis y Marrero, 2013) y (Chávez, 1994).

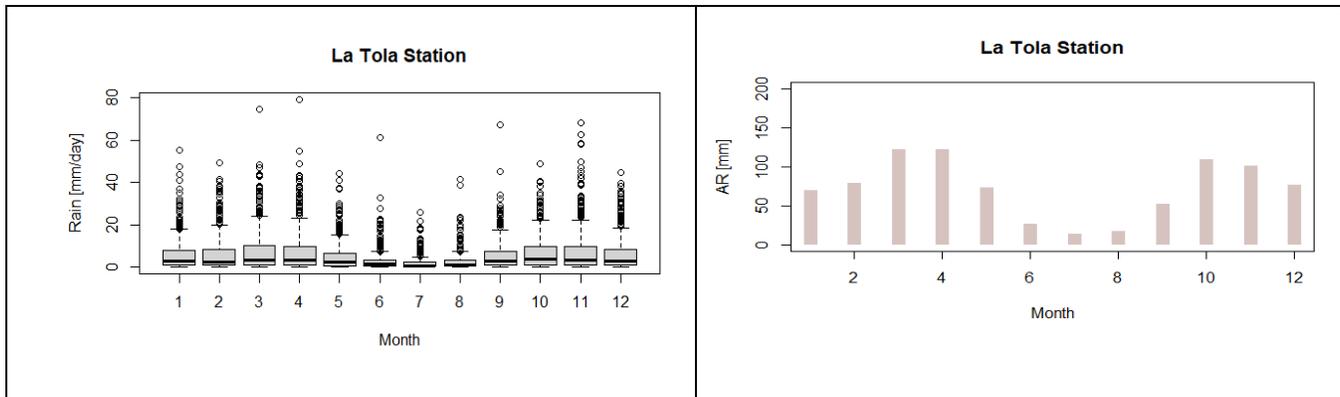
#### 4.4.2. Análisis Estacional

A continuación, se analizará el comportamiento estacional mensual por cada estación, tanto con boxplots e histogramas de lluvia acumulada.

**Figura 20.**

*Boxplots e histogramas por mes para estaciones del INAMHI.*





*Nota.* Boxplots e histogramas de las estaciones del INAMHI, dichos gráficos representan el comportamiento estacional por cada estación. Elaborado por, Romero y Topón.

En la figura 21 se analiza el comportamiento mensual de la precipitación para las estaciones del INAMHI. Aquí se puede observar que los meses más lluviosos para las estaciones de Iñaquito, Izobamba y La Tola es abril y el menos lluvioso es julio que coincide con lo mencionado en la investigación de Serrano et al. (2016).

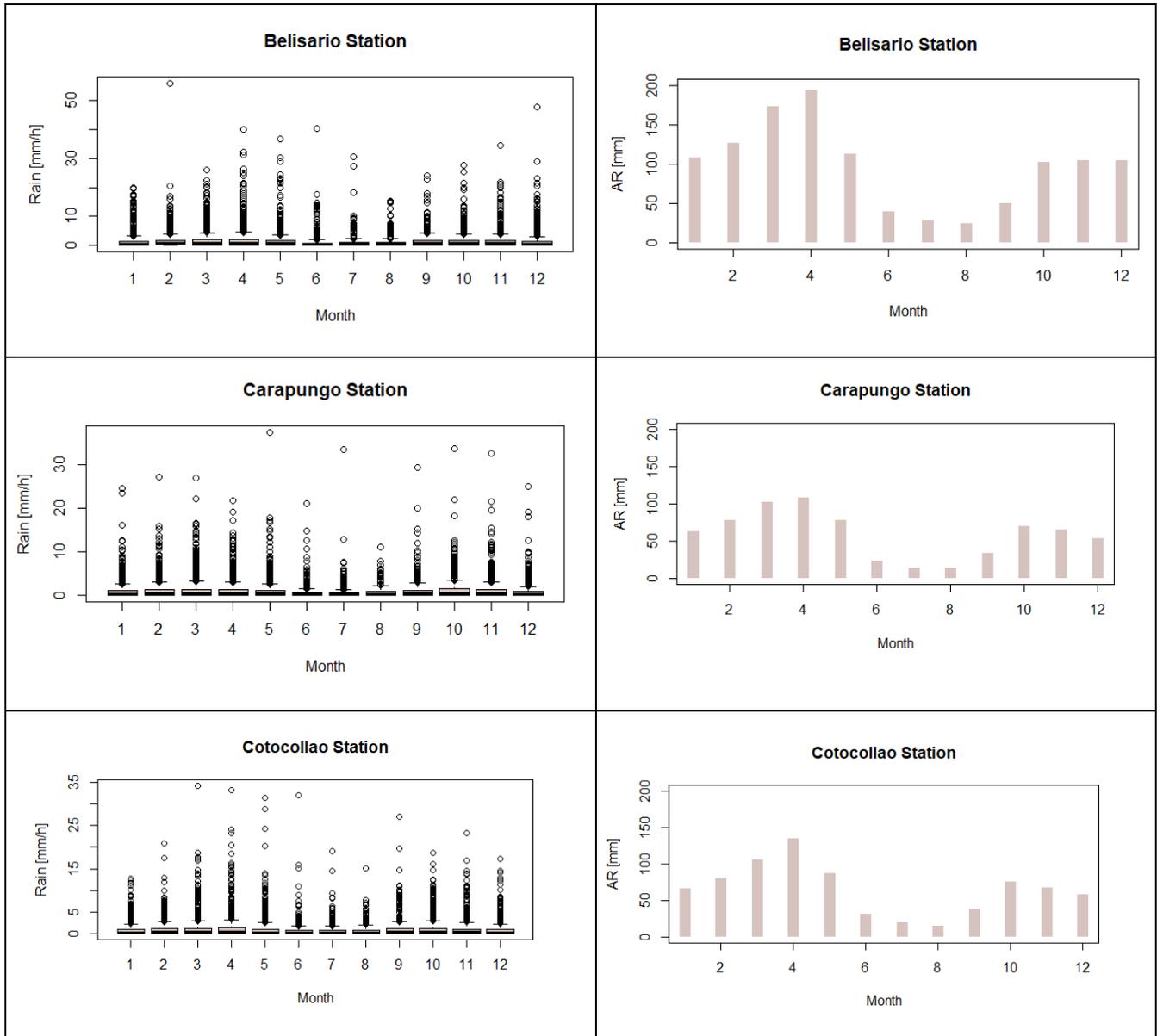
Con respecto a la correspondencia directa entre la ocurrencia de un mes lluvioso (es decir, en el que la lluvia acumulada es alta) se puede observar que los mismos no se relacionan para la mayoría de las estaciones. Ya que para la estación de Izobamba los mayores eventos extremos se presentan en el mes de marzo con 84.5mm/día y en el mes de diciembre con 71.4 mm/día como lo indica Pacheco et al., (2019) en investigación, una de las posibles causas de los eventos extremos en el mes de diciembre puede ser por la presencia de la corriente cálida del Niño.

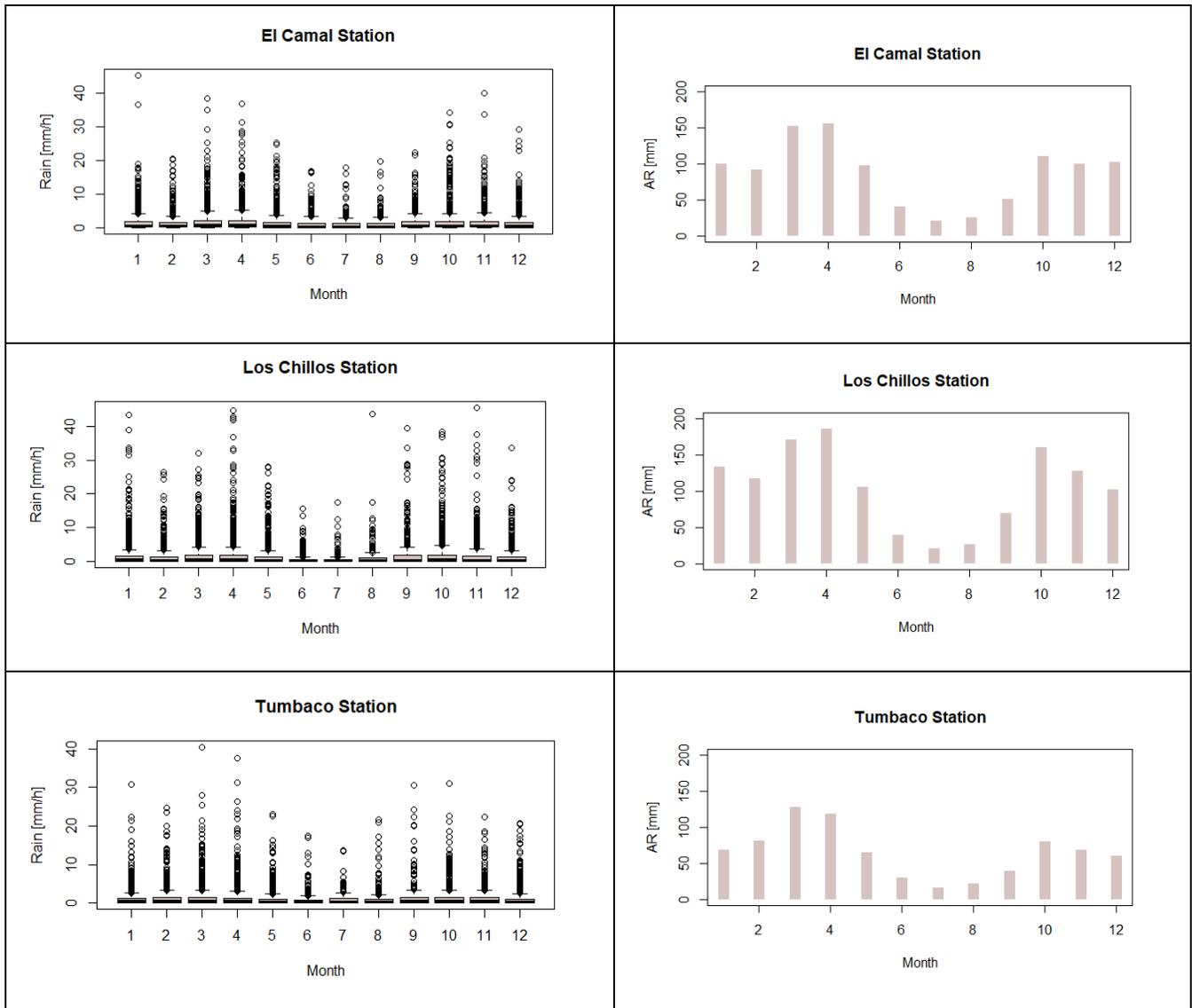
La estación de Iñaquito tiene sus dos más grandes eventos extremos en el mes de mayo con 75mm/día y en el mes de agosto con 71.6 mm/día. La Estación de la Tola si presenta una correspondencia directa, puesto que uno de sus eventos extremos se presenta en el mes de abril con 79.2mm/día, sin embargo, el evento extremo que le sigue es en el

mes de marzo con 74.6 mm/día que coincide con la investigación de Pourrut & Pierre (1983).

**Figura 21.**

*Boxplots e histogramas por mes para estaciones de la REMMAQ.*





*Nota.* Boxplots e histogramas los mismos que representan el comportamiento estacional por cada estación de la REMMAQ. Elaborado por, Romero y Topón.

En la figura 22 que representa el análisis estacional mensual para las estaciones de la REMMAQ se puede observar que en su totalidad el mes más lluvioso es abril. A diferencia de la estación de Tumbaco que tuvo el mes más lluvioso en marzo, evento que coincide con la investigación de Pourrut y Pierre (1983). Mientras que los meses menos lluviosos para las estaciones de Belisario, Carapungo y Cotocollao fue agosto. Para las

estaciones de El Camal, Los Chillos y Tumbaco el mes menos lluvioso fue julio que coincide con la investigación de Amestoy (1999).

También se puede observar que en la mayoría de las estaciones no existe la correspondencia directa entre la ocurrencia de un mes lluvioso (es decir, que la lluvia acumulada es alta) con respecto a los meses que presentan un evento extremo. Para la estación de Belisario los dos eventos extremos más altos se dieron en el mes febrero con 55.9 mm/h y en el mes de diciembre con 47.9 mm/h de acuerdo con Seidel et al. (2015). La estación de Carapungo tuvo sus eventos extremos en mayo con 37.4 mm/h y en octubre con 33.8 mm/h, resultado que coincide con lo expuesto por Venegas (2020) en su trabajo investigativo.

