

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS



**“ANÁLISIS DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA DE LA
INTERCUENCA ALTO APURÍMAC Y LAS CUENCAS ALTO
URUBAMBA Y YAVERO UTILIZANDO EL MÉTODO DE L-
MOMENTOS”**

Presentada por:

MELANIA MABEL ZAPANA QUISPE

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima-Perú

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS

**“ANÁLISIS DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA DE LA
INTERCUENCA ALTO APURÍMAC Y LAS CUENCAS ALTO
URUBAMBA Y YAVERO UTILIZANDO EL MÉTODO DE L-
MOMENTOS”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Presentada por:

MELANIA MABEL ZAPANA QUISPE

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

.....
Mg.Sc. Cayo Ramos Taipe
PRESIDENTE

.....
Ph.D. Eduardo Chávarri Velarde
ASESOR

.....
Dr. Waldo Lavado Casimiro
CO-ASESOR

.....
Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado
MIEMBRO

.....
Dr. Abel Mejía Marcacuzco
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mi padre Daniel por darme su apoyo incondicional, estar siempre a mi lado y alentarme para superarme y ser una persona de bien. Por todo su amor, comprensión y esfuerzo.

A mi familia, que siempre ha estado a mi lado apoyándome, incentivando de esta forma mi crecimiento personal y profesional.

AGRADECIMIENTO

A mi patrocinador Dr. Eduardo Chavarri Velarde y a mi co-patrocinador Dr. Waldo Lavado Casimiro, por la oportunidad y confianza brindada. Su apoyo incondicional, apreciaciones y buena disposición durante la formulación de mi investigación.

A los miembros del comité consejero, conformado por el Mg. Sc. Cayo Ramos Taipe, Dr. Abel Mejía Marcacuzco y Mg. Sc. Miguel Ángel Sánchez Delgado, por haberme brindado su apoyo y disposición para lograr este objetivo.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú y a la Universidad Nacional Agraria La Molina.

A Dios que es el autor de todo y por estar siempre en mí y guiar mi camino.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
III.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1	Precipitación	4
3.2	Definición de Sequia.....	4
3.3	Tipos de Sequias	5
3.4	Características de la Sequía Meteorológica.....	7
3.5	PISCO (Peruvian Interpolated Data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations).....	8
3.6	Análisis exploratorio de datos	9
3.6.1	Diagrama de caja (Boxplot).....	9
3.7	Supuesto del análisis regional.....	10
3.7.1	Prueba de Mann Kendall (MK)	10
3.8	Análisis de Frecuencia	11
3.9	Análisis Regional de Frecuencias	12
3.10	L-Momentos	12
3.11	Análisis Regional de Frecuencia basado en los L-momentos	15
3.12	Procedimiento del análisis regional de frecuencia de sequias basado en los L-momentos.....	18
3.12.1	Preparación de datos	18
3.12.2	Identificación de Regiones Homogéneas.....	18
3.12.3	Identificación de la Distribución	21
3.12.4	Determinación del Cuantil.....	23
3.12.5	Mapeo del periodo de retorno de eventos de sequia.....	24
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	25
4.1	Descripción del área de estudio	25
4.1.1	Climatología	26
4.2	Materiales	28
4.3	Metodología.....	31
4.3.1	Validación de los datos de PISCO precipitación mensual (PISCOpm) con los datos Observados de precipitación mensual.....	33

4.3.2	Preparación de datos	34
4.3.3	Identificación de Zonas Homogéneas.....	35
4.3.4	Determinación de la Función Distribución de Probabilidad.....	35
4.3.5	Determinación de Cuantiles Regionales y Locales	36
4.3.6	Mapeo del Periodo de Retorno de Eventos de Sequía.....	36
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
5.1	Validación de los datos de PISCO precipitación mensual (PISCOpm) con los datos Observados de precipitación mensual.....	38
5.2	Preparación de datos	40
5.2.1	Análisis exploratorio de datos (AED).....	40
5.2.2	Supuestos del análisis regional de frecuencia.....	43
5.3	Identificación de Zonas Homogéneas.....	45
5.4	Determinación de la Función Distribución de Probabilidad.....	51
5.5	Determinación de Cuantiles regionales y locales	52
5.6	Mapeo del Periodo de Retorno de Eventos de Sequía.....	57
VI.	CONCLUSIONES	70
VII.	RECOMENDACIONES	71
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
IX.	ANEXOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuadro valores críticos de la discordancia D_i	19
Tabla 2: Parámetros de las unidades hidrográficas	25
Tabla 3: Tipo de clima zona de estudio.....	27
Tabla 4: Red de estaciones meteorológicas observadas	33
Tabla 5: Validación de los datos de PISCOpm con los datos Observados	39
Tabla 6: Valores de la medida de Discordancia de las estaciones	46
Tabla 7: Principales características L-momentos regionales de las regiones homogéneas	48
Tabla 8: Estadísticas de Heterogeneidad de las regiones	48
Tabla 9: Estadístico ZDIST para varias distribuciones	52
Tabla 10: Cuantiles regionales para las dos distribuciones de mejor ajuste – Región 01 ..	53
Tabla 11: Cuantiles regionales para las dos distribuciones de mejor ajuste – Región 02..	53
Tabla 12: Resultados de la simulación para la curva de crecimiento – Región 01	55
Tabla 13: Resultados de la simulación para la curva de crecimiento – Región 02	56
Tabla 14: Parámetros y cuantiles regionales para la distribución de mejor ajuste.....	56
Tabla 15: Uso de suelo afectado por una sequía en la Intercuenca Alto Apurímac	65
Tabla 16: Uso de suelo afectado por una sequía en la cuenca Alto Urubamba.....	65
Tabla 17: Uso de suelo afectado por una sequía en la cuenca Yavero.....	66
Tabla 18: Resumen del Uso de suelo afectado por una sequía.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Secuencia de las sequias comúnmente aceptadas y sus efectos asociados al déficit del recurso hídrico.	6
Figura 2: Características de la sequía para un nivel de truncamiento X_0	8
Figura 3: Mapa de ubicación de la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero.....	26
Figura 4: Mapa climático zona de estudio	28
Figura 5: Estaciones con registro de PISCO precipitación (PISCOpm)	30
Figura 6: Esquema Metodológico.	32
Figura 7: Estaciones meteorológicas Observadas	34
Figura 8: Precipitación Media Anual (PISCOpm) de la zona de estudio.....	37
Figura 9: Precipitación total mensual (PISCOpm – Observado). Estación Granja Kcayra	39
Figura 10: Gráficos boxplots para detección de outliers por estación a escala anual	41
Figura 11: Dendrograma en base al método de Ward. RP es Región Preliminar	41
Figura 12: Diagrama de boxplot por estación a escala anual – Región preliminar 01.....	42
Figura 13: Diagrama de boxplot por estación a escala anual – Región preliminar 02.....	43
Figura 14: Ubicación de las estaciones – Regiones Preliminares	43
Figura 15: Estaciones con tendencia y sin tendencia - Test de Mann Kendall	44
Figura 16: Ratios de los L-momentos de las estaciones por cada región.....	47
Figura 17: Ubicación de las estaciones por cada región homogénea.....	49
Figura 18: Régimen de lluvias mensuales (1981-2016) para las regiones homogéneas	50
Figura 19: Régimen de lluvias anuales (1981-2016) para las regiones homogéneas.....	50
Figura 20: Diagrama de L-momentos ratio con el L-momentos ratio regional para las distribuciones candidatas.....	51
Figura 21: Curva de crecimiento regional para distribuciones candidatas – Región 01	53
Figura 22: Curva de crecimiento regional para distribuciones candidatas – Región 02	54
Figura 23: Curvas de mejor ajuste de PMA versus L-Cv, L-Skewness y L-Kurtosis.....	57
Figura 24: Mapa del estadístico L-Cv sobre el área de estudio	58
Figura 25: Mapa del estadístico L-Skewness sobre el área de estudio	59
Figura 26: Mapa de los estadísticos L-Kurtosis sobre el área de estudio	59
Figura 27: Periodo de retorno de una sequía equivalente al 80%PMA	60
Figura 28: Periodo de retorno de una sequía equivalente al 70%PMA	61

Figura 29: Periodo de retorno de una sequía equivalente al 60%PMA	61
Figura 30: PMA para un periodo de retorno de 5, 10, 15,20, 25, 50 y 100 años	62
Figura 31: Eventos de sequias presentadas con mayor magnitud – Región 01.....	64
Figura 32: Eventos de sequias presentadas con mayor magnitud – Región 02.....	64
Figura 33: Uso de suelo afectado por una sequía del 80%PMA.....	67
Figura 34: Uso de suelo afectado por una sequía del 70%PMA.....	67
Figura 35: Uso de suelo afectado por una sequía del 60%PMA.....	68

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Red de estaciones asumidas de PISCOpm	78
Anexo 2: Serie de datos de precipitación total anual (mm) por estación - PISCOpm	81
Anexo 3: Supuesto del Análisis Regional de Frecuencia - test de Mann Kendall	90
Anexo 4: Distribuciones Teóricas y sus Relaciones	93
Anexo 5: Cuantiles de precipitación media anual por estación estimada por ARF-LM.....	98
Anexo 6: Daños causados por las sequías en los años 2005, 2006, 2016 y 2018.....	100

RESUMEN

En esta investigación se desarrolló el método del Análisis Regional de Frecuencia basado en los L-momentos (ARF-LM) en la intercuenca Alto Apurímac y las cuencas Alto Urubamba y Yavero con los datos del producto grillado PISCO de precipitación. El método de L-momentos permitió definir objetivamente que el área de estudio se conforma de dos regiones hidrológicamente homogéneas de la precipitación anual, basada en registros de 70 estaciones. La función de distribución de probabilidad se obtuvo según el diagrama de L-momento ratios y el Z estadístico, ajustándose mejor la distribución Normal Generalizado (GNO) con la distribución se estimó los cuantiles regionales y locales para diferentes probabilidades de no excedencia. Para zonas con mayor vulnerabilidad y en situaciones de deficiencia del 20% de lluvia la sequía tiene períodos de retorno de 4.5 a 14 años, para situaciones de deficiencia del 30% de lluvia la sequía tiene períodos de retorno de 8 a 18 años y para situaciones de deficiencia del 40% de lluvia la sequía tiene períodos de retorno de 18 a 26 años. Las zonas afectadas en la intercuenca Alto Apurímac por la sequía con un déficit del 40% de lluvia es del 10.1%, para un déficit del 30% de lluvia es del 46.6% y para un déficit del 20% de lluvia es del 95.2%. Las zonas afectadas en la cuenca Alto Urubamba por la sequía con un déficit del 40% de lluvia es del 19.8%, para un déficit del 30% de lluvia es del 41.2% y para un déficit del 20% de lluvia es del 54.7%. Las zonas afectadas en la cuenca Yavero por la sequía con un déficit del 40% de lluvia es del 28.6%, para un déficit del 30% de lluvia es del 43.2% y para un déficit del 20% de lluvia es del 58.9%.

Palabras claves: Sequía, Análisis regional frecuencia, L-momentos.

ABSTRACT

In this research we developed the method of Regional Frequency Analysis based on L-moments (ARF-LM) in the Upper Apurímac interbasin and the Upper Urubamba and Yavero basins with the data of the precipitation gridded product PISCO. The L-moments method objectively defined that the study area consists of two hydrologically homogeneous regions of annual precipitation, based on records from 70 stations. The probability distribution function was obtained according to the diagram of L-moment ratios and the statistical Z, adjusting better the Generalized Normal distribution (GNO) with the distribution the regional and local quantiles were estimated for different probabilities of nonexceedence. For areas with greater vulnerability and in situations of 20% rain deficiency the drought has return periods of 4.5 to 14 years, for situations of 30% rain deficiency the drought has return periods of 8 to 18 years and for situations of 40% rain deficiency the drought has return periods of 18 to 26 years. The areas affected in the interbasin Alto Apurimac by drought with a deficit of 40% rain is 10.1%, for a deficit of 30% rain is 46.6% and for a deficit of 20% rain is 95.2%. The areas affected by drought in the alto Urubamba basin with a 40% rain deficit is 19.8%, for a 30% rain deficit it is 41.2% and for a 20% rain deficit it is 54.7%. The areas affected by drought in the Yavero basin with a 40% rain deficit is 28.6%, for a 30% rain deficit it is 43.2% and for a 20% rain deficit it is 58.9%.

Keywords: Drought, Regional Analysis Frequency, L-Moments.

I. INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática en la actualidad viene cambiando el régimen hídrico tanto a nivel mundial y local como se demuestran en múltiples estudios desarrollados en diversas partes del mundo. Según López (1997) el agua es un recurso fundamental para la vida y por la creciente demanda, cada vez es más escaso en algunas regiones. La falta de cantidad y calidad es quizá la amenaza más implacable para las personas que habitan tierras donde se producen mayormente la sequía además de poner en riesgo los geoecosistemas

Las sequías ocurren en todas las zonas climáticas, pero sus características varían perceptiblemente de una región a otra; por lo tanto, es un fenómeno temporal. La sequía no presenta epicentro ni trayectorias definidas, sino que tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y del espacio, provocando que el agua disponible sea insuficiente para satisfacer las distintas necesidades humanas y de los ecosistemas, considerándose como uno de los fenómenos naturales que afecta a más personas en el mundo (Ortega *et al.* 2014).

La sequía meteorológica es definida a partir de un umbral de déficit de precipitación que se alcanza durante un período de tiempo previamente determinado (OMM 2006). Los episodios de sequías pueden causar grandes impactos y consecuencias sociales, económicas y en el medio ambiente, sobre todo en regiones áridas y semiáridas, como es el caso en algunas partes del Perú (Salas 2000). Estos impactos son más severos en la medida en que se está menos preparado para afrontarlas, ante ello es necesario lograr una mejor comprensión de las sequías meteorológicas, es decir conocer la probabilidad de ocurrencia en distintos niveles de severidad y duración (Wilhite *et al.* 2005).

La sequía meteorológica, como un evento extremo, tiene lugar cuando la precipitación mensual o anual desciende por debajo de lo normal para una duración específica y que estos eventos se presentan sobre la base de diferentes características de sequía como son su duración, magnitud y severidad. La sequía trae como consecuencia una disminución significativa de las precipitaciones en una localidad determinada y al prolongarse en el

tiempo afecta negativamente la oferta hídrica, genera un déficit que suele afectar la demanda de la población y el ambiente en general (Wilhite *et al.* 2005).

Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), reporto que entre los años 2000 y 2010, se reportaron a nivel nacional 163 eventos de sequías, siendo en mayor número en la vertiente del Pacífico (127 eventos), seguidos por la vertiente del Titicaca (25 eventos) y la vertiente del Atlántico (11 eventos). Dichas sequias han ocurrido con distinta frecuencia, siendo mayor el número las de frecuencia anual y las que ocurren entre 3 y 9 años con 85 eventos y 70 eventos respectivamente. La mayor cantidad de eventos reportados corresponden a los ocurridos entre los años 2000 y 2008 con 73 y el año 2010 con 62. En total, en todo el país se afectaron 66,724 familias y 332,087 hectáreas (ANA 2013).

La presente investigación se enfoca en el uso de un método que permite utilizar los datos de precipitación total anual disponibles del producto grillado PISCO precipitación mensual (PISCOpm v2.0) para estimar con mayor precisión que otros métodos asociados a eventos de sequía meteorológica, con el fin de utilizar esta información para la generación de mapas asociado a una sequía. Este método, es el Análisis Regional de Frecuencias basado en L-momentos (ARF-LM), que tiene como principal sustento estadístico, el cálculo de las probabilidades de la teoría de los L-momentos, metodología robusta aun en presencia de datos anómalos y su buen uso puede conducir a estimaciones suficientemente precisas, sirve para describir la forma de una distribución de probabilidad que cuenta con diversos métodos de distribución y con coeficientes de variación, asimetría y curtosis (Hosking y Wallis 1997). En este sentido la investigación estará destinada a generar el mapeo probabilístico de la sequía meteorológica para la intercuenca Alto Apurímac y las cuencas del Alto Urubamba y Yavero, con el fin de realizar estimaciones de probabilidades y magnitudes de la sequía.

II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

Caracterizar la sequía meteorológica en la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero mediante el método de L-Momentos.

Objetivos Específicos

1. Evaluar la información meteorológica de la zona de estudio del producto PISCOpm.
2. Determinar las regiones homogéneas de precipitación total anual.
3. Determinar probabilidades, magnitudes y mapas de sequía meteorológica en base a análisis estadísticos, utilizando la metodología de los L-Momentos.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Precipitación

Guevara (1992) indica que la precipitación es el principal vector de entrada del ciclo hidrológico y se refiere a la cantidad total de agua que cae sobre la superficie terrestre. Se presenta en forma líquida (lluvia, niebla, rocío), o sólida (nieve, granizo, escarcha). Se deriva del vapor de agua atmosférica; sus características están sometidas a la influencia de otros factores climáticos tales como: viento, temperatura y presión atmosférica.

3.2 Definición de Sequia

OMM (1992) en su vocabulario meteorológico internacional, define a la sequía como un periodo de tiempo con condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un desequilibrio hidrológico.

ONU (1994) indica a la sequía como el fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales y registrados, cuando un agudo desequilibrio hídrico perjudica los sistemas de producción de recursos de tierras.

Fernández (1997) define como sequía a un fenómeno natural que se extiende de manera irregular a través del tiempo y el espacio, tiene la particularidad de ser de lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, su ocurrencia no provoca el colapso ni la falla destructiva de la infraestructura. Sin embargo, puede condicionar las operaciones de los sistemas de recursos hídricos imponiendo muchas veces condiciones más exigentes que las de diseño con graves consecuencias económicas y sociales.

Duran (1998) menciona a la sequía es uno de los fenómenos adversos y más difíciles de evaluar por su gran complejidad, pues a su vez que depende de las escasas o ausentes precipitaciones, también se relaciona con la capacidad de almacenamiento en el suelo y la ocurrencia del fenómeno en relación con el ciclo vegetativo anual, como se sabe las sequias son eventos multivariados descritos por diferentes atributos, incluyendo duración, magnitud y severidad.

Valiente (2001) reporta que existe dos tipos de definiciones de sequía: las conceptuales y las operacionales. Las primeras son aquellas definiciones enciclopedistas que cuantifican la deficiencia y el tiempo, pero no tienen en cuenta umbrales de referencia, ni la realidad climática del espacio geográfico sobre el que se aplica la definición. Asimismo, no consideran los usos de suelos alternativos y por tanto la posible situación de vulnerabilidad relativa, derivada de ellas. Las segundas precisan el momento de inicio, finalización e intensidad de la sequía. Requieren de un conocimiento más detallado de las variables climáticas, así como datos disponibles a diferentes escalas, según el nivel de detalle deseado.

Para el estudio consideramos la definición de la sequía como la ocurrencia de disponibilidad de agua por debajo del promedio natural de manera sostenida y a escala regional (Tallaksen *et al.* 2004).

3.3 Tipos de Sequias

Todos los tipos de sequía son causados por variaciones climáticas que pueden ocurrir en cualquier clima, pero se observan con más frecuencia en regiones secas. La Figura 1, enfoca los impactos que generan los cuatro tipos de sequía, en los ecosistemas y la sociedad.

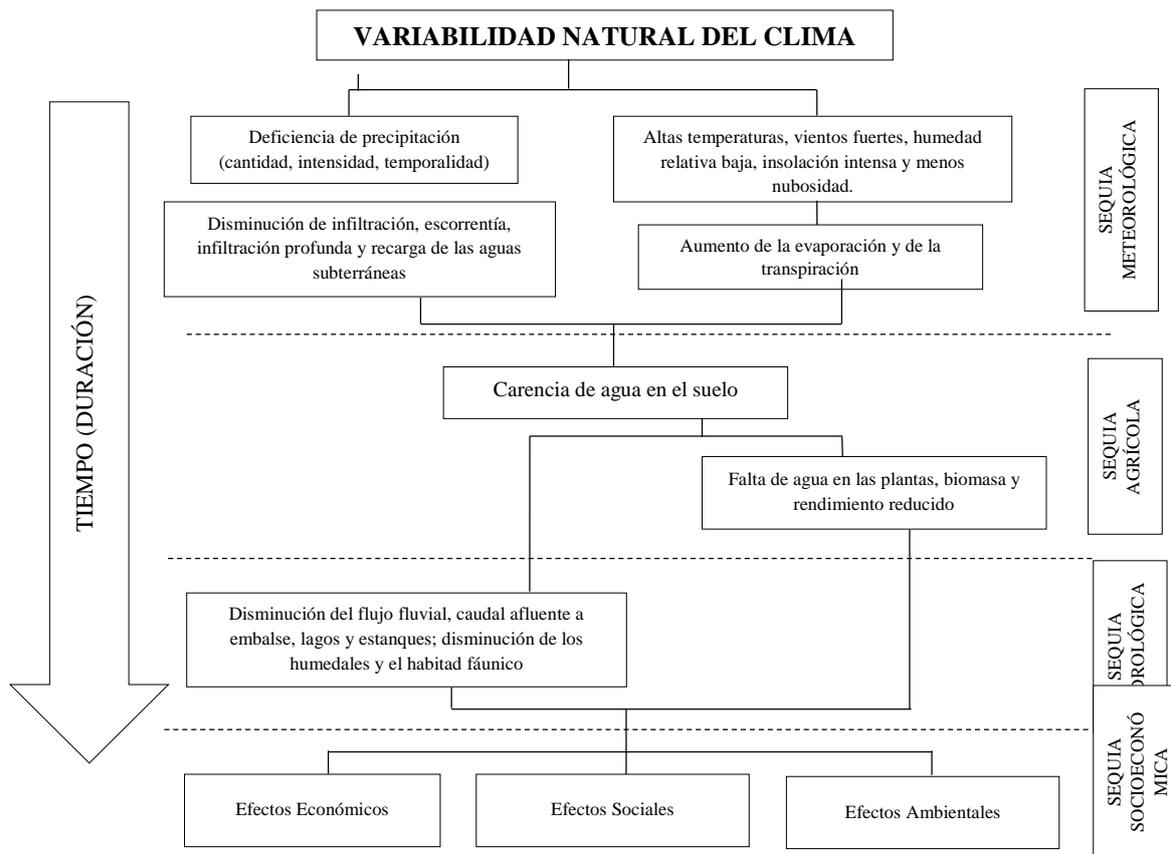


Figura 1: Secuencia de las sequías comúnmente aceptadas y sus efectos asociados al déficit del recurso hídrico.

FUENTE: OMM 2006.

- La sequía Meteorológica, se basa en datos climáticos, es una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo determinado. Existen diferentes definiciones de sequía meteorológica debido a la dificultad de establecer una duración y magnitud del déficit de las de precipitaciones valido para diferentes áreas geográficas (Valiente 2001).

Es el intervalo de tiempo con una duración de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae significativamente por debajo de lo climáticamente esperado (Palmer 1965) o como escasez prolongada de precipitación, inferior a la media (Russell *et al.* 1970).

- La sequía Agrícola, se presenta cuando la escasez de las precipitaciones afecta la agricultura, es decir que no hay suficiente humedad en el suelo para permitir el

desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento este tipo de sequía no solo depende de las precipitaciones sino también de las características biológicas del cultivo y las propiedades del suelo (Valiente 2001). Existen casos donde se manifiesta una sequía meteorológica en un lugar dado, pero si se cuentan con suficientes niveles de humedad en el subsuelo para mantener los cultivos, no se llega a producir una sequía agrícola.

- La sequía Hidrológica, se define como el periodo durante el cual los caudales son inadecuados para satisfacer los usos establecidos bajo un determinado sistema de gestión de agua y se diferencia de la agrícola, en que no se manifiesta inmediatamente desde el inicio de la escasez de la precipitación, es decir ellas tienen lugar meses después que se presente la sequía meteorológica y la podemos observar en los volúmenes de aguas de los ríos, embalses, lagos, etc. (Linley *et al.* 1975).
- La sequía Socioeconómica, tiene que ver con los daños económicos y sociales que afectan a una población, producto de la falta de las precipitaciones; tal es el caso de la restricción del suministro de agua o del servicio eléctrico, producido por centrales hidroeléctricas o basta con que algún sector económico se vea afectado (Valiente 2001).

3.4 Características de la Sequía Meteorológica

Burton *et al.* (1978) indicaron que existen siete parámetros para caracterizar la ocurrencia de la sequía meteorológica; uno independiente (magnitud), cuatro relacionados al componente temporal (duración, frecuencia, velocidad de implantación y espaciamiento temporal), y dos que describen su cobertura espacial (extensión y dispersión espacial).

OMM (2006) indica que dan significativa importancia a la intensidad, duración y extensión, destacando algunos aspectos relevantes con relación a este fenómeno: (1) su intensidad, muestra el déficit de la precipitación y la gravedad de los efectos asociados a ese déficit. (2) la magnitud, puede expresarse en términos de la desviación respecto de las pautas normales de parámetros climáticos como, la precipitación o el nivel de los embalses, o por medio de índices como el índice SPI (índice de precipitación estandarizado); (3) estos eventos pueden sobrevenir rápidamente en algunos regímenes climáticos pero, lo habitual, es que tarden, como mínimo, dos o tres meses en hacerse patentes y extenderse durante meses o años; (4)

la magnitud de los efectos de una sequía está estrechamente relacionada con el momento en que comienza la escasez de precipitación, su intensidad y duración; (5) las sequías difieren en sus características espaciales.

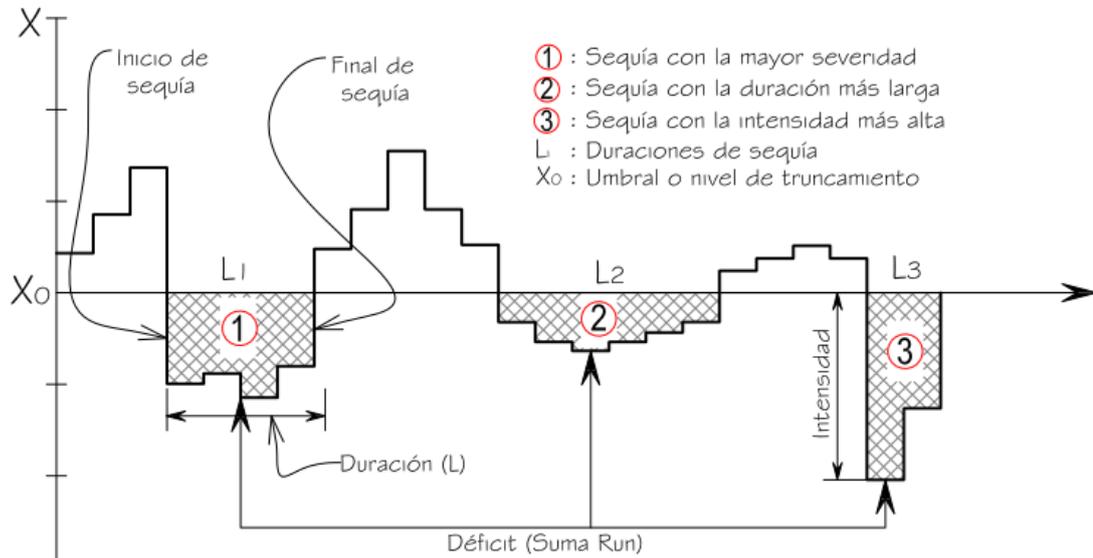


Figura 2: Características de la sequía para un nivel de truncamiento X_0

FUENTE: Ayala 2016.

3.5 PISCO (Peruvian Interpolated Data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations)

El producto PISCO de precipitación v2.0 (PISCOp), en su versión mensual es el resultado de la combinación de datos de estaciones terrenas con climatologías, reanálisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial ($\sim 5 \times 5$ km); los datos grillados abarcan una serie temporal que se inicia el 1ro de enero 1981 hasta el 31 de diciembre 2016 (Aybar *et al.* 2017).

Para la construcción del producto PISCOp fue necesario utilizar como covariable, la base de datos global del proyecto CHIRPS (Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data). CHIRPS es una mezcla de datos provenientes de sensores remotos, modelos y datos provenientes de estaciones terrenas. Los datos de CHIRPS están disponibles desde enero de 1981 para una grilla global de resolución de 0.05° (~ 5 km). La resolución temporal mínima es de un día pero también hay posibilidad de agregaciones a mayores intervalos de tiempo.

Para la mezcla de la información pluviométrica y CHIRPM (modificación del CHIRP), a una escala de paso mensual de la precipitación se ha utilizado la técnica geoestadística

Kriging con Deriva Externa (KED) por ser una técnica robusta. En esta metodología, la variable a regionalizar es la precipitación observada y la covariable es la precipitación estimada por el producto CHIRPM. A paso diario se utiliza una modificación de la técnica de interpolación “Inverso de la Distancia Ponderada” junto a una corrección de sesgo basado en valores mensuales, además a partir de la optimización de parámetros de interpolación se plantea la caracterización de la estructura espacial. El proceso de mezcla se realizó de manera independiente para cada mes y día de las series históricas desde enero de 1981 hasta diciembre de 2016 (Aybar *et al.* 2017).

3.6 Análisis exploratorio de datos

La primera condición esencial de cualquier análisis de datos estadísticos es comprobar que las observaciones de la serie de datos sean adecuadas para el análisis de frecuencia. Para el caso específico de observaciones de variables hidrológicas para las que se ha de realizar un análisis de frecuencia, dos tipos de errores son habituales en las muestras: Primero, que los valores de los datos puedan ser incorrectos, debido a posibles fallos en la grabación o transcripción, que conducen a valores incorrectos y pone en duda a la muestra para cualquier análisis de frecuencia posterior. En segundo lugar, las circunstancias en que se recogieron los datos pueden haber cambiado con el tiempo, como puede ser: el reemplazo de los aparatos de medición o su traslado a una ubicación diferente, manifestación de tendencias a través del tiempo que pueden haber surgido a partir de los cambios ambientales y climáticos en el entorno donde se ubica el dispositivo de medición. Esto significa que la muestra de observaciones no es homogénea o constante en el tiempo, y el análisis de frecuencia de los datos no será una base válida para estimaciones de las mediciones futuras en el sitio (Fernández 2014).

3.6.1 Diagrama de caja (Boxplot)

La regla del boxplot es un test visual para reconocer los outliers. El rango intercuartil es incluido dentro de una caja y los intervalos de confianza de 5% y 95% son indicados con barras de error fuera de la caja. Aquellos valores que caen fuera de los intervalos de confianza son candidatos a ser outliers (Iglewicz y Hoaglin 1993).

Límite para el intervalo de confianza al 95%:

$$\frac{x - Q_3}{Q_3 - Q_1} > L_S$$

Límite para el intervalo de confianza al 5%:

$$\frac{Q_3 - x}{Q_3 - Q_1} > L_1$$

$$L_1 = Q_1 - Q_3 - Q_1 * 1.5$$

$$L_S = Q_3 - Q_3 - Q_1 * 1.5$$

Donde L_1, L_S es el valor crítico en la regla del boxplot, x es el punto fuera del límite más alto o más bajo en la regla del boxplot y Q_i =Cuartil i-esimo.

3.7 Supuesto del análisis regional

Verificar los supuestos del Análisis de Frecuencia Regional, es una práctica habitual para poner a prueba la hipótesis donde las observaciones en diversos sitios son estacionarios (libre de tendencias), independientes y homogéneos y/o idénticamente distribuidos.

3.7.1 Prueba de Mann Kendall (MK)

La prueba de MK, es la prueba no paramétrica basado en el rango para evaluar la importancia de una tendencia, ha sido ampliamente utilizado en la detección de la tendencia en estudios hidrológicos. La hipótesis nula es H_0 : No existe una tendencia en la serie $\{X_i, i = 1, 2, \dots, n\}$. La hipótesis alternativa es H_a : hay una tendencia en la serie.

El estadístico S de Tau de Kendall se define como sigue (Yue et al. 2002):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i)$$

Donde el X_j son los datos secuenciales, n es la longitud del conjunto de datos, y:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \text{si } \theta < 0 \end{cases}$$

Mann (1945) y Kendall (1975) han documentado que cuando $n \geq 8$, la estadística S es aproximadamente normal distribuido con la media y la varianza de la siguiente manera:

$$E(S) = 0$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{m=1}^n t_m m(m-1)(2m+5)}{18}$$

Donde t_m es el número de vínculos de grado m . la prueba estadística estandarizada Z se calcula:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

El valor de probabilidad P de la estadística S de MK para los datos de la muestra se puede estimar usando la función de distribución acumulativa normal como:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Si los datos de la muestra están correlacionados serialmente, será necesario blanquear previamente los datos y aplicar una corrección para calcular la varianza (Yue *et al.* 2002).

3.8 Análisis de Frecuencia

Kite (1977), Labbé (1979) y Arumi *et al.* (2000) indicaron que el análisis de frecuencia es el procedimiento que permite ajustar datos hidrológicos a un modelo matemático de distribución de probabilidades. Para poder aplicar este tipo de análisis es necesario considerar tres supuestos esenciales:

- Los datos analizados describen eventos aleatorios.
- Los procesos naturales son estacionarios con respecto al tiempo.
- Los parámetros de la población pueden ser estimados desde la muestra.

Ayala y Ferrer (1973) mencionan que el procedimiento de análisis de frecuencia contemplan las siguientes etapas:

- a) Analizar la confiabilidad de las series de datos hidrológicos.
- b) Suponer modelos probabilísticos, asumiendo que predicen los fenómenos hidrológicos.

- c) Seleccionar modelos probabilísticos y estimar parámetros estadísticos de las distribuciones.
- d) Aplicar pruebas estadísticas para seleccionar los modelos probabilísticos de mejor ajuste (describe de mejor forma el fenómeno).
- e) Estimar los valores de probabilidades asociados a los periodos de retorno.

Chow (1964), define que el objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de eventos con su frecuencia de recurrencia, mediante el uso de distribución de probabilidad.

3.9 Análisis Regional de Frecuencias

Para asociar los resultados obtenidos de un análisis de frecuencia de una estación o un grupo de estaciones a un área determinada, se debe aplicar el procedimiento conocido como análisis regional o regionalización. Este procedimiento consiste básicamente en definir regiones estadísticamente homogéneas en una zona determinada con el fin de asociar estaciones a estas regiones y poder estimar las frecuencias sobre la base de los datos hidrológicos. En cada región los resultados de los análisis de frecuencia de las estaciones pueden ser promediados para representar la frecuencia característica de toda la región (Chow 1964). Para estimar que un grupo de estaciones conforman una región, las estaciones deben cumplir el criterio de homogeneidad, es decir, los cuantiles estimados en todas las estaciones difieren solo por un factor de escala específico de cada zona (Bradley y Zhao 1997).

3.10 L-Momentos

L-momentos o momentos lineales (L significa linealidad), es un sistema alternativo a los momentos tradicionales de los momentos convencionales para describir las formas de las distribuciones de probabilidad.

Los L-Momentos son combinaciones lineales de los momentos Ponderados de Probabilidad (MPP), que miden la localización, escala y forma de la distribución de probabilidades.

El estimador MPP a partir de una muestra con variable aleatoria X de tamaño N, con elementos en orden ascendente: $X_{1:N} < X_{2:N} < \dots < X_{N:N}$ es:

$$\beta_r = \frac{1}{N} \sum_{j=r+1}^N (x_j) \frac{(j-1)(j-2) \dots (j-r)}{(N-1)(N-2) \dots (N-r)}$$

Donde: $x_{j:N}$ es el j -ésimo elemento en orden ascendente.

Desarrollando los primeros MPP se tiene:

$$\beta_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=2}^N x_j \frac{(j-1)}{(N-1)}$$

$$\beta_3 = \frac{1}{N} \sum_{j=3}^N x_j \frac{(j-1)(j-2)}{(N-1)(N-2)}$$

$$\beta_4 = \frac{1}{N} \sum_{j=4}^N x_j \frac{(j-1)(j-2)(j-3)}{(N-1)(N-2)(N-3)}$$

Análogamente, los cuatro primeros momentos lineales están definidos como:

$$l_1 = \beta_0$$

$$l_2 = 2\beta_1 - \beta_0$$

$$l_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0$$

$$l_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0$$

El momento lineal de primer orden l_1 es el parámetro de localización o media de la muestra; el segundo orden l_2 mide la escala o la variación, indicando el grado de dispersión de los datos; el momento de tercer orden l_3 hace referencia a su asimetría; y el cuarto orden l_4 indica la kurtosis de la muestra.

Los L-momentos de la muestra que son independientes de las unidades de medición, llamados L-momentos ratios o cociente (Hosking 1990). Se definen dividiendo aquellos de mayor orden por la medida de la escala l_2 :

$$t = \frac{l_2}{l_1} = L - Cv, \text{ donde } 0 \leq t \leq 1$$

$$t_3 = \frac{l_3}{l_2} = L - Skewness, \text{ donde } -1 \leq t_3 \leq 1$$

$$t_4 = \frac{l_4}{l_2} = L - \text{Kurtosis}, \text{ donde } -1 \leq t_4 \leq 1$$

Donde t es L-cociente de variación ($L - Cv$), t_3 es L-cociente de asimetría ($L - Skewness$) y t_4 es L-coeficiente de kurtosis ($L - Kurtosis$).

Los momentos lineales de la muestra (t , t_3 y t_4) se relacionan con los momentos lineales de la función de distribución (τ , τ_3 y τ_4) para determinar los parámetros de las distribuciones.

3.11 Ventajas del análisis regional de frecuencia basado en los L-momentos

Las ventajas que tiene el análisis regional de frecuencia basado en los L-momentos (ARF-LM) son a través de una comparación entre sus capacidades de estimación respecto a los modelos convencionales:

- El ARF-LM sobre el uso de los métodos convencionales de ajuste probabilístico es que, probado que distintos sitios provienen de una gran región homogénea desde el punto de vista de la distribución de probabilidad, es posible agregar las observaciones de cada uno de ellos para obtener una sola gran estimación de los parámetros de la distribución (Hosking y Wallis 1997).
- El ARF-LM es el procedimiento más robusto disponible frente a los métodos convencionales para el ajuste de distribuciones de probabilidad. Según Hosking y Wallis (1997), lo que el procedimiento viene a realizar es compensar la carencia de información en el tiempo, por su abundancia en el espacio.
- Los modelos de distribución utilizados por el ARF-LM no son los modelos convencionales utilizados en la hidrología probabilístico, sino que son modelos de distribución mucho más generales y flexibles, basados en 3 o más parámetros. Esta flexibilidad, que determina que distribuciones como Kappa de 4 parámetros, sea una función general de la cual derivan no menos de 7 tipos distintos de distribución ampliamente utilizadas en hidrología, es muy bien aprovechada por las propiedades de los L-momentos. Se debe recordar que a mayor cantidad de parámetros aumenta la flexibilidad de la distribución, pero se requiere un mayor número de ecuaciones para su resolución. El método de los momentos convencionales, implica depender de un mayor número de momentos, cada uno de ellos elevado a potencias de mayor grado.

Ante la presencia de valores atípicos que pueden tener base física, los ajustes mediante momentos convencionales pueden dar resultados totalmente insatisfactorios. En cambio, los L-momentos son bastante insensibles ante la presencia de estos valores atípicos y menos sensibles a la asimetría y entre otros, por lo tanto, concluyen que al utilizar este método, se obtienen estimaciones más cercanas a los valores observados (Hoshing y Wallis 1997).

- Los L-momentos pueden obtener mejores estimaciones de cuantiles y probabilidades que mediante otros métodos en análisis de muestras pequeñas. Además se puede ajustar un número mayor de distribuciones que mediante otros métodos. Un total de 13 diferentes distribuciones se pueden ajustar mediante el método de los L-momentos, de los cuales 5 son generalmente utilizadas en análisis regionales de frecuencia (Okur y Sorman 2000).

3.12 Análisis Regional de Frecuencia basado en los L-momentos

El Análisis Regional de Frecuencias basado en los L-momentos (ARF-LM), está basado en la metodología propuesta por Hoshing y Wallis (1997), quienes justifican el método en la estimación de las magnitudes (cuantiles) de los eventos extremos (avenidas y sequías) correspondiente a diferentes periodo de retorno (Ayala 2016).

Los procedimientos para realizar un análisis de frecuencia estadístico de un conjunto de datos son bien conocidos. Sin embargo, suelen existir varias muestras de datos disponibles para un análisis. Estas observaciones pueden ser, por ejemplo, de orígenes meteorológicos o ambientales, de la misma variable y obtenidos en diferentes sitios de medición bajo diferentes condiciones. Si las distribuciones presentan similitud en las diferentes observaciones (datos), es posible obtener resultados más precisos utilizando todas las muestras en un análisis. En análisis ambientales este procedimiento es conocido como análisis regional de frecuencia, debido a que los datos utilizados corresponden a observaciones de la misma variable en una serie de lugares de medición dentro de una región o zona determinada. Así, los principios y procedimientos del análisis regional de frecuencia son aplicables cuando existan muestras, de la misma variable, provenientes de diferentes lugares dentro de una misma región (Hosking y Wallis 1997).

Suponiendo que las observaciones se realizan en intervalos regulares de tiempo en una región determinada, se denomina a Q como la magnitud del evento que ocurre en un momento dado en un lugar específico. Así se considera a Q como una variable aleatoria que teóricamente puede tomar cualquier valor entre cero y el infinito. El fundamento del análisis estadístico de frecuencia se basa en la distribución de probabilidad de los posibles valores de Q (Hosking y Wallis 1997). Se denomina $F(X)$ la probabilidad de que el valor de Q no sea mayor que x . Si ordenamos los datos de menor a mayor, es:

$$F(X) = P(Q \leq x)$$

$F(X)$ es la función de probabilidad de la distribución de frecuencia. La función inversa $x(F)$, es la función de densidad, asociados a los cuantiles de la distribución de frecuencia. Esta función inversa expresa la magnitud de un evento particular en términos de probabilidad de no excedencia F . El cuantil asociado al periodo de retorno T denominado Q_T es la magnitud de un evento tan extremo que tiene probabilidad $1/T$ de ser excedido por otro evento (Hosking y Wallis 1997). Para eventos extremos de alta magnitud que se ubican en lo alto de la curva de distribución de frecuencia, Q_T es:

$$Q_T = X\left(1 - \frac{1}{T}\right)$$

$$F(Q_T) = \left(1 - \frac{1}{T}\right)$$

En un evento extremo de baja magnitud, que se ubican en la parte baja de la curva de distribución de frecuencia, las expresiones de Q_T son:

$$Q_T = X\left(\frac{1}{T}\right)$$

$$F(Q_T) = \left(\frac{1}{T}\right)$$

El objetivo del análisis de frecuencia es obtener estimaciones de cuantiles Q_T y probabilidades asociadas a diferentes periodos de retorno. Generalmente el objetivo del análisis de frecuencia es estimar Q_T para un rango de periodos de retorno o para estimar la función de probabilidad. Si existen datos disponibles de un determinado sitio de monitoreo o estación de interés, los datos observados proveen una muestra de Q . En diversos análisis ambientales el tamaño de la muestra raramente es suficiente para estimar cuantiles de manera confiable. Generalmente un cuantil asociado a un determinado periodo de retorno puede ser

estimado de manera confiable utilizando un registro de datos de longitud n solo si $T \leq n$. Sin embargo en diferentes aplicaciones de la ingeniería, basados en registros anuales, la condición antes mencionada no se satisface. Se han desarrollado diferentes metodologías para abordar este problema, utilizando fuentes de datos alternativos o adicionales. Una de estas metodologías es el análisis regional de frecuencia (Álvarez *et al.* 1999).

En este contexto existen diferentes investigaciones relacionadas con las propiedades de los algoritmos regionales de los momentos de probabilidad ponderados, que es un procedimiento de análisis regional de frecuencia basado en el método estadístico denominado momentos de probabilidad ponderados. El método de los algoritmos regionales de momentos ponderados por probabilidad entrega resultados precisos (Cunnane 1988). Los L-momentos derivan de los momentos ponderados por probabilidad e incrementan la precisión de los cálculos (Hosking y Wallis 1997).

El ARF-LM se fundamenta en el método denominado Índice de Avenida. Este último se desarrolló por Dalrymple, 1960, se ha utilizado desde entonces en el análisis de frecuencias, tomando como base la prueba de homogeneidad hidrológica. La ecuación del Índice de Avenida considerado comúnmente como la precipitación media anual (PMA) es como sigue:

$$Q_i(F) = u_i * q(F), i = 1, \dots, n$$

Donde:

u_i : es la precipitación media anual para la estación i ; $q(F)$: es la Curva de Crecimiento Regional estimada para $0 < F < 1$. Es una función adimensional común a todos los sitios dentro de la región homogénea y representa la función cuantílica de la distribución regional de frecuencia (Hosking y Wallis 1997).

Los cuantiles para cada sitio pueden ser estimados, justamente a partir de la relación entre el valor estimado de μ_i , correspondiente a la media de los datos observados en el sitio, y (F) , la curva de crecimiento regional estimada, para $0 < F < 1$. Es decir, la función cuantílica estimada en el sitio i , depende de la media estimada en el sitio i y de la curva de crecimiento regional estimada, según la siguiente ecuación:

$$\hat{Q}_i(F) = \hat{u}_i * \hat{q}(F)$$

3.13 Procedimiento del análisis regional de frecuencia de sequias basado en los L-momentos

Para la aplicación del ARF-LM se consideró la metodología propuesta por Hosking y Wallis (1997) consideran los siguientes pasos:

3.13.1 Preparación de datos

La primera etapa del análisis regional de frecuencia basado en los L-momentos consiste en la preparación de los datos mediante la revisión e inspección de estos. En esta etapa se realizó:

- Análisis de datos atípicos
- Supuestos del análisis regional de frecuencia

3.13.2 Identificación de Regiones Homogéneas

A través de algunas variables de agrupación tales como la precipitación media anual, latitud, longitud y altitud se realiza la etapa de regionalización preliminar, utilizando el Análisis Clúster según la Agrupación de Ward para representar un grupo de estaciones con características comunes e implicar grandes cantidades de información para el ARF-LM. La identificación de regiones homogéneas, es la etapa principal del ARF-LM, según este procedimiento se establecerá el número de regiones de análisis, por tanto, para conseguir tal homogeneidad (similitud bajo las características externas de cada estación (Ayala 2016).

Medida de Discordancia: Dado un grupo de sitios, el objetivo consiste en identificar las estaciones que son groseramente discordantes con los grupos de las estaciones. La discordancia se mide en términos de L-momentos de los datos de las estaciones (Hosking y Wallis 1997), se definen la medida de discordancia para el sitio i como:

$$D_i = \frac{N}{3} (u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u})$$

Donde:

$$u_i = [t^i \ t_3^i \ t_4^i]^T$$

Vector que contiene los valores de los ratios L-momentos t^i , t_3^i y t_4^i para la estación i : el superíndice T indica la transposición de un vector. El valor promedio de la región o grupo es:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$$

La matriz de sumas de cuadrados y productos cruzados se define como:

$$A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u})^T$$

La estación i se declara discordante si el valor de D_i es elevado, y ello depende del número de estaciones que forman los grupos.

Hosking y Wallis (1997), establecen que una estación ha de ser considerada discordante si su valor D_i supera el valor crítico establecido en función al número de estaciones en la región, dado en la

Tabla 1:

Tabla 1: Cuadro valores críticos de la discordancia D_i

Número de estaciones en la Región	Valor Crítico	Número de estaciones en la Región	Valor Crítico
5	1.333	10	2.491
6	1.648	11	2.632
7	1.917	12	2.757
8	2.14	13	2.869
9	2.329	14	2.971
		≥ 15	3

FUENTE: Hosking y Wallis 1997.

Hosking y Wallis (1997), recomienda el empleo de D_i en dos etapas.

Inicialmente, se puede aplicar a un grupo de sitios procurando abarcar la totalidad de las estaciones o regiones suficientemente amplias. Las estaciones que difieren significativamente de la mayoría, en sus datos serán señalados como discordante y serán excluidos, pudiéndose considerar la posibilidad de desplazarlo a otra región. Posteriormente, una vez identificadas las diferentes regiones homogéneas, se debe recalcular la medida de la discordancia para cada sitio en su región propuesta.

Medida de Heterogeneidad: Hosking y Wallis (1997), presenta la medida de Heterogeneidad para estimar el grado de heterogeneidad en un grupo de estaciones y evaluar cuando pueden ser tratadas en su conjunto como una región homogénea.

La medida de heterogeneidad compara la dispersión observada y simulada de L-momentos para N estaciones consideradas. Para este propósito la simulación de Monte Carlo se realiza mediante la distribución Kappa de cuatro parámetros definidos por:

$$f(x) = \alpha^{-1} [1 - k(x - \xi)/\alpha]^{1/k-1} [F(x)]^{1-h}$$

ξ es un parámetro de localización, α es un parámetro de escala, k y h son parámetros de forma.

La razón para utilizar la distribución Kappa es que se trata de una distribución generalizada que produce muchas distribuciones como casos especiales se tiene la Logística Generalizada, General de Valores Extremos, General de Pareto, por lo que es capaz de abarcar la mayor parte de las distribuciones empleadas en estudios medioambientales.

Los cuatro parámetros de la distribución Kappa son ajustada a los ratios medios regionales l, t^R, t_3^R y t_4^R para simular un número N_{sim} de realizaciones de una región con N estaciones como la original. Para comparar los valores de la dispersión observadas con los simulados, el estadístico apropiado es la medida de heterogeneidad, $H_j, j=1, 2, 3$, definido como:

$$H_j = \frac{V_j - \mu_{V_j}}{\sigma_{V_j}}$$

Donde para cada simulación se calcula V_j . Se determina además la media μ_{V_j} y la desviación estándar σ_{V_j} de los N_{sim} valores de V_j . Siendo:

V_1 : es la desviación estándar ponderada observada de los t valores:

$$V_1 = \left\{ \sum_{i=1}^N n_i (t^i - t^R)^2 / \sum_{i=1}^N n_i \right\}^{1/2}$$

V_2 : es la distancia media observada de t/t_3 :

$$V_2 = \sum_{i=1}^N n_i [(t^i - t^R)^2 + (t_3^i - t_3^R)^2]^{1/2} / \sum_{i=1}^N n_i$$

V_3 : es la distancia media observada de t_3/t_4 :

$$V_3 = \sum_{i=1}^N n_i [(t_3^i - t_3^R)^2 + (t_4^i - t_4^R)^2]^{1/2} / \sum_{i=1}^N n_i$$

Donde la región propuesta tiene N estaciones, cada estación i tiene la longitud de registro n_i y los ratios de L-momentos t^i , t_3^i y t_4^i , t^R , t_3^R y t_4^R son los ratios medios regionales de L-CV, L-asimetría y L-Kurtosis, ponderados proporcionalmente en función de la longitud de registro; por ejemplo:

$$t^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t^i}{\sum_{i=1}^N n_i}$$

La región se declara heterogénea si el valor de H_j es suficientemente elevado.

Hosking y Wallis (1997), sugieren considerarla como “aceptablemente homogénea” si $H_j < 1$, “posiblemente heterogénea” si $1 \leq H_j < 2$ y “definitivamente heterogénea” si $H_j \geq 2$.

El uso del estadístico H con un número mayor de repeticiones constituye una alternativa más fiable y menos subjetiva. Se considera adecuado un valor M de 500 simulaciones, requiriéndose de valores mayores en caso de que H_j resulte cercano a los límites de 1 y 2.

3.13.3 Identificación de la Distribución

Realizada la clasificación regional, es posible determinar las funciones de distribuciones de probabilidad para cada región homogénea.

Hosking y Wallis (1997), consideran entre los más importantes a cinco distribuciones como: Logística Generalizada (GLO), Valores Extremos Generalizados (GEV), Pareto Generalizado (GPA), Normal Generalizado (GNO) y Pearson Tipo III (PE3). Justifican la elección entre estas cinco distribuciones por el hecho de poseer tres parámetros lo cual, en un análisis regional, facilita el ajuste al disponerse de observaciones de varias estaciones y de incluir entre sus casos particulares las distribuciones más empleadas en el estudio de variables ambientales (ver Anexo 4)

Los diagramas de las relaciones de los L-momentos:

En Hosking (1990), aparecen por primera vez los diagramas de las relaciones de los L-momentos, que resulta una herramienta útil en la selección adecuada de la función de distribución regional de frecuencia de los eventos hidrológicos extremos.

Hosking y Wallis (1997), han desarrollado expresiones polinómicas que permiten elaborar los diagramas de L-momentos para cada una de las funciones de distribución más frecuentemente utilizadas, en las que L-cociente de Kurtosis (L-C_k) se estiman a partir de L-cociente de asimetría (L-C_s); mediante la aproximación del siguiente polinomio, los coeficientes A_k, se dan en el anexo 4:

$$L - C_k = \sum_{k=0}^8 A_k (L - C_s)^k$$

Una vez que se disponen de los diagramas en el plano ($L - C_s$, $L - C_k$), de acuerdo a Vogel *et al.* (1993) y Hosking y Wallis (1995), la proximidad de la media regional a un candidato particular de la curva de distribución teórica se interpreta como una indicación de la distribución de mejor ajuste para describir los datos regionales.

Medida de Bondad de Ajuste – Estadístico Z^{DIST}

El criterio para seleccionar la distribución de mejor ajuste es el estadístico Z^{DIST} definidas por Hosking y Wallis (1993), cuyo objetivo principal es comparar L-C_s y L-C_k simulado de una distribución ajustada con los valores de la media regional L-C_s y L-C_k obtenidos de los datos observados.

La bondad de la medida de ajuste para una distribución Z^{DIST} se define como:

$$Z^{DIST} = (\tau_4^{DIST} - t_4^R + B_4) / \sigma_4$$

Donde:

τ_4^{DIST} es el coeficiente L-kurtosis teórica de la distribución ajustada, donde DIST hace referencia a GLO, GEV, GPA, GNO y PE3 se determina directamente de los diagramas $L - C_s$, $L - C_k$

t_4^R es la media regional de L-kurtosis del conjunto de datos observados en la región homogénea.

B_4 y σ_4 bias y desviación estándar de t_4^R , respectivamente, definido como:

$$B_4 = N_{sim}^{-1} \sum_{m=1}^{N_{sim}} t_4^m - t_4^R$$

$$\sigma_4 = \left\{ (N_{sim} - 1)^{-1} \left[\sum_{m=1}^{N_{sim}} (t_4^m - t_4^R)^2 - N_{sim} B_4^2 \right] \right\}^{1/2}$$

N_{sim} es el número de conjunto de datos regionales simulados, generados usando una distribución Kappa. Se insiste en la posibilidad de emplear las mismas simulaciones mediante técnicas de simulación de Monte Carlo; llevadas a cabo para el cálculo de heterogeneidad. m es la m -ésima región simulada.

Finalmente se considera que el ajuste de una determinada distribución es adecuado si Z^{DIST} es suficientemente cercano a cero, siendo un valor razonable para este criterio $|Z^{DIST}| \leq 1.64$ lo cual corresponde a la aceptación de la distribución, planteado la hipótesis en un nivel de confianza del 90%.

3.13.4 Determinación del Cuantil

El algoritmo regional de L-momentos descrito por Hosking y Wallis (1997), se ha aplicado para estimar la distribución de frecuencias regionales. Que se define:

Dada la región de N estaciones, cada estación i con longitud muestral n_i , media muestral l_1^R y ratios de L-momentos t^i, t_3^i, t_4^i, \dots , donde t^R, t_3^R, t_4^R, \dots , son los ratios medios regionales de L-momentos ponderados proporcionalmente en función de la longitud de la muestra:

$$t^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t^i}{\sum_{i=1}^n n_i}$$

$$t_r^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t_r^i}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad r = 3, 4, \dots$$

El valor de la media regional $l_1^R = 1$

El algoritmo regional de L-momentos consiste en ajustar la distribución mediante sus ecuaciones de L-momentos ratios $\lambda_1, \tau, \tau_3, \tau_4, \dots$, a las medias ponderadas de los ratios regionales de L-momentos muestrales $l_1^R, t^R, t_3^R, t_4^R, \dots$, calculados anteriormente. La función cuantil de la distribución regional de frecuencia ajustada, se denota como \hat{q} .

Las estimaciones de los cuantiles en la estación i se determinan por combinación de las estimaciones de u_i y q . Así, el cuantil para la probabilidad de no excedencia F es:

$$\hat{Q}_i(F) = \hat{u}_i * \hat{q}(F)$$

3.13.5 Mapeo del periodo de retorno de eventos de sequia

El principal objetivo de esta fase es generar los mapas de probabilidad de ocurrencia de eventos de precipitaciones asociados a un cuantil de interés correspondiente a un porcentaje de déficit de precipitación normal.

Para realizar los mapas se recomienda realizar la búsqueda de una función de mejor ajuste que describa la relación entre los L-momentos y la precipitación media anual (PMA). Schaefer *et al.* 2006 y Wallis *et al.* 2007 consideran la siguiente ecuación como la más recomendada para realizar el ajuste:

$$L - Momento = \alpha e^{-\beta(PMA)} + \delta$$

Donde:

α : Factor de escala

β : Factor de decaimiento

δ : Valor límite del L-momento calculado

L-momentos: Momentos lineales L-Cv, L-Sk y L-Ku

PMA: Precipitación media anual

El buen ajuste depende del número de pares de puntos disponibles para el gráfico, a medida que se obtengan más puntos, se espera un mejor ajuste, principalmente en la determinación de los coeficientes de ajuste, los cuales son específicos para cada L-momento. La importancia de esta etapa es poder estimar posteriormente los valores de los L-momento en cada punto o sitio de interés donde no se tiene mediciones. Para ello, se recurre al conocimiento de la distribución espacial de una variable altamente disponible en muchos sitios, como es la precipitación media anual. De esta forma, obtenidos los L-momento en cualquier punto, son utilizados en la determinación de los parámetros de las funciones de distribución de densidad de probabilidad y por tanto de las probabilidades o cuantiles asociados.

Finalmente, los mapas de los parámetros de la distribución de probabilidad seleccionados permitirán determinar el mapa de probabilidad o periodo de retorno para un cuantil definido.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio está ubicada en la parte sur del Perú y corresponde a la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero, políticamente pertenece a las regiones de Apurímac y Cusco. Su cobertura espacial se extiende entre las coordenadas 71°00'00" - 73°30'00" de Longitud Oeste y 11° 54'00" - 15° 36'00" de Latitud Sur. Las cuencas de los ríos Alto Apurímac, Alto Urubamba y Yavero se emplazan en la Vertiente del Atlántico. Abarcan un área total de 61,533.0 km² distribuidas entre niveles altitudinales que varían entre 470 m.s.n.m. – 6400 m.s.n.m.

Limita al Norte con la cuenca Bajo Urubamba, al Sur con las cuencas Camana, Azángaro y Pucara, al Oeste con las cuencas Pampas, Intercuenca Bajo Apurímac y Ocoña, al Este con las Cuencas Inambari e Intercuenca Alto Madre de Dios.

En la Tabla 2 se muestran las unidades hidrográficas que están elaboradas por el ANA (Autoridad Nacional del Agua) aplicando el sistema internacional Pfafstetter.

Tabla 2: Parámetros de las unidades hidrográficas

N°	Nombre	Área (km ²)	Perímetro (km)
1	Intercuenca Alto Apurímac	34,733.0	1,350.0
2	Cuenca Urubamba	21,303.0	1,157.0
3	Cuenca Yavero	5,496.0	713.0
Total		61,532.0	

En la Figura 3 se muestra la ubicación de la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero sobre el modelo de elevación del terreno, de gran influencia sobre las condiciones hidroclimáticas en la superficie en estudio.

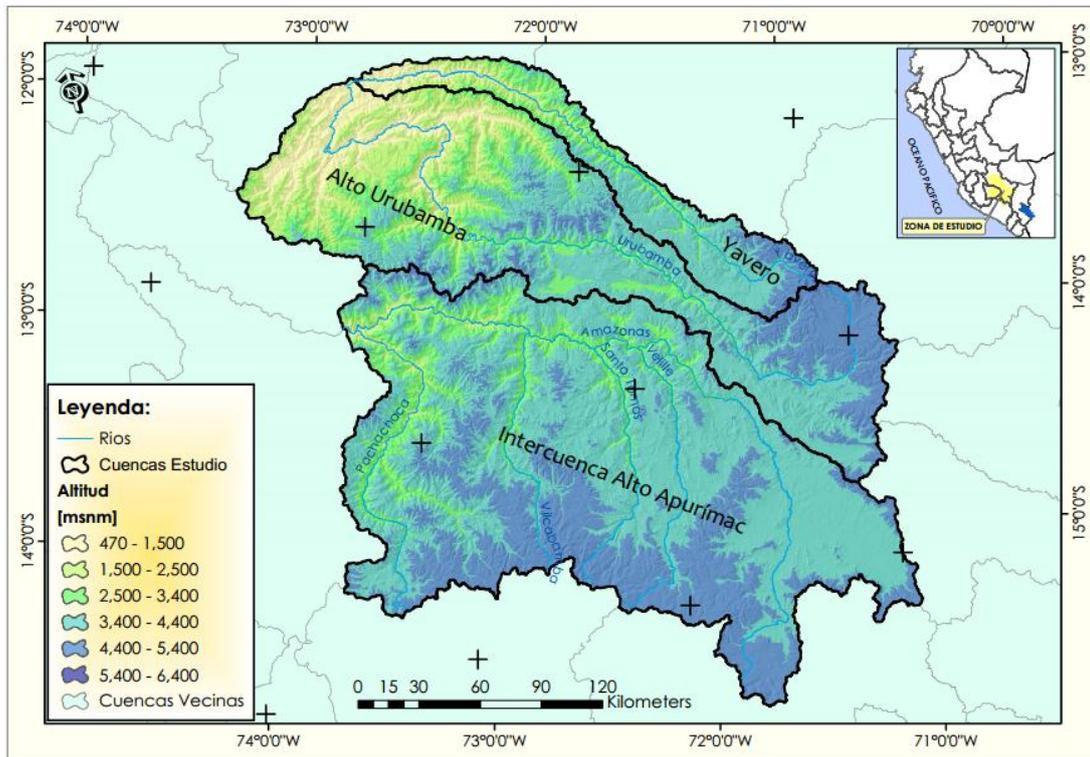


Figura 3: Mapa de ubicación de la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero.