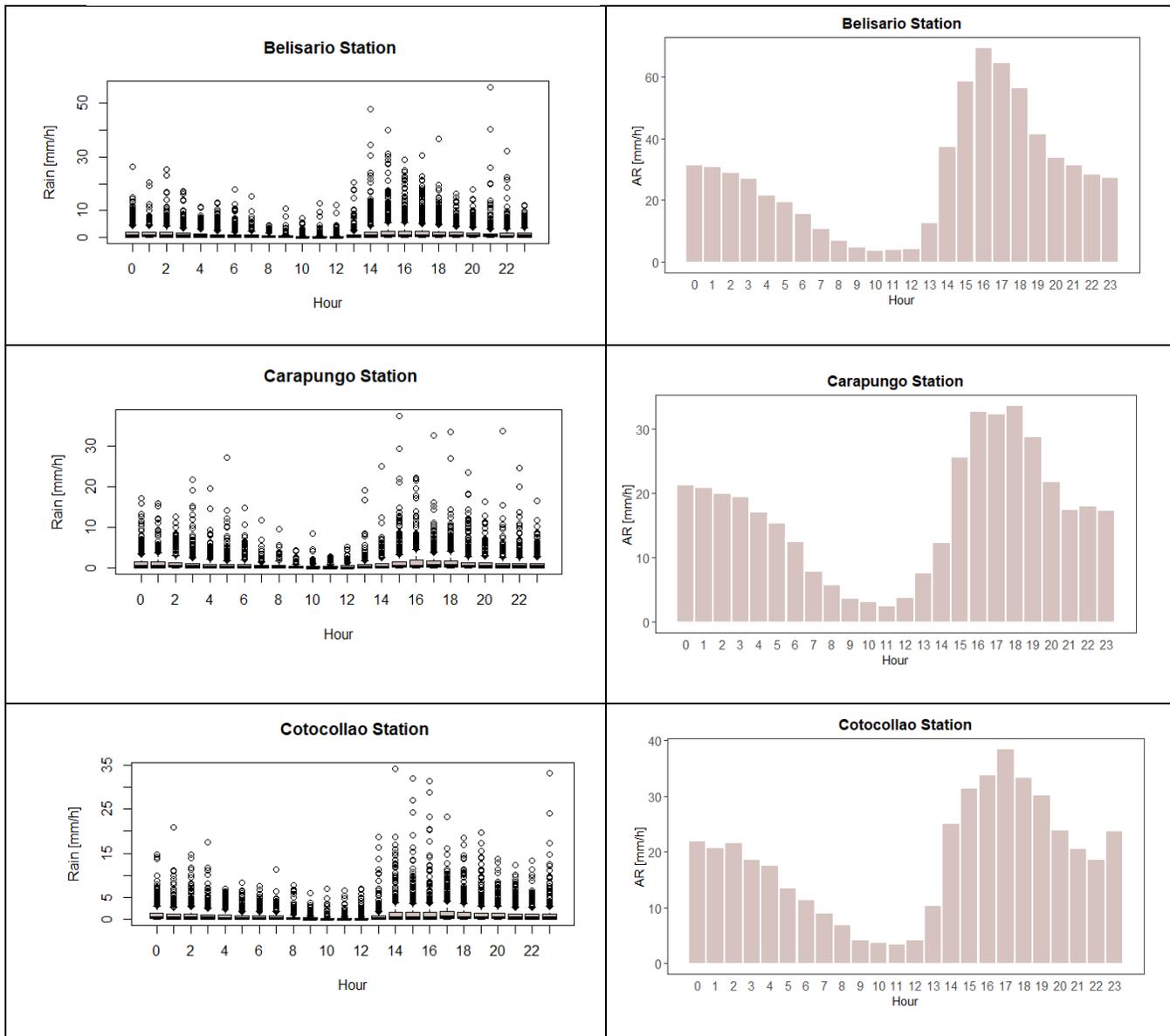
Asimismo, la estación El Camal mantuvo sus eventos extremos en enero con 45.2 mm/h y en noviembre con 40 mm/h. Al analizar las tres estaciones restantes frente a los histogramas de lluvia acumulativa si presentan correspondencia directa en al menos uno de sus eventos extremos, así tenemos: la estación de Cotocollao con un evento lluvioso extremo en abril con 33.1 mm/h y en marzo con 34.1 mm/h, la estación de Los Chillos en abril con 44.8 mm/h y en noviembre con 45.5 mm/h, y la estación de Tumbaco en marzo con 40.4 mm/h y en abril con 37.7 mm/h

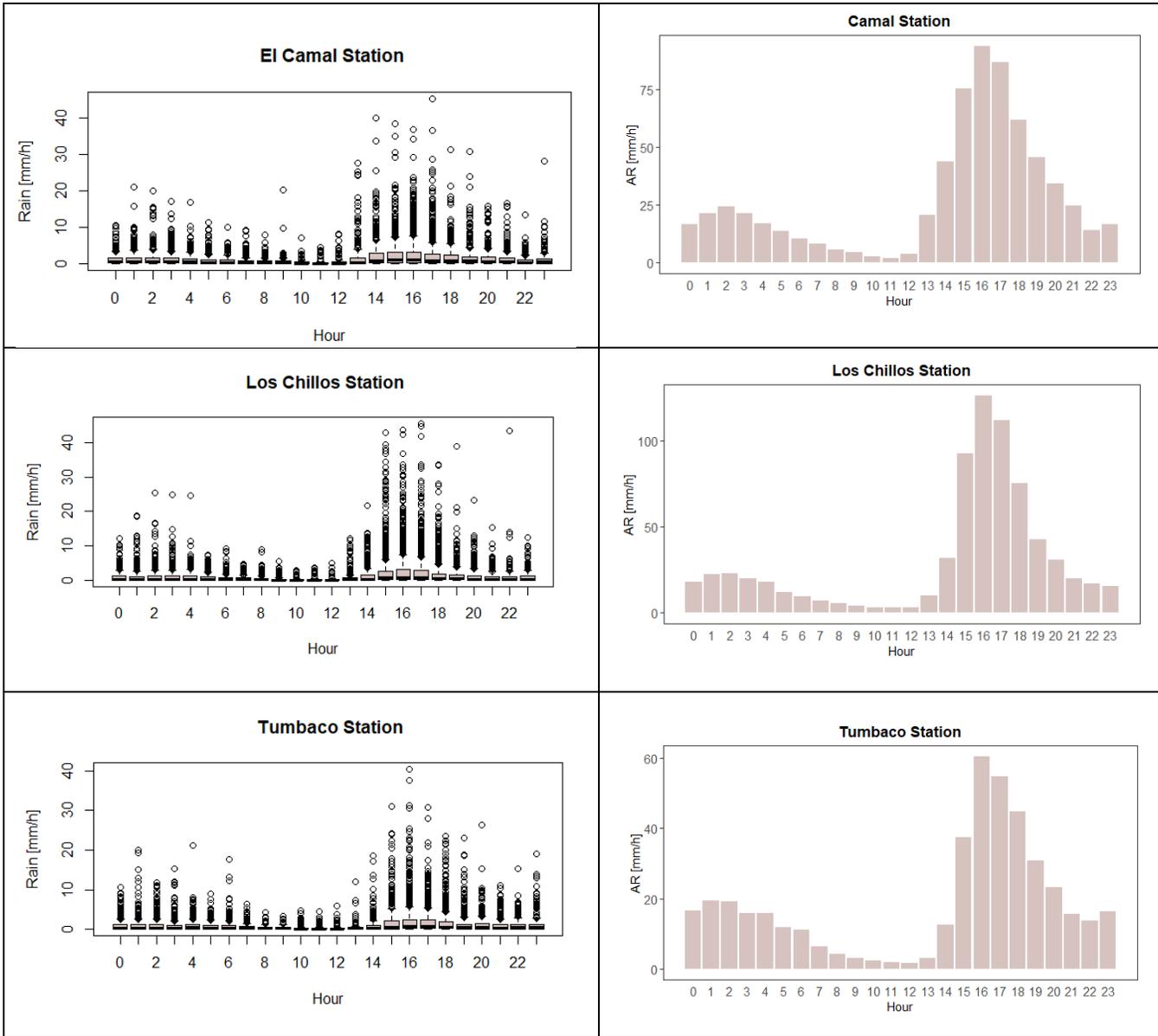
### 4.4.3. Análisis de Ciclo Diurno

A continuación, se analizará el comportamiento del ciclo diurno por cada estación, tanto con boxplots e histogramas de lluvia acumulada.

Figura 22.

Boxplots e histogramas por hora





*Nota.* Boxplots e histogramas los mismos que representan el comportamiento del ciclo diario por cada estación. Elaborado por, Romero y Topón

Cabe mencionar que, para las gráficas del comportamiento de ciclo diario, solo se trabajó con las estaciones del REMMAQ las mismas que son 6, ya que las estaciones del INAMHI no disponían de datos horarios necesarios para su representación gráfica.

En la figura 23 se observa que la hora con precipitación más alta para las estaciones de Belisario, El Camal, Los Chillos y Tumbaco son las 16:00 horas. Mientras que para las estaciones de Carapungo, Cotocollao se dio a las 18:00 y 17:00 horas respectivamente. Estos resultados concuerdan con (Baque, 2021).

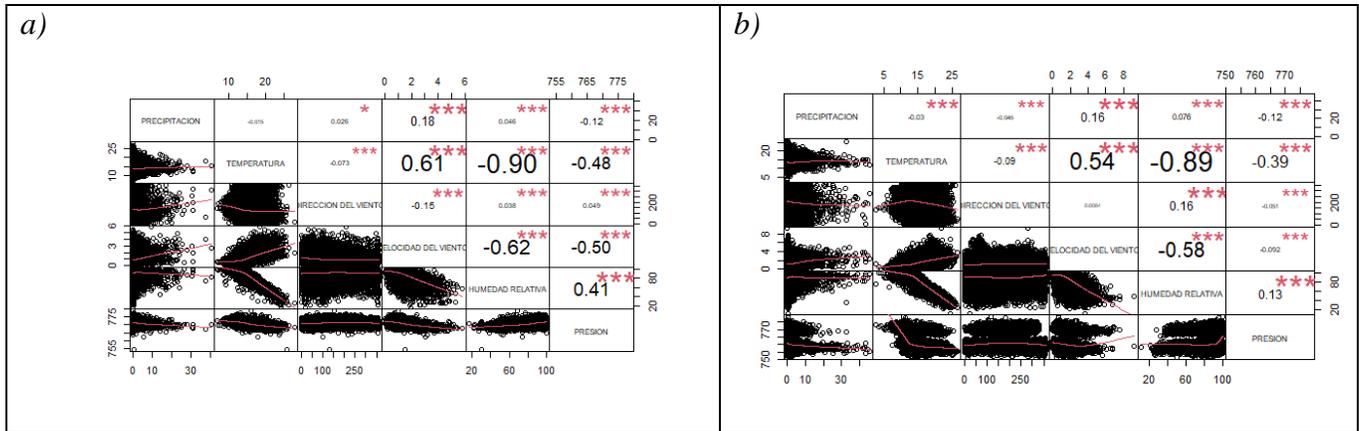
Por el contrario, la hora con menor cantidad de lluvia se dio a las 11:00 horas para las estaciones de Carapungo y Cotocollao, a las 12:00 horas para las estaciones de Los Chillos y Tumbaco, a las 8:00 horas para la estación El Camal, y a las 10:00 horas para la estación de Belisario.

Con respecto a las lluvias extremas, se puede observar que la correspondencia directa entre la ocurrencia de una hora lluviosa (es decir, en el que la lluvia acumulada es alta) con respecto al horario que presentan un evento extremo existe solo para ciertas estaciones. La estación de Belisario tuvo sus dos más grandes eventos extremos a las 21:00 horas con 55 mm/h y a las 14:00 horas con 47.9 mm/h. Para la estación de Carapungo las horas donde la lluvia fue más fuertes se dieron a las 15:00 con 37.4 mm/h y a las 21:00 horas con 33.8 mm/h. La estación de Cotocollao tuvo sus mayores eventos extremos a las 14:00 horas con 34,1mm/h y a las 23:00 horas con 33.1 mm/h. En el caso de las estaciones de El Camal y Los Chillos, en la estación de El Camal los eventos extremos ocurrieron a las 17:00 horas con 45,2mm/h y a las 14:00 horas con 40mm/h, así mismo para Los Chillos los eventos extremos más grandes ocurrieron a las 17:00 horas con 45.5 y 44.8 mm/h. La estación de Tumbaco, si presenta correspondencia directa, ya que los dos más grandes eventos extremos coinciden con las horas más lluviosas representadas en el histograma de lluvia acumulativo, estos eventos sucedieron a las 16:00 horas con 40.4 mm/h y 37.7 mm/h.

#### 4.5. Correlaciones entre las Variables Meteorológicas: Precipitación, Temperatura, Dirección del Viento, Velocidad del Viento, Humedad Relativa y Presión.

Figura 23.

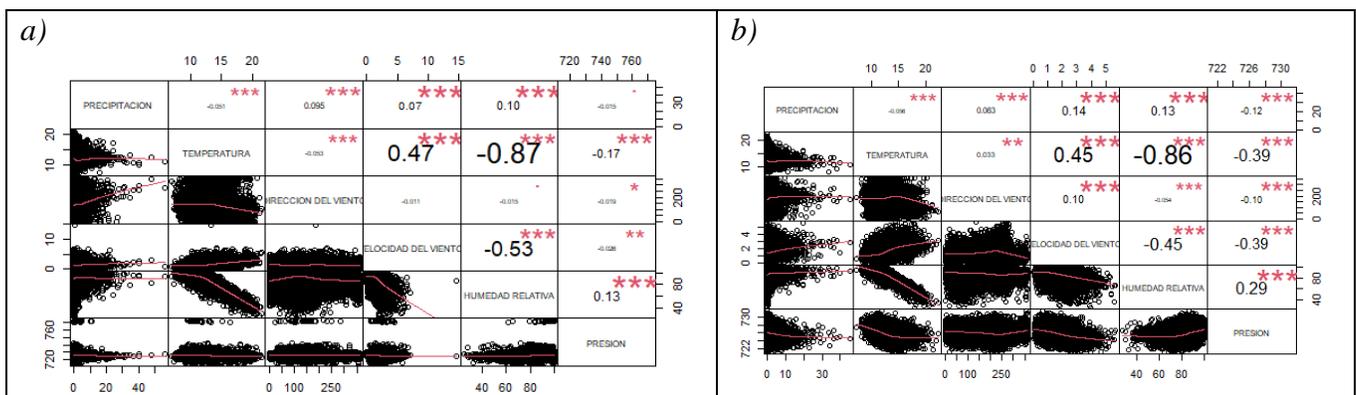
Gráficos de las correlaciones de la estación Tumbaco y los Chillos de la REMMAQ.



Nota. Gráficas de las correlaciones tanto de la estación de Tumbaco (a) y la gráfica de la estación de Los Chillos (b). Elaborado por, Romero y Topón.

Figura 24.

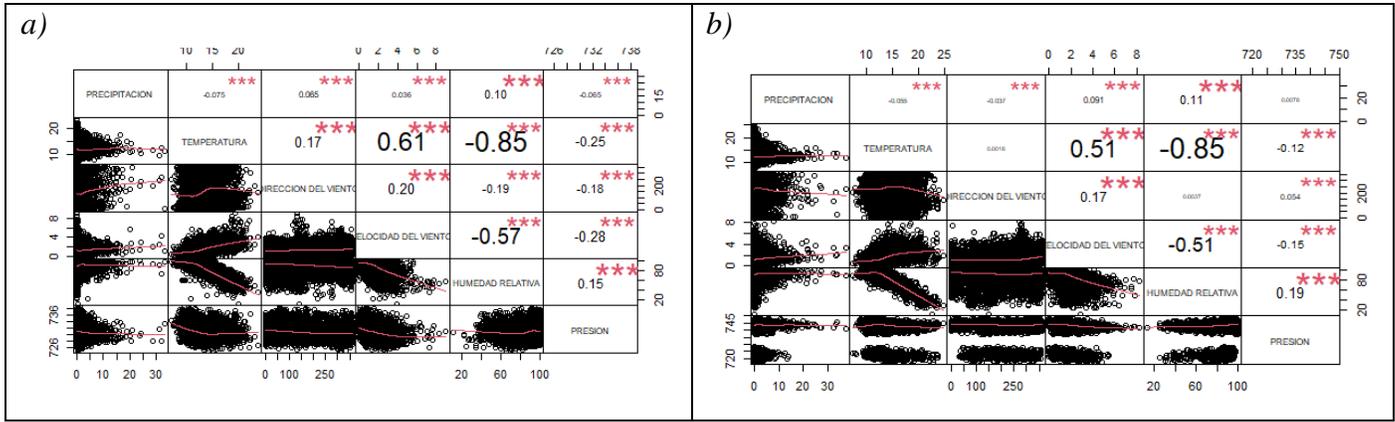
Gráficos de las correlaciones de la estación Belisario y Carapungo de la REMMAQ.



Nota. Gráficas de las correlaciones tanto de la estación de Belisario (a) y la gráfica de la estación de El Camal (b). Elaborado por, Romero y Topón.

**Figura 25.**

*Gráficos de las correlaciones de la estación Cotocollao y El Camal de la REMMAQ.*



*Nota.* Gráficas de las correlaciones tanto de la estación de Cotocollao (a) y la gráfica de la estación de Carapungo (b). Elaborado por, Romero y Topón.

Como se puede apreciar la mayoría de correlaciones son muy bajas, al ser el clima un sistema complejo, no es fácil identificar relaciones directas entre las variables que no estén modificadas por otros factores climáticos ( topografía, circulaciones en altos niveles de la troposfera, etc.), por lo que en este estudio únicamente se describirán los tres valores de correlación más altos (Ver Figura 24.a,b, Figura 25.a,b y Figura 26.a,b) se aprecia que existe una mayor correlación para las variables de humedad relativa y temperatura, un evento ya bien conocido, donde la humedad relativa presenta un comportamiento inversamente proporcional a la temperatura, cumpliendo así con la relación de Clausius Clapeyron (Romps, 2016). Estas anti correlaciones entre humedad relativa y temperatura varían entre -0.85 y -0.90, la mínima registrada en las estaciones de Carapungo y Cotocollao y la máxima en la estación de Tumbaco.

Podemos observar que también existe una correlación menos fuerte para las variables de velocidad del viento y la humedad relativa, que va de -0.45 a -0.62, siendo la

mínima en la estación de El Camal y la máxima en la estación de Tumbaco. Esta correlación indica que mientras la velocidad del viento aumenta, la humedad relativa tiende a disminuir (Mamani, 2011).

Para el caso de las variables, temperatura y velocidad del viento, se observa que existe una correlación positiva donde si aumenta la temperatura también aumenta la velocidad del viento, que va desde 0.45 a 0.61. Donde el valor mínimo, se da en la estación de El Camal y la máxima en las estaciones de Tumbaco y Cotocollao. Este evento según Santillán y Zamora (2021), se debe a que la salida del sol las velocidades del viento se incrementan, llegando a un máximo en las tardes.

La correlación entre las variables de presión y humedad relativa es positiva y van desde 0.13 hasta 0.41, siendo la mínima en las estaciones de Los Chillos y Belisario y la máxima en la estación de Tumbaco. El incremento de humedad podría afectar de forma mínima, al incremento de presión atmosférica.

Se puede apreciar también que la correlación entre la precipitación y las otras variables es mínima. Para las estaciones de Tumbaco, Los Chillos y El Camal, la mínima correlación se da entre las variables precipitación vs. temperatura, y la máxima entre las variables de precipitación vs. velocidad del viento. Para las estaciones de Belisario y Carapungo la correlación mínima se da entre la variable precipitación vs. presión, y la máxima entre la precipitación y la humedad relativa. La estación de Cotocollao presenta la mayor correlación entre la variable de precipitación y humedad relativa y la mínima se da para las variables precipitación y velocidad del viento. Por lo que se puede decir que no hay una correlación directamente proporcional entre estas variables.

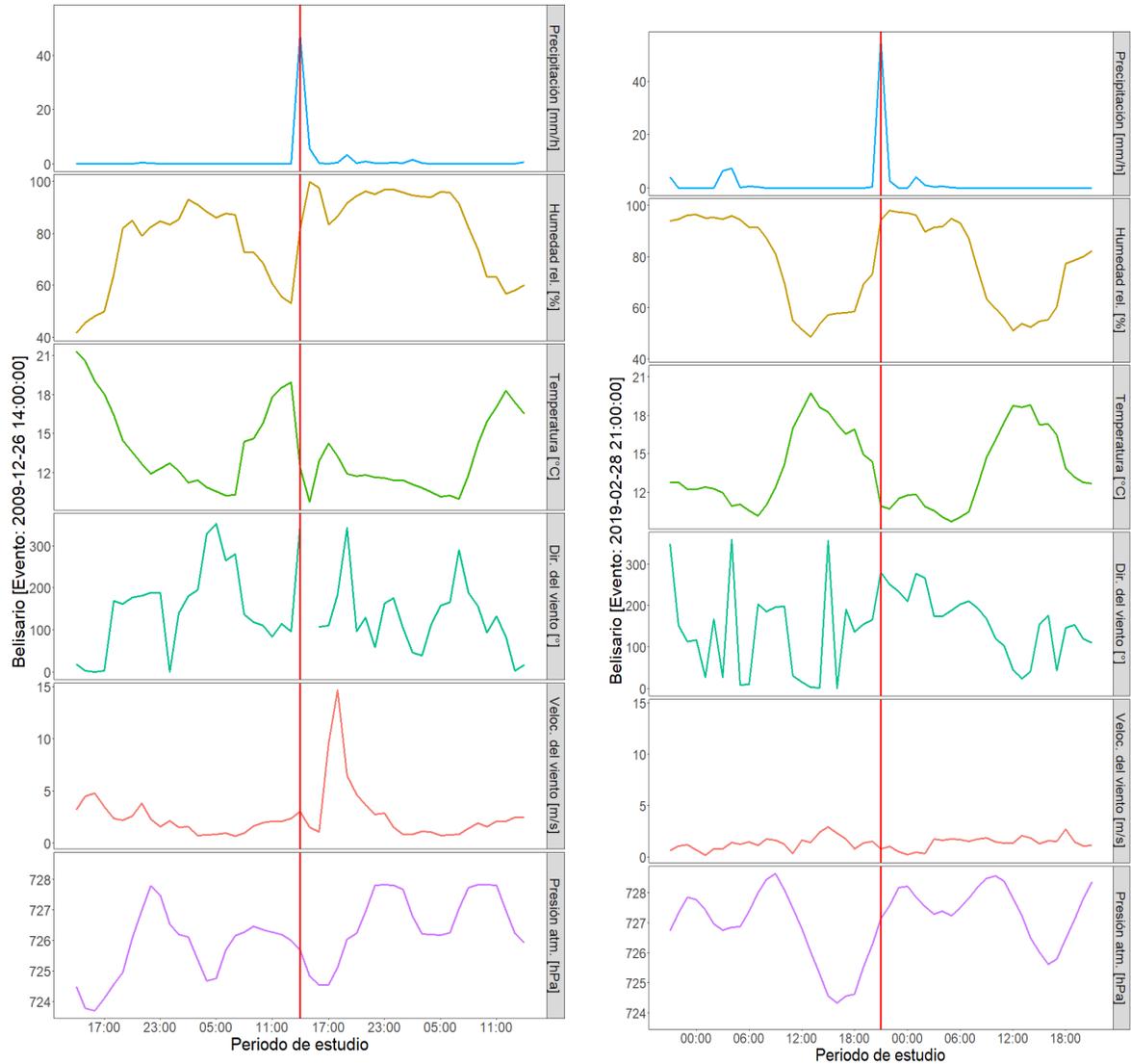
#### 4.5.1. Análisis de Eventos de Precipitación Extrema frente a Variables Climatológicas

##### Locales

- Estación Belisario

Figura 26.

Gráficos de los dos eventos extremos de la estación de Belisario (REMMAQ).