4.1.1 Climatología

En la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero, se presentan 03 tipos de climas según el Mapa Climático del Perú como son:

- *Clima lluvioso semifrigido (de tundra):* Este de tipo climático en la región andina, se extiende entre los 3500 y 6000 msnm. Se caracteriza por presentar precipitaciones anuales en promedio de 700mm, temperaturas medias anuales de 7°C y nieves perpetuas en alta montaña. Presenta veranos lluviosos e inviernos secos con heladas moderadas (SENAMHI 1988).
- *Clima frio o boreal (de los valles mesoandinos):* Este tipo climático de la región de la sierra, se extiende entre los 3000 y 4000 msnm. Se caracteriza por precipitaciones anuales promedio de 700 mm, y sus temperaturas medias anuales de 12°C. Presenta veranos lluviosos e inviernos secos con fuertes heladas (SENAMHI 1988).

- *Clima lluvioso - frio húmedo*: Máxima promedio varía entre 19°C y 12°C y la mínima fluctúa entre 1°C y 6°C entre mayo y setiembre, en ocasiones desciende por debajo de 0°C, estas bajas temperaturas se deben a las altas mesetas y montañas por donde discurren masa de aire muy frías durante las noches y se acentúa el enfriamiento si el cielo está despejado y si hay presencia de aire seco proveniente del oeste o del norte a través del valle del Vilcanota.

Entre los meses de abril a septiembre los días son cálidos debido a la fuerte insolación diurna, la transparencia y la sequedad de la atmosfera, durante las noches se registra perdida de radiación terrestre dando como resultado heladas y un ambiente muy frio. El periodo de lluvias es de noviembre a marzo siendo las más intensas en diciembre y los primeros meses del año (SENAMHI 1988).

En la Tabla 3 y Figura 4 se muestran el tipo de clima para la zona de estudio según el mapa climático del Perú.

Tabla 3: Tipo de clima zona de estudio

Tipo de clima – Mapa climático Perú	
Intercuenca Alto Apurímac	Clima lluvioso semifrigido (de tundra) y Clima frio o boreal (de los valles mesoandinos)
Cuenca Alto Urubamba	Clima lluvioso semifrigido (de tundra), Clima frio o boreal (de los valles mesoandinos) y Clima lluvioso - frio húmedo
Cuenca Yavero	Clima lluvioso semifrigido (de tundra) y Clima lluvioso - frio húmedo

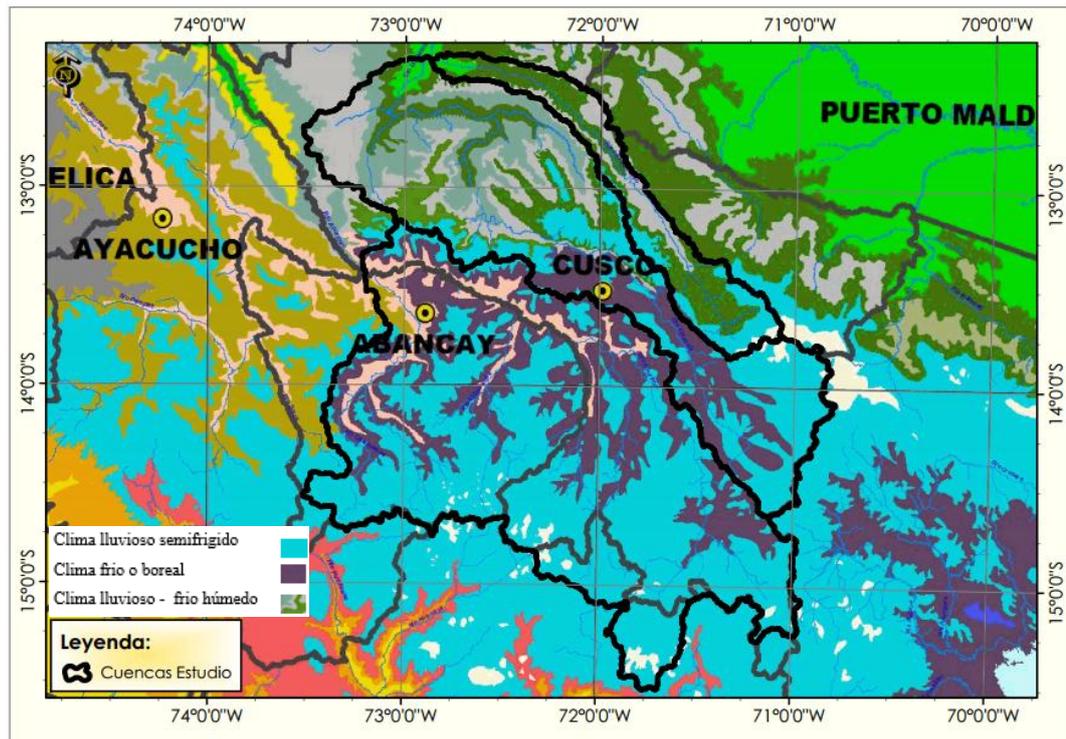


Figura 4: Mapa climático zona de estudio

Fuente: SENAMHI, 1988.

4.2 Materiales

En el desarrollo del Análisis Regional de Frecuencia basado en los L – momentos de la precipitación media anual para la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero se empleó la siguiente información:

- **Información Básica - Sistema de Información Geográfica:**

Para identificar el área de influencia de la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero se ha recopilado inicialmente la información en formato SIG, para ello se recurrió al servidor de Catálogo de Metadatos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA-PERÚ), disponible en:

<http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/spa/catalog.search;jsessionid=E9FC51B193C902391EA32EFDE4502577#/home>.

Para comprender la distribución espacial y altitudinal de las estaciones en el área de estudio se ha recopilado el modelo de elevación del terreno ASTER-GDEM de 30 m de resolución espacial, a partir de 1,3 millones de imágenes estéreo recogidas por el radiómetro japonés llamado ASTER. Este radiómetro es uno de los cinco

instrumentos de observación de la Tierra que viajan a bordo del satélite americano TERRA, lanzado en diciembre del 1999, disponible en:

http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download_raster.aspx.

Para identificar la cobertura de uso de suelos para la zona de estudio se utilizó GlobeLand30 es un producto de información de cobertura terrestre global con una resolución espacial de 30m x 30m (se extrajeron de más de 20,000 imágenes satelitales Landsat y HJ-1 de China), es potencialmente útil para muchas aplicaciones, disponible en:

<http://www.globallandcover.com/GLC30Download/index.aspx>

- **Información Meteorológica:**

Para conformar la serie de datos de precipitación mensual, se utilizó información obtenida del producto PISCO v2.0 (Peruvian Interpolation of the SENAMHIs Climatological and Hydrological Stations) para un periodo de 36 años de 1981- 2016, elaborado por la Dirección General de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, disponible en:

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=observacion-de-inundaciones>

Para validar la información de los datos de PISCO precipitación mensual (PISCOpm) se utilizó la información de precipitación mensual de estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio, correspondiente a las estaciones pluviométricas que se encuentran administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), se ha recopilado información de las mismas en el portal web de la Autoridad Nacional del Agua (ANA-PERÚ) y del SENAMHI, disponibles en:

<http://snirh.ana.gob.pe/SCCRH/frmBienvenida.aspx>

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>

En la Figura 5 se muestra la ubicación de las estaciones asumidas de la base de datos PISCOpm, dichas estaciones se consideraron con una grilla de 25x25 km tomando como el centroide de cada grilla como la estación de la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero. En el Anexo 1 se muestra el registro de la ubicación geográfica de las estaciones.

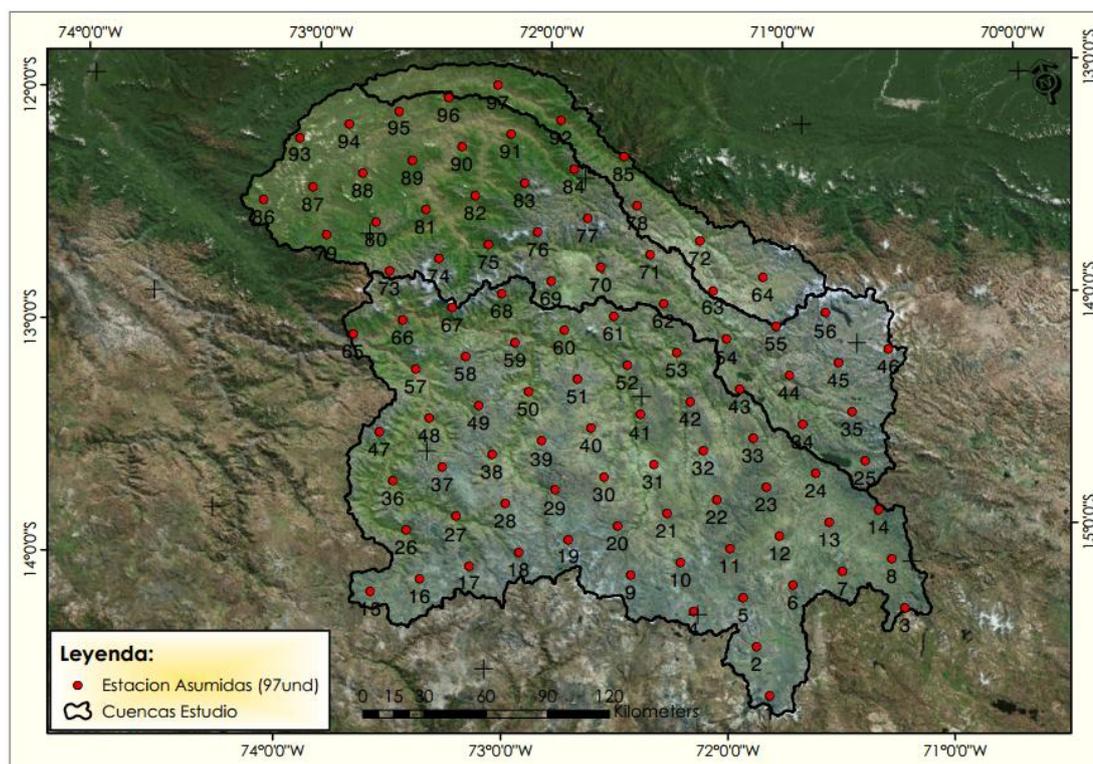


Figura 5: Estaciones con registro de PISCO precipitación (PISCOpm)

- **Programas:**

- ArcGis 10.x: con este programa se elaboró las presentaciones de mapas que representen el objetivo de la investigación a un nivel espacial.
- R y Rstudio (lenguaje de programación): Lenguaje de programación para el análisis estadístico y gráfico, proyecto de *software* libre, el cual se encuentra bajo la licencia GNU. Con este lenguaje de programación se realizó el análisis exploratorio de datos, análisis de supuestos y el análisis clúster y parte del procedimiento del análisis regional de frecuencia basado en L-momentos, se han codificado en el programa R.
- REFRAN – CV: Es un *software* desarrollado en cooperación de programas entre la Unión Europea y Latinoamérica con un especial enfoque en temas asociados a los problemas del Cambio Climático. El principal aspecto que caracteriza a este programa es el uso de estadísticas llamado L-momentos son similares a otros momentos estadísticos, pero con la ventaja de ser menos susceptibles a la presencia de valores atípicos y a trabajar con tamaños de muestras más pequeños (Romero *et al.* 2015).

La herramienta REFRAN - CV, también tiene la función de relacionar las funciones de ajuste entre los L-Momentos y precipitación media anual (PMA), con imágenes ráster de la PMA y posteriormente la utilización de estas relaciones con los mismos algoritmos de REFRAN - CV para la elaboración de mapas de probabilidad o periodo de retorno.

4.3 Metodología

Una vez conformadas las series de precipitación total anual para todas las estaciones con la información de PISCO precipitación mensual (PISCOpm), se prosiguió con la metodología esquematizada en la Figura 6.

A continuación se describe cada uno de los procesos metodológicos realizados.

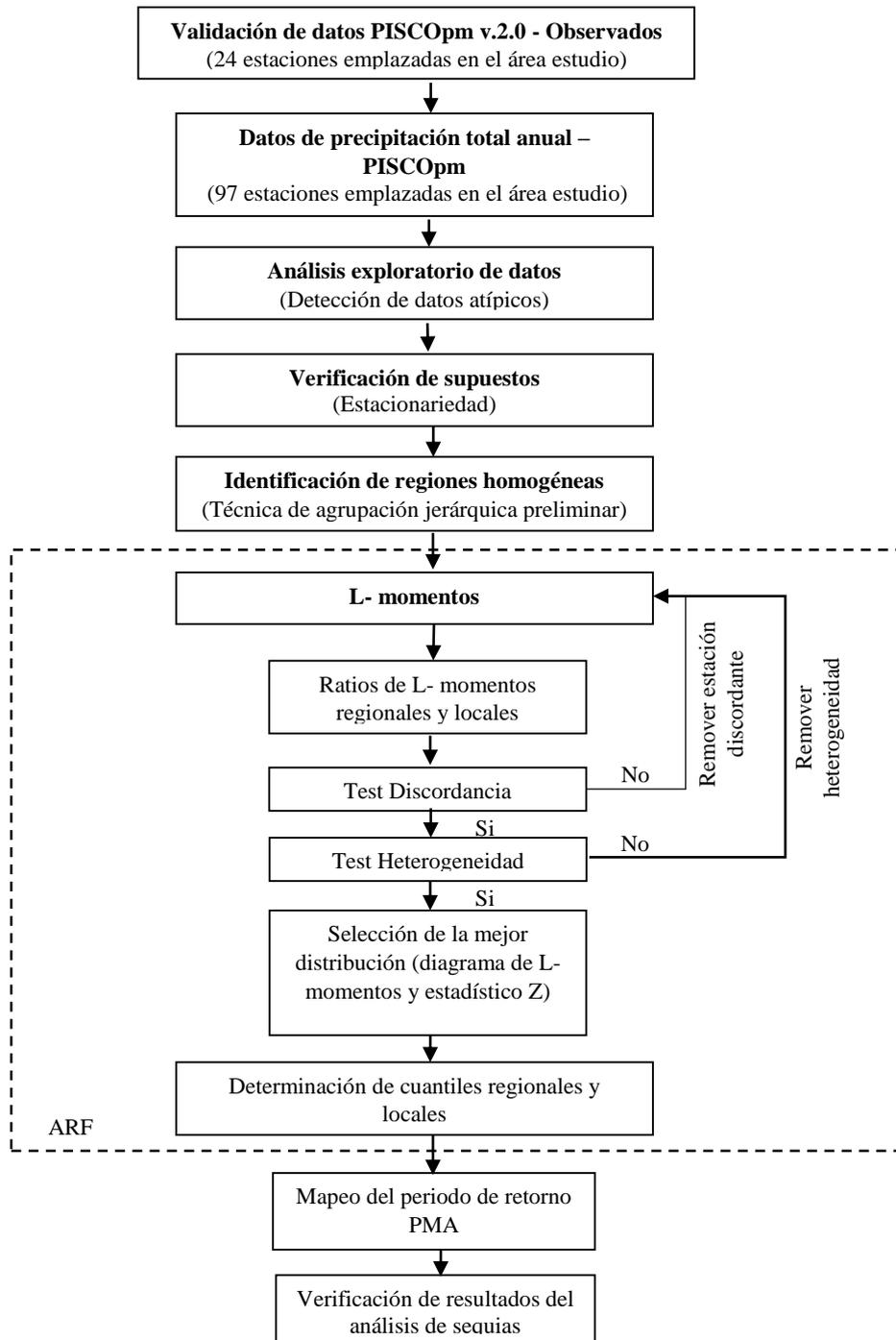


Figura 6: Esquema Metodológico.

4.3.1 Validación de los datos de PISCO precipitación mensual (PISCOpm) con los datos Observados de precipitación mensual

La validación de la precipitación de los datos de PISCO precipitación mensual (PISCOpm) y los datos Observados de precipitación mensual se realizó mediante una comparación de los datos para un periodo de 36 años (1981 - 2016). La confiabilidad de las estimaciones de los datos de PISCOpm frente a los datos Observados fueron evaluados mediante indicadores estadísticos como son: coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de correlación (r) y el error cuadrático medio (RMSE) los mismos que permitirán validar los datos, siempre y cuando el indicador de error (RMSE) sea bajo y los coeficientes sean altos (coeficiente de determinación y correlación).

Se establece una relación cuantitativa entre dos fuentes de información en base a la estimación del coeficiente de correlación de una regresión lineal con intersección en el eje de las coordenadas. Las correlaciones son significativas ($p > 0.01$) cuando presentan un coeficiente de correlación mayor o igual a 0.7 (Rau y Condom 2010).

En la Tabla 4 y la Figura 7 se muestran las estaciones utilizadas para la validación de los datos PISCOpm.

Tabla 4: Red de estaciones meteorológicas observadas

N°	Código	Estaciones	Longitud	Latitud	Altitud
1	753	Caylloma	-71.768	-15.185	4420
2	754	La Angostura	-71.649	-15.179	4150
3	884	La Raya	-71.000	-14.500	4150
4	757	Yauri	-71.432	-14.801	3927
5	606	Quillabamba	-72.692	-12.856	990
6	605	Abancay	-72.870	-13.608	2750
7	687	Acomayo	-71.689	-13.921	3160
8	684	Anta Ancachuro	-72.216	-13.468	3340
9	685	Calca	-71.950	-13.333	2926
10	690	Ccatcca	-71.560	-13.610	3729
11	156307	Chitapampa	-71.967	-13.417	3298
12	156306	Colquepata	-71.683	-13.367	3650
13	756	Combapata	-71.433	-14.100	3464
14	607	Granja Kcayra	-71.875	-13.557	3219
15	679	Machu Picchu	-72.546	-13.167	2563
16	686	Paruro	-71.844	-13.767	3084
17	689	Paucartambo	-71.590	-13.324	3042
18	704	Perayoc	-71.950	-13.517	3365
19	844	Pisac	-71.849	-13.416	2950
20	812	Pomacanchi	-71.573	-14.028	3700
21	752	Santo Tomas	-72.088	-14.399	3253
22	759	Sicuani	-71.237	-14.253	3574
23	811	Tambobamba	-72.176	-13.946	3275
24	683	Urubamba	-72.124	-13.310	2863

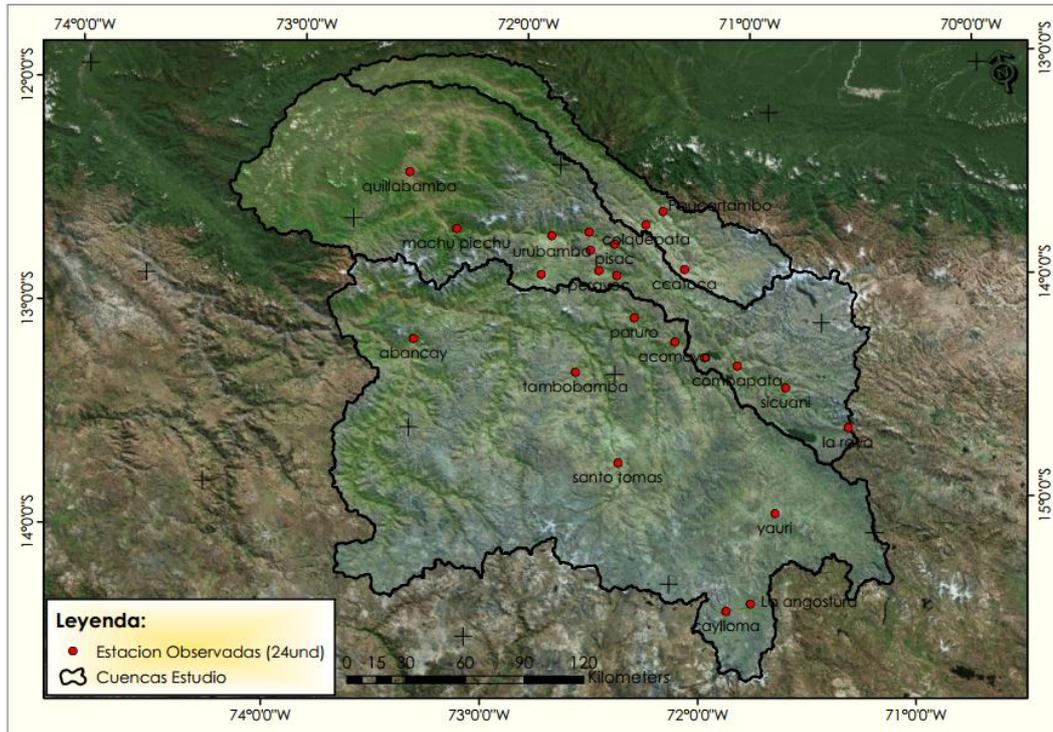


Figura 7: Estaciones meteorológicas Observadas

4.3.2 Preparación de datos

En esta etapa se procedió a analizar y preparar los datos de precipitación total anual (97 estaciones) para la zona de estudio (Anexo 2), con el fin de determinar el uso de estos para el análisis.

Además se determinó la confiabilidad de los datos de precipitación total anual. Por consiguiente se pretende maximizar el entendimiento de los datos, a través de:

- **Análisis exploratorio de datos (AED):** Esta etapa consiste en la detección de los datos atípicos (outliers) mediante el diagrama de cajas (Boxplot). Los posibles datos atípicos que serán detectados con el gráfico de Boxplot, serán contrastados conociendo su fecha de ocurrencia con el comportamiento de eventos de precipitación de estaciones contiguas; de aquí se pondrá en juicio si los datos atípicos detectados deberán ser eliminados o incluidos en la siguiente etapa de análisis. Este análisis se realizó mediante el uso del Software R.
- **Supuestos del análisis regional de frecuencia:** En esta etapa se analizó la precipitación total anual de los datos, por lo tanto, las series libres de datos atípicos se someterá al test no paramétrico de Mann Kendall. El supuesto es que las series

no presenten tendencias a disminuir o aumentar en el tiempo. Este análisis se realizó mediante el uso del Software R.

4.3.3 Identificación de Zonas Homogéneas

Para identificar las regiones homogéneas para el análisis regional de frecuencia con L-momentos se determinó:

Primero: Realizar una agrupación preliminar de las regiones mediante el método estadístico multivariado: Análisis de Agrupación Jerárquica mediante el método de Ward, con este método se buscó determinar regiones de estaciones que sinteticen el comportamiento pluviométrico regional de cada región.

Segundo: El agrupamiento definitivo de las estaciones se realiza mediante el filtrado de las estaciones empleando la medida de discordancia y la medida de heterogeneidad. Se determinó la medida de discordancia D_i para cada estación lo cual mide la similitud entre las distribuciones de frecuencia de las estaciones, visualizada en términos de sus L-momentos, detectando las estaciones que difieren significativamente del resto en función a sus L-CV, L-asimetría y L-kurtosis. Los valores de la medida de discordancia D_i calculados son comparados con un valor crítico que depende del número de estaciones que conforman la región. Por último se determinó la medida de heterogeneidad considerando el uso del estadístico H_j para determinar el grado de heterogeneidad en el grupo de estaciones y así determinar si una región compuesta por estaciones puede ser considerada aceptablemente homogénea si $H_j < 1$; posiblemente heterogénea si $1 < H_j < 2$; y definitivamente heterogénea cuando $H_j > 2$. Para su cálculo se utilizó el programa R.

4.3.4 Determinación de la Función Distribución de Probabilidad

En esta etapa se desarrolló la selección de una o varias funciones de distribución de frecuencia que modelicen las regiones homogéneas, para este análisis se consideraron cinco distribuciones de probabilidad más empleadas.

Para el Análisis Regional de Frecuencia basado en los L-momentos (ARF-LM) se evaluó las funciones de distribución analizadas de 3 parámetros: Logística Generalizada (GLO), General de Valores Extremos (GEV), Pareto Generalizado (GPA), Log Normal de Tres Parámetros (LN3) o Normal Generalizado (GNO) y Person Tipo III (PE3). De estas se

seleccionó las distribuciones candidatas de mejor ajuste en función a los diagramas ratios de L – momentos y el estadístico $|Z^{DIST}| \leq 1.64$ a un nivel de confianza del 90%. Los cálculos han sido realizados con los programas R y REFRAN – CV.

4.3.5 Determinación de Cuantiles Regionales y Locales

Los cuantiles se definen como los montos de precipitación asociados a una determinada probabilidad. Es así como los cuantiles dependen directamente de la función de probabilidad (Naranjo 2011).

En este contexto, se determinaron cuantiles regionales, que tienen una magnitud adimensional y los cuantiles asociados a cada estación. Los cuantiles a nivel de estación fueron calculados multiplicando los cuantiles regionales por el factor de escala asociado a cada estación, es decir, la precipitación media anual de cada estación asociada a los distintos periodos analizados. Esta etapa se realizó con el software R y REFRAN – CV.

4.3.6 Mapeo del Periodo de Retorno de Eventos de Sequía

Para la generación de los mapas de sequía meteorológica se utilizó la función de probabilidad de mejor ajuste seleccionada para cada región homogénea de precipitación, sobre la base del Z estadístico basado en los L-Momentos. Además se utilizó como base una imagen ráster de la precipitación media anual de la base de datos de PISCOpm, para calcular la variabilidad espacial de los L-momentos en la zona de estudio y poder estimar las probabilidades asociadas a los eventos de sequía meteorológica. Esta variable auxiliar tiene una buena capacidad explicativa de los L-Momentos (Hosking y Wallis, 1997). Utilizando los valores de los L-momentos regionales se procedió a realizar un ajuste de una función exponencial entre los L-Momentos (L-CV, L-Skewness y L-Kurtosis) y la precipitación media anual (PMA) Esto se realizó para todas las combinaciones antes mencionadas. La función que se utilizó para el ajuste de los parámetros y el cálculo de la variación espacial de los L-Momentos fue:

$$L - Momento = \alpha e^{-\beta(PMA)} + \delta$$

Donde:

α : Factor de escala

β : Factor de decaimiento

δ : Valor límite del L-momento calculado

L-momentos: Momentos lineales L-Cv, L-Sk y L-Ku

PMA: Precipitación media anual

Los parámetros α , β y δ se calcularon mediante el ajuste entre los L-momentos (L-CV, L-Skewness y L-Kurtosis) y la precipitación media anual. El cálculo de esta función permitió obtener las fórmulas para relacionar la imagen ráster de precipitación media anual (Figura 8) con los L-momentos asociados a las diferentes combinaciones y obtener imágenes de la variabilidad de los L-momentos (L-CV, L-Skewness y L-Kurtosis) para generar los mapas de probabilidades de no excedencia de la sequía meteorológica. El ajuste de la función exponencial se realizó mediante el software R y REFRAN – CV.

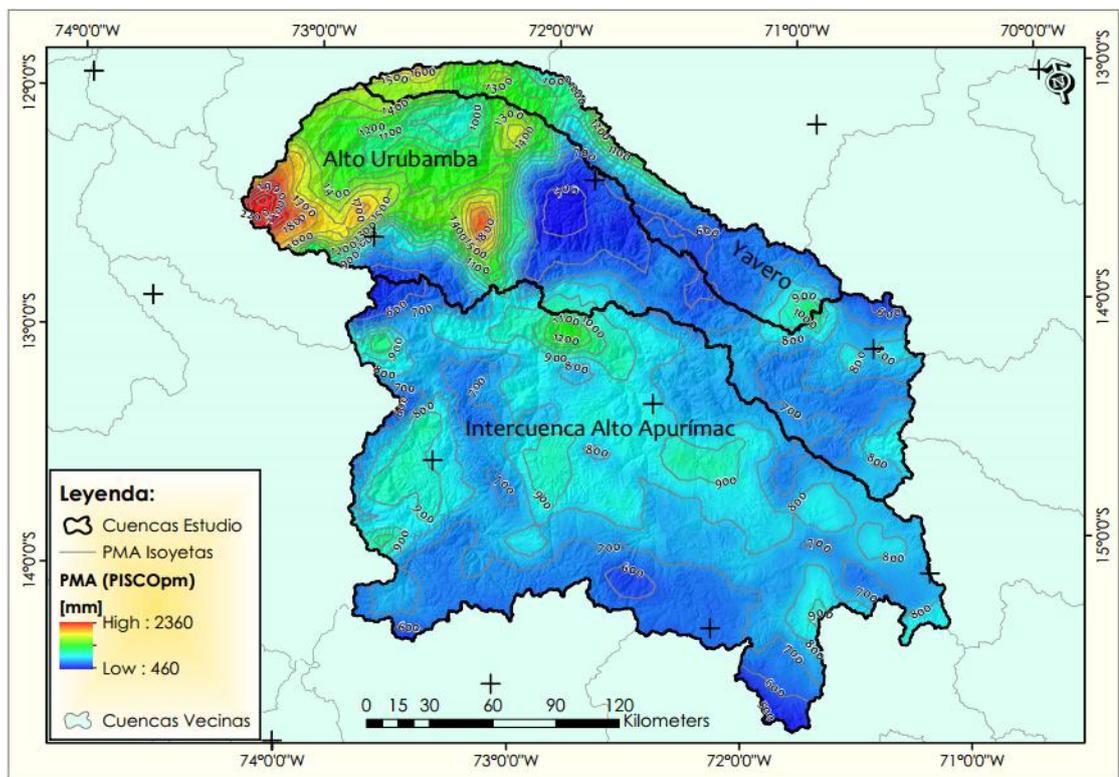


Figura 8: Precipitación Media Anual (PISCOpm) de la zona de estudio

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Validación de los datos de PISCO precipitación mensual (PISCOpm) con los datos Observados de precipitación mensual

A continuación se presenta el comportamiento de la precipitación total mensual de los datos de PISCOpm y los datos Observados, donde se cuenta con 24 estaciones para realizar la validación de los datos, previo a la validación se realizó el análisis de datos y el análisis de supuestos, con precipitaciones que varían desde los 0 mm/mes, en los meses de estiaje, hasta precipitaciones totales mensuales máximos de 300 mm/mes aproximadamente durante los meses de lluvia para la zona de estudio.

Los resultados obtenidos indican en considerar fiable la precipitación estimada por los datos de PISCOpm y se puedan utilizar como alternativa en zonas sin información, dado que el coeficiente de correlación en la validación de las precipitaciones se encuentra en un rango 0.73 – 0.98. Se concluye que el producto de estimación PISCOpm es válido para la zona de estudio.