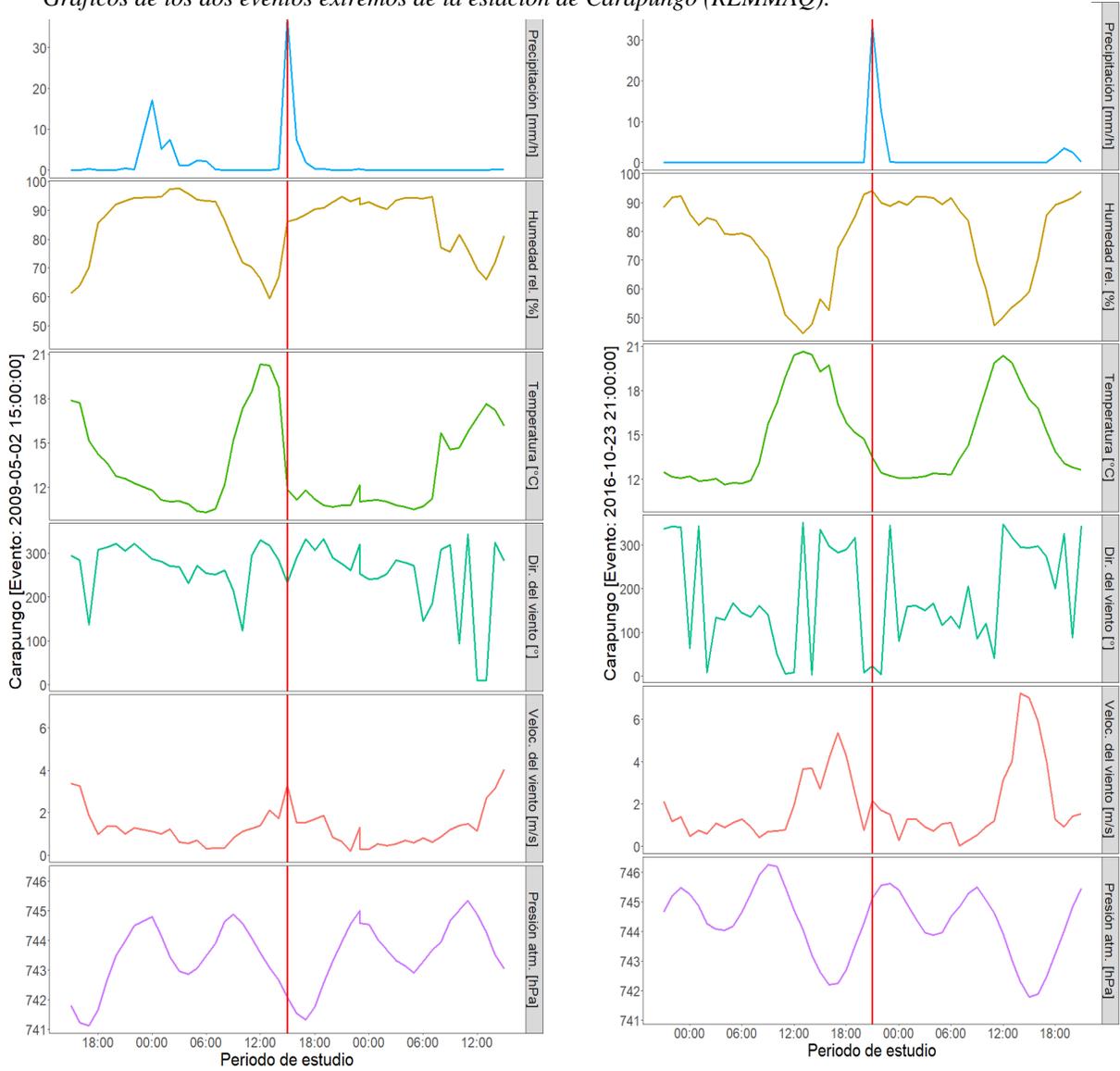


*Nota.* Gráficas de lluvia, velocidad del viento, temperatura, humedad y precipitación. Cabe mencionar que existe una relación inversa entre la temperatura y la humedad relativa ya que mientras la temperatura aumenta la humedad relativa disminuye, esto sucede en todos los casos. Elaborado por, Romero y Topón.

- Estación Carapungo

**Figura 27.**

*Gráficos de los dos eventos extremos de la estación de Carapungo (REMMAQ).*

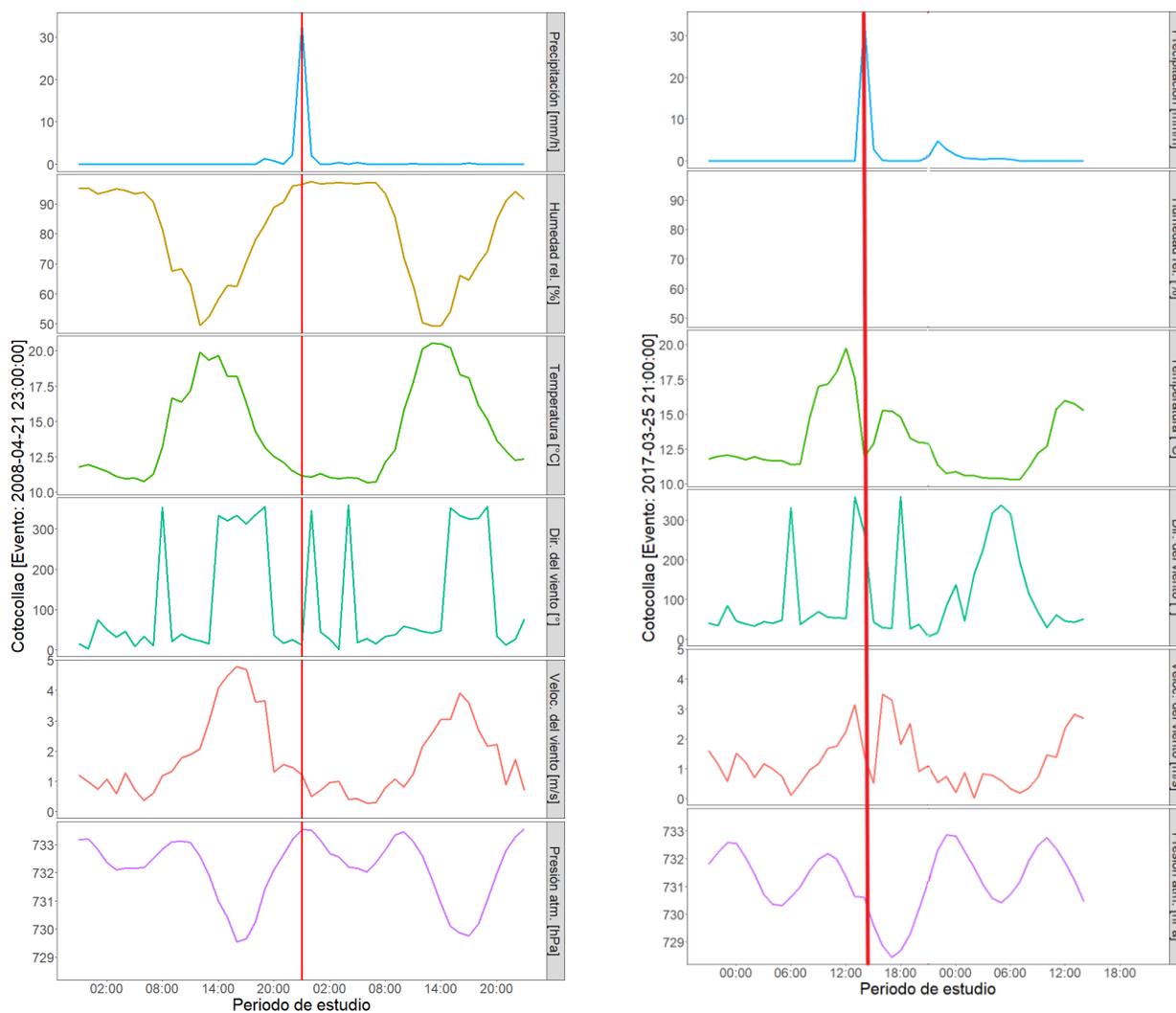


*Nota.* Gráficas de lluvia, velocidad del viento, temperatura, humedad y precipitación. Elaborado por, Romero y Topón.

- Estación Cotocollao

**Figura 28.**

*Gráficos de los dos eventos extremos de la estación Cotocollao (REMMAQ).*

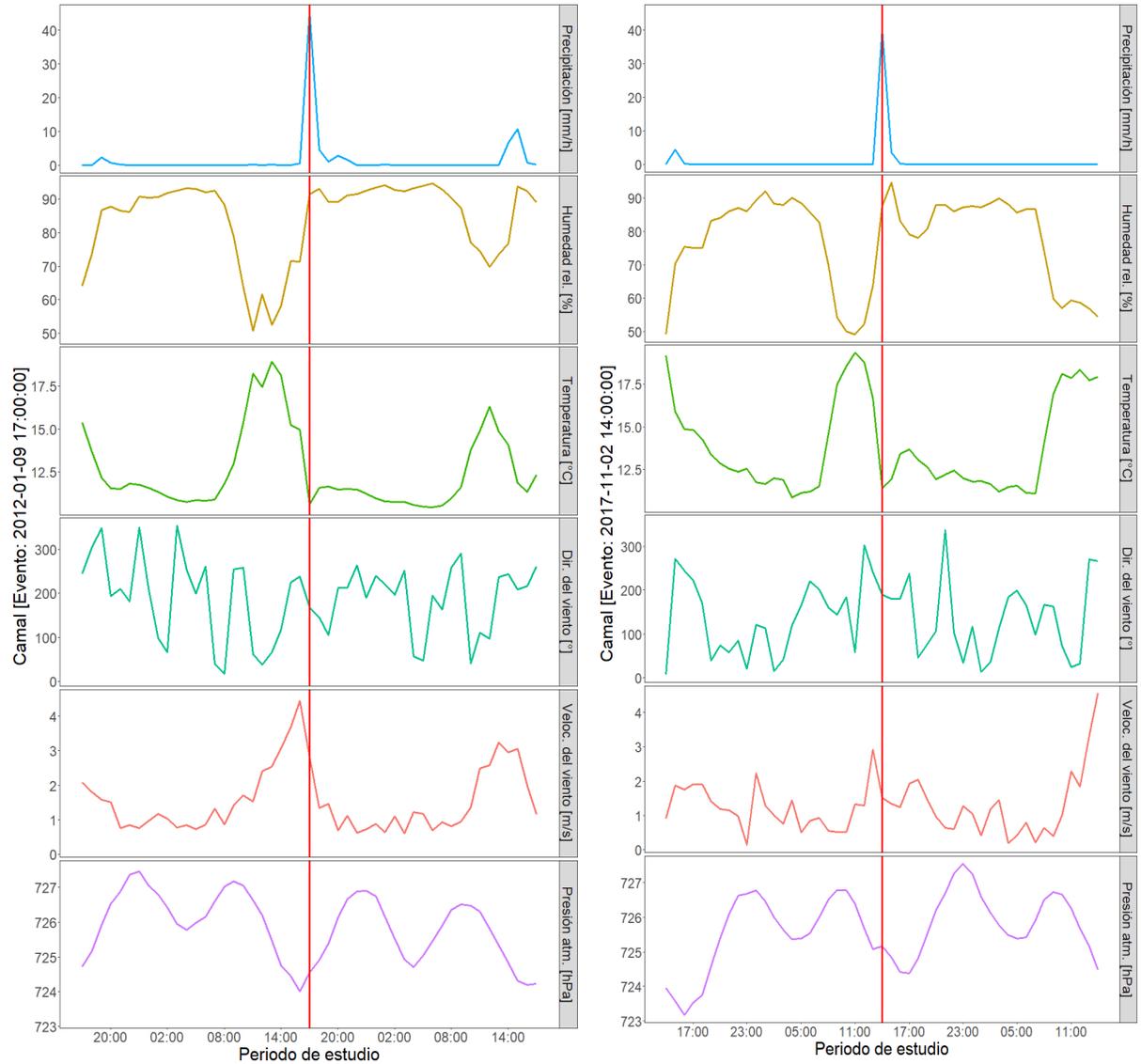


*Nota.* Gráficas de lluvia, velocidad del viento, temperatura, humedad y precipitación. En referencia a las siguientes gráficas, se debe tomar en cuenta, que en la segunda figura no se puede realizar la comparación ya que no se dispone de la gráfica de la humedad relativa debido a la falta de datos por fallas. Elaborado por, Romero y Topón.

- Estación El Camal

**Figura 29.**

*Gráficos de los dos eventos extremos de la estación El Camal (REMMAQ).*

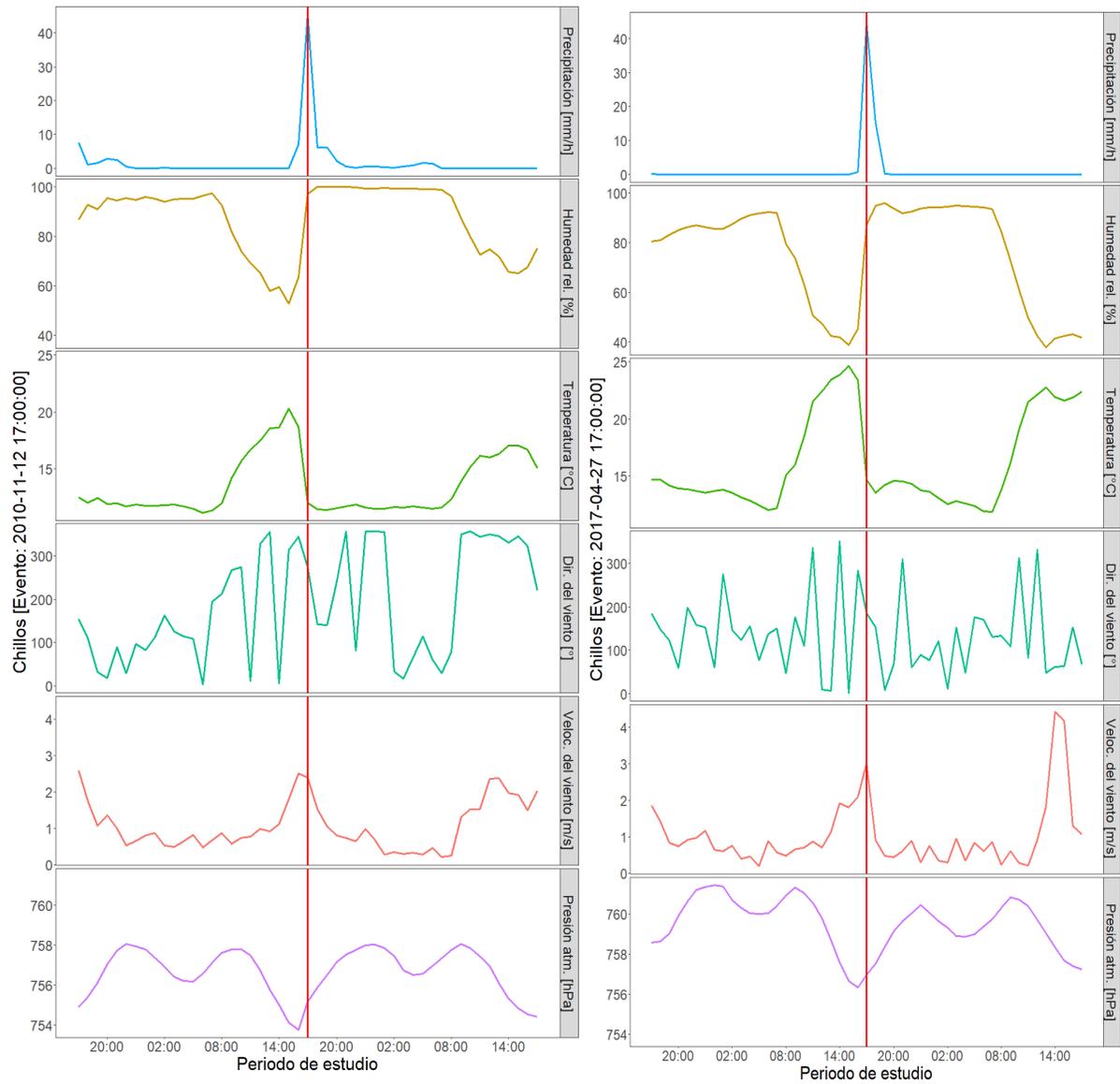


*Nota.* Gráficas de lluvia, velocidad del viento, temperatura, humedad y precipitación. Elaborado por, Romero y Topón.