Los valores obtenidos de las precipitaciones totales mensuales de las estimaciones de PISCOpm considerados para el periodo 1981 al 2016, indican un comportamiento similar a la precipitación total mensual de los datos Observados (Figura 9). Las estimaciones de los datos de PISCOpm se replican de manera eficiente con los valores Observados de las estaciones Ayaviri, Caylloma, La Angostura, La Raya, Yauri, Quillabamba, Abancay, Acomayo, Anta Ancachuro, Calca, Ccatcca, Chitapampa, Colquepata, Combapata, Granja Kcayra, Machu Picchu, Paruro, Paucartambo, Perayoc, Pisac, Pomacanchi, Santo Tomas, Sicuani, Tambobamba, Urubamba, (24 estaciones) con indicadores estadísticos considerados como satisfactorios tal como se muestra en la Tabla 5 y Figura 9 (Para la estación Granja Kcayra).

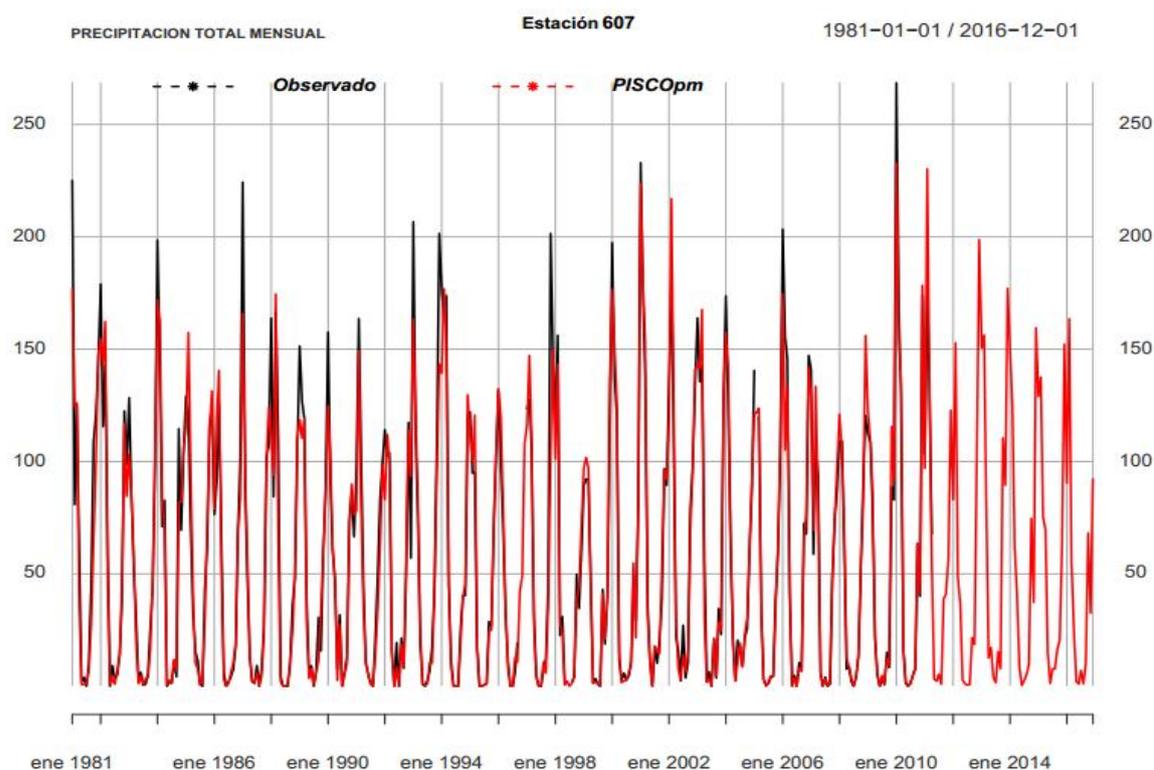


Figura 9: Precipitación total mensual (PISCOpm – Observado). Estación Granja Kcayra

Tabla 5: Validación de los datos de PISCOpm con los datos Observados

N°	Código	Estaciones	R2	r	RMSE	Corrección
1	753	Caylloma	0.909	0.953	25.401	Aceptado
2	754	la Angostura	0.650	0.806	48.733	Aceptado
3	884	La Raya	0.646	0.804	44.794	Aceptado
4	757	Yauri	0.828	0.910	33.737	Aceptado
5	606	Quillabamba	0.543	0.737	55.860	Aceptado
6	605	Abancay	0.824	0.908	28.957	Aceptado
7	687	Acomayo	0.921	0.960	20.302	Aceptado
8	684	Anta Ancachuro	0.744	0.862	46.655	Aceptado
9	685	Calca	0.732	0.856	24.652	Aceptado
10	690	Ccatcca	0.906	0.952	16.269	Aceptado
11	156307	Chitapampa	0.789	0.888	26.431	Aceptado
12	156306	Colquepata	0.526	0.725	40.143	Aceptado
13	756	Combapata	0.642	0.801	38.909	Aceptado
14	607	Granja Kcayra	0.940	0.970	14.382	Aceptado
15	679	Machu Picchu	0.901	0.949	46.560	Aceptado
16	686	Paruro	0.811	0.901	34.750	Aceptado
17	689	Paucartambo	0.857	0.926	18.785	Aceptado
18	704	Perayoc	0.809	0.900	33.515	Aceptado
19	844	Pisac	0.723	0.850	29.906	Aceptado
20	812	Pomacanchi	0.868	0.932	24.118	Aceptado
21	752	Santo Tomas	0.946	0.973	17.667	Aceptado
22	759	Sicuani	0.784	0.886	26.564	Aceptado
23	811	Tambobamba	0.961	0.980	21.761	Aceptado
24	683	Urubamba	0.765	0.874	23.606	Aceptado

5.2 Preparación de datos

Para el análisis se recopilaron 97 estaciones asumidas de la base de datos de PISCOpm con registros de precipitación total anual para un periodo de 36 años de 1981 al 2016, para la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero,

5.2.1 Análisis exploratorio de datos (AED)

En la etapa del AED se ha realizado los gráficos de cajas (Boxplots), para detectar los datos atípicos (outliers) de manera cualitativa. Así, en la Figura 10, se muestra el diagrama de cajas de la distribución de los datos anuales por cada estación, donde se observa que la mayoría de las estaciones tienen los valores de precipitación dentro de los límites de confianza (superior e inferior). Sin embargo, también se observa la presencia de datos de precipitación fuera del límite superior e inferior del intervalo de confianza, catalogándose estos como posibles datos atípicos.

Para realizar un mejor análisis de los datos se realizó un Agrupamiento de las estaciones, con fines prácticos, estas estaciones se agruparon en 02 regiones preliminares para la zona de estudio. Las regiones preliminares fueron definidos utilizando el Metodo de Ward. Para ello a traves del metodo Ward se realizo una agrupacion preliminar de las estaciones utilizando como variables descriptoras a: la precipitación media anual, elevacion, longitud y latitud; siendo previamente todas las variables estandarizadas. Asi, la agrupacion preliminar en base al metodo de Ward se presenta en el grafico del dendrograma (Figura 11); el cual es un diagrama de arbol que muestra las regiones que se forman al crear los conglomerados de las observaciones en cada paso y sus niveles de similitud. Asi, en este estudio en base al dendrograma se ha definido una particion final de 02 regiones preliminares lo cual ocurre a un nivel de similitud de 0.8 (Figura 11).

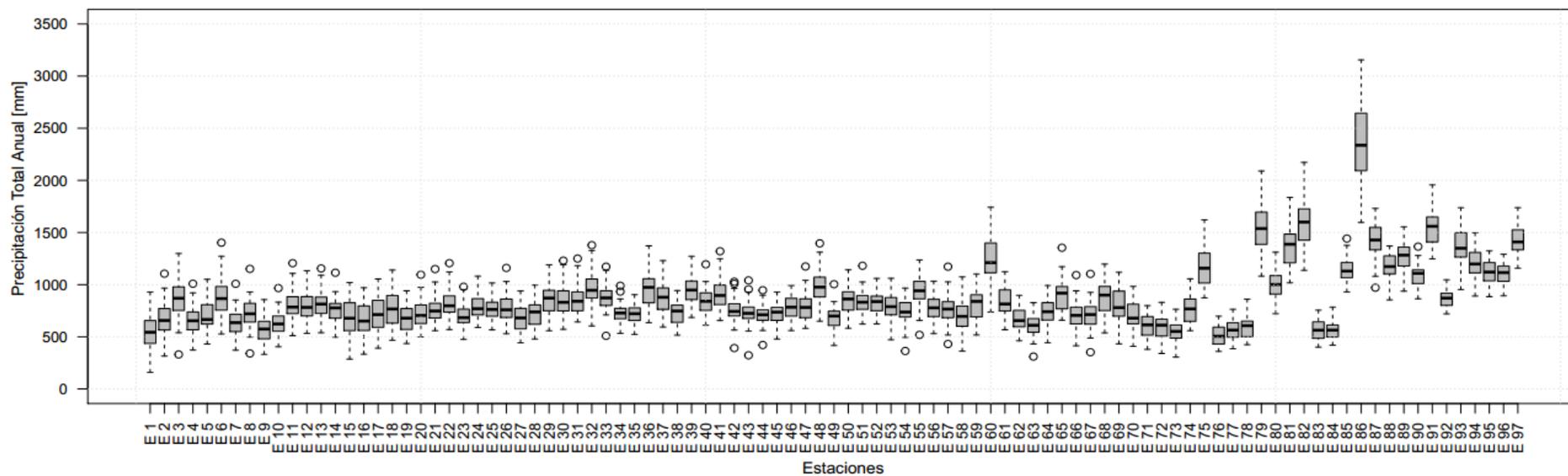


Figura 10: Gráficos boxplots para detección de outliers por estación a escala anual

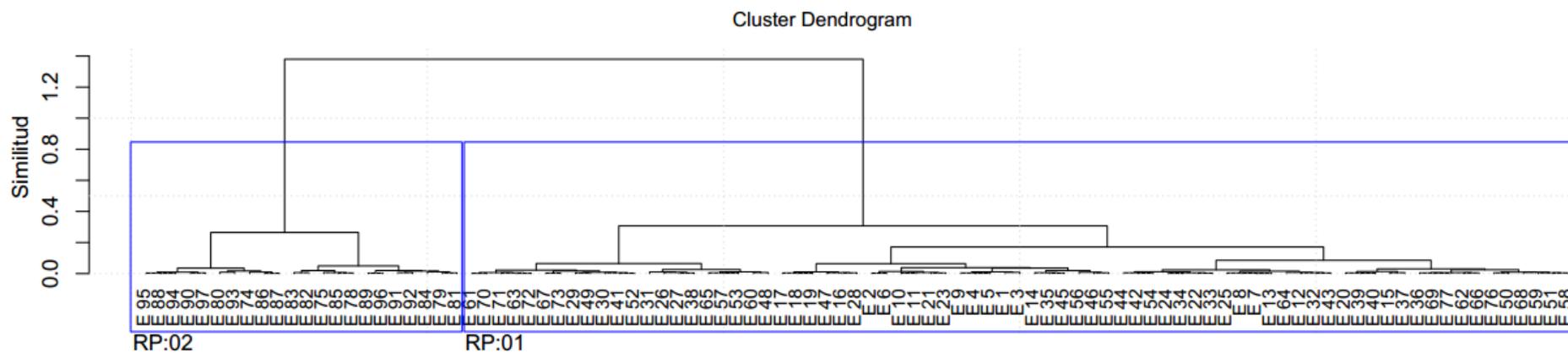


Figura 11: Dendrograma en base al método de Ward. RP es Región Preliminar

La distribución espacial del agrupamiento preliminar de las estaciones en base al método de Ward se muestra en la Figura 11, donde se puede apreciar que la región preliminar 01 corresponde a las estaciones localizadas en la Intercuenca Alto Apurímac y la parte sur y centro de las cuencas del Alto Urubamba y Yavero y la región preliminar 02 corresponde al norte de las cuencas del Alto Urubamba y Yavero.

En la Figura 12 y la Figura 13, se muestra el diagrama de cajas de la distribución de los datos anuales por estación para la región preliminar 01 (75 estaciones) y la región preliminar 02 (22 estaciones), donde se observa que la mayoría de las estaciones tienen los valores de precipitación dentro de los límites de confianza (superior e inferior). La mayor cantidad de los posibles datos atípicos de precipitación y las magnitudes de estos datos también fueron registradas en estaciones vecinas; por lo que no se encontró una clara evidencia de que éstos sean datos atípicos y por lo tanto no se han reportado presencia de datos atípicos en estas regiones preliminares. En la Figura 14 se muestra la ubicación de las estaciones de las regiones preliminares.

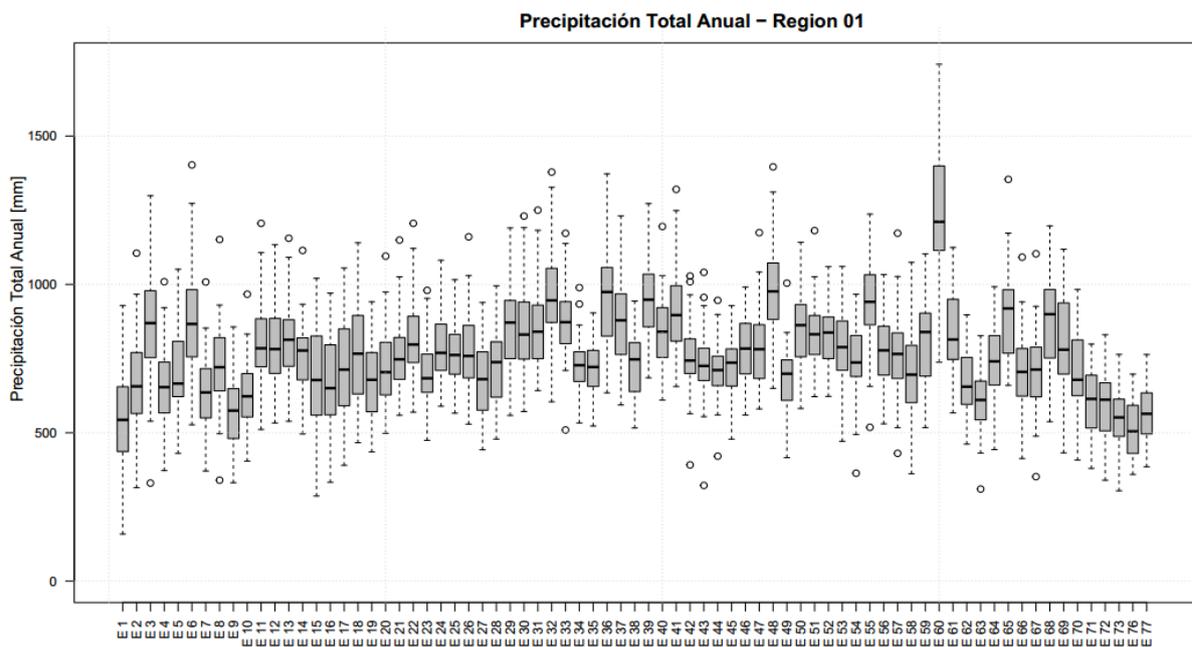


Figura 12: Diagrama de boxplot por estación a escala anual – Región preliminar 01

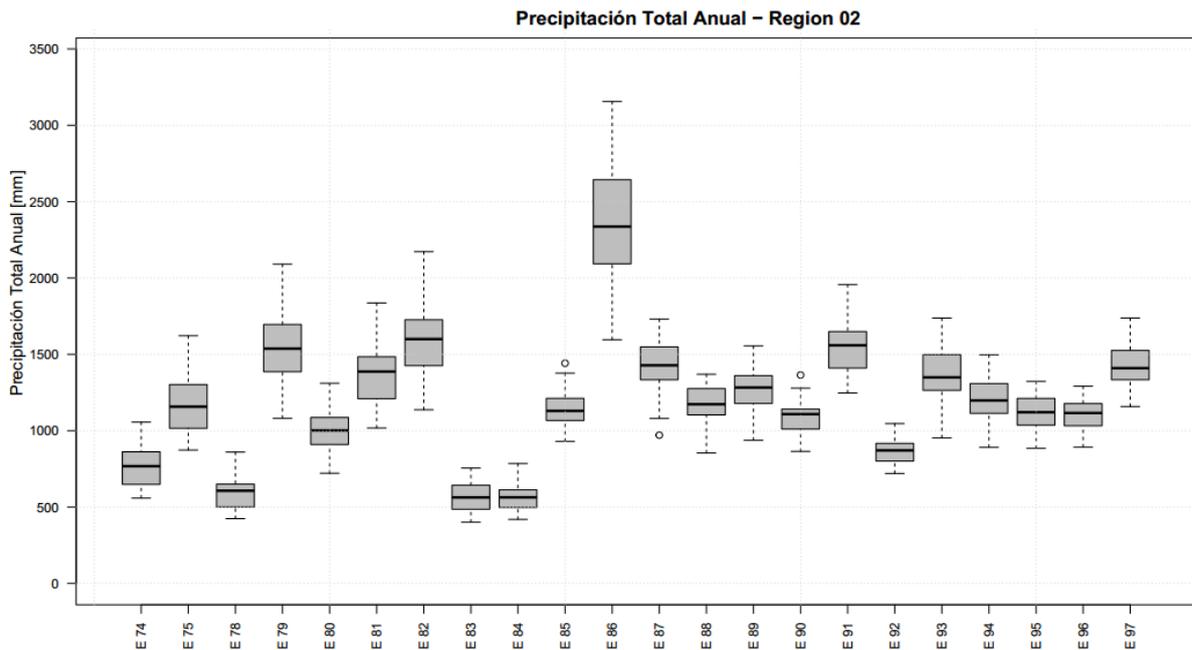


Figura 13: Diagrama de boxplot por estación a escala anual – Región preliminar 02

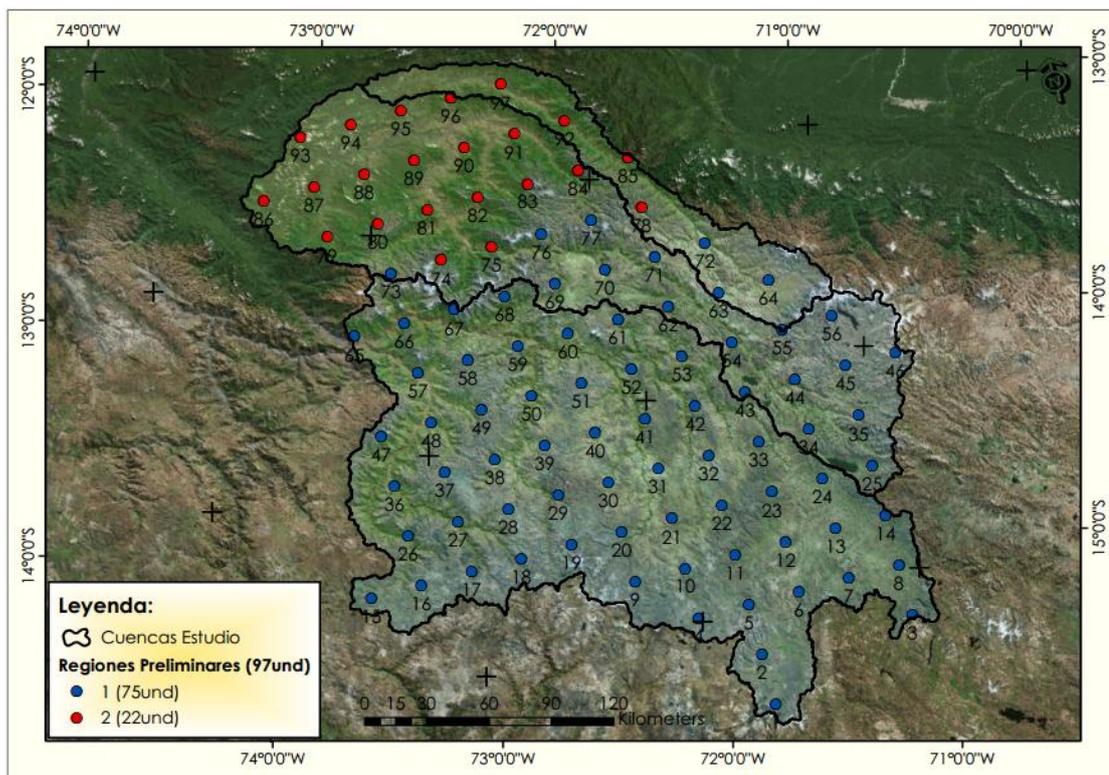


Figura 14: Ubicación de las estaciones – Regiones Preliminares

5.2.2 Supuestos del análisis regional de frecuencia

A continuación se describen los resultados obtenidos del test de Mann Kendall que nos ayudó a tener una visión clara de los procesos que han ocurrido a lo largo del periodo del análisis, que permiten afirmar la existencia o no de la tendencia de cada estación. El

parámetro evaluado es la precipitación total anual para un periodo de 1981 – 2016 para un nivel de significancia del 5%.

Se analizó el supuesto de Estacionariedad (libre de tendencias), de acuerdo a los diagramas de Boxplots de las estaciones analizadas, las series libres de datos atípicos se sometieron a la prueba estadística no paramétrica de Mann Kendall.

En el Anexo 3 se describe los resultados del análisis de tendencias por el test estadístico de Mann Kendall para un nivel de significación $\alpha= 0.05$. Donde:

H0 (Hipótesis Nula): No existe una tendencia en la serie.

Ha (Hipótesis Alternativa): Hay una tendencia en la serie.

De acuerdo a la Figura 15, la hipótesis nula: No existe una tendencia en la serie, para el análisis se eliminaron 09 estaciones (E 46, E 57, E 58, E 66, E 67, E 73, E 74, E 75 y E 78) que representan el 9% de las series analizadas, pero se aceptaron 88 estaciones que representan el 91% de las series analizadas.

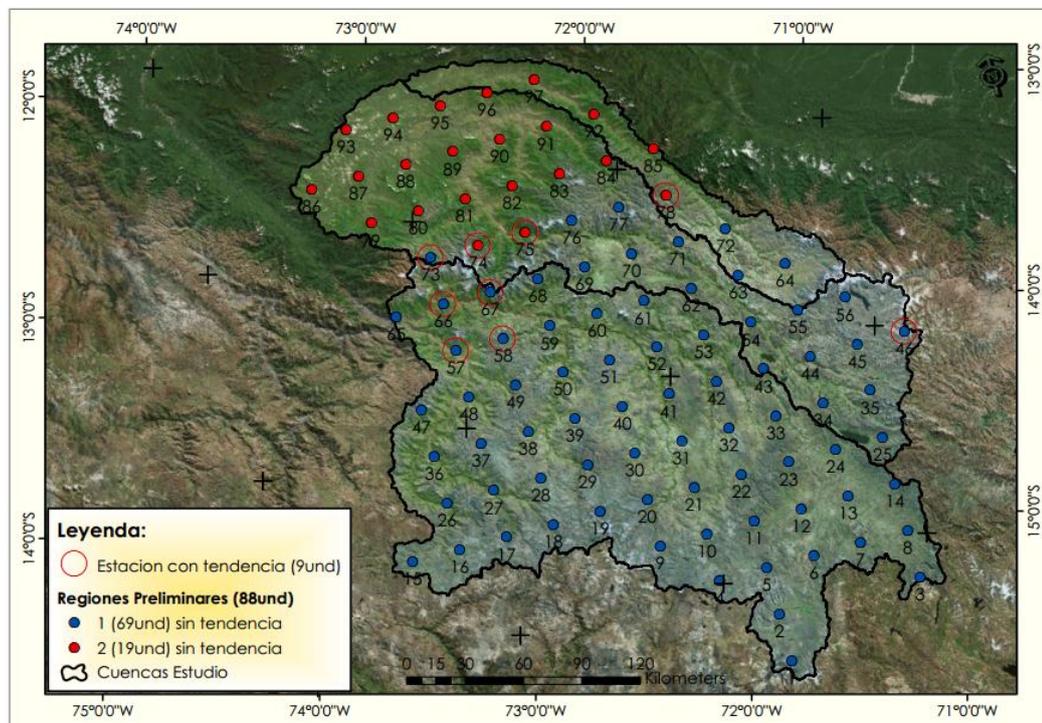


Figura 15: Estaciones con tendencia y sin tendencia - Test de Mann Kendall

5.3 Identificación de Zonas Homogéneas

Para delimitar las regiones homogéneas de precipitación se utilizó como base las agrupaciones de estaciones obtenidas en la etapa anterior. Los resultados y análisis que se muestra en esta etapa son para las series de datos de precipitación total anual de las estaciones que pasaron el análisis de supuestos (88 estaciones).

Las agrupaciones preliminares de las estaciones obtenidas en las etapas anteriores fueron sometidas a la medida de discordancia y la medida de heterogeneidad, los cuales se basan en los L-momentos. Sobre la base de los resultados de estos indicadores se eliminaron y reubicaron ciertas estaciones en distintas regiones. De esta forma se obtuvieron las regiones homogéneas.

Medida de discordancia

La medida de discordancia D_i indica cuán lejos se encuentran los ratios de L – momentos de cada estación con respecto a los ratios de L – momentos regionales. Los diagramas de ratios (L-coeficiente de variación vs L-coeficiente de asimetría, L-coeficiente de Kurtosis vs L-coeficiente de asimetría) de los L-momentos de las estaciones como se muestra en la Figura 16.

Uno de los requisitos para agrupar las estaciones dentro de una región, es que estas presenten similitud en sus distribuciones de frecuencias. Esta similitud fue visualizada en términos de los L-momentos mediante el uso de la medida de Discordancia (D_i) (Ver Tabla 6), el cual permitió identificar estaciones que diferían significativamente del resto en términos de las variables L-Cv, L-Skewness y L-Kurtosis. El valor del indicador para cada estación fue comparado con el respectivo valor crítico (Ver Tabla 6). Para cada una de las regiones homogéneas finales de precipitación se obtuvieron estaciones que no pueden ser consideradas como discordantes de acuerdo al indicador D_i (menores a 3 en todos los casos) de las estaciones en cada una de las 02 regiones obtenidas.

Tabla 6: Valores de la medida de Discordancia de las estaciones

	N°	Estación	Discordancia D _i *	Dc	N°	Estación	Discordancia D _i *	Dc
	1	E 4	1.629		36	E 48	0.275	
	2	E 5	0.817		37	E 49	2.518	
	3	E 6	1.460		38	E 50	1.658	
	4	E 7	1.085		39	E 52	1.388	
	5	E 8	1.608		40	E 53	1.336	
	6	E 9	1.403		41	E 56	0.613	
	7	E 10	0.525		42	E 59	0.536	
	8	E 11	0.420		43	E 61	0.933	
	9	E 12	0.203		44	E 62	0.605	
	10	E 13	0.336		45	E 63	1.052	
	11	E 14	0.643		46	E 64	0.908	3.00
	12	E 17	2.563		47	E 65	0.379	
	13	E 19	1.094		48	E 68	0.572	
	14	E 20	0.258		49	E 69	0.515	
	15	E 21	1.878		50	E 70	0.732	
	16	E 22	0.975		51	E 71	0.820	
	17	E 23	0.816		52	E 72	0.557	
Región 1	18	E 24	1.341	3.00	53	E 76	1.714	
	19	E 25	1.284		54	E 77	0.516	
	20	E 26	0.867		55	E 83	2.212	
	21	E 27	0.678		56	E 84	0.679	
	22	E 28	0.939		57	E 80	0.747	
	23	E 29	0.518		58	E 81	1.995	
	24	E 30	0.080		59	E 82	0.771	
	25	E 31	1.364		60	E 87	0.797	
	26	E 32	1.836		61	E 88	1.162	
	27	E 33	1.914		62	E 89	0.842	
	28	E 35	2.366		63	E 90	1.094	2.971
	29	E 36	0.357		64	E 91	0.849	
	30	E 37	0.086		65	E 92	0.911	
	31	E 38	1.725		66	E 93	0.262	
	32	E 39	0.619		67	E 94	0.591	
	33	E 40	0.715		68	E 95	1.061	
	34	E 41	0.905		69	E 96	1.494	
	35	E 47	0.172		70	E 97	1.426	

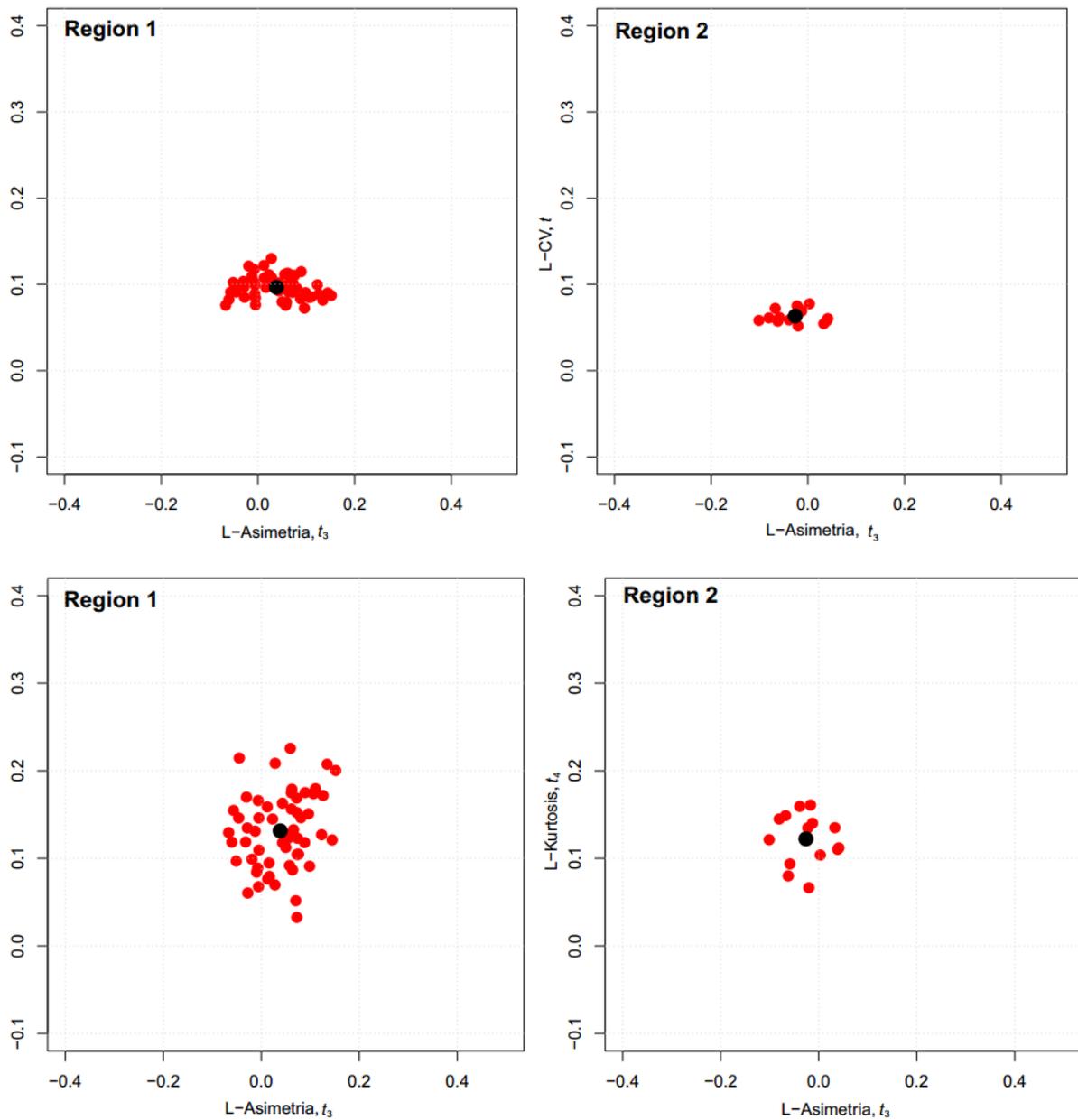


Figura 16: Ratios de los L-momentos de las estaciones por cada región

En resumen, la medida de discordancia se muestra por región. (PMAR = precipitación media anual regional).