- Estación Los Chillos

**Figura 30.**

Gráficos de los dos eventos extremos de la estación Los Chillos (REMMAQ).

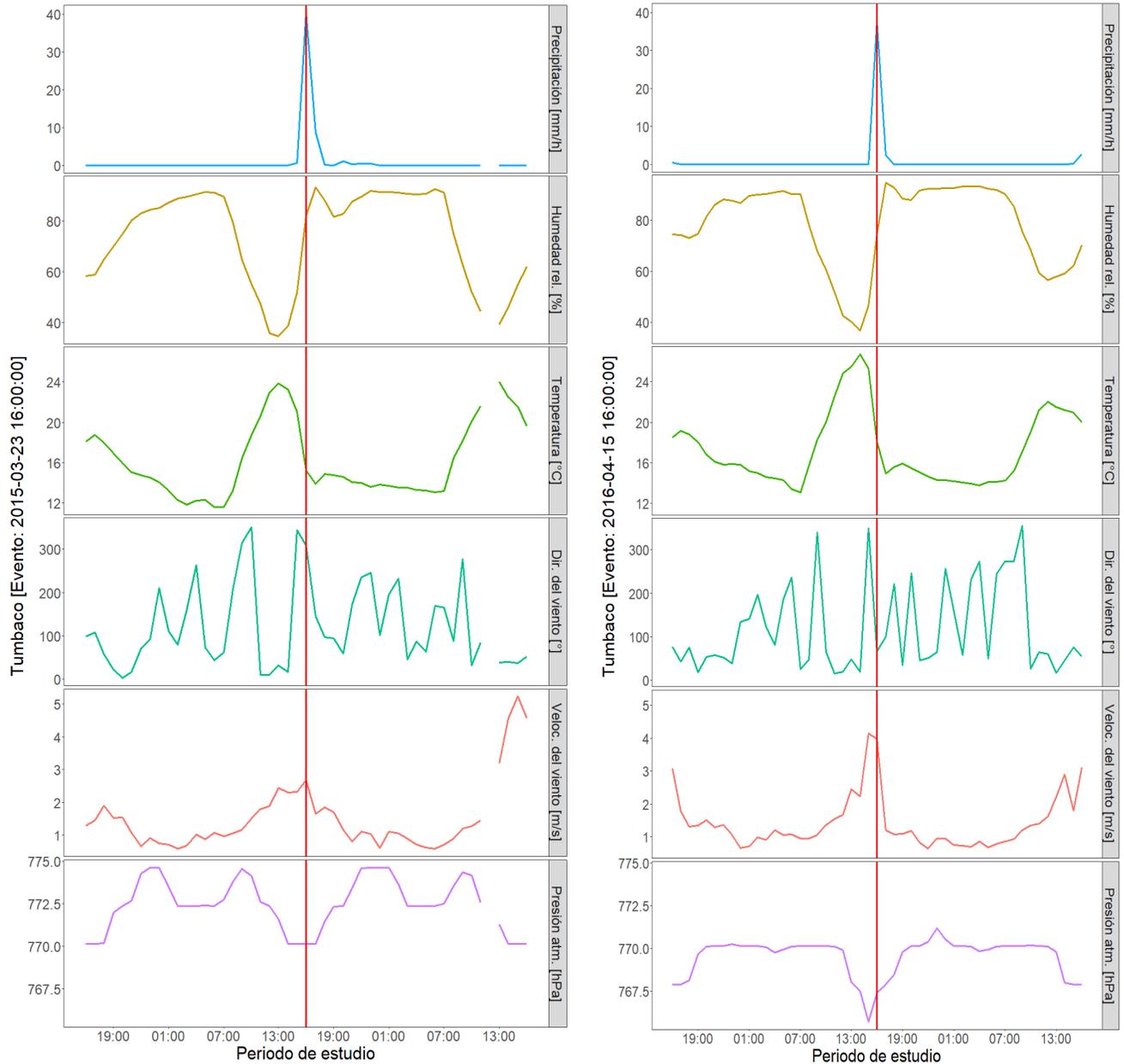


*Nota.* Gráficas de lluvia, velocidad del viento, temperatura, humedad y precipitación. Elaborado por, Romero y Topón.

- Estación Tumbaco

**Figura 31.**

*Gráficos de los dos eventos extremos de la estación Tumbaco (REMMAQ).*



*Nota.* Gráficas tanto de la lluvia, velocidad del viento, temperatura, humedad y precipitación. Elaborado por, Romero y Topón.

#### 4.5.1.1. Descripción de las Variables Meteorológicas antes de los Eventos

##### Intensos de lluvia.

Tabla 7

Descripción de las variables meteorológicas en relación a las horas antes del evento

Estación	Tendencia	Humedad	Temperatura	Presión	Dir. Del viento	Velocidad del viento
		Baja	Sube	Sube	Cambia al NE	Sube
<b>Belisario</b>	E1. Horas (2009/12/26)	1h	1h	5h	1h	0h
	Tendencia	Baja	Sube	Baja	Cambia SE	Sube
	E2. Horas (2019/02/28)	1h	1h	3h	1h	0h
	Tendencia	Baja	Sube	Sube	Cambia al SE	Sube
<b>Carapungo</b>	E1. Horas (2009/05/02)	2h	2h	6h	0h	0h
	Tendencia	Baja	Sube	Baja	Cambia al E	Sube
	E2. Horas (2016/10/23)	4h	4h	3h	1h	0h
	Tendencia	Baja	Sube	Baja	Cambia al E	Sube
<b>Cotocollao</b>	E1. Horas (2008/04/21)	6h	6h	6h	1h	0h
	Tendencia		Sube	Baja	Cambia al E	Sube
	E2. Horas (2017/03/25)		3h	2h	1h	0h
	Tendencia	Baja	Sube	Baja	Cambia al SO	Sube
<b>El Camal</b>	E1. Horas (2012/01/17)	1h	1h	1h	1h	1h
	Tendencia	Baja	Sube	Baja	Cambia al SO	Baja
	E2. Horas (2017/11/02)	3h	3h	1h	2h	0h
	Tendencia					

<b>Estación</b>	<b>Tendencia</b>	<b>Humedad</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Presión</b>	<b>Dir. Del viento</b>	<b>Velocidad del viento</b>
<b>Los Chillos</b>	Tendencia	Baja	Sube	Baja	Cambia al SE	Sube
	E1. Horas (2010/11/12)	2h	2h	1h	1h	0h
	Tendencia	Baja	Sube	Baja	Cambia al SE	Sube
	E2. Horas (2017/04/27)	2h	2h	1h	1h	0h
<b>Tumbaco</b>	Tendencia	Baja	Sube	Baja	Cambia al E	Sube
	E1. Horas (2015/03/26)	3h	3h	2h	1h	0h
	Tendencia	Baja	Sube	Baja	Cambia al E	Sube
	E2. Horas (2016/04/15)	2h	2h	1h	1h	0h

*Nota.* Comportamiento de cada variable meteorológica antes del evento extremo. Se debe tomar en cuenta que en la estación de Cotocollao no se cuenta con los datos de humedad, debido a la falta de los mismos por fallas técnicas que inesperadamente pueden suceder Elaborado por, Romero y Topón.

En la Figura 27 hasta la Figura 32 se observa que la humedad (vapor de agua) desciende antes del evento de lluvia extrema en un intervalo de tiempo de 1h a 6h antes, debido a que es el momento en el que más vapor de agua se ha condensado y está próximo a precipitar. Por consiguiente, esta disminución de humedad coincide con un incremento de temperatura, ya que no sólo se sabe que son, eventos inversamente proporcionales, sino que la condensación libera calor latente.

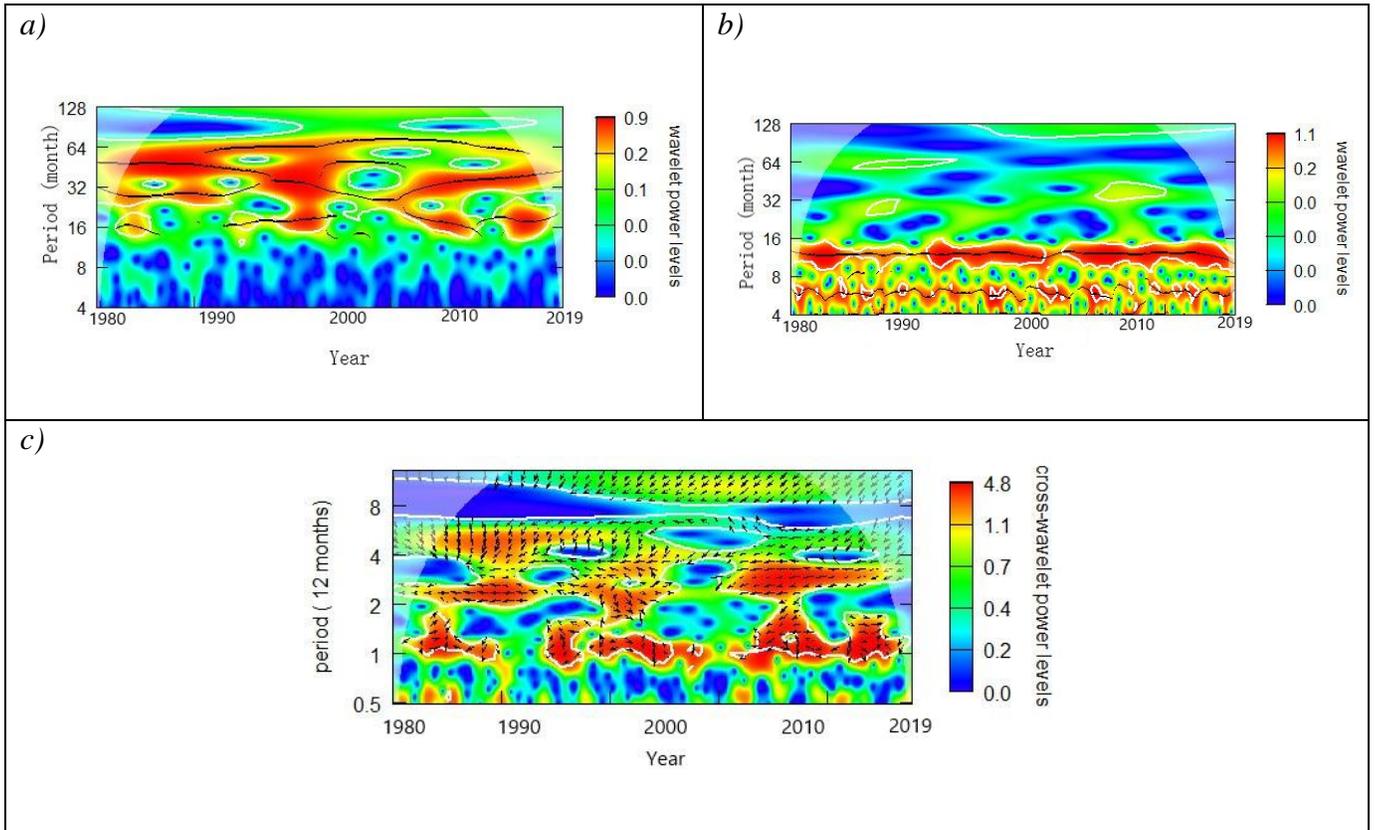
Respecto a la presión atmosférica, su disminución promueve la convección (Cruz, 2014) y por lo tanto el evento lluvioso ocurre con mayor frecuencia cuando la presión atmosférica es baja. Cabe mencionar que esta bajada de presión ocurre 1h a 6h antes del

evento de lluvia extrema (Ver Tabla 7). Pero en el caso del primer evento extremo de las estaciones de Belisario y Carapungo la presión sube, pero va disminuyendo a medida que el evento se va presentando y después del mismo se puede observar un bajón considerable de la presión. Asimismo, se registra un cambio en la dirección del viento dependiendo el evento extremo y la ubicación de la estación, varía su dirección las mismas que pueden ser NE, SE, E y SO. Esto se puede dar debido al incremento de convección que favorece los vientos (Thual y Mosquera Kobi, 2018), que incrementan sus magnitudes en el momento de la precipitación. En cambio, en el Hemisferio Sur, si se observa que el viento emigra su dirección hacia al Oeste (es decir va de Oeste a Este), esto significa que se viene una bajada de presiones , con probabilidad de ocurrencia de precipitación (*Principios Básicos De Meteorología*, n.d.). También se debe mencionar que existe un vacío en los datos de la estación de Carapungo específicamente en la variable de la humedad dicho vacío se produjo por la falta de datos.