Región 01: PMAR = 759.136 mm, agrupa 56 estaciones. La discordancia máxima = 2.563 y mínima = 0.080

Región 02: PMAR = 1252.505 mm, agrupa 14 estaciones. La discordancia máxima= 1.995 y mínima = 0.262

En la Tabla 7 se muestra las principales características de los L-momentos y su respectivo número de estaciones por cada región (N° E). Las principales características son: la media (l_1) y los L-momentos ($\tau, \tau_3, \tau_4, \tau_5$):

Tabla 7: Principales características L-momentos regionales de las regiones homogéneas

L-momentos	Región 1	Región 2
N° E	56	14
l_1	1	1
τ	0.097	0.063
τ_3	0.039	-0.026
τ_4	0.131	0.122
τ_5	0.031	0.014

Medida de Heterogeneidad

Una vez agrupado y aprobado la medida de discordancia, se determinó la medida de heterogeneidad H_j de cada región.

Según lo indicado anteriormente para generar regiones artificiales homogéneas se ha empleado la simulación de Monte Carlo mediante la distribución Kappa, donde las regiones simuladas tienen el mismo número de estaciones y longitud de registros. Para la presente investigación se ha realizado 1000 simulaciones para obtener las medidas de heterogeneidad más precisas para las 02 regiones, puesto que el tiempo de simulación no es significativo.

En la Tabla 8, se tienen los estadísticos H_1, H_2 y H_3 para cada región, siendo el estadístico H_1 el más riguroso para la evaluación de la homogeneidad. La variación de H_1 para la región 01 es de 0.939 y para la región 02 es de 0.209 respectivamente. Todas las regiones presentan valores de H_1 menores a 1, por lo tanto, se consideran regiones homogéneas según Hosking y Wallis (1997).

Tabla 8: Estadísticas de Heterogeneidad de las regiones

	Región 1	Región 2
Estadístico para H_1	0.939	0.209
Estadístico para H_2	-2.310	-1.803
Estadístico para H_3	-3.319	-2.686

Hosking y Wallis (1997) sugieren considerar como “aceptablemente homogénea” si $H_j < 1$, “posiblemente heterogénea” si $1 \leq H_j < 2$, y “definitivamente heterogénea” si $H_j \geq 2$. H_1 tiene mejor poder discriminatorio para detectar la homogeneidad de la región que H_2 y H_3 . De aquí se desprende que las regiones son homogéneas y están formadas por 70 estaciones. Ver Figura 17.

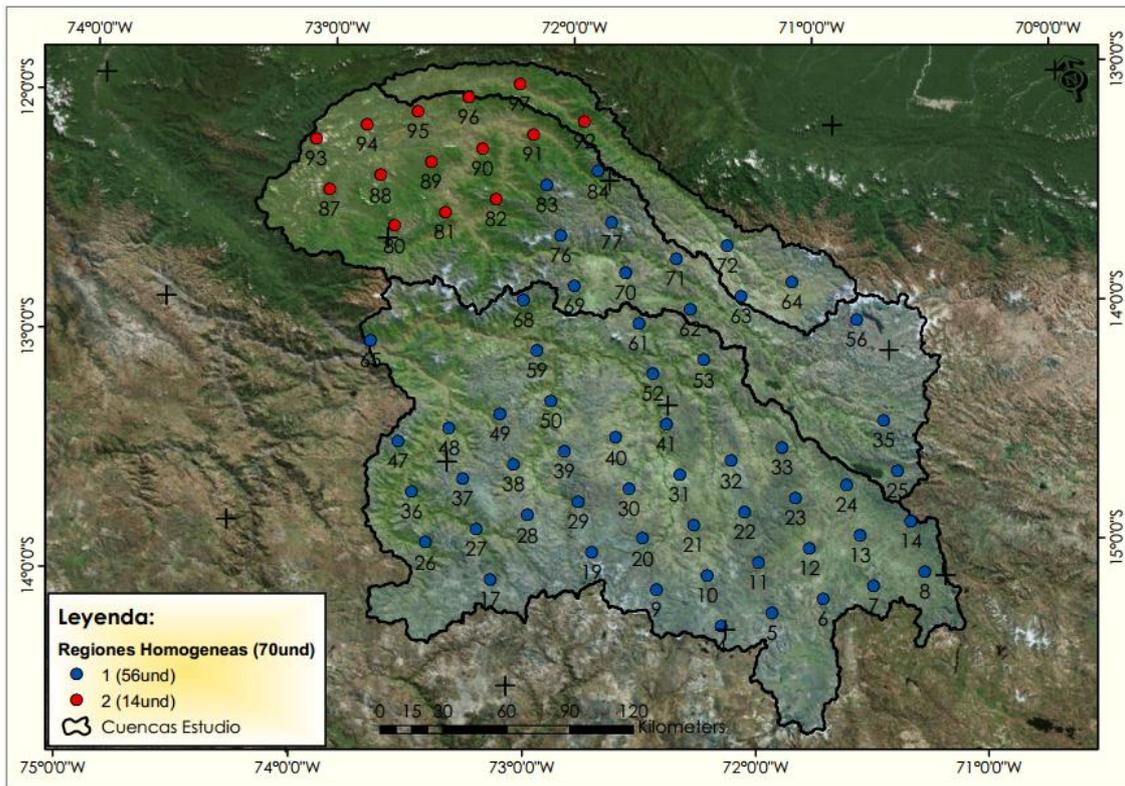


Figura 17: Ubicación de las estaciones por cada región homogénea

La caracterización de las regiones homogéneas definidas, se muestra que la región 01 está conformado por estaciones ubicadas entre las altitudes de 1,225.0 a 5,065.0 m.s.n.m., la región 02 está conformado por estaciones ubicadas entre las altitudes de 1,059.0 a 3,399.0 m.s.n.m. Finalmente, en la Figura 18 y la Figura 19 se muestra la distribución de la precipitación media anual y la precipitación total anual para cada región homogénea, donde se puede apreciar claramente la estacionalidad de la precipitación en la zona de estudio, siendo el periodo húmedo de Setiembre a Abril y el periodo seco de Mayo a Agosto en la región 01 y el periodo húmedo de Agosto a Mayo y el periodo seco de Junio y Julio en la región 02. Además, se puede apreciar que la región 02 experimenta la mayor contribución de precipitación anual (1,252.505 mm) seguida por la región 01 (759.136 mm).

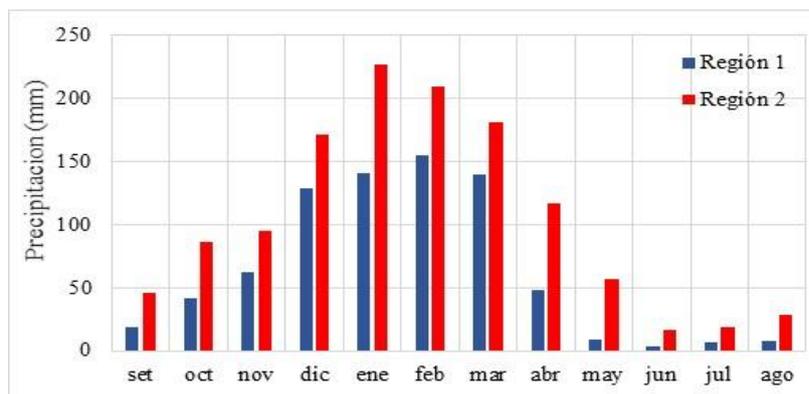


Figura 18: Régimen de lluvias mensuales (1981-2016) para las regiones homogéneas

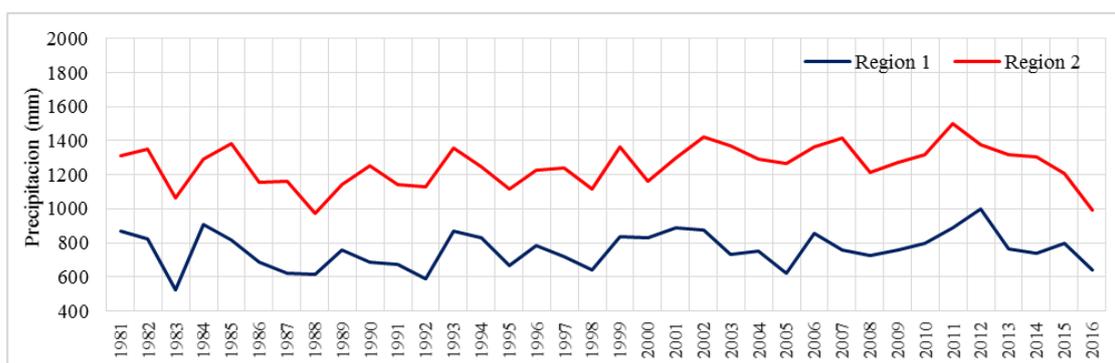


Figura 19: Régimen de lluvias anuales (1981-2016) para las regiones homogéneas

La región 01 se encuentra en la zona de sierra y la región 02 se encuentra en la zona de selva, dichas regiones presentan estrecha relación con la altitud donde se indica a mayor altitud menor precipitación y a menor altitud mayor precipitación. Asimismo, los regímenes de lluvia en estas regiones tienen una característica Sur tropical. Para las regiones la variabilidad multianual de la precipitación está relacionada directamente al gradiente del Océano Atlántico (Norte menos Sur) e inversamente con el Índice de oscilación del sur (IOS) del Océano Pacífico. Para la región 02 también se considera en su comportamiento climático la zona de convergencia intertropical (ZCIT) donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur, cuando la ZCIT se aleja hacia el norte del Ecuador se presenta el invierno austral (junio, julio y agosto) y cuando la ZCIT se aleja hacia el sur del Ecuador se presenta el verano austral (diciembre, enero y febrero) también indicar que es influenciado por los vientos alisios de este a oeste que ingresan al continente (cuenca amazonas), como el continente se encuentra caliente en el verano hay un contraste de temperatura más fuerte (océano atlántico y el continente) y los vientos son más húmedos y más propensos a la convección originándose así el monzón sudamericano, cuando los vientos alisios migran hacia el sur se forma la Zona de convergencia del atlántico sur (ZCAS).

5.4 Determinación de la Función Distribución de Probabilidad

Las distribuciones consideradas en el análisis regional para estimar los cuantiles son cinco y todas las distribuciones son de tres parámetros, siendo, la logística generalizada (GLO), generalizada del valor extremo (GEV), generalizado normal (GNO), generalizada de Pareto (GPA) y Pearson tipo III (PE3).

El diagrama de la relación L-momentos se ha empleado para identificar cualitativamente las distribuciones de mejor ajuste, complementariamente aprovecha la simulación de Monte Carlo, realizada para la medida de heterogeneidad, con el cual se determinó el Z-estadístico para las cinco distribuciones en análisis, para identificar la distribución de mejor ajuste.

La media del ratio L-momentos regionales (punto en negrita) se representan en la curva teórica de la relación de L-momentos de las distribuciones candidatas en la Figura 20 para las 02 regiones. El punto para la región se encuentra cerca de la curva de distribución.

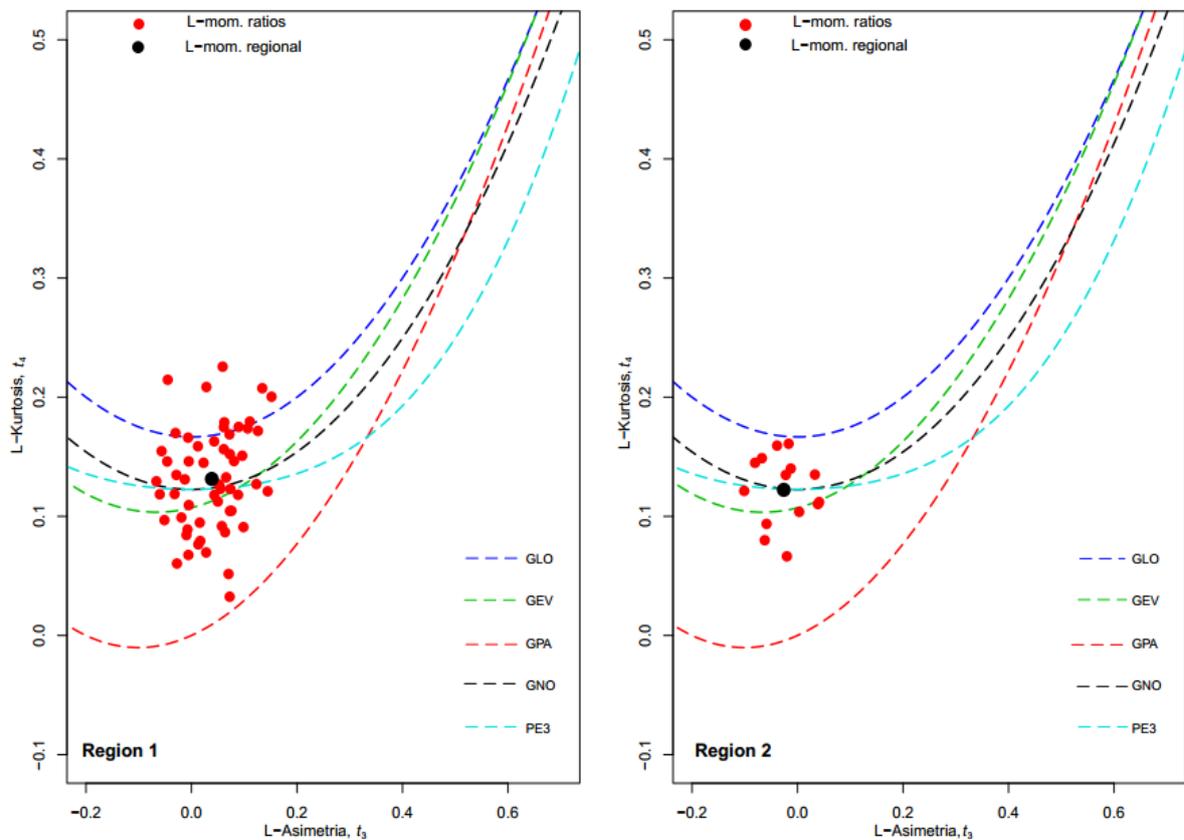


Figura 20: Diagrama de L-momentos ratio con el L-momentos ratio regional para las distribuciones candidatas

En la Figura 20 se muestra el diagrama de L-momento-ratio y los L-momentos regionales (circulo color negro) de las dos regiones homogéneas; se puede indicar que la región 01 se ajusta a las distribuciones generalizado normal (GNO) y Pearson tipo III (PE3) y para la región 02 se ajusta las distribuciones generalizado normal (GNO) y Pearson tipo III (PE3).

Tabla 9: Estadístico ZDIST para varias distribuciones

Estadístico	Región 1	Región 2
Z^{GLO}	4.991	3.030
Z^{GEV}	-2.438	-1.094
Z^{GNO}	-0.959	0.116
Z^{PE3}	-1.057	0.094
Z^{GPA}	-16.417	-8.321

Considerando que el ajuste es bueno si $|Z^{DIST}| \leq 1.64$ lo cual corresponde a la aceptación de la distribución, planteado la hipótesis en un nivel de confianza del 90%. Un numero de distribuciones se puede calificar con este criterio la más adecuada es una que tiene el valor $|Z^{DIST}|$ cerca a cero.

Asimismo mediante el estadístico $|Z^{DIST}|$ calculado para las distribuciones propuestas en la Tabla 9 se muestra que en la región 01 la distribución de mejor ajuste es GNO (0.959) y la distribución PE3 (1.057) es una opción alternativa y en la región 02 la distribución de mejor ajuste es PE3 (0.094) y la distribución GNO (0.116) es una opción alternativa.

5.5 Determinación de Cuantiles regionales y locales

Estimación de la curva de crecimiento regional

La estimación de los cuantiles regionales $q(F)$, para varias probabilidades de no excedencia, así como los parámetros (localización, escala y forma) de las distribuciones candidatas se presentan en la Tabla 10 y Tabla 11. Los parámetros de las distribuciones se obtiene ajustando sus L-momentos a los L-momentos promedios regionales de la muestra de datos de todas las estaciones que forman las regiones.

Las curvas de crecimiento regional para las regiones se presentan en la Figura 21 y Figura 22.

Tabla 10: Cuantiles regionales para las dos distribuciones de mejor ajuste – Región 01

Distri bución	Parámetros			Cuantiles regionales para probabilidades de no excedencia F							
	Locali zación	Escala	Forma	F=0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.10	0.20	0.50
				TR=100	50	25	20	15	10	5	2
GNO	0.993	0.171	-0.079	0.630	0.669	0.714	0.730	0.751	0.785	0.854	0.993
PE3	1.000	0.172	0.236	0.631	0.670	0.714	0.730	0.751	0.785	0.854	0.993

F es la probabilidad de no excedencia y TR es el tiempo de retorno

De acuerdo a la Tabla 10 para cualquier estación ubicada dentro de la región 01 $q_{GNO, PE3}$ (0.1), la frecuencia de tener un evento de precipitación anual tan bajo como el 78.5% de la lluvia media anual (759.136 mm), es decir 595.922 mm, que se produciría una vez cada 10 años.

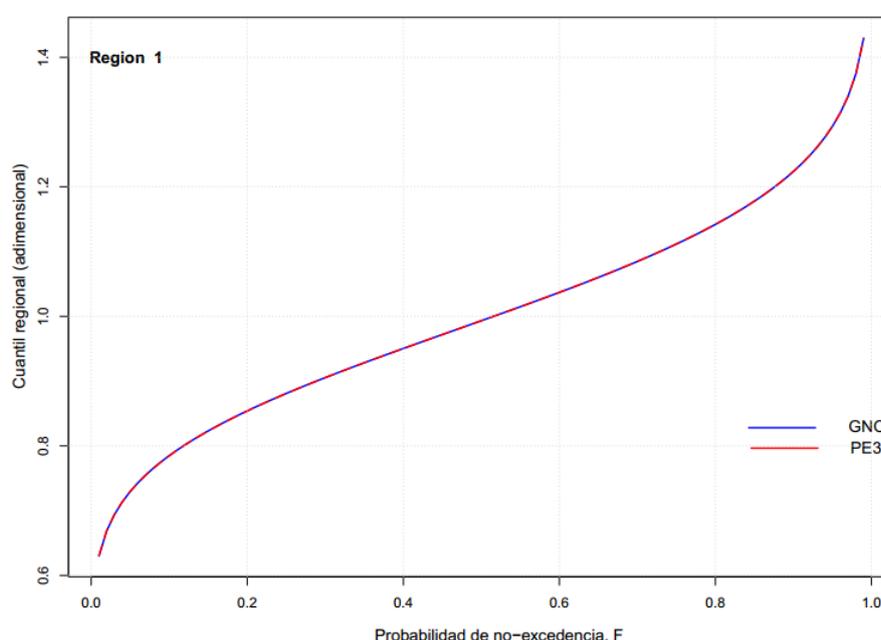


Figura 21: Curva de crecimiento regional para distribuciones candidatas – Región 01

De acuerdo a la Tabla 11 para cualquier estación ubicada dentro de la región 02 $q_{PE3, GNO}$ (0.1), la frecuencia de tener un evento de precipitación anual tan bajo como el 85.4% de la lluvia media anual (1,252.505 mm), es decir 1,069.64 mm, que se produciría una vez cada 10 años.

Tabla 11: Cuantiles regionales para las dos distribuciones de mejor ajuste – Región 02

Distri bución	Parámetros			Cuantiles regionales para probabilidades de no excedencia F							
	Locali zación	Escala	Forma	F=0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.1	0.2	0.5
				TR=100	50	25	20	15	10	5	2
PE3	1.000	0.112	-0.159	0.726	0.760	0.797	0.810	0.828	0.854	0.906	1.003
GNO	1.003	0.112	0.053	0.725	0.760	0.797	0.810	0.828	0.854	0.906	1.003

F es la probabilidad de no excedencia y TR es el tiempo de retorno

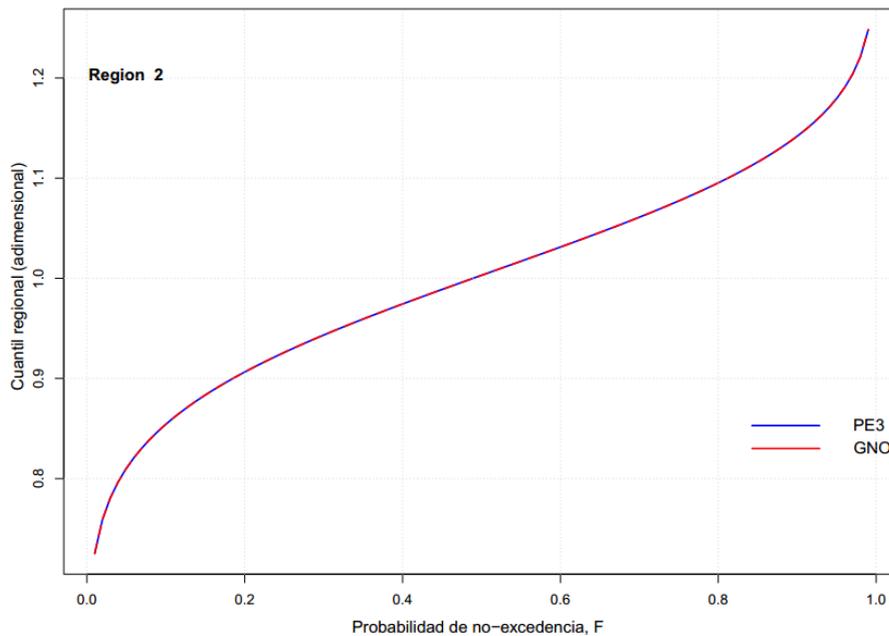


Figura 22: Curva de crecimiento regional para distribuciones candidatas – Región 02

Las frecuencias de precipitaciones medias anuales en la región 01 y región 02 de la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas Alto Urubamba y Yavero fácilmente podrían ser modeladas por ambas distribuciones PE3 y GNO. Sin embargo con fines científicos para seleccionar la estimación más robusta de los cuantiles regionales, hay una necesidad de algún análisis de evaluación.

Decisión acerca de la mejor curva de crecimiento regional

Para medir la robustez de la precisión de las curvas de crecimiento regional estimados, se han llevado a cabo simulaciones sobre la base de las dos distribuciones PE3 y GNO para las regiones 01 y 02, de acuerdo a la metodología de L-momentos propuesto por Hosking y Wallis (1997).

Para la región 01, se considera las dos distribuciones candidatas GNO y PE3 y para la región 02 las dos distribuciones candidatas PE3 y GNO, en ambas regiones las simulaciones se ha establecido que las simuladas a partir de ellas presentan las siguientes características:

- Mismo número de estaciones para la región 01, es decir, 56 estaciones
- Mismo número de estaciones para la región 02, es decir, 14 estaciones
- Mismas longitudes de registro como las estaciones originales
- Las series de las estaciones generadas deben tener la misma media que su correspondiente serie real.

- L-Cv para la región 01 varía en el rango 0.1301 a 0.0725 y para la región 02 varía en el rango 0.0518 a 0.0776 para la posible heterogeneidad, estos valores son el mínimo y máximo respectivamente.

Las regiones se han simulado $M=1000$ veces, esto significa que se tendría M -ésimo valores de cuantiles para cada estación y para cada probabilidad de no excedencia, comparando estas con los cuantiles reales se obtiene la medida de precisión la raíz de error cuadrático medio (RECM).

La medida de precisión para la región 01 se muestra en la Tabla 12. Los resultados de la simulación para la región 01, muestran que en general para periodos de retorno de 10 a 2 años el RECM; son similares para ambas distribuciones. El indicador de medida RECM a partir del periodo de retorno de 100 a 20 años son relativamente bajos para la distribución GNO y altos para PE3. Por otra parte los límites de error al 95%, que significa que 95% de los datos simulados se encuentran dentro de los límites de error superior (LES) y límite de error inferior (LEI) son más estrechos para la distribución GNO en periodos de retorno de 100 a 15 años. En consecuencia, se puede concluir que GNO es la mejor distribución para la estimación de cuantiles para bajo periodos de retorno (> 15 años).

Tabla 12: Resultados de la simulación para la curva de crecimiento – Región 01

Distribución	F= TR=	Cuantiles regionales para probabilidades de no excedencia F							
		0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.1	0.2	0.5
		100	50	25	20	15	10	5	2
GNO	RMSE	0.0768	0.0670	0.0566	0.0531	0.0487	0.0415	0.0281	0.0069
	LEI	0.5164	0.5681	0.6269	0.6477	0.6760	0.7202	0.8099	0.9827
	LES	0.7609	0.7807	0.8062	0.8159	0.8300	0.8519	0.8990	1.0039
PE3	RMSE	0.0772	0.0671	0.0567	0.0532	0.0484	0.0415	0.0281	0.0069
	LEI	0.5162	0.5683	0.6271	0.6480	0.6769	0.7202	0.8096	0.9825
	LES	0.7610	0.7809	0.8068	0.8164	0.8311	0.8515	0.8990	1.0054

F es la probabilidad de no excedencia y TR es el tiempo de retorno

LEI = Límite de error inferior, LES = Límite de error superior

La medida de precisión para la región 02 se muestra en la Tabla 13. Los resultados de la simulación para la región 02, muestran que en general para periodos de retorno de 50 a 2 años el RMSE son relativamente bajos para la distribución GNO y altos para PE3. Por otra parte los límites de error al 95%, que significa que 95% de los datos simulados se encuentran dentro de los límites de error superior (LES) y límite de error inferior (LEI) son más estrechos para la distribución GNO en periodos de retorno de 100 a 5 años. En consecuencia,

se puede concluir que GNO es la mejor distribución para la estimación de cuantiles para bajo periodos de retorno (> 5 años).

Tabla 13: Resultados de la simulación para la curva de crecimiento – Región 02

Distribución	Cuantiles regionales para probabilidades de no excedencia F								
	F=	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.1	0.2	0.5
	TR=	100	50	25	20	15	10	5	2
PE3	RMSE	0.0484	0.0409	0.0332	0.0307	0.0276	0.0228	0.0144	0.0048
	LEI	0.6519	0.6966	0.7451	0.7619	0.7840	0.8180	0.8833	0.9949
	LES	0.8120	0.8305	0.8537	0.8622	0.8745	0.8921	0.9302	1.0105
GNO	RMSE	0.0487	0.0409	0.0331	0.0306	0.0272	0.0226	0.0144	0.0047
	LEI	0.6516	0.6965	0.7450	0.7617	0.7851	0.8178	0.8831	0.9949
	LES	0.8106	0.8304	0.8530	0.8614	0.8742	0.8914	0.9297	1.0111

F es la probabilidad de no excedencia y TR es el tiempo de retorno

LEI = Límite de error inferior, LES = Límite de error superior

En este trabajo de tesis se definió definitivamente la distribución GNO para la región 01 y para la región 02, como la mejor distribución para modelar las regiones hidrológicamente homogéneas de la Intercuenca Alto Apurímac y las Cuencas Alto Urubamba y Yavero.

Cuantiles de frecuencia regional y local

Seleccionada la distribución más robusta (GNO) y determinada sus parámetros, se computan los cuantiles regionales adimensionales de la precipitación total anual para los periodos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años, también se evalúa la incertidumbre de su estimación mediante la medida de precisión como el RECM y los límites de error al 95% (límite de error inferior y límite de error superior). Ver Tabla 14.

Tabla 14: Parámetros y cuantiles regionales para la distribución de mejor ajuste

Región	Distribución	Cuantiles regionales para probabilidades de no excedencia F								
		F=	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.1	0.2	0.5
		TR=	100	50	25	20	15	10	5	2
Región 1	GNO	Cuantil	0.630	0.669	0.714	0.730	0.751	0.785	0.854	0.993
		RMSE	0.077	0.067	0.057	0.053	0.049	0.042	0.028	0.007
		LEI	0.516	0.568	0.627	0.648	0.676	0.720	0.810	0.983
		LES	0.761	0.781	0.806	0.816	0.830	0.852	0.899	1.004
Región 2	GNO	Cuantil	0.725	0.760	0.797	0.810	0.828	0.854	0.906	1.003
		RMSE	0.049	0.041	0.033	0.031	0.027	0.023	0.014	0.005
		LEI	0.652	0.697	0.745	0.762	0.784	0.818	0.883	0.995
		LES	0.811	0.830	0.853	0.861	0.874	0.891	0.929	1.011

F es la probabilidad de no excedencia y TR es el tiempo de retorno

Establecida las curvas de crecimiento regional, los cuantiles para cada estación se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{Q}_i(F) = \hat{u}_i * \hat{q}(F)$$

Donde los valores adimensionales $\hat{q}(F)$ estimados para la curva de crecimiento regional Tabla 14, multiplica con la PMA, considerado como la media de las observaciones de cada estación. Ver los resultados en el Anexo 5.

5.6 Mapeo del Periodo de Retorno de Eventos de Sequía

Previo a realizar el mapeo de las precipitaciones, se construyen las curvas regionales que asocian los L-momentos ratios principales y la variable auxiliar de la precipitación media anual regional obtenida en cada región. Ver Figura 23.

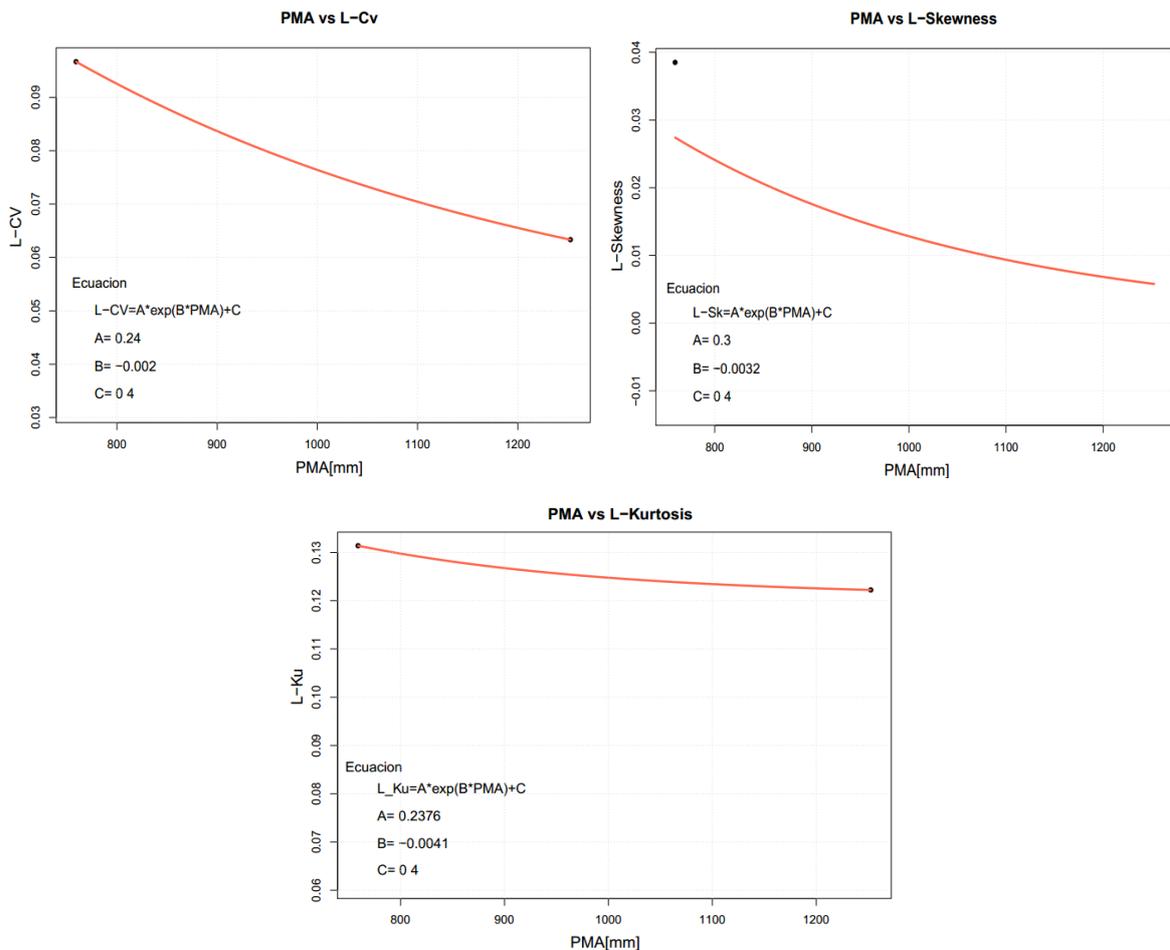


Figura 23: Curvas de mejor ajuste de PMA versus L-Cv, L-Skewness y L-Kurtosis

En la Figura 24, Figura 25 y Figura 26 se muestran las variaciones regionales de L-Cv, L-Skewness y L-Kurtosis, los mismos que fueron obtenidos desde las ecuaciones regionales y sus respectiva PMA de cada celda.

En la Figura 24, se muestra los valores del coeficiente de variación (L-Cv), donde se indica que para la región central de la cuenca Alto Urubamba existe un mayor coeficiente de variación (0.12 – 0.14) y también que el menor coeficiente de variación (0.045-0.061) se encuentra en la región norte de las cuencas de Alto Urubamba y Yavero, respectivamente.

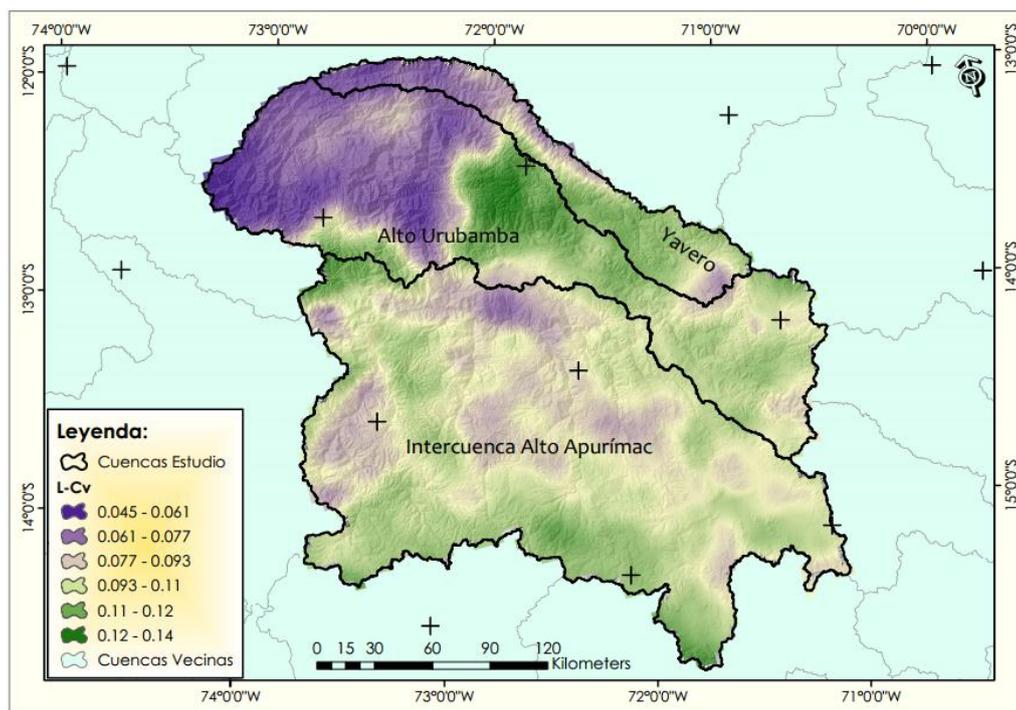


Figura 24: Mapa del estadístico L-Cv sobre el área de estudio

En la Figura 25 se muestra los valores del coeficiente de asimetría (L-Skewness), donde se indica que existe un menor coeficiente de asimetría (0.001-0.012) en la región norte de las cuencas de Alto Urubamba y Yavero y también que el mayor coeficiente de asimetría (0.059-0.071) se encuentra en el centro de la cuenca de Alto Urubamba, respectivamente.

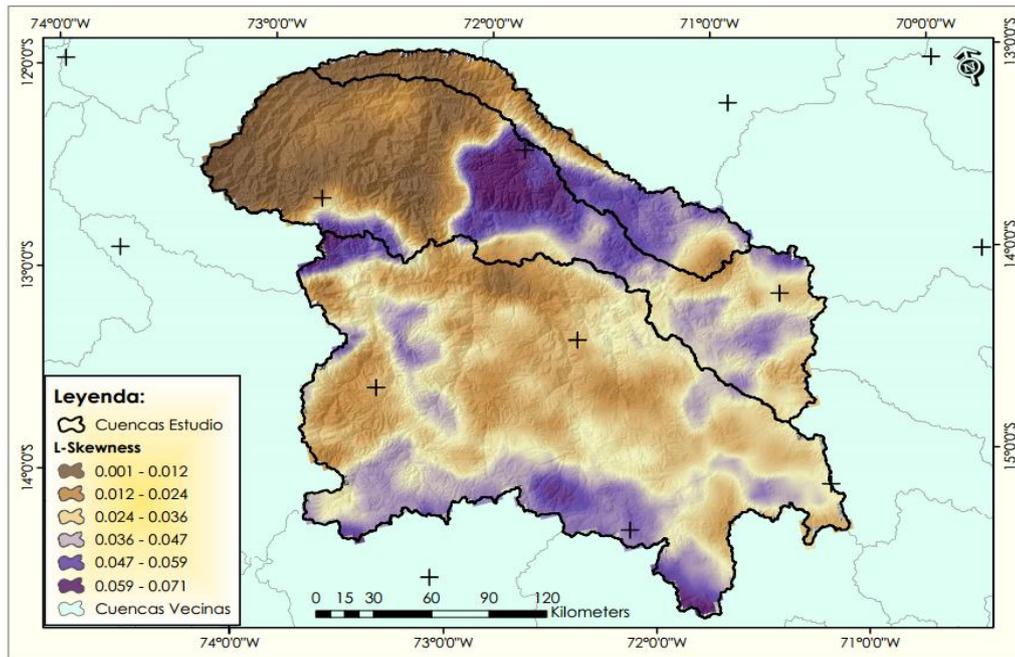


Figura 25: Mapa del estadístico L-Skewness sobre el área de estudio

En la Figura 26 se muestra el coeficiente de kurtosis (L-Kurtosis), donde se indica que existe un mayor coeficiente de kurtosis (0.151 – 0.157) en la región central de la cuenca Alto Urubamba y también un menor coeficiente de kurtosis (0.121-0.127) se encuentra en la región norte de las cuencas de Alto Urubamba y Yaveru, respectivamente.

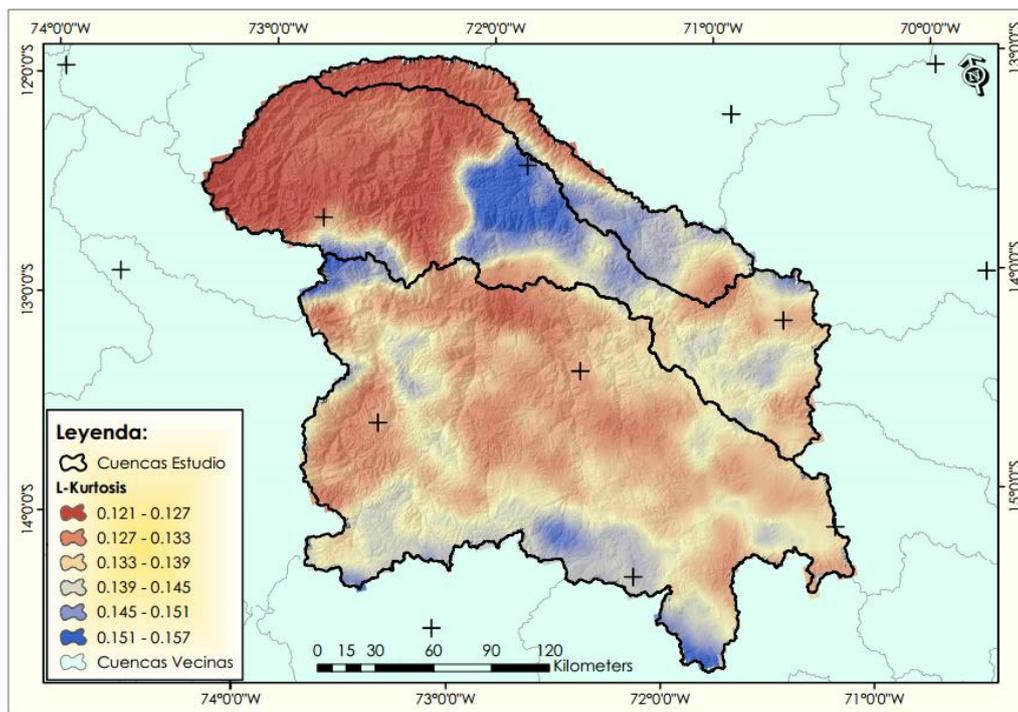


Figura 26: Mapa de los estadísticos L-Kurtosis sobre el área de estudio

Calculados los coeficientes de L-Cv, L-Skewness y L-Kurtosis, se determinó los parámetros de la distribución GNO de probabilidad de no excedencia mediante los L-momentos ratios que asocia la PMA de cada celda y las ecuaciones calculadas anteriormente. En cada una de las celdas se calculan las precipitaciones para diferentes periodos de retorno.

En la Figura 27, Figura 28 y Figura 29, se muestra la distribución espacial del periodo de retorno asociado a la ocurrencia de una sequía equivalente al 80%PMA, 70%PMA y 60%PMA, respectivamente, para la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas Alto Urubamba y Yavero.

En la Figura 27 para situaciones de una deficiencia del 20% de lluvia, es decir, una precipitación equivalente al 80% de la precipitación media anual, la sequía presento un período de retorno fluctuante de 4.5 a 100 años; las zonas de mayor vulnerabilidad es toda la Intercuenca Alto Apurímac y la zona sur y centro de las cuencas de Alto Urubamba y Yavero con periodos de retorno menores a 14 años.

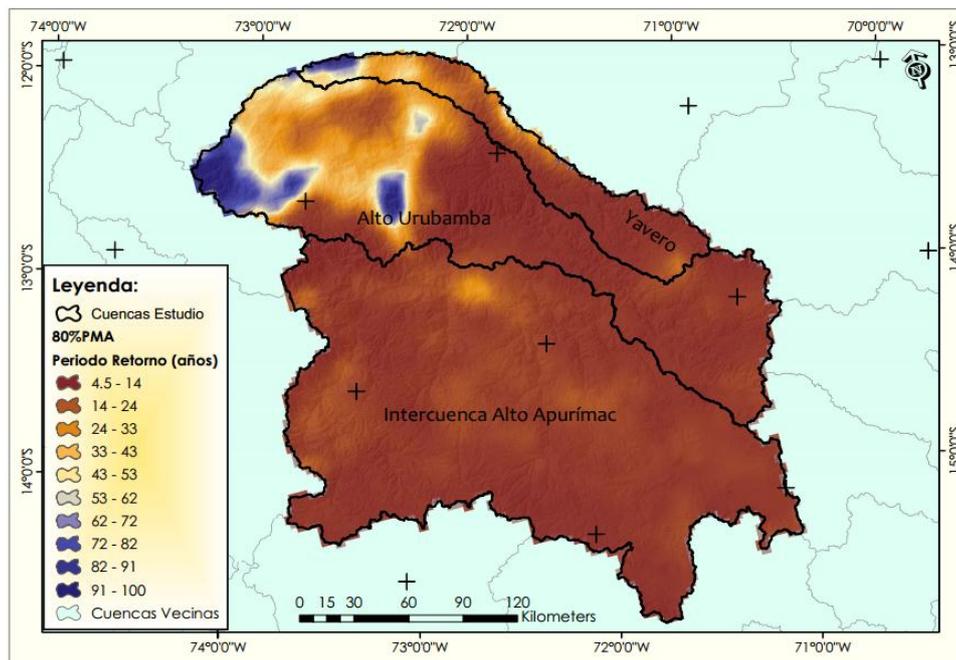


Figura 27: Periodo de retorno de una sequía equivalente al 80%PMA

En la Figura 28 para situaciones de una deficiencia del 30% de lluvia, es decir, una precipitación equivalente al 70% de la precipitación media anual, el período de retorno varía de 8 a 100 años; las zonas de mayor vulnerabilidad son la zona centro y sur de las cuencas alto Urubamba y Yavero con periodos de retorno menores a 18 años.

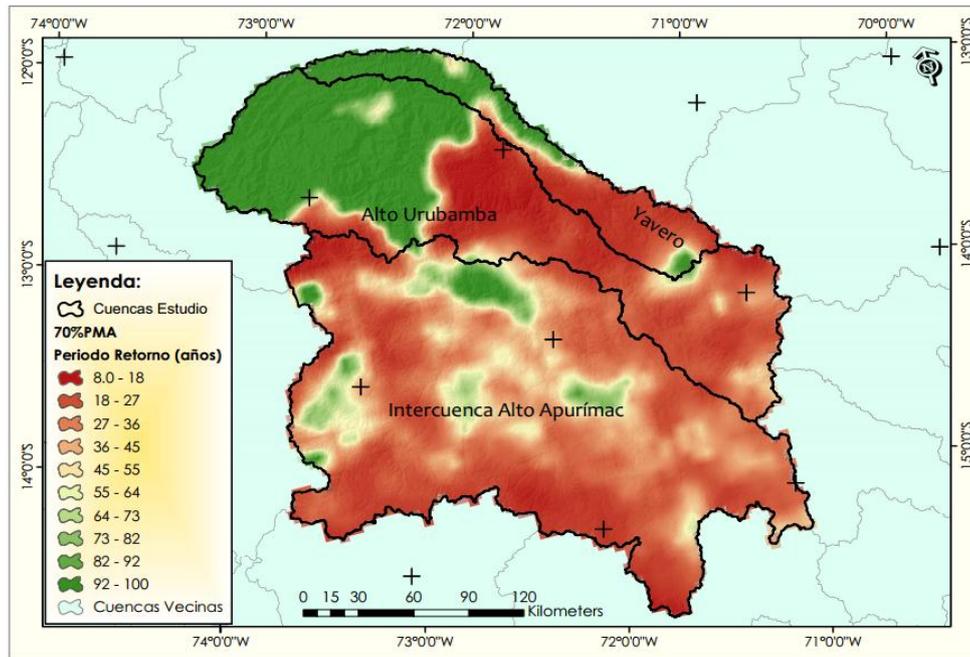


Figura 28: Periodo de retorno de una sequía equivalente al 70%PMA

En la Figura 29 para situaciones de una deficiencia del 40% de lluvia, es decir, una precipitación equivalente al 60% de la precipitación media anual, el período de retorno varía de 18 a 100 años; las zonas de mayor vulnerabilidad son la zona centro y sur de las cuencas alto Urubamba y Yavero con periodos de retorno menores a 26 años.

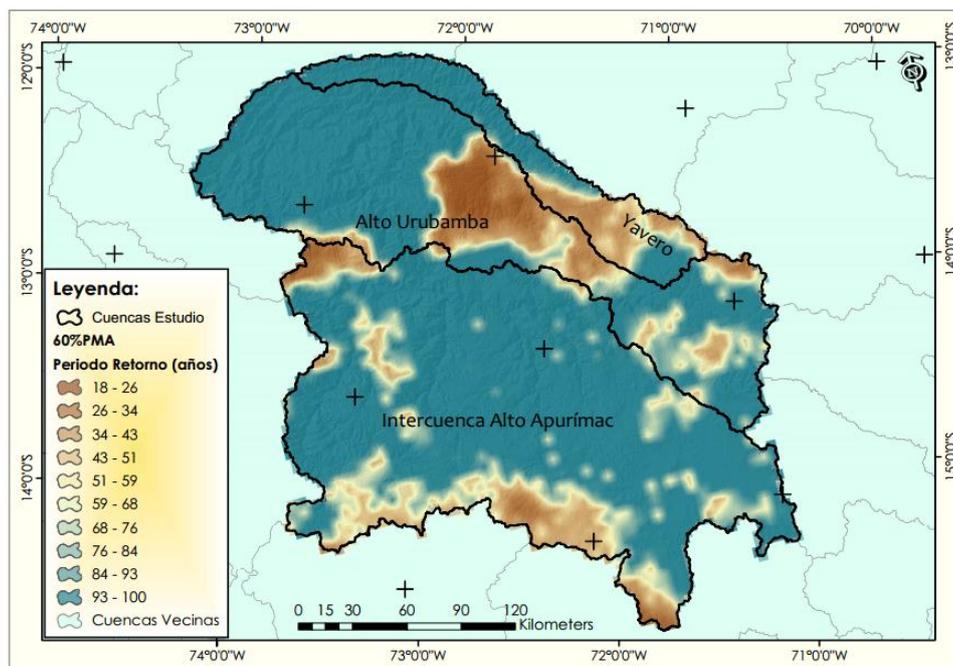


Figura 29: Periodo de retorno de una sequía equivalente al 60%PMA

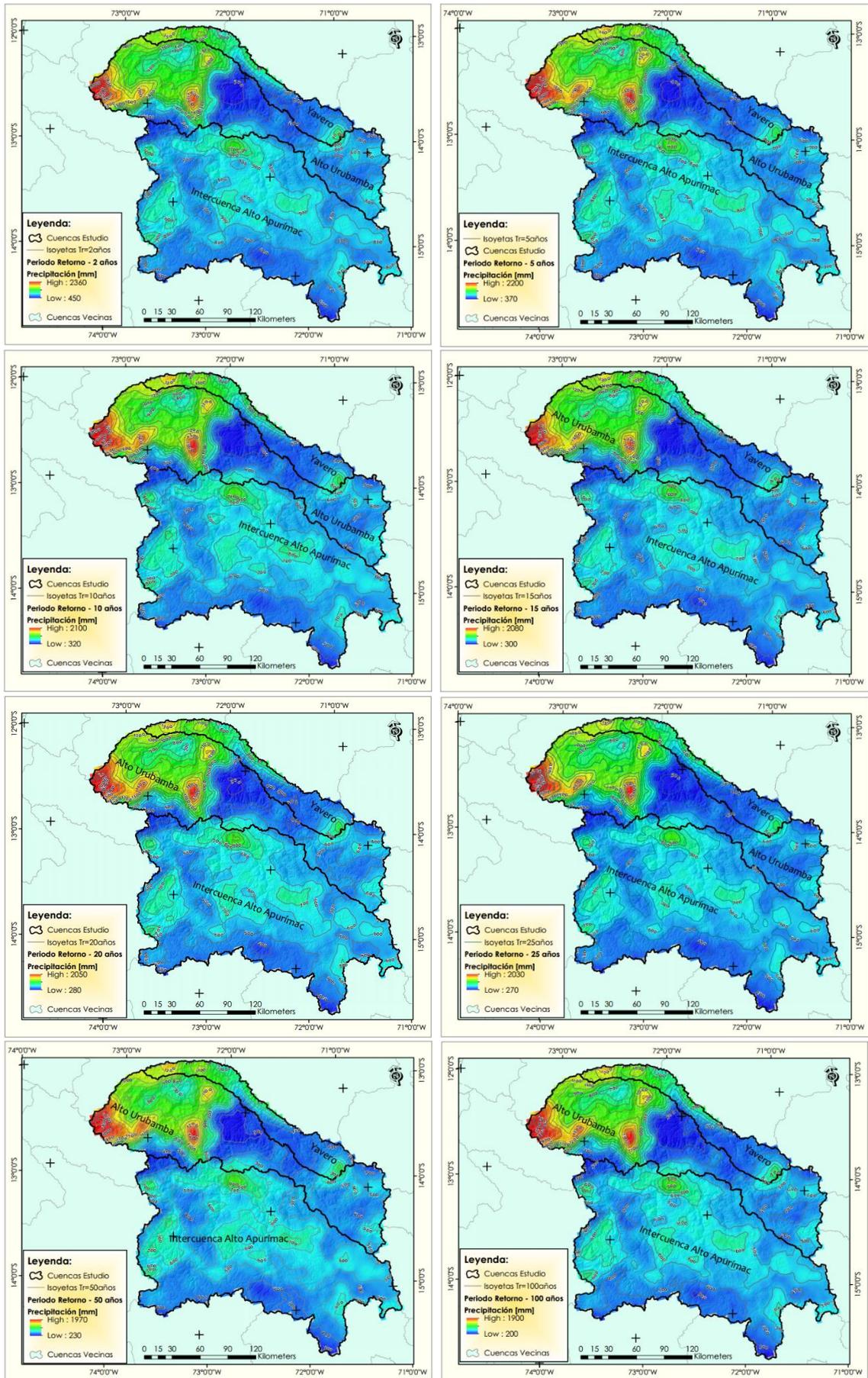


Figura 30: PMA para un periodo de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años

Después de estimar los cuantiles extremos de la precipitación (sequias) en base a la distribución GNO en el análisis regional de frecuencias, los mapas de los mismos correspondientes a diferentes periodos de retorno. En la Figura 30 se muestran los mapas de precipitación extrema (sequias) que corresponde a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años, que proporcionan las precipitaciones mínimas para la zona de estudio.

Definido los mapas anteriormente mencionados (80%PMA, 70%PMA y 60%PMA) fue necesario corroborar los porcentajes de la precipitación media para definirlos como sequía, para esto se consideró utilizar los eventos de sequias ocurridas en la zona de estudio, las sequias ocurridas fueron ocasionadas por el gradiente del Océano Atlántico e inversamente con el Índice de Oscilación del Sur (IOS) del Océano Pacifico.

La variabilidad mutianual de la precipitación está relacionada directamente al gradiente del Océano Atlántico e inversamente con el Índice de Oscilación del Sur (IOS) del Océano Pacifico. Es decir generalmente durante los eventos el Niño se observan sequias en la zona sur del país (Lavado *et al.* 2010).

Los eventos ocurridos de El Niño fuerte (ENF) y de El Niño moderado (ENM), se presentan con un total de 3 años hidrológicos para los años ENF (1982-83, 1991-92 y 1997-98) y 11 años hidrológicos para los años ENM (1965-66, 1972-73, 1977-78, 1986-87, 1987-88, 1992-93, 1993-94, 1994-95, 2002-03, 2004-05 y 2006-07), ocurridos en el Perú. (Lavado *et al.* 2014).

El evento ocurrido de El Niño 2015-2016 fue reportado en la página web del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), cuyos daños son registrados en el Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación (SINPAD) ver anexo 6.

Considerando los eventos ya ocurridos de las sequias antes mencionados y la climatología de la zona de estudio se verifico los porcentajes de precipitación con respecto a la precipitación media anual como se muestra en la Figura 31 y Figura 32 para determinar los porcentaje de precipitación media anual y así determinar las sequias que se presentaran según la metodología del ARF-LM.

Según la Figura 31 para el año 1983 se presentó el 69% de la precipitación anual con respecto a la media considerándose el 31% de déficit de lluvia, para el año 1987 se presentó el 81% de la precipitación anual con respecto a la media considerándose el 19% de déficit de lluvia así presentándose sequías para dichos años. Según la Figura 32 para el año 2016 se presentó el 79% de la precipitación anual con respecto a la media presentándose el 21% de déficit de lluvia.

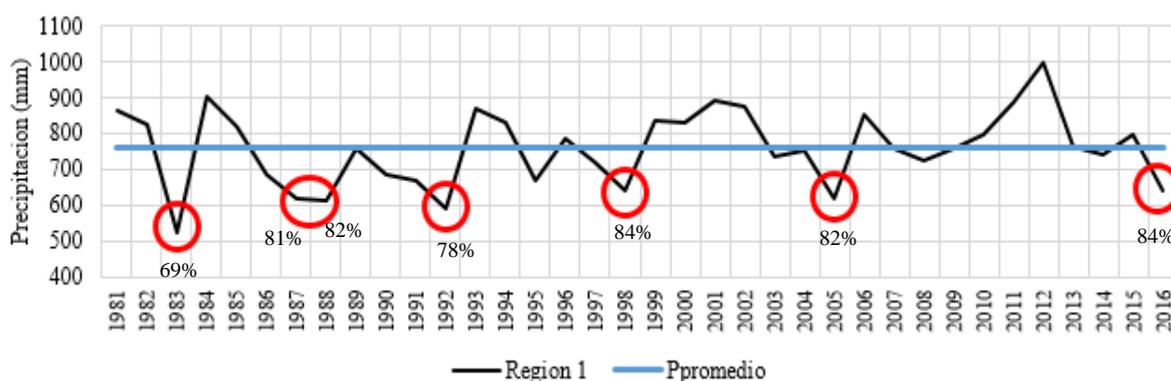


Figura 31: Eventos de sequías presentadas con mayor magnitud – Región 01

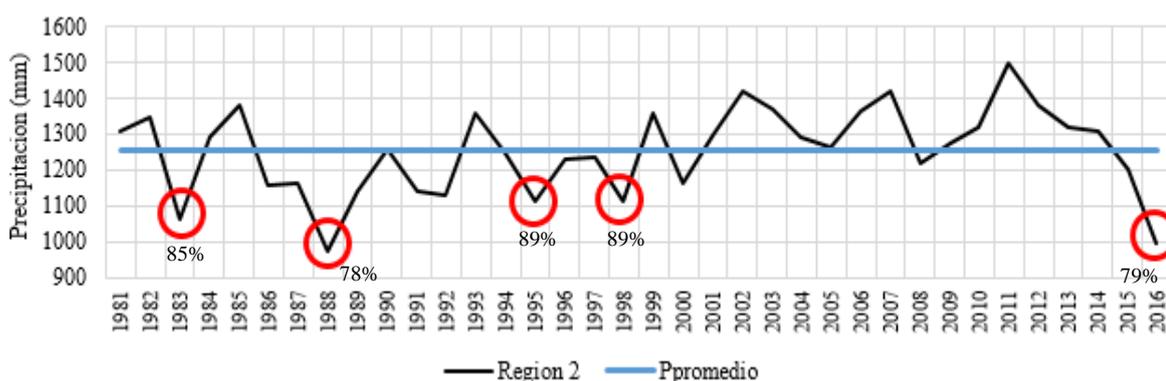


Figura 32: Eventos de sequías presentadas con mayor magnitud – Región 02

Según los resultados antes mencionados se puede corroborar los porcentajes de los umbrales determinados como sequía para el 80%PMA, 70%PMA y 60%PMA según la metodología del ARF-LM.

Con la corroboración de los umbrales que se utilizaron para las sequías (80%PMA, 70%PMA y 60%PMA) se pudo determinar los daños que se presentarían a nivel del uso del suelo en la zona de estudio

En la Tabla 15 se muestra las zonas más vulnerables ante las sequías con un déficit de 40% de lluvia, déficit de 30% de lluvia y déficit de 20% de lluvia para la intercuenca Alto Apurímac, los cuales tienen un efecto directo en el uso del suelo. Para el estudio solo se

consideró las variables con mayor impacto ante una sequía las cuales son la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales. La sequía del 60%PMA que representa el 40% del déficit de la precipitación media anual, el cual afecto a la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales en un área de 351,481.08 has. La sequía del 70%PMA que representa el 30% del déficit de la precipitación media ANUAL, el cual afecto a la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales en un área de 1,617,051.67 has. La sequía del 80%PMA que representa el 20% del déficit de la precipitación media anual, el cual afecto a la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales en un área de 3,306,917.56 has..

Tabla 15: Uso de suelo afectado por una sequía en la Intercuenca Alto Apurímac

Intercuenca Alto Apurímac	40% déficit lluvia Área (has)	30% déficit lluvia Área (has)	20% déficit lluvia Área (has)
Agricultura	611.90	30,233.75	67,412.25
Forestal	19,390.82	52,318.69	84,103.80
Pastizal	284,848.79	1,229,640.85	2,382,542.42
Matorral	46,629.57	304,858.38	772,859.09
TOTAL	351,481.08	1,617,051.67	3,306,917.56

FUENTE: GlobeLand30.

En la Tabla 16 se muestra las zonas más vulnerables ante las sequias con un déficit de 40% de lluvia, déficit de 30% de lluvia y déficit de 20% de lluvia para la Cuenca Alto Urubamba los cuales tienen un efecto directo en el uso del suelo. La sequía del 60%PMA que representa el 40% del déficit de la precipitación media anual, el cual afecto a la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales en un área de 420,926.24 has. La sequía del 70%PMA que representa el 30% del déficit de la precipitación media anual, el cual afecto a la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales en un área de 878,210.35 has. La sequía del 80%PMA que representa el 20% del déficit de la precipitación media anual, el cual afecto a la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales en un área de 1,164,210.13 has.

Tabla 16: Uso de suelo afectado por una sequía en la cuenca Alto Urubamba

Cuenca Alto Urubamba	40% déficit lluvia Área (has)	30% déficit lluvia Área (has)	20% déficit lluvia Área (has)
Agricultura	37,667.55	76,763.64	96,237.45
Forestal	30,287.96	82,231.54	137,231.79
Pastizal	168,897.66	418,884.65	550,250.50
Matorral	184,073.07	300,330.52	380,490.39
TOTAL	420,926.24	878,210.35	1,164,210.13

FUENTE: GlobeLand30.