## 4.6. Análisis Wavelets para ENSO

Figura 32.

Gráficas de la correlación cruzada y análisis univariado de ENSO para la estación de Izobamba (INAMHI).



*Nota.* Gráficas del análisis univariado para (a) ENSO, (b) precipitación, y (c) gráfica de correlación cruzada entre la oscilación ENSO y la precipitación. El período de tiempo tomado para este análisis fue de 39 años desde el año 1980 hasta el 2019. Elaborado por, Romero y Topón.

La ventaja del análisis de Wavelets, es tener una figura (escalograma) que permite conocer los períodos naturales, en distintos rangos de tiempo. En la Figura 33.b se aprecia el análisis con Wavelets, de la señal de lluvia en Quito. Es evidente los valores con altas intensidades (en rojo) en los períodos correspondientes a 12 meses y 6 meses, también señalados con la línea negra, que marca una significancia estadística superior al 99% de

confianza (p-value de 0.01). El ciclo de 12 meses, se refiere al ciclo anual o estacional, que se repite año a año, en toda la serie de tiempo. Mientras que el de 6 meses corresponde a la estacionalidad o comportamiento bimodal de la lluvia con sus picos en dos ciclos: el primero de marzo-abril y el segundo septiembre-octubre, es decir, estos picos separados en 6 meses, sin embargo, es evidente que la línea negra que marca el período de 6 meses no es tan regular como la línea del período de 12 meses, sino que varía. Este comportamiento indica adelantos y retrasos de la estación lluviosa en el período de 6 meses. El mismo comportamiento se puede apreciar en la figura 34.b

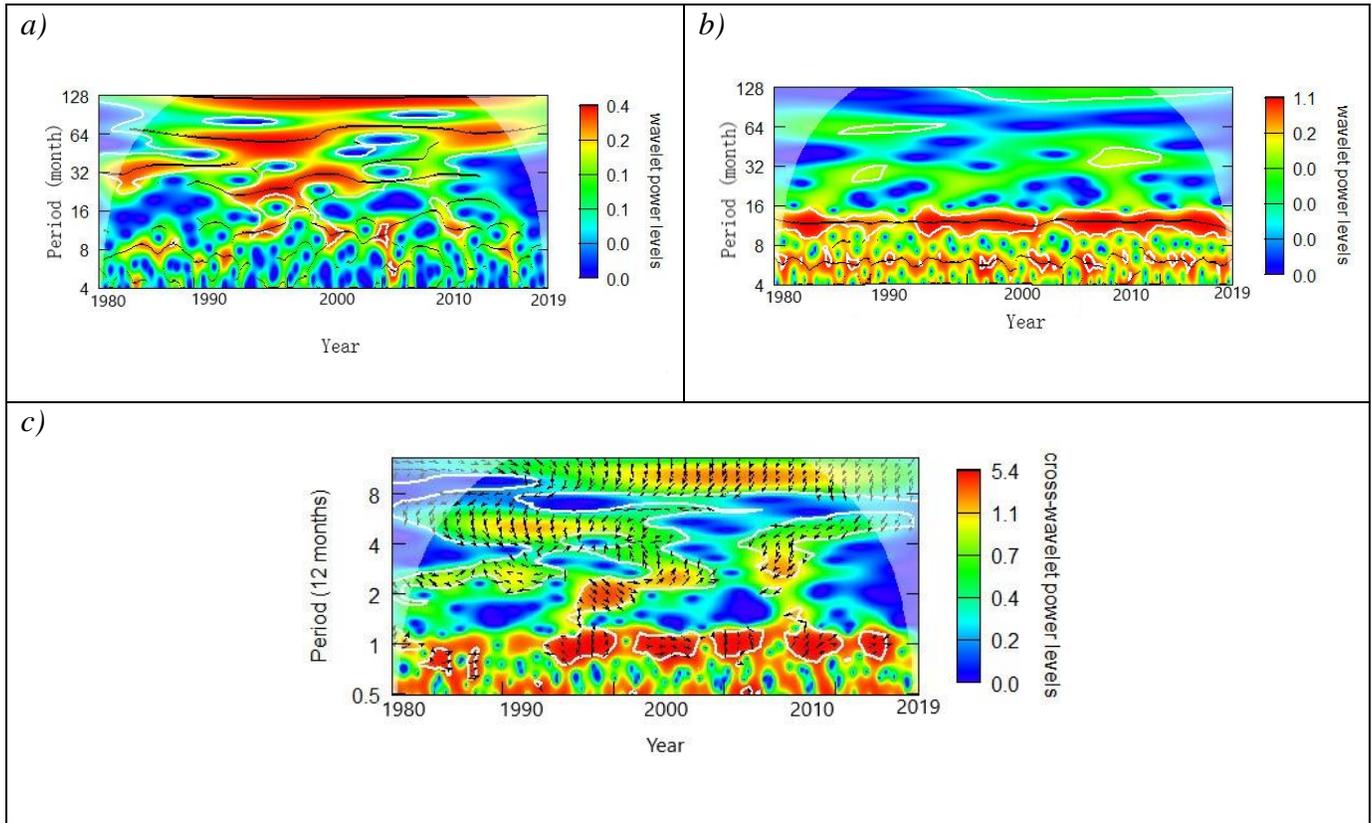
Es posible apreciar en la figura 33.a la señal de ENSO, es decir, se observa el crecimiento que ha tenido la temperatura del Océano Pacífico Central. Es posible visualizar períodos de 16 meses (1 año y 4 meses), 30 meses (2 años y medio), 60 meses (5 años) y 72 meses (6 años), lo que se corresponde a la teoría, que indica el período variable y difícil de predecir de la señal ENSO. Nótese también que los períodos indicados, no se mantienen en el tiempo, sino que aparecen en determinadas fechas (líneas negras no continuas).

En cuanto a la correlación entre ENSO y lluvia (Figura 33.c) se aprecia la influencia de ENSO en el ciclo anual (período de 12 meses igual a 1 año) únicamente alrededor de los años de 1983 hasta el año 1989, así como alrededor de los años de 1993 hasta el año 2003. De la misma manera aparece este comportamiento en el año 2007 hasta el año 2019. Al comparar la figura 33.c y la figura 33.b se puede observar claramente que existe una influencia de ENSO sobre la precipitación, por lo que se puede decir que si existe una correlación entre estas dos variables.

#### 4.7. Análisis Wavelets para PDO

Figura 33.

Gráficas de la correlación cruzada y análisis univariado de PDO para la estación de Izobamba (INAMHI)



*Nota.* Gráficas del análisis univariado para (a) PDO, (b) precipitación, y (c) gráfica de correlación cruzada entre la oscilación PDO y la precipitación. El período de tiempo tomado para este análisis fue de 39 años desde el año 1980 hasta el 2019. Elaborado por, Romero y Topón.

La Figura 34.b es la misma que la Figura 33.b que marca la señal de lluvia en Quito, con igual interpretación. En cuanto a la figura 34.a, se refiere al comportamiento natural de los períodos de PDO, en los que se identifican períodos a los 8 meses, 16 meses (1 año 4 meses) y 32 meses (2 años, 8 meses), es evidente que el comportamiento de estos períodos no es constante y por lo tanto difícil de predecir, al igual que la señal de ENSO.

En la Figura 34.c se escoge como mínimo período de correlación de 12 meses que corresponden a un año. En este caso, se aprecia que sí existe una correlación, que indicaría un efecto de PDO sobre la lluvia en Quito, pero de una manera más marcada desde en los años de 1992-1996, 1998-2003, 2005-2008, 2010-2015, 2017-2019. Por lo tanto, se puede decir que la Oscilación Decadal del Pacífico ha ido afectando de manera no continua sobre las lluvias en Quito.

#### **4.8. Discusión**

Al comparar los resultados con otros autores se pudo determinar que existen lluvias intensas que corresponde al percentil 90 y lluvias extremas correspondientes al percentil 99. Cabe mencionar que las lluvias que poseen un percentil 90 (de 2.7 mm/h a 4.2 mm/h) tienen mayor incidencia al Norte de la ciudad de Quito, mientras que las lluvias extremas que están sobre el percentil 99 (9.9 mm/h a 16.4 mm/h) afectan más al Sur de la ciudad ya que las misma duplican los valores del percentil 90 como se puede observar en la figura 18 y 19. Según Peltre (1989) y Serrano Chano (2010) esto se puede dar por varias razones, una de ellas, considera el hecho de que contamos con la presencia del volcán Pichincha, que funciona como una barrera protectora para el norte de Quito de las masas de aire húmedas que provienen del Sur-Oeste.

Es necesario señalar que según Serrano et al. (2010) y Serrano Chano (2010) los eventos extremos de mayor magnitud en la ciudad son un efecto esperado del Cambio Climático, que ocurre debido el incremento de la temperatura ya que la termodinámica básica indica que a mayor temperatura se produce mayor cantidad de vapor de agua, que es contenida por la atmósfera, esto quiere decir que se aumenta la posibilidad de mayor lluvia.

Según las proyecciones del IPCC (1995) se espera el incremento de eventos extremos de lluvia de manera generalizada en el planeta, combinados con eventos de sequía.

Los años más lluviosos que presentan de forma general todas las estaciones estudiadas corresponden al 2008 y 2017. Mientras que los años según el presente estudio en los cuales hubo menor incidencia de lluvia fueron 1980, 1985, 1992, 2004 y 2009 (Ver Fig. 19 y 20).

Al igual que otros trabajos realizados sobre la precipitación estacional y las investigaciones de Serrano et al. (2012), Santillán y Zamora (2021) se demostró que las épocas más lluviosas se dan en meses de septiembre-noviembre y marzo-mayo mientras que la época seca se encuentra entre los meses de junio a septiembre. Teniendo precipitaciones extremas en diferentes meses del año como se puede observar en la tabla 3, ya que la ZCIT atraviesa de Oeste a Este el país, desviando los vientos alisos provenientes de Este a Oeste, generando la época seca en la temporada de Junio-Agosto (Pacheco et al. 2019). Otros de los meses con presencia de precipitaciones extremas son febrero, marzo, abril y mayo. De acuerdo con el estudio de Seidel et al. (2015) y la presente investigación, se indica que los meses con mayor lluvia corresponde de octubre a mayo y en que algunos casos pueden también darse un evento extremo en este período de tiempo.

En cuanto al ciclo diurno de la lluvia, las horas con mayor incidencia corresponden entre las 16:00h a 1800h, eso se debe a la orografía escarpada, y la gran radiación solar que recibe Quito que favorece al rápido calentamiento de las masas de aire superficiales en horas de la mañana, mismas que al ser calentadas se elevan convectivamente en horas de la tarde. Este proceso se ve favorecido por una disminución de la presión atmosférica a las 16h00 (Ver figuras 19, 20, 21, 22 y 23).

Por otro lado, también se tienen la presencia de las lluvias extremas que se han identificado en dicho estudio, hay que tomar en cuenta que la mayoría de estos eventos no tienen correspondencia directa entre la ocurrencia de años o meses lluviosos como se puede observar en la tabla 4. Algunos de los eventos extremos de las estaciones de Belisario, Izobamba y Camal presentan su evento extremo en los meses de enero y diciembre esto según Pacheco et al. (2019) y Varela y Ron (2019). Uno de los factores que puede influir en la presencia de eventos extremos, puede ser la presencia de la corriente cálida del Niño ya que se considera como una representaciones climáticas más severas que se dan en los ecosistemas costeros e insulares del Ecuador , es posible evidenciarlo a lo largo de la historia, mediante la observación del aumento de la temperatura en el océano que se ha producido y de la misma manera con la incrementación de la precipitaciones cuyo fenómeno aparece en determinadas fechas ya que no se mantienen en el tiempo como indica la figura 33.a.