En la Tabla 17 se muestra las zonas más vulnerables ante las sequías con un déficit de 40% de lluvia, déficit de 30% de lluvia y déficit de 20% de lluvia para la Cuenca Yavero los cuales tienen un efecto directo en el uso del suelo. La sequía del 60%PMA que representa el 40% del déficit de la precipitación media anual, el cual afecto a la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales en un área de 157,140.27 has. La sequía del 70%PMA que representa el 30% del déficit de la precipitación media anual, el cual afecto a la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales en un área de 237,635.07 has. La sequía del 80%PMA que representa el 20% del déficit de la precipitación media anual, el cual afecto a la agricultura, actividad forestal, pastizales y matorrales en un área de 323,919.60 has.

Tabla 17: Uso de suelo afectado por una sequía en la cuenca Yavero

Cuenca Yavero	40% déficit	30% déficit	20% déficit
	lluvia	lluvia	lluvia
	Área (has)	Área (has)	Área (has)
Agricultura	2,568.29	2,568.29	2,568.29
Forestal	2,764.61	7,457.95	25,567.59
Pastizal	114,950.22	165,562.74	199,820.83
Matorral	36,857.15	62,046.09	95,962.89
TOTAL	157,140.27	237,635.07	323,919.60

FUENTE: GlobeLand30.

En la Tabla 18 se muestra los porcentajes del uso de suelo afectado por una sequía con respecto al área de cada cuenca, para un déficit del 20% de lluvia, seguida de un déficit del 30% de lluvia y luego de un déficit del 40% de lluvia.

Tabla 18: Resumen del Uso de suelo afectado por una sequía

Descripción	Intercuenca Alto Apurímac			Alto Urubamba			Yavero		
	40% déficit lluvia	30% déficit lluvia	20% déficit lluvia	40% déficit lluvia	30% déficit lluvia	20% déficit lluvia	40% déficit lluvia	30% déficit lluvia	20% déficit lluvia
Agricultura	0.02%	0.9%	1.9%	1.8%	3.6%	4.5%	0.5%	0.5%	0.5%
Forestal	0.6%	1.5%	2.4%	1.4%	3.9%	6.4%	0.5%	1.4%	4.7%
Pastizal	8.2%	35.4%	68.6%	7.9%	19.7%	25.8%	20.9%	30.1%	36.4%
Matorral	1.3%	8.8%	22.3%	8.6%	14.1%	17.9%	6.7%	11.3%	17.5%
Total	10.1%	46.6%	95.2%	19.8%	41.2%	54.7%	28.6%	43.2%	58.9%

En la Figura 33, Figura 34 y Figura 35 se muestra el uso del suelo para una sequía del 80%PMA, 70%PMA y 60%PMA para la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas Alto Urubamba y Yavero.

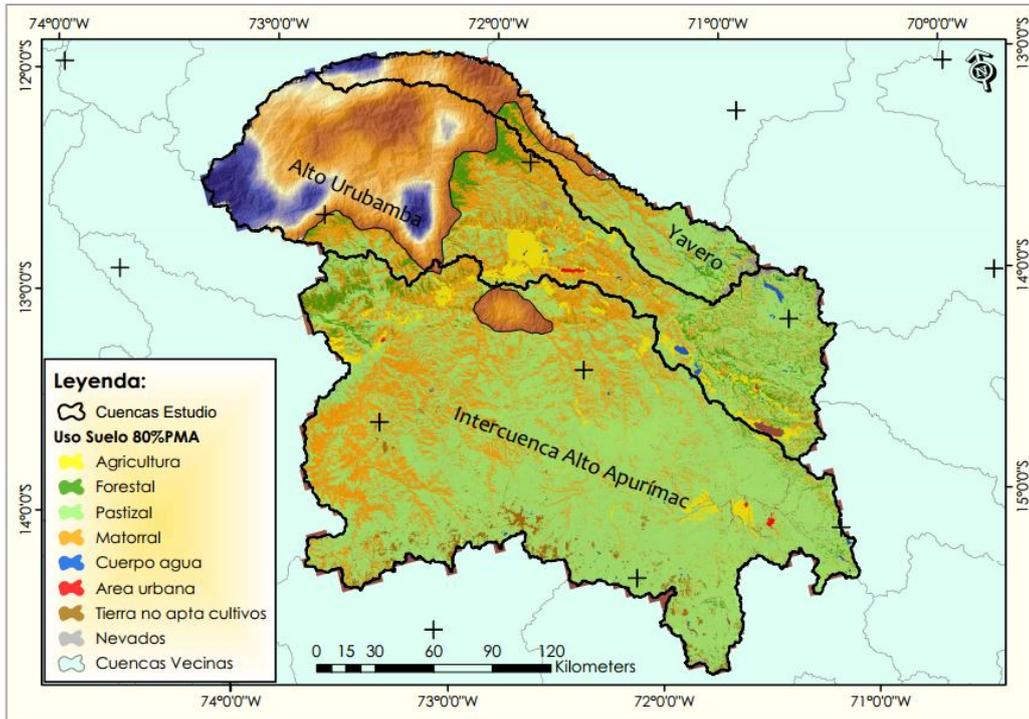


Figura 33: Uso de suelo afectado por una sequía del 80%PMA

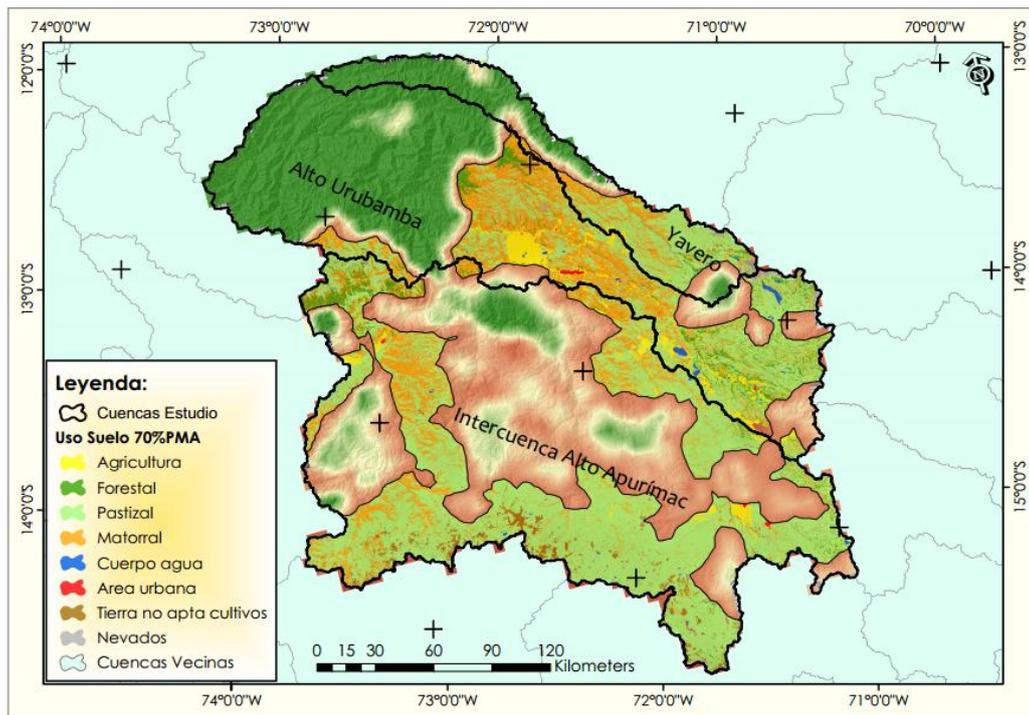


Figura 34: Uso de suelo afectado por una sequía del 70%PMA

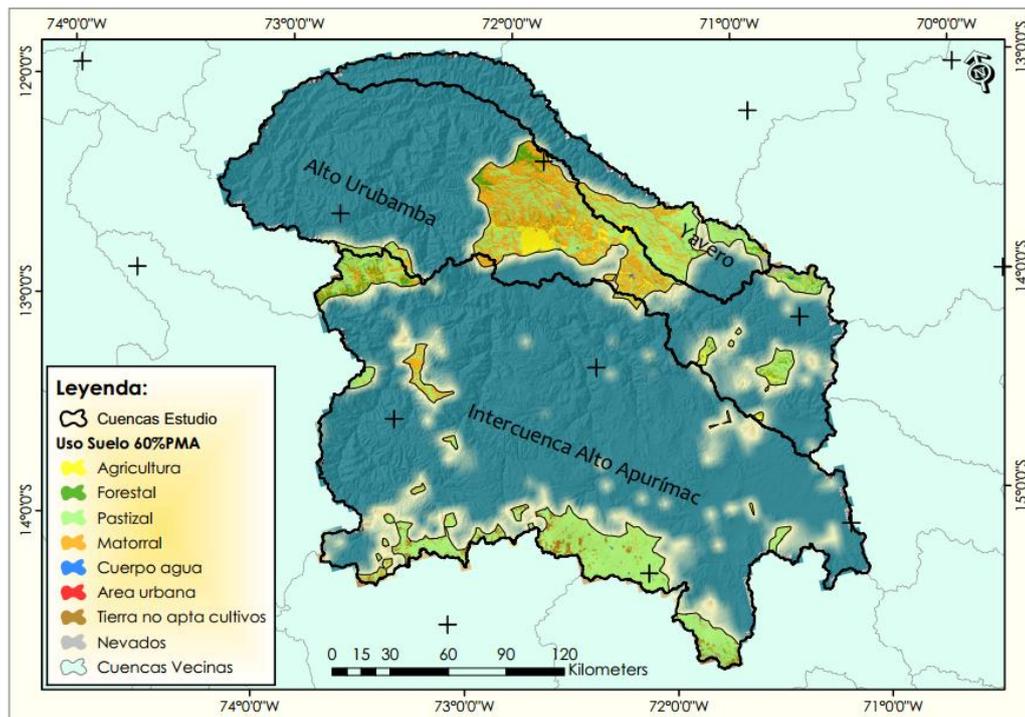


Figura 35: Uso de suelo afectado por una sequía del 60%PMA

Con el objetivo de evaluar los fuertes impactos de la sequía en los ecosistemas de la región 02 del área de estudio, se consideró algunas especies que serían afectados por la sequía, para este análisis se tomó como referencia los siguientes estudios realizados como:

Bodmer *et al.* (2013), indican según las sequías del 2005 y del 2010, que no estuvieron relacionadas con eventos de El Niño, sino con anomalías positivas de la temperatura de la superficie del mar del Atlántico norte. Las especies afectadas fueron (caso zona húmeda del estudio):

- **Manatí:** Los manatíes se enfrentaron a una nueva amenaza de las mayores variaciones en el nivel del agua durante las sequias. Antes del 2010, no se registraron muertes de manatí por causas naturales. Durante la sequía del 2010 hubo individuos de manatí encontrados muertos por causas naturales. Se presume que los manatíes murieron de hambre, ya que los niveles de agua eran tan excesivamente bajos que la vegetación flotante de la que se alimentan estaba fuera del alcance de los animales.
- **Delfín Gris y Rosado:** La sequía del 2010 tuvo un gran impacto significativo en las poblaciones de los delfines. Los delfines rosados disminuyeron en 47% y el delfín gris en 49% en setiembre y octubre del 2010. La sequía terminó a finales de Octubre de 2010 y en Enero y Febrero del 2011 ambos delfines rosado y gris continuaron

consistentemente con bajos números (entre 60-70% menos avistamientos) que en los mismos meses en el 2010.

- **Aves Acuáticas:** La sequía ha provocado una elevada mortandad de peces y la disminución de las poblaciones de aves de orilla concurre con una disminución de la producción de peces en el 2011. Esto también se correlaciona con el impacto de las variaciones del nivel de agua en las poblaciones.
- **Peces:** La sequía del 2010 tuvo un gran impacto significativo en las poblaciones de los peces. La demografía se ha visto afectada por las variaciones en el nivel del agua. los siguientes peces son:

Acarahuazú. El impacto se vio en el 2011, el volumen de la captura más grande se redujo drásticamente a 11-13 cm (tamaño normal 19-21 cm)

Carachama: El impacto se vio en el 2011, el volumen de la captura más grande se redujo drásticamente a 18 a 21 cm (tamaño normal 22-25 cm)

Boquichico: El impacto se vio en el 2012, el volumen de la captura más grande se redujo drásticamente a 15-17 cm (tamaño normal 21 a 24 cm)

Piraña roja: El impacto se vio en el 2012, el volumen de la captura más grande se redujo drásticamente a 8-12 cm (tamaño normal 14-16 cm)

Piraña blanca: El impacto se vio en el 2011, el volumen de la captura más grande se redujo drásticamente a 11.9 cm (tamaño normal 13 a 15 cm).

Anfibios: La disminución de la precipitación puede alterar su fisiología, en últimas, comprometer su supervivencia. En el caso de las salamandras que carecen de pulmones internos y dependen en gran medida de la respiración cutánea lo cual las hace más susceptibles a cambios en la precipitación. Los adultos de la rana de patas rojas tienden a evitar áreas despejadas cuando la precipitación es baja. Asimismo, la degradación y el cambio en hábitats acuáticos y terrestres influyen de forma indirecta sobre los ciclos de vida de los anfibios, al alterar sus modos reproductivos (Uribe 2015).

VI. CONCLUSIONES

1. En la zona de estudio de la intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero, los registros de precipitación de las estaciones asumidas de PISCOpm permitieron generar una base de datos adecuados para la aplicación de los métodos estadísticos asociado a los L-momentos mediante la revisión de datos (datos atípicos) y análisis de supuestos (series sin tendencia) que garantizaron la confiabilidad de los datos.
2. En la zona de estudio de la intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero, se determinaron 02 regiones homogéneas, en la región 01 se presentan 56 estaciones y en la región 02 se presentan 14 estaciones.
3. Para ambas regiones homogéneas dentro de la intercuenca Alto Apurímac y las cuencas de Alto Urubamba y Yavero, la información de precipitación utilizada para el análisis de las sequías se ajusta mejor a la Normal Generalizada (GNO).

Ante una sequía meteorológica con una deficiencia del 20% de lluvia (80%PMA) los períodos de retorno fluctúan de 4.5 a 14 años para zonas con mayor vulnerabilidad, ante una sequía meteorológica con una deficiencia del 30% de lluvia (70%PMA) los períodos de retorno fluctúan de 8.0 a 18 años para zonas con mayor vulnerabilidad y ante una sequía meteorológica con una deficiencia del 40% de lluvia (60%PMA) los períodos de retorno fluctúan de 18 a 26 años para zonas con mayor vulnerabilidad.

Las zonas afectadas en el uso de suelo en la intercuenca Alto Apurímac por la sequía de un déficit del 40% de lluvia es del 10.1%, para un déficit del 30% de lluvia es del 46.6% y para un déficit del 20% de lluvia es del 95.2%. Las zonas afectadas en el uso de suelo en la cuenca Alto Urubamba por la sequía de un déficit del 40% de lluvia es del 19.8%, para un déficit del 30% de lluvia es del 41.2% y para un déficit del 20% de lluvia es del 54.7%. Las zonas afectadas en el uso de suelo en la cuenca Yavero por la sequía de un déficit del 40% de lluvia es del 28.6%, para un déficit del 30% de lluvia es del 43.2% y para un déficit del 20% de lluvia es del 58.9%.

VII. RECOMENDACIONES

A continuación se dan algunas recomendaciones y sugerencias para futuras investigaciones y desarrollo de estudios afines.

- Se recomienda extender la investigación con la metodología de L-momentos para la caracterización de las sequías en otras cuencas alto-andinas, así como otras del territorio del país con mayor impacto socioeconómico, con la finalidad de conocer y entender la variabilidad espacio-temporal de las sequías bajo diferentes condiciones climáticas.
- Se recomienda generar a través de la investigación, alertas de peligro y vulnerabilidad futura de las sequías para una mejor toma de decisión en el proceso de aprovechamiento, manejo, operación y control de los recursos hídricos en la Intercuenca Alto Apurímac y las cuencas Alto Urubamba y Yavero.
- Se recomienda a los Gobiernos regionales y locales hacer uso de los mapas de las zonas afectadas en el uso del suelo para la toma de decisiones frente a las sequias para mitigar sus efectos negativos.
- Se recomienda antes de utilizar la base de datos de PISCOpm realizar una correlación matricial de los datos de PISCOpm con los datos observados para obtener una mejor consistencia en la validación de los datos.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, M., Puertas, J., y Soto, B. 1999. Análisis regional de las precipitaciones máximas en Galicia mediante el método del índice de avenida. Ingeniería del Agua. Vol 6: 283-290.

ANA (Autoridad Nacional del Agua), 2013. Las condiciones de sequía y estrategias de gestión en el Perú.

Ayala, L. y Ferrer, P. 1973. Análisis de Frecuencia de Datos Hidrológicos mediante Computación. Santiago de Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Obras Civiles. 128.

Ayala, I. A., 2016. Predicción de sequias con redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos utilizando precipitación por percepción remota. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. Perú.

Aybar, C.; Lavado Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

Arumí, J., Jara, J. y Salgado, L. 2000. Análisis Hidrológico. Curso de Formulación de Proyectos de Aspersión para la Ley N° 18.450. Temuco. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Centro Regional de Investigaciones Carillanca. 46.

Bradley, A. y Zhao, H. 1997. Climatic Variations in Extreme Precipitation in the Midwest (Submitted to Journal of Hydrologic Engineering). University of Iowa. Disponible en: <http://www.icaen.uiowa.edu/~abradley/publications/rfa2.pdf>.

Bodmer Richard E., Fang Tula G., Puertas Pablo E., Antunez Miguel, Chota Kimberlyn y Bodmer William E. 2013. Cambio Climático y Fauna Silvestre en la Amazonia Peruana - Impacto de la Sequía e Inundaciones Intensas en la Reserva Nacional Pacaya Samiria, Perú.

Burton, I., Kates, R. y White, G. 1978. The Environment as Hazard. Oxford University Press. New York. 240.

Chow, V. 1964. Statistical and Probability Analysis of Hydrologic Data; Part I: Frequency Analysis. In: Handbook of Applied Hydrology; a Compendium of Water Resources Technology. New York. McGraw-Hill. 42.

Cunnane, C. 1988. Methods and merits of regional flood frequency analysis. Journal of Hydrology. Vol. 100: 269-290.

Duran, D. 1998. La Argentina Ambiental. Naturaleza y Sociedad. Buenos Aires. Lugar Editorial. 71-138.

Fernández, B., 1997. Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en Chile Central. Ing. del Agua 4, 37-46.

Fernández, C. 2014. Mapeo del análisis regional de frecuencia de precipitaciones máximas para la cuenca hidrográfica del lago Titicaca empleando L-momentos. Ayacucho, Perú.

Guevara, E. 1992. Métodos Hidrológicos para el Análisis de Sequias. Revista Ingeniería UC. Vol. 1. 25-34.

Hosking, J. R. M., 1990. L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistic. Journal of the Royal Statistical Society, Series B., 52(2), 105 – 124.

Hosking, J. R. M., y Wallis, J. R., 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis. Water Resources Research 29(2), 271-281.

Hosking, J. R. M., y Wallis, J. R., 1995. A comparison of unbiased and plotting- position estimators of L-moments. *Water Resources Reserch* 31(8), 2019-2025.

Hosking, J.R.M. y Wallis, J.R. 1997. *Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, 224: 105-124.

Iglewicz, P. J. y Hoaglin, D. C., 1993. *How to detec and Handle Outliers*. American Society for Quality Control, Milwaukee, WI.

Kendall, M. G., 1975. *Rank Correlation Methods*. 4th ed., Charles Griffin: London.

Kite, G. 1977. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Fort Collins, Colorado. Water Resources Publications. 224.

Labbé, D. 1979. *Análisis de Datos de Lluvia*. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Chillan. 95.

Lavado, C., W., Silvestre, E., Pulache, W. 2010. Tendencias en los extremos de lluvias cerca a la ciudad del Cusco y su relación con las inundaciones de enero 2010. *Revista peruana Geo-Atmosférica, SENAMHI - Perú*.

Lavado, C., Waldo, Espinoza, J. 2014. Impactos del Niño y la Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorología*.

Linley, J., Kohler, M. y Paulhus, J. 1975. *Hidrology for Engineers*. 2da. Edición. McGraw-Hill. New York.

López, B. 1997. La Sequía y su Impacto en el Riesgo de Desertificación de la Cuenca de Segura. *Apuntes para la Gestión y Sustentabilidad del Agua*. Francisco López Bermúdez, M. C. Sánchez F. *Revista internacional de ciencias sociales*. 155-168.

Mann, J. F., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econométrica* 13(1):245-259.

Naranjo, R., 2011. Análisis regional de frecuencia mediante el método de los L-momentos en las regiones de Valparaíso y Metropolitana para la generación de cartografía probabilística de sequía meteorológica. Universidad de Chile. Santiago. Chile.

ONU (Organización de las Naciones Unidas). 1994. Convención Internacional de Lucha contra la Desertificación en los Países afectados por Sequía Grave o Desertificación, en Particular en África. Doc. A/AC.241/15/Rev 17. Paris. 125.

OMM (Organización Mundial de Meteorología). 1992. Vocabulario Meteorológico Internacional. Publicación N° 182. Ginebra, Suiza. 85.

OMM (Organización Mundial de Meteorología). 2006. Vigilancia y Alerta Temprana de la Sequía: Conceptos, Progresos y Desafíos Futuros. Tiempo, Clima y Agua N° 1006.

Okur, A. y Sorman, U. 2000. Application of at site regional frequency analyses by using the L-moments technique. Teknik Dergi. Vol 11(3): 2199-2218

Ortega, D., Velasco, I., Güitrón, A., Arreguín, F. y López, M. 2014. La Gestión de Sequías en México: Avances y Retos. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Puerto Vallarta, México.

Palmer, W. 1965. Meteorological drought. Research paper N° 45. U.S. Department of commerce weather Bureau. Washington D.C. 58 pp.

Rau, P. y Condom, T. 2010. Análisis espacio temporal de la precipitación en las zonas de montaña de Perú (1998-2007). Revista Peruana Geo-Atmosferica RPGA (2). Lima. Perú.

Romero, C., Mena, D., Torres, J., Duran, C. y Carmona, C. 2015. Análisis de Frecuencia Regional de las Variables Climáticas REFRAN –CV, Manual de Usuario del Software. European Commission. European Union.

Rusell, C., Arey, D. y Kates, R. 1970. Drought and water supply. Johns Hopkins University Press. Baltimore. 232 pp.

Salas, J. 2000. Hidrología de Zonas Áridas y Semiáridas. Ingeniería del Agua, 7(4): 409-429.

Schaefer, M., Barker, B., Taylor, G., y Wallis, J. 2006. Regional precipitation frequency analysis and spatial mapping for 24 hours and 2 hours durations in Eastern Washington. Prepared for Washington State Department of Transportation. MSG Engineering consultants, Inc and Oregon Climate Service.

SENAMHI. 1988. Mapa de clasificación climática del Perú. Disponible en <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>.

Tallaksen, L., Lanen, H.A.J. van, 2004. Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater, Developments in Water Science : 48. Elsevier, 73.

Uribe Botero Eduardo, 2015. El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)

Valiente, M. 2001. Sequia: Definiciones, Topologías y Métodos de Cuantificación. Universidad de Alicante. Instituto Universitario de Geografía. Investigaciones Geográficas. Vol. 26: 59-80.

Velasco, I., Ochoa, L. y Gutiérrez, C. 2005. Sequía, un Problema de Perspectiva y gestión. Región y Sociedad, Vol. XVII, N° 34, 35-71.

Vogel, R. M., y Fennessey, N. M., 1993. L-moment diagrams should replace product moment diagrams, Water resources Research 29(6), 1745-1754.

Wallis, J. R., Schaefer, M. G., Barker, B. L., y Taylor, G. H., 2007. Regional precipitation frequency analysis and spatial mapping for 24 hour and 2 hour durations for Washington state. Hydrology and Earth System Sciences 11(1), 415-442.

Wilhite, D. y Buchanan – Smith, M. 2005. Drought as Hazard: Understanding the Natural and Social Context. D. Editor: Drought and Water Crises Science, Technology, and Management Issues.

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B. y Cavadis, G., 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes* 16(9), 1807-1829. doi: 10.1002/hyp.1095.

IX. ANEXOS

Anexo 1: Red de estaciones asumidas de PISCOpm

N°	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
1	E - 1	-71.774	-15.429	5000.0
2	E - 2	-71.777	-15.204	4293.0
3	E - 3	-71.081	-15.193	4810.0
4	E - 4	-72.013	-14.981	4782.0
5	E - 5	-71.781	-14.978	4848.0
6	E - 6	-71.549	-14.975	4287.0
7	E - 7	-71.317	-14.971	4069.0
8	E - 8	-71.085	-14.967	4108.0
9	E - 9	-72.248	-14.758	4811.0
10	E - 10	-72.016	-14.755	4487.0
11	E - 11	-71.784	-14.752	4383.0
12	E - 12	-71.552	-14.749	3915.0
13	E - 13	-71.321	-14.745	4032.0
14	E - 14	-71.089	-14.742	4500.0
15	E - 15	-73.410	-14.543	4200.0
16	E - 16	-73.178	-14.542	4661.0
17	E - 17	-72.947	-14.540	4836.0
18	E - 18	-72.715	-14.537	4757.0
19	E - 19	-72.483	-14.535	4815.0
20	E - 20	-72.251	-14.532	4177.0
21	E - 21	-72.019	-14.530	4610.0
22	E - 22	-71.788	-14.527	4229.0
23	E - 23	-71.556	-14.523	4595.0
24	E - 24	-71.324	-14.520	4177.0
25	E - 25	-71.093	-14.516	4043.0
26	E - 26	-73.180	-14.316	3680.0
27	E - 27	-72.949	-14.314	3406.0
28	E - 28	-72.717	-14.312	4631.0
29	E - 29	-72.485	-14.309	3982.0
30	E - 30	-72.254	-14.307	3783.0
31	E - 31	-72.022	-14.304	3548.0
32	E - 32	-71.791	-14.301	3956.0
33	E - 33	-71.559	-14.298	4198.0
34	E - 34	-71.328	-14.294	4124.0
35	E - 35	-71.097	-14.290	4607.0
36	E - 36	-73.182	-14.090	2440.0

(Continuación)

Nº	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
37	E - 37	-72.951	-14.088	4293.0
38	E - 38	-72.719	-14.086	3499.0
39	E - 39	-72.488	-14.083	4157.0
40	E - 40	-72.256	-14.081	4250.0
41	E - 41	-72.025	-14.078	3884.0
42	E - 42	-71.794	-14.075	4328.0
43	E - 43	-71.563	-14.072	4065.0
44	E - 44	-71.332	-14.069	4411.0
45	E - 45	-71.101	-14.065	4526.0
46	E - 46	-70.870	-14.061	4742.0
47	E - 47	-73.184	-13.864	4624.0
48	E - 48	-72.953	-13.862	2703.0
49	E - 49	-72.721	-13.860	3957.0
50	E - 50	-72.490	-13.858	3062.0
51	E - 51	-72.259	-13.855	4418.0
52	E - 52	-72.028	-13.852	3960.0
53	E - 53	-71.797	-13.849	3096.0
54	E - 54	-71.566	-13.846	4278.0
55	E - 55	-71.335	-13.843	4824.0
56	E - 56	-71.104	-13.839	5065.0
57	E - 57	-72.955	-13.636	1721.0
58	E - 58	-72.724	-13.634	4424.0
59	E - 59	-72.493	-13.632	4260.0
60	E - 60	-72.262	-13.629	3384.0
61	E - 61	-72.031	-13.627	3839.0
62	E - 62	-71.800	-13.624	4129.0
63	E - 63	-71.569	-13.621	3825.0
64	E - 64	-71.339	-13.617	4017.0
65	E - 65	-73.187	-13.412	1225.0
66	E - 66	-72.957	-13.410	2779.0
67	E - 67	-72.726	-13.408	3798.0
68	E - 68	-72.495	-13.406	4620.0
69	E - 69	-72.264	-13.404	4147.0
70	E - 70	-72.034	-13.401	3871.0
71	E - 71	-71.803	-13.398	3722.0
72	E - 72	-71.573	-13.395	3870.0
73	E - 73	-72.958	-13.184	3863.0
74	E - 74	-72.728	-13.182	3539.0
75	E - 75	-72.497	-13.180	2806.0
76	E - 76	-72.267	-13.178	4417.0
77	E - 77	-72.036	-13.175	4140.0
78	E - 78	-71.806	-13.172	4231.0
79	E - 79	-73.191	-12.960	2418.0
80	E - 80	-72.960	-12.958	3399.0

(Continuación)

Nº	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
81	E - 81	-72.730	-12.956	2384.0
82	E - 82	-72.500	-12.954	3387.0
83	E - 83	-72.269	-12.952	4245.0
84	E - 84	-72.039	-12.949	4051.0
85	E - 85	-71.809	-12.947	3343.0
86	E - 86	-73.422	-12.735	1444.0
87	E - 87	-73.192	-12.734	1437.0
88	E - 88	-72.962	-12.732	1094.0
89	E - 89	-72.732	-12.730	2131.0
90	E - 90	-72.502	-12.728	1276.0
91	E - 91	-72.272	-12.726	2462.0
92	E - 92	-72.042	-12.724	2684.0
93	E - 93	-73.194	-12.508	1754.0
94	E - 94	-72.964	-12.506	1158.0
95	E - 95	-72.734	-12.505	1059.0
96	E - 96	-72.504	-12.502	2148.0
97	E - 97	-72.274	-12.500	1147.0