Aunque en este estudio se encuentra también una relación con la oscilación PDO, no es posible determinar en detalle cómo se da esta influencia. En las figuras 33 y 34 se puede observar que existe una influencia de la oscilación ENSO y la PDO sobre las lluvias de Quito, pero no es continua para ninguno de los casos. Este evento es similar a la de la investigación de Uvidia (2020), donde se menciona que el enfriamiento del Pacífico causado por el PDO ocasiona una disminución de la precipitación en la zona Andina. Así mismo Hidalgo (2017) en su investigación menciona que la presencia de ENSO, específicamente los eventos de la Niña en los años de 1984-85, 1988-89, 1995-96, 1998-99, 2000-01, 2005-06, 2007, 2008 y 2010 ocasionan aumento en la precipitación que van por encima de los valores normales.

Al realizar estudios de correlación entre variables meteorológicas, se puede decir que las variables que tuvieron mayor correlación en dicho estudio fueron la humedad relativa y la temperatura con correlaciones negativas de (-0.85 a -0.90) como se puede apreciar en las figuras 24, 25 y 26. La segunda correlación importante se dio entre la humedad relativa y la velocidad del viento con valores de -0.45 a -0.62. Cumpliendo así con lo que menciona Mamani (2011, p.14), donde se especifica que “Al sustituirse el aire continuamente por un aire más seco, se produce un aumento en la potencia de remoción de vapor de agua y así mismo la tasa de evapotranspiración aumenta”. Es decir, mientras mayor sea la velocidad del viento se favorece más la evaporación y el transporte de humedad en general, dejando las superficies más secas. La correlación entre la temperatura y la velocidad del viento fue positiva, registrando valores de (0.45 a 0.61) (Ver figura 24, 25 y 26), pero no se relacionan directamente entre ellas, sino que es el forzamiento solar quien influye como lo especifica Cruz (2014) en su investigación.

En el análisis del comportamiento de las variables meteorológicas por evento, al analizar los eventos más grandes, ocurridos en las fechas de 28/02/2019, 26/12/2009, 02/05/2009, 23/10/2016, 25/03/2017, 21/04/2008, 09/01/2012, 02/11/2017, 12/11/2010, 27/04/2017, 23/03/2015, 15/04/2020 (Ver Tabla 4 y Figuras 27-32) se puede apreciar que antes de un evento lluvioso extremo, la temperatura aumenta entre 1 y 6 horas antes, con la correspondiente disminución de la humedad relativa, debido a que es el momento en el que más vapor de agua se ha condensado y está próximo a precipitar. Por consiguiente, esta bajada de humedad coincide con un incremento de temperatura, ya que no sólo se sabe que son, eventos inversamente proporcionales, sino que la condensación libera calor latente. Al analizar la presión atmosférica antes del evento extremo tiende a disminuir, lo cual indica la

naturaleza convectiva de la lluvia, en la que ascienden las masas de aire húmedo, generando la consecuente caída en la presión atmosférica (Arroyo et al. 2014). Con respecto a la velocidad del viento en el presente estudio se observa que aumenta antes del evento extremo de lluvia, lo que es confirmado por Arroyo et al. (2014) en su investigación donde afirma que las lluvias extremas vienen acompañadas de un aumento en la velocidad del viento, efecto consistente con el ascenso de las masas de aire debido a la lluvia convectiva. La dirección del viento es una de las variables meteorológicas que depende de la ubicación de la estación para cambiar su dirección debido a su elevación, este comportamiento se comprueba en la investigación de Vincenti et al. (2012) donde se indica que la dirección de los vientos está marcada por la elevación, donde los más característicos son aquellos provenientes del noroccidente, con curso de Oeste a Este.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

Según Pendergrass et al. (2017) se considera lluvia intensa aquella que supera el percentil 90, y lluvia extrema la que supera al percentil 99. En Quito, los valores del P90 varían entre 2.7 mm/h a 4.2 mm/h, teniendo como resultado que la estación El Camal presenta el valor más alto, cuya intensidad tiene un intervalo de 4 a 4.2 mm/h, y con menor intensidad en las estaciones de Cotocollao y Carapungo con 2.7 a 2.9 mm/h. En cuanto al percentil 99 el mismo cuyos valores oscilan entre 9.9 mm/h a 16.4 mm/h, representa a la lluvia extrema se ha registrado la mayor intensidad en el valle de los Chillos cuyos valores van desde 15.7 a 16.4 mm/h mientras que el lugar con menor incidencia son las estaciones de Carapungo y Cotocollao que presentan valores entre 9.9 a 10.6 mm/h. Por lo tanto, las zonas más lluviosas, y con mayor incidencia de lluvias extremas corresponden a la zona Sur y Valle-sur de Quito.

Cabe indicar que según el presente estudio los años más lluviosas corresponden al 2008 y 2017, y en cuanto a los meses más lluviosos se dan en marzo y abril, al igual que las horas que tienen mayor presencia de precipitación son entre las 16:00h a 1800h.

Las correlaciones entre las variables meteorológicas indican que existe una mayor correlación entre la humedad y la temperatura. También existe una correlación menos fuerte entre la velocidad del viento y la humedad relativa. Se puede mencionar que la correlación entre la precipitación y otros variables es mínima. Cabe mencionar que las variables meteorológicas antes de los eventos de lluvia extrema se comportan de la siguiente manera la humedad disminuye horas antes de la lluvia mientras que la temperatura aumenta, con respecto a la presión, esta tiende a subir, y la dirección del viento

cambia, mientras que la velocidad del viento en todos los casos sube, lo cual señala la naturaleza evidentemente convectiva de las lluvias extremas en Quito, en los casos de estudio.

Respecto a la relación entre la precipitación y las oscilaciones oceánicas ENSO y PDO mediante el análisis wavelets se ratifica el ciclo estacional de la precipitación que se da con mayor intensidad en períodos de 12 meses (ciclo anual o estacional) y 6 meses (comportamiento bimodal) con picos en marzo-abril y septiembre-octubre. El comportamiento de ENSO se intensifica en períodos de 16 meses (1 año y 4 meses), 30 meses (2 años y medio), 60 meses (5 años) y 72 meses (6 años), Y con respecto a PDO se identifican períodos a los 8 meses, 16 meses (1 año 4 meses) y 32 meses (2 años, 8 meses) donde este evento se da con mayor intensidad. Al comparar la influencia de ENSO con la de la lluvia en Quito se observa que afecta de manera no continua, para el caso de ENSO mayormente en los años 1983-1989, 1993-2003, 2007-2019 es decir, cuando ENSO es fuerte (ONI mayor que 2°C) y para PDO en los años 1992-1996, 1998-2003, 2005-2008, 2010-2015, 2017-2019, aunque se evidencia que la influencia de PDO no es tan importante como la de ENSO.

## 5.2. Recomendaciones

- Debido a que la precipitación es una variable meteorológica con mucho potencial para la investigación se recomienda enfocarse más en el estudio de su comportamiento distribucional en lugares cercanos y lejanos a la zona del presente estudio con el fin de realizar posibles comparaciones en distintos escenarios de diferentes regiones del país.
- Para el caso de la representación gráfica de los percentiles mediante la interpolación es importante que se consideren solo datos horarios para lograr resultados más significativos y precisos.
- Se recomienda que para el análisis interanual, mensual y diurno los datos estén con el debido control de calidad para poder apreciar las gráficas con mayor exactitud y también considerar los comandos adecuados para establecer la escala de los mismo en cuanto a la intensidad de la lluvia dependiendo del análisis que se realice.
- Al analizar la correlación que existe entre la precipitación, variables meteorológicas y oscilaciones oceanográficas es importante que la recolección de datos sea de fuentes oficiales, por lo que se recomienda solicitar los datos que se requieran a entidades e instituciones reconocidas a nivel nacional que sean de confianza.
- Se recomienda extender el estudio en cuanto al comportamiento de las variables meteorológicas antes y después de eventos extremos, de tal manera que se pueda obtener más información que permita tomar medidas de prevención que eviten futuros catástrofes.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Aguiar, L., Soares, M. J., Aguiar, L., & Soares, M. J. (2011). *The Continuous Wavelet Transform: A Primer*. <https://econpapers.repec.org/RePEc:nip:nipewp:16/2011>
- Almorox, A., & Garcia, A. (1992). Climatología aplicada a la Ingeniería y Medioambiente. In *Curso Básica de Climatología*.
- Álvarez O., & Montaña T. (2017). *Completamiento de series de precipitación en la región surde Ecuador y caracterización de su pluviometría y aridez*. moz-extension://63b9de76-15e6-446a-92ac-0b3a0c2cf63d/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fd1wqtxts1xzle7.cloudfront.net%2F60643656%2Freclim17b20190919-27672-uzxvo3.pdf%3F1568899367%3D%26response-content-disposition%3Dinline%253B%2Bfilename%253DC
- Amestoy, A. (1999). *APROXIMACION AL ESTUDIO DE LAS CORRIENTES OCEÁNICAS Y SU INFLUENCIA EN EL CLIMA. EL FENOMENO DE LA CORRIENTE DE EL NIÑO*.
- Andrade, F. J. (2007). *Sistema de información para la interpolación espacial y temporal de datos sobre el tiempo atmosférico y el clima*. 1–384. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4211>
- Andrades, M., & Muñoz, C. (2012). *Fundamentos de Climatología* (S. de P. Universidad de La Rioja (ed.)).
- Baque, E. E. L. (2021). *Cambios en patrones de precipitación y temperatura en el Ecuador: regiones sierra y oriente*. 1–22.
- Barrera, E., & Pérez, M. (2016). *CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA Y EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA TIPO ENSO PARA LAS VARIABLES: PRECIPITACIÓN, EVAPORACIÓN, HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ*. UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.
- Barros, J., & Troncoso, A. (2010). Atlas climatológico del Ecuador. In *ATLAS CLIMATOLÓGICO DEL ECUADOR*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.
- Carmona, R., & Torresani, B. (1998). *Practical Time-Frequency Analysis* (1st Edition, Vol. 9). Academic Press . <https://www.elsevier.com/books/practical-time-frequency-analysis/carmona/978-0-12-160170-6>
- Castro, M., & Rosales, M. (2013). *Análisis básico sobre la posible variación de la precipitación y de la temperatura bajo la influencia del cambio climático*. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/1992>
- Catalá Joaquín. (1977). *Física de las nubes*. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yJAXEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=formacion+de+nubes&ots=gZW8e6ktE\\_&sig=uelglbNuVL3RP4oPjllcXD\\_qfoc#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yJAXEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=formacion+de+nubes&ots=gZW8e6ktE_&sig=uelglbNuVL3RP4oPjllcXD_qfoc#v=onepage&q&f=false)
- Centro Nacional de Metrología. (n.d.). *Presión*. Retrieved May 12, 2021, from

<https://www.cenam.mx/FYP/Presion/Pre1.aspx>

Coch, H. (2017). *COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS CUBIERTAS EN EL CLIMA DE QUITO*. ETSAB.

Corporación Andina de Fomento. (2000). El fenómeno El Niño 1997-1998. Memoria, retos y soluciones. Ecuador. In *Prevención y mitigación de desastres naturales*.

Cruz, R. (2014). Viento y forzamiento radiativo en la Península Ibérica en el último milenio. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.

*Empirical Bayesian Kriging*. (n.d.). Retrieved March 11, 2021, from <https://www.esri.com/news/arcuser/1012/empirical-byesian-kriging.html>

Espinoza, J. (1996). EL NIÑO Y SUS IMPLICACIONES SOBRE EL MEDIO AMBIENTE. In *Instituto Oceanográfico de la Armada*.

ESRI. (2021). *¿Qué es ArcGIS?*

Fernández, M. A. (1996). *Degradación Ambiental, Riesgos Urbanos y Desastres*.

García Romero, A., Muñoz Jiménez, J., Andrés de Pablo, N., & Palacios Estremera, D. (2007). Influencia del cambio climático en la evolución de la vegetación nival de las montañas mediterráneas. Sierra de Guadarrama, España. *Espacio y Desarrollo*, 0(19), 37–52.

Gencay, R., & Selcuk, F. (2000). *An Introduction to Wavelets and Other Filtering Methods in Finance and Economics* (1st Edition). Academic Press .  
<https://www.elsevier.com/books/an-introduction-to-wavelets-and-other-filtering-methods-in-finance-and-economics/gencay/978-0-12-279670-8>

Georgiou, F., & Kumar, P. (1994). *Wavelets in Geophysics: Vol. Volume 4* (1st Edition). Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/wavelets-in-geophysics/foufoula-georgiou/978-0-08-052087-2>

Gómez, V., & Macchione, M. (2009). *Comportamiento hidráulico de las calles durante lluvias extremas en zonas urbanas*.  
<https://web.b.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=01864076&AN=45526110&h=Hkg6l4CSyfem%2FeWNOY4ADUkk3MB3wE8OMGrOi03Up64jMZpL2XdsePL92L8fn0yn8thuXjpw9xkhCOovqVFc%2Fw%3D%3D&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrlNotAuth&crlhasurl=login.aspx%3Fdirect%3Dtrue%26profile%3Dehost%26scope%3Dsite%26authype%3Dcrawler%26jrnl%3D01864076%26AN%3D45526110>

Hafez, Y. (2016). Study on the Relationship between the Oceanic Nino Index and Surface Air Temperature and Precipitation Rate over the Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 04(05), 146–162.  
<https://doi.org/10.4236/gep.2016.45015>

Hidalgo, M. (2017). Variabilidad climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS. *CienciAmérica*, 6(2), 42–47.

IPCC. (1995). *The Science of Climate Change*.

- Liu, Y., Liang, X. S., & Weisberg, R. H. (2007). Rectification of the bias in the wavelet power spectrum. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(12), 2093–2102. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHO511.1>
- Madrigal, V. (2016, September). *Climatología. Climatología.*
- Mamani, A. (2011). “RELACIÓN ENTRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA CON EL DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR INFLUENCIADA POR LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA PUNO.” UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ANTIPLANO PUNO.
- Mancero-Mosquera, I. (2015). Análisis de Fourier y Wavelet de Las Series de Tiempo de la Estación Meteorológica Espol-Fimcbor. *Revista Tecnológica ESPOL*, 28(Septiembre), 34–50.
- Mark P.J. (2012). *Capítulo I: Introducción a R y RStudio*. [https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/195980\\_3f4cd84bc3ca434daeec55c6c211d13e.html](https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/195980_3f4cd84bc3ca434daeec55c6c211d13e.html)
- Martín, F., & Quirantes, A. (n.d.). *OBSERVACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE NUBES.*
- Méndez, M. (2018). *ANÁLISIS DE DATOS CON R* (Primera ed).
- Moreno, Cacho, Canals, Grimalt, Sánchez, & Sierro. (2007). CONEXIONES CLIMÁTICAS DE ESCALA MILENARIA ENTRE PROCESOS OCEÁNICOS Y ATMOSFÉRICOS DURANTE EL ÚLTIMO CICLO GLACIAR: ESTUDIO MULTIDISCIPLINAR DE UN SONDEO DEL MAR DE ALBORÁN (MEDITERRÁNEO OCCIDENTAL). *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 20(2).
- Moreno, P. (2009). *CLIMATOLOGÍA Y METEOROLOGÍA*. [https://www.academia.edu/33327673/CLIMATOLOGÍA\\_Y\\_METEOROLOGÍA](https://www.academia.edu/33327673/CLIMATOLOGÍA_Y_METEOROLOGÍA)
- Muñoz, A., Recalde, C., Cadena, J., Núñez, A., Díaz, J., & Mejía, R. (2010). *ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON FCLIMDEX PARA ECUADOR*. <https://docplayer.es/7170796-Analisis-estadistico-con-fclimdex-para-ecuador.html>
- National Weather Service. (2019). *El Niño - Southern Oscillation*. Climate Precipitation Center.
- NOAA. (2021). *Oscilación decenal del Pacífico (PDO)*.
- Ordoñez, J. (2011). " Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico ". *Sociedad Geográfica de Lima*, 1, 44.
- Pacheco, H., Montilla, A., Méndez, W., Delgado, M. H., & Zambrano, D. (2019). Causes and consequences of the extraordinary rainfall of 2017 on the Ecuadorian coast: The case of the province of Manabí. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 48(2), 45–70. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2019.48.2.766>
- Peltre, P. (1989). *Quebradas y riesgos naturales en Quito, periodo 1900-1988*.
- Peña, M. (2019). Universidad nacional de piura escuela de posgrado programa de maestría en ingeniería informática. In *SISTEMA DE INFORMACIÓN DE MINI ESTACIÓN*

*METEREOLÓGICA PARA LA CAPTURA DE DATOS DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA - CENTRO DE OPERACIONES DE EMERGENCIA REGIONAL - PIURA. UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA.*

- Pendergrass, A. G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C., & Sanderson, B. M. (2017). Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17966-y>
- Percival, D. B., & Walden, A. T. (2000). *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511841040>
- Pourrut, & Pierre. (1983). *Los climas del Ecuador : fundamentos explicativos. Principios Básicos De Meteorología*. (n.d.). Retrieved March 20, 2021, from <https://tatooweb.com/ec/p/principios-basicos-de-meteorologia/1210>
- Saenz, A. (1905). *Breves observaciones acerca del clima de la Ciudad de Quito*.
- Santillán, K., & Zamora, E. (2021). *ANÁLISIS CLIMÁTICO Y DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
- Schmidbauer, H. (2018). WaveletComp 1.1: A guided tour through the R package. *WaveletComp 1.1: A Guided Tour through the R Package*, 58.
- Seidel, A., Salamea, P., Arévalo, G., & Narváez, G. (2015). *La relación entre la precipitación en Ecuador y la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico* *Item Type Journal Contribution*. <http://hdl.handle.net/1834/10333>
- Serrano Chano, J. (2010). *Regionalización espacial de series climáticas mensuales*.
- Serrano, S., & Basile, L. (2012). LA PRECIPITACIÓN INTENSA VISTA DESDE LA CRITICALIDAD AUTO-ORGANIZANDA Y LAS TRANSICIONES DE FASE CONTINUAS: UN NUEVO ENFOQUE DE ESTUDIO. *La Granja*, 16(2), 23–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.17163/lgr.n15.2012.01>
- Serrano, S., Condom, T., Campozano, L., Guamán, J., & Villacís, M. (2020). An Empirical Model for Rainfall Maximums Conditioned to Tropospheric Water Vapor Over the Eastern Pacific Ocean. *Frontiers in Earth Science*, 8(July), 1–12. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00198>
- Serrano, S., Reisancho, A., Lizano, R., Borbor, M., & Stewart, A. (2016). ANÁLISIS DE INUNDACIONES COSTERAS POR PRECIPITACIONES INTENSAS, CAMBIO CLIMÁTICO Y FENÓMENO DE EL NIÑO. CASO DE ESTUDIO: MACHALA. *La Granja*, 24(2), 53–68. <https://doi.org/10.17163/lgr.n24.2016.05>
- Serrano, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., & Villacís, M. (2010). *Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de la variabilidad climática y cambio climático en el Distrito metropolitano de Quito*. 16(2), 23–47.
- Serrano Vincenti, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., & Villacís, M.

- (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito. *La Granja*, 16(2), 23.  
<https://doi.org/10.17163/lgr.n16.2012.03>
- Thual, S., & Mosquera Kobi. (2018). Estudio teórico sobre la relación entre El Niño y la. *Boletín Técnico: Generación de Información y Monitoreo Del Fenómeno El Niño*, 5, 5–9.
- Torrence, C., & Compo, G. (1998). *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. moz-extension://63b9de76-15e6-446a-92ac-0b3a0c2cf63d/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fpaos.colorado.edu%2Fresearch%2Fwavelets%2Fbams\_79\_01\_0061.pdf
- Uvidia, K. (2020). “ANÁLISIS DE LA DINÁMICA ESPACIO TEMPORAL DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) Y SU RELACIÓN CON PATRONES CLIMÁTICOS GLOBALES EN EL PÁRAMO ECUATORIAL ENTRE EL AÑO 2001 Y 2018.” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.
- Valiente, O. (1998). *EVOLUCIÓN EN EL ESTUDIO DEL FENÓMENO ENSO (EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR) :DE ANOMALÍA, A LA PREDICCIÓN DE VARIACIONES CLIMÁTICAS GLOBALES*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17654250001>
- Varela, A., & Ron, S. (2019). *Geografía y Clima del Ecuador*.  
<https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/GeografiaClima/>
- Venegas, J. G. (2020). *Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios en el periodo 2006-2018 para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito*. 94.  
<http://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/7482/1/T3268-MCCNA-Venegas-Analisis.pdf>
- Villacis, E., & Marrero, N. (2013). Precipitaciones extremas en la ciudad de Quito, provincia de Pichincha- Ecuador. *SciELO*.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382017000200008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000200008)
- Villacrés, D., Bacacela, C., Aguilar, A., & Rivera, A. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media. *Idesia*, 34(3), 81–90.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-34292016000300010>
- Vincenti, S. S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., & Villacís, M. (2012). ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS METEOROLÓGICOS MENSUALES Y DIARIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. *La Granja*, 16(2), 23–47.
- Yupa, M. (2019). *TENDENCIA ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN, SU AGRESIVIDAD Y CONCENTRACIÓN EN LA REGIÓN INTERANDINA DEL ECUADOR*.

Zúñiga López, I., & Crespo, E. (2021). *Meteorología y Climatología*. UNED.  
<https://es.scribd.com/book/498270192/Meteorologia-y-Climatologia>

## 7. ANEXOS

### ANEXO A

*Script para la realización de boxplots.*

```
plot(emmaq$FECHA, emmaq$ElCamal, main = "El Camal Station",  
ylab = "Rain [mm/h]", xlab = " ")
```

```
plot(emmaq$MES, emmaq$ElCamal, main = "El Camal Station",  
ylab = "Rain [mm/h]", xlab = " ")
```

```
plot(emmaq$ANO, emmaq$ElCamal, main = "El Camal Station",  
ylab = "Rain [mm/h]", xlab = " ")
```

```
Precipitacioncamal <- subset(emmaq, ElCamal>0)
```

```
summary(Precipitacioncamal)
```

```
boxplot(Precipitacioncamal$ElCamal ~ Precipitacioncamal$ANO, main="Precipitacion EL  
Camal 2004-2020",  
ylab="Rain [mm/h]", xlab= "Year")
```

```
boxplot(Precipitacioncamal$ElCamal ~ Precipitacioncamal$MES, main="Precipitacion El  
Camal 2004-2020",  
ylab="Rain [mm/h]", xlab= "Month")
```

### ANEXO B

*Script para la realización de histogramas.*

```
hist(x = Precipitacioncamal$ANO, main = "Histograma Anual",  
xlab = "Año", ylab = "Rain [mm/h]",  
col = "ivory")
```

```
hist(x = Precipitacioncamal$MES, main = "Histograma Mensual",  
xlab = "Mes", ylab = "Rain [mm/h]",  
col = "ivory")
```

## ANEXO C

*Script para el cálculo de cuartiles y percentiles*

```
quantile(Precipitacioncamal$ElCamal)
quantile(Precipitacioncamal$ElCamal, prob=seq(0, 1, length = 101))
```

## ANEXO D

*Script para el cálculo de correlaciones*

Librerías a utilizar:

```
library(readxl)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(GGally)
library(Hmisc)
library(corrplot)
library(PerformanceAnalytics)
```

Tratamiento de los datos NA, para que no existan errores estadísticos. Para esto se utiliza el siguiente código.

```
DatoscorregidosBelisario <- na.omit(Belisario)
```

Filtración de los datos de precipitación, para solo se consideren los mayores a “0”.

```
lluviaCorrBelisario <- subset (DatoscorregidosBelisario, PRECIPITACION>0)
```

Obtención de gráficas de correlaciones.

```
chart. Correlation (lluviaCorrBelisario, histogram = F, pch = 19)
```

## ANEXO E

*Script del análisis univariado mediante Wavelets.*

```
my.data = data.frame(date=data, x=datosvalidos$Lluvia)
my.data=na.omit(my.data)
my.w <- analyze.wavelet(my.data,
                        "x", loess.span = 0,
dt = 1,
  dj = 1/250,
lowerPeriod = 2,
upperPeriod = 128,
make.pval = TRUE,
n.sim = 10)
reconstruct(my.w, plot.waves = FALSE, lwd = c(1,2), legend.coords = "bottomleft", ylim
= c(-1.8, 1.8))
wt.image(my.w, color.key = "quantile", n.levels = 250,
        legend.params = list(lab = "wavelet power levels", mar = 4.7))
```

## ANEXO F

*Script del análisis bivariado mediante Wavelets*

```
datoswavelts4<-read.table("~/R TESIS WAVELETS/datoswavelts4.csv",header = TRUE,
sep =";", stringsAsFactors = FALSE)
data<-as.Date(datoswavelts4$DATA, format = "%Y/%m")
data <- as.Date(datoswavelts4$Fecha,format = "%m/%Y")
date <- as.Date(datoswavelts4$Fecha,format = "%Y/%m")
my.data = data.frame(date = data, x = datoswavelts4$Lluvia, y = datoswavelts4$IFN)
my.wc = analyze.coherency(my.data, my.pair = c("x","y"),
  loess.span = 0,
```

```
dt = 1/12, dj = 1/250,  
lowerPeriod = 1/2,  
upperPeriod = 32,  
  make.pval = T, n.sim = 10)  
wc.image(my.wc, n.levels = 250,  
  legend.params = list(lab = "Wavelet power levels"),  
show.date = T, date.format = "%Y-%m-%d",  
timelab = "Año", periodlab = "Período")  
wc.avg(my.wc, sigpch = 20)  
wt.image(my.wc, my.series = "x",  
  legend.params = list(lab = "Wavelet power levels"),  
show.date = T, date.format = "%Y-%m-%d",  
timelab = "ano", periodlab = "Período")
```