Anexo 2: Serie de datos de precipitación total anual (mm) por estación - PISCOpm

Año	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9	E 10	E 11	E 12
1981	589.98	713.02	886.81	719.38	749.13	962.34	640.34	732.26	618.96	708.04	877.49	886.53
1982	422.07	713.87	900.67	638.35	770.45	1062.85	663.57	744.35	553.51	609.84	895.55	921.27
1983	177.19	324.09	330.52	388.05	430.52	526.86	371.16	340.24	390.14	425.42	511.11	533.10
1984	821.19	1105.25	1299.10	921.82	1043.23	1402.63	1008.17	1151.28	744.42	832.90	1107.60	1126.15
1985	546.54	670.77	992.30	703.86	810.03	957.23	740.73	841.60	600.23	680.94	886.31	947.34
1986	713.49	834.21	975.15	757.55	768.15	910.56	661.86	757.92	637.38	635.86	810.75	772.85
1987	245.22	358.81	662.67	451.51	454.51	702.66	442.70	567.04	398.62	455.65	567.76	621.33
1988	433.87	515.06	850.27	537.10	557.14	747.43	533.78	641.86	402.16	447.11	642.92	694.43
1989	459.03	527.90	723.03	705.46	658.38	800.00	537.98	615.41	619.90	657.93	811.83	791.01
1990	367.56	598.78	799.80	511.53	645.98	869.36	627.46	715.24	429.11	532.44	742.17	773.16
1991	341.55	553.06	788.76	638.17	646.33	800.53	574.42	629.38	536.52	587.82	775.65	742.42
1992	158.60	315.00	538.99	372.61	456.58	575.71	422.00	496.79	331.88	404.47	572.32	584.07
1993	418.10	665.26	1048.89	802.46	845.10	1116.07	779.06	890.26	701.85	773.77	973.55	965.59
1994	644.81	749.83	995.55	759.97	785.96	975.64	701.72	807.06	693.21	747.23	887.22	874.81
1995	440.22	619.49	716.51	555.80	630.60	761.25	557.86	641.09	479.95	505.94	705.38	739.20
1996	619.31	720.71	881.67	691.98	703.02	939.86	631.82	730.30	615.97	684.54	834.37	832.10
1997	643.74	727.89	930.62	620.17	662.77	888.45	679.00	811.29	481.09	554.42	721.64	793.44
1998	595.10	618.11	727.41	583.13	583.54	727.34	574.33	651.58	526.55	552.00	657.54	657.16
1999	814.51	819.94	1109.83	837.74	845.21	994.73	745.53	853.22	721.61	717.29	903.46	870.18
2000	732.95	853.60	995.12	816.75	809.88	987.36	720.76	784.21	709.75	728.83	882.19	862.89
2001	810.12	851.09	947.79	771.27	859.48	1032.26	711.72	726.54	715.32	778.30	953.85	955.00
2002	727.10	815.80	954.20	717.24	810.58	1000.56	833.70	869.38	641.39	684.45	881.45	913.98
2003	448.68	580.21	825.40	528.83	616.66	801.83	581.03	662.54	462.64	507.21	725.76	749.48
2004	533.96	571.05	831.95	578.28	564.78	750.78	542.43	666.33	497.01	563.61	683.56	698.35
2005	450.87	561.14	680.80	455.98	556.94	694.15	504.01	618.86	368.08	420.39	636.04	652.33
2006	665.54	791.17	957.79	710.72	806.28	1074.23	751.71	852.81	635.97	682.61	882.01	884.29
2007	592.36	697.54	982.11	683.56	712.34	864.32	661.78	829.88	570.35	600.19	793.89	802.36
2008	471.16	568.82	806.90	601.03	627.20	792.25	578.58	696.33	532.93	594.56	722.83	738.45
2009	540.66	587.74	769.47	603.15	648.68	811.70	640.17	745.19	557.50	579.90	728.60	747.00
2010	480.82	579.93	913.29	669.18	664.06	866.62	587.25	706.20	579.31	636.75	755.89	768.71
2011	766.16	847.85	1085.39	787.22	821.18	977.38	760.50	903.96	655.89	723.97	929.86	909.31
2012	929.06	966.89	1231.21	1009.07	1051.13	1272.82	852.99	930.37	856.83	967.00	1205.73	1133.69
2013	566.27	647.65	758.23	622.23	667.82	776.22	628.81	690.32	586.89	640.64	743.09	701.66
2014	379.06	545.90	748.12	598.33	630.80	698.01	521.11	603.77	525.22	600.68	748.86	686.58
2015	607.04	675.21	857.60	680.68	717.12	866.71	651.18	694.02	677.47	690.62	850.07	818.25
2016	477.76	529.30	612.38	495.46	599.72	622.84	512.18	540.55	478.46	554.86	726.00	654.88

(Continuación)

Año	E 13	E 14	E 15	E 16	E 17	E 18	E 19	E 20	E 21	E 22	E 23	E 24
1981	882.78	823.00	775.37	672.66	737.61	773.01	728.81	805.89	864.76	992.42	818.18	871.28
1982	854.12	811.56	701.19	641.12	726.64	840.82	650.82	697.61	798.74	925.50	745.10	861.65
1983	538.73	496.15	384.23	447.68	492.42	505.05	456.45	555.04	597.86	569.45	474.58	589.48
1984	1155.48	1114.48	1020.43	970.45	1055.09	1140.41	941.64	974.32	1025.63	1121.21	953.21	1081.43
1985	968.87	825.97	612.52	632.39	718.48	761.62	693.02	755.44	771.64	879.71	765.60	869.27
1986	766.38	630.46	860.65	794.75	865.73	990.26	753.37	701.24	710.91	724.55	619.33	711.31
1987	675.09	654.98	440.12	482.33	546.00	564.47	520.01	578.69	594.39	686.88	579.26	681.55
1988	686.96	609.38	556.09	505.16	507.99	502.28	439.12	498.38	558.80	646.16	587.15	654.28
1989	756.62	702.12	931.92	797.79	921.19	981.27	789.63	772.54	745.40	808.39	679.33	756.97
1990	792.78	720.17	562.80	567.22	595.77	628.04	572.46	634.50	683.06	770.71	676.30	750.62
1991	692.21	621.41	615.79	563.67	652.97	729.10	632.86	644.75	725.19	751.28	613.67	667.44
1992	596.09	543.79	286.86	333.20	390.50	466.61	445.18	498.94	576.97	658.68	554.35	627.48
1993	980.77	893.07	759.30	799.82	868.62	883.00	777.44	889.31	911.08	989.98	848.69	886.20
1994	926.60	897.22	920.35	825.50	885.99	948.52	838.46	852.82	817.84	875.46	766.23	877.57
1995	755.02	702.68	506.68	527.00	566.02	617.81	563.24	618.09	677.09	694.10	636.37	761.49
1996	828.96	765.79	849.15	788.42	834.11	835.18	766.39	810.37	841.69	916.66	746.52	774.88
1997	818.94	788.68	624.41	575.24	549.72	553.60	516.39	586.61	654.96	763.64	677.68	829.36
1998	699.82	735.72	730.90	690.22	665.85	655.01	586.80	636.80	687.00	721.03	649.06	707.87
1999	876.58	816.99	834.77	835.65	923.66	1017.20	806.36	757.72	753.34	845.92	736.23	794.35
2000	826.50	800.68	1019.30	905.39	947.16	996.48	836.69	820.97	824.46	847.64	714.70	815.85
2001	878.86	797.77	957.35	875.80	937.73	969.90	877.65	844.17	851.31	934.86	803.42	884.65
2002	980.49	895.81	748.42	752.58	751.24	769.39	705.14	728.38	768.00	885.96	845.27	961.90
2003	749.92	678.69	655.89	627.41	662.27	705.33	569.34	620.79	676.90	748.80	636.29	735.42
2004	748.80	737.03	638.76	558.18	590.99	633.83	613.59	722.77	767.97	827.24	688.14	769.51
2005	705.49	667.43	480.18	493.50	488.04	500.40	435.50	526.50	605.07	654.21	575.50	696.18
2006	960.60	933.19	817.61	798.99	833.86	907.78	774.59	818.14	848.95	913.26	803.08	888.73
2007	846.91	801.68	674.72	645.95	711.40	815.66	676.62	681.47	694.09	786.53	704.82	792.61
2008	808.33	810.76	677.53	627.94	714.53	763.88	690.90	702.06	702.67	757.85	668.41	765.84
2009	828.47	816.90	671.19	654.82	711.06	769.49	675.66	680.68	683.04	762.83	692.59	766.26
2010	802.86	800.34	541.17	558.24	641.20	725.50	680.48	766.23	771.81	829.06	675.99	773.84
2011	923.99	838.19	784.04	762.34	791.59	859.93	764.88	803.85	854.76	893.60	764.78	863.19
2012	1091.47	896.40	992.28	947.44	958.44	975.49	939.39	1095.23	1149.41	1205.74	979.94	951.10
2013	742.25	689.78	547.93	562.86	591.36	657.84	653.22	706.31	749.72	774.78	651.53	701.07
2014	705.83	677.70	678.11	665.98	694.33	706.94	599.35	656.25	687.93	770.01	647.22	725.24
2015	841.33	744.51	725.16	681.90	742.46	804.93	735.45	767.29	765.53	891.51	745.25	769.10
2016	632.22	584.46	475.34	484.37	509.07	545.54	530.13	586.46	672.33	708.23	605.93	709.00

(Continuación)

Año	E 25	E 26	E 27	E 28	E 29	E 30	E 31	E 32	E 33	E 34	E 35	E 36
1981	820.75	811.82	718.98	786.88	924.33	953.57	1000.64	1180.26	1138.24	863.31	779.29	1039.56
1982	848.02	796.54	652.92	731.40	1009.43	938.66	943.32	1125.24	976.39	773.45	711.64	1174.62
1983	566.03	670.28	532.95	540.38	634.74	653.41	642.29	604.35	509.43	533.19	522.92	674.01
1984	1016.04	985.21	885.05	995.52	1190.57	1191.41	1182.46	1327.25	1172.24	989.24	863.87	1052.86
1985	775.33	737.11	648.58	731.46	878.92	912.59	905.90	1003.30	885.67	741.02	739.48	982.94
1986	618.76	823.17	703.78	741.18	907.19	813.62	747.86	876.07	747.46	646.58	565.44	1016.85
1987	677.18	603.47	558.35	588.43	677.92	675.24	672.58	803.30	759.17	640.79	641.48	757.33
1988	611.46	606.23	451.01	478.80	558.28	571.84	658.49	853.40	820.00	628.98	578.71	724.83
1989	750.43	841.55	781.37	811.21	927.22	910.68	873.57	960.96	865.29	709.74	721.99	1048.51
1990	693.65	673.34	568.53	605.64	724.88	735.56	768.77	901.38	822.84	667.28	565.50	884.28
1991	604.38	684.57	583.75	634.18	793.77	786.12	760.07	940.28	821.54	635.37	561.01	864.66
1992	598.16	529.15	442.77	512.61	641.29	660.54	664.97	798.86	709.79	588.51	545.53	727.23
1993	825.01	1030.10	830.44	849.35	951.74	966.50	985.32	1053.41	952.74	760.95	721.25	1168.41
1994	867.15	879.36	800.80	825.75	983.91	938.97	899.46	941.37	849.54	772.28	793.28	1038.89
1995	719.08	685.67	553.82	635.10	789.50	721.73	718.39	847.31	751.69	678.61	671.16	817.23
1996	739.48	894.59	763.99	799.67	959.71	1007.34	954.43	1064.56	935.82	716.61	684.00	1185.86
1997	772.98	621.04	518.97	533.71	661.92	691.92	731.07	911.97	901.00	814.95	702.03	834.27
1998	704.53	709.84	621.59	654.02	725.84	723.52	756.14	861.19	779.92	655.19	619.99	726.38
1999	813.30	912.55	817.81	826.52	942.21	889.28	831.16	966.89	880.19	715.97	794.54	1063.00
2000	783.93	1004.59	857.56	881.16	993.84	942.59	850.42	989.97	893.99	741.94	684.40	1372.66
2001	854.68	901.61	802.05	839.15	944.21	951.03	908.50	1054.83	993.98	832.13	845.55	1178.34
2002	930.08	860.63	723.73	755.29	842.59	826.39	863.59	1070.04	1054.43	933.79	903.91	1000.41
2003	719.24	756.09	601.43	594.17	760.18	769.66	773.46	936.27	859.33	731.08	696.94	944.61
2004	751.24	693.20	608.46	669.69	863.84	877.57	916.85	1052.45	954.06	762.48	735.11	919.15
2005	695.80	701.07	511.46	495.68	606.44	650.97	717.90	861.19	780.57	650.44	607.29	777.97
2006	913.39	863.12	806.70	852.54	948.07	957.57	985.09	1055.98	931.42	776.82	839.00	1033.98
2007	807.49	759.31	661.19	736.41	890.13	801.69	778.60	998.41	904.77	738.46	713.48	966.31
2008	844.62	692.83	673.32	739.72	831.96	783.76	751.55	867.33	842.89	725.68	776.00	846.82
2009	834.30	778.02	698.34	750.66	840.49	772.01	759.57	882.37	773.02	689.64	769.46	982.76
2010	829.06	708.87	687.99	761.45	893.01	891.87	894.32	950.88	890.80	686.57	747.25	909.01
2011	821.09	844.74	743.46	801.43	1040.63	1024.52	980.89	1130.75	948.24	795.14	742.87	1191.29
2012	838.74	1160.30	939.01	943.16	1145.32	1230.25	1250.19	1378.52	1121.24	810.12	782.79	1266.80
2013	698.90	622.76	594.07	674.52	789.00	798.82	818.93	897.72	829.63	730.37	728.29	782.03
2014	724.70	809.21	705.18	728.39	818.63	835.49	866.64	889.79	828.05	689.48	737.14	1061.60
2015	701.30	758.58	698.92	778.53	903.82	917.27	969.84	1019.79	903.68	722.65	796.36	962.39
2016	642.02	609.52	502.27	556.33	739.54	761.17	745.65	845.29	744.27	729.58	682.84	634.60

(Continuación)

Año	E 37	E 38	E 39	E 40	E 41	E 42	E 43	E 44	E 45	E 46	E 47	E 48
1981	969.83	826.67	1156.84	996.43	1109.89	1008.76	1040.73	898.70	827.98	915.15	887.80	1014.61
1982	988.59	781.53	1163.77	948.58	991.08	812.18	784.61	714.95	726.57	782.79	834.75	1200.51
1983	674.47	575.13	752.05	698.30	655.69	391.80	322.58	421.21	478.57	559.72	580.47	670.98
1984	754.66	717.04	1049.24	1029.86	1248.95	1028.25	956.26	882.93	822.18	861.72	583.72	649.82
1985	876.50	766.67	991.14	853.26	927.47	750.83	713.11	731.18	759.39	742.46	822.29	1102.25
1986	877.25	671.58	879.52	738.89	710.51	564.17	575.61	587.24	582.84	614.42	727.94	983.78
1987	732.32	611.91	802.30	701.37	760.53	649.61	665.59	638.14	665.99	729.11	650.81	777.24
1988	593.70	516.26	685.32	610.48	759.23	712.84	724.66	662.96	609.37	611.42	584.96	734.85
1989	955.69	796.92	956.75	792.56	909.00	766.96	734.93	701.92	729.81	751.98	768.53	1012.78
1990	800.17	648.08	861.02	770.27	848.94	736.44	718.12	654.01	587.27	597.11	743.95	926.95
1991	786.09	669.10	879.77	707.45	830.04	698.96	673.94	597.08	602.87	584.97	679.39	897.26
1992	709.24	629.63	839.21	678.26	728.65	567.99	554.14	560.23	562.58	630.02	671.10	877.03
1993	1050.39	884.68	1100.74	933.24	991.81	755.85	725.97	710.24	711.52	761.50	924.43	1112.55
1994	892.22	810.39	1039.68	920.99	917.58	710.42	677.72	731.85	780.24	826.15	744.76	916.08
1995	790.14	705.30	936.64	771.61	751.66	599.65	598.38	609.14	649.02	729.72	686.76	887.19
1996	1000.56	789.79	1059.61	933.57	1012.89	821.28	779.00	715.06	693.25	706.81	832.99	1053.93
1997	691.23	573.78	793.78	747.73	880.85	772.78	781.39	763.54	748.99	690.03	716.96	892.99
1998	730.48	628.62	835.75	809.00	852.15	743.92	690.50	659.76	602.79	664.44	606.04	719.37
1999	1063.36	903.01	1016.03	760.06	889.14	728.35	712.96	704.12	776.49	811.35	934.08	1217.20
2000	1160.98	891.55	1029.53	904.10	862.01	729.60	732.34	712.22	681.88	719.64	1042.06	1246.87
2001	943.61	782.42	943.05	914.79	993.34	865.51	895.91	862.23	891.40	973.86	927.38	1049.03
2002	903.59	726.38	936.19	922.57	1049.21	925.17	928.79	946.30	928.73	991.42	849.75	965.33
2003	860.61	626.68	852.90	731.69	868.27	716.12	704.91	701.22	747.29	791.57	818.43	1090.53
2004	880.77	734.51	1017.31	969.46	1018.12	846.49	850.68	808.35	794.71	834.72	792.54	969.07
2005	761.42	590.85	772.08	669.75	755.36	607.73	621.55	640.27	580.87	623.96	698.83	892.18
2006	966.85	851.99	1078.27	890.16	997.97	860.97	852.97	786.90	829.44	905.29	814.08	991.13
2007	954.52	787.67	980.62	777.00	879.31	776.04	797.68	755.62	727.33	771.73	861.77	1046.60
2008	791.77	744.92	911.45	782.45	788.27	685.08	701.39	730.00	743.14	842.17	673.58	832.10
2009	902.19	791.04	1021.31	848.01	877.90	742.80	689.25	675.67	721.55	875.93	825.64	967.26
2010	892.69	838.05	1010.06	866.18	921.89	735.34	759.37	689.17	765.22	828.17	737.75	999.86
2011	1025.73	879.02	1206.81	935.89	1009.67	806.61	764.21	761.02	746.25	817.39	959.69	1311.35
2012	1230.61	943.85	1272.46	1195.16	1320.39	965.07	857.88	779.55	785.35	880.93	1174.31	1396.13
2013	766.13	680.13	886.11	873.20	903.93	781.62	766.63	748.46	788.70	891.83	770.77	865.32
2014	979.32	783.11	914.35	833.69	917.84	700.75	663.02	657.47	742.71	948.80	912.35	1181.85
2015	867.28	749.97	953.98	908.44	1021.21	869.42	785.64	727.04	799.94	986.88	866.81	1019.90
2016	672.56	597.06	820.57	826.55	786.50	601.53	594.99	683.24	691.80	784.81	585.19	749.37

(Continuación)

Año	E 49	E 50	E 51	E 52	E 53	E 54	E 55	E 56	E 57	E 58	E 59	E 60
1981	733.86	1018.84	1011.30	1010.59	1060.99	956.62	1164.94	914.29	775.33	692.22	912.76	1473.93
1982	704.77	904.78	840.71	925.88	874.58	717.92	920.58	745.25	796.25	702.93	894.83	1608.22
1983	504.21	627.72	655.82	622.78	471.45	363.76	518.43	530.29	517.51	470.64	517.56	737.69
1984	416.26	647.60	801.30	1005.84	956.32	855.91	1011.20	846.75	430.84	362.01	530.93	1214.84
1985	699.90	932.44	895.29	849.63	869.53	770.10	1012.88	780.94	821.00	803.54	974.37	1401.57
1986	593.23	677.72	674.80	677.98	566.19	494.49	656.12	548.14	646.97	542.61	605.29	918.93
1987	536.92	679.64	708.49	733.44	731.15	691.31	908.14	736.51	572.04	556.04	693.57	1114.12
1988	450.59	581.64	621.74	727.90	793.29	741.55	889.14	674.29	564.62	521.95	650.66	1047.42
1989	749.07	856.79	815.90	806.01	777.46	705.20	934.98	771.62	706.03	698.92	824.82	1173.07
1990	614.66	771.08	739.86	760.18	767.43	750.95	847.72	657.17	780.39	579.45	685.74	1123.13
1991	602.20	731.68	683.95	739.95	695.84	656.62	788.16	628.26	669.03	596.94	688.39	1077.11
1992	594.30	740.62	687.70	703.15	614.28	566.63	712.18	632.36	741.38	605.94	687.87	1044.73
1993	805.81	1025.89	948.16	893.39	805.16	721.80	943.52	786.73	852.47	829.38	961.72	1471.21
1994	685.55	933.57	937.34	887.59	770.23	710.98	925.79	771.87	682.51	687.31	870.41	1396.91
1995	653.74	794.92	755.79	687.49	634.85	595.27	774.73	678.92	683.58	633.46	740.64	1155.48
1996	698.25	871.17	826.67	835.26	798.67	740.21	950.75	738.97	763.32	643.96	764.09	1192.21
1997	603.58	764.03	782.87	845.07	763.84	732.68	905.24	744.33	783.22	716.88	834.86	1292.67
1998	595.26	747.98	813.02	782.26	714.99	656.59	805.51	685.68	614.30	579.70	666.33	919.68
1999	826.06	945.73	883.22	822.11	767.53	698.25	939.05	799.21	932.99	908.76	1102.58	1479.51
2000	837.94	918.19	871.84	791.01	706.36	733.53	876.25	702.83	958.83	804.25	894.56	1307.39
2001	687.37	936.16	971.00	1011.90	974.21	940.23	1167.05	938.29	801.08	771.92	1040.42	1742.02
2002	741.29	960.92	1025.95	1059.79	979.43	966.96	1237.02	1033.30	865.92	858.21	1027.03	1587.92
2003	700.51	806.64	824.09	859.01	850.78	791.10	999.79	795.94	871.80	846.07	910.80	1344.26
2004	741.96	925.91	952.99	904.36	882.61	864.60	1096.33	864.46	813.86	765.24	882.44	1358.24
2005	628.08	724.01	733.31	689.82	633.33	662.57	851.83	659.38	700.38	590.31	674.74	1054.77
2006	738.93	931.32	895.13	884.33	908.64	849.06	1116.97	902.27	768.01	748.49	895.29	1301.00
2007	756.23	835.45	798.01	782.66	814.22	786.06	993.56	774.62	735.37	692.87	762.42	1115.21
2008	670.25	827.07	771.68	697.94	705.90	750.58	1033.46	854.00	622.50	665.08	760.99	1070.52
2009	719.91	909.41	859.85	769.42	784.06	687.91	922.39	816.56	753.94	720.95	832.91	1137.39
2010	750.95	900.33	859.13	882.51	878.52	771.02	1013.96	819.67	730.59	689.58	893.60	1573.11
2011	836.86	963.63	916.62	949.89	896.60	855.51	1031.17	820.23	1026.68	823.37	937.63	1335.88
2012	1004.28	1142.22	1181.30	1017.69	854.12	819.93	1057.27	874.78	1172.52	1074.41	1097.80	1410.13
2013	693.22	883.23	878.15	844.58	848.94	884.34	1145.83	977.00	793.39	758.41	851.71	1207.16
2014	758.29	841.15	790.06	840.18	739.39	726.84	970.53	887.05	878.53	785.57	844.32	1232.11
2015	722.02	868.56	848.36	887.06	914.66	835.69	1046.58	954.57	888.88	824.98	882.74	1130.72
2016	617.99	791.03	837.22	761.88	590.82	558.59	814.40	771.37	702.47	685.08	784.16	1122.23

(Continuación)

Año	E 61	E 62	E 63	E 64	E 65	E 66	E 67	E 68	E 69	E 70	E 71	E 72
1981	1026.47	840.97	739.39	859.87	988.01	725.97	713.69	999.05	1016.63	875.85	710.80	668.92
1982	991.15	760.89	629.96	697.20	1011.18	709.67	716.20	969.08	973.42	983.39	720.27	622.25
1983	567.05	461.81	310.39	443.51	716.25	506.85	488.50	537.51	432.38	408.04	379.78	340.15
1984	1002.76	768.22	637.84	716.50	731.82	413.36	352.25	647.62	736.04	811.84	638.64	611.66
1985	949.27	747.10	694.52	784.44	948.80	750.93	736.20	1003.97	945.65	820.86	706.26	631.94
1986	703.87	518.68	431.58	485.86	741.39	598.92	578.07	682.65	597.55	643.20	513.37	403.87
1987	721.91	620.64	543.97	706.98	715.19	546.68	536.86	673.45	658.70	605.36	497.10	468.60
1988	794.79	646.39	615.01	691.13	691.17	542.03	533.97	768.79	756.27	741.64	607.48	522.43
1989	745.10	603.86	591.41	757.66	737.84	651.88	680.96	839.83	744.13	631.77	555.36	565.80
1990	755.61	597.58	591.44	658.96	921.74	675.92	595.05	753.08	742.19	662.13	519.18	519.56
1991	712.65	556.81	516.68	603.82	765.49	611.21	605.09	715.53	682.61	607.45	509.53	493.22
1992	770.04	587.05	450.68	538.29	836.19	648.84	627.72	707.34	683.41	623.22	498.53	439.56
1993	950.64	710.81	627.83	782.90	1035.79	795.85	796.30	934.70	895.47	753.92	626.29	612.24
1994	1028.82	731.11	672.11	775.16	792.13	650.71	670.64	907.38	961.39	922.34	718.07	668.30
1995	733.55	576.91	507.43	607.00	755.71	602.32	632.47	750.58	707.32	605.05	519.00	467.85
1996	785.25	601.89	543.41	706.39	955.95	688.38	655.18	788.02	682.15	638.51	504.53	568.88
1997	892.12	680.33	571.14	677.95	934.44	784.91	790.07	996.62	954.12	814.14	591.69	532.21
1998	602.73	506.05	476.68	610.87	659.55	576.42	560.72	631.75	566.41	424.85	400.43	442.13
1999	813.36	589.28	544.08	783.33	974.51	858.97	903.51	1197.38	1098.19	703.66	534.06	567.20
2000	815.29	637.19	594.13	663.05	1009.82	811.55	787.60	929.88	831.21	779.81	643.73	611.64
2001	1124.61	897.71	827.08	936.76	976.03	782.75	784.23	1071.17	1118.54	977.09	776.89	781.42
2002	1081.81	831.57	797.07	992.38	962.56	846.21	910.58	1140.75	1084.96	895.44	762.36	764.36
2003	877.22	739.12	676.34	749.27	988.11	837.87	914.91	1032.86	834.67	759.73	669.14	624.36
2004	848.84	664.08	664.36	798.68	951.10	743.45	747.24	891.83	803.84	693.35	585.55	582.35
2005	764.40	594.21	532.99	629.82	826.19	657.18	614.43	708.69	586.71	582.57	498.90	450.80
2006	937.90	777.25	739.18	893.41	905.76	719.19	745.62	938.23	834.08	767.93	682.08	669.00
2007	768.68	653.86	606.03	732.21	876.17	698.29	712.49	820.99	720.41	626.47	623.89	584.18
2008	725.16	639.79	623.84	851.78	770.90	629.68	681.37	799.99	750.05	631.47	621.80	642.60
2009	735.98	612.20	573.60	791.44	825.24	726.91	766.37	922.64	842.28	663.78	620.90	617.12
2010	1059.82	841.97	680.71	821.64	916.19	700.63	707.56	966.30	933.52	927.60	717.43	689.25
2011	962.26	781.68	755.10	832.97	1172.50	941.44	926.06	1097.58	941.68	881.50	798.95	779.79
2012	835.14	675.57	630.10	840.60	1354.03	1091.88	1103.10	1096.90	835.96	629.23	646.55	701.70
2013	890.85	817.88	781.66	947.08	957.44	760.54	824.77	936.28	823.23	780.00	741.46	830.46
2014	835.46	656.75	572.17	718.58	1085.68	753.68	719.52	835.31	688.14	655.06	560.09	624.23
2015	793.76	697.55	669.01	839.94	1025.75	835.43	843.02	931.88	715.54	594.58	605.91	697.21
2016	749.58	527.41	440.71	584.68	771.33	617.61	695.63	848.04	714.63	584.08	480.82	488.94

(Continuación)

Año	E 73	E 74	E 75	E 76	E 77	E 78	E 79	E 80	E 81	E 82	E 83	E 84
1981	619.97	796.52	1347.67	611.52	678.97	672.47	1643.71	1107.51	1557.41	1727.18	649.49	605.17
1982	507.00	714.88	1152.31	484.35	602.23	607.31	1686.74	1108.67	1444.32	1726.10	508.70	511.44
1983	427.57	600.53	873.22	365.29	405.60	424.27	1221.75	830.92	1129.53	1300.68	455.02	458.15
1984	304.68	558.71	1012.41	503.13	594.35	590.01	1395.59	834.26	1319.51	1711.40	644.13	576.78
1985	550.20	748.61	1244.77	586.50	644.58	618.85	1704.44	1072.42	1495.66	1752.43	609.74	594.66
1986	454.68	619.31	876.83	359.57	442.51	466.91	1373.64	903.30	1176.59	1366.04	401.24	444.02
1987	441.79	619.05	990.03	403.39	443.63	469.05	1513.20	916.07	1215.20	1458.29	465.21	468.02
1988	365.97	561.30	902.02	435.12	516.57	506.43	1081.34	728.48	1053.99	1283.50	465.36	467.20
1989	505.93	698.63	1082.54	486.36	503.48	531.46	1296.05	894.12	1203.72	1414.35	539.22	537.49
1990	486.70	691.79	1007.15	425.67	489.12	470.84	1594.68	940.04	1269.60	1510.39	489.32	520.06
1991	461.27	621.26	875.33	416.91	504.03	507.25	1367.14	860.71	1157.45	1358.78	461.74	510.02
1992	512.58	648.73	1051.45	436.59	477.39	470.55	1410.72	937.26	1152.79	1349.70	481.35	472.54
1993	591.22	795.00	1162.80	506.49	592.01	592.59	1777.87	1086.73	1476.38	1595.88	576.33	571.39
1994	527.60	761.09	1240.39	602.74	631.43	642.00	1441.56	954.47	1329.53	1607.35	620.58	610.26
1995	482.64	643.22	1046.36	424.02	467.31	483.51	1377.25	899.76	1196.04	1437.83	493.92	471.61
1996	489.04	765.82	1053.47	412.50	444.53	495.57	1561.96	945.09	1369.97	1667.67	470.71	484.02
1997	614.59	939.92	1361.84	660.66	658.40	608.86	1417.94	1036.32	1528.38	1790.46	663.78	616.74
1998	517.36	638.69	885.86	366.90	385.46	440.29	1317.87	903.00	1137.24	1137.35	482.08	484.86
1999	660.28	996.81	1477.12	661.90	586.41	564.15	1564.90	1088.28	1643.81	1950.55	681.14	619.21
2000	555.11	833.97	1164.59	498.99	560.45	621.24	1500.94	1018.82	1380.17	1583.38	499.16	522.94
2001	634.67	890.35	1332.41	655.27	707.18	764.12	1578.32	1086.62	1534.46	1657.16	642.84	665.62
2002	684.83	949.77	1500.32	697.75	763.82	779.83	1736.78	1142.85	1562.25	1728.42	740.26	742.16
2003	611.94	862.62	1268.98	510.54	567.66	606.70	1796.17	1122.60	1479.25	1733.43	567.36	549.05
2004	564.58	769.52	1165.68	488.45	548.72	584.46	1726.66	1059.61	1423.50	1589.88	533.67	522.16
2005	491.63	648.34	1024.08	380.59	455.48	454.09	1879.91	985.14	1225.31	1378.15	416.03	419.43
2006	583.15	826.02	1259.57	545.87	640.75	708.37	1663.68	1026.64	1465.27	1671.51	658.95	659.65
2007	578.63	787.18	1251.71	476.52	553.65	615.05	1936.58	1096.21	1454.55	1725.99	580.42	550.20
2008	538.43	746.02	1121.00	506.85	574.42	620.98	1500.98	985.85	1347.85	1463.07	558.97	555.97
2009	602.02	852.94	1292.34	598.66	623.44	663.98	1590.80	1008.94	1452.45	1678.28	690.18	627.62
2010	576.14	861.32	1403.11	578.36	621.19	642.90	1673.55	1067.37	1489.83	1815.45	608.90	577.64
2011	749.40	1056.32	1621.98	654.02	713.38	740.25	1900.66	1310.77	1836.77	2172.50	699.30	664.09
2012	764.03	1055.51	1439.82	570.17	637.54	711.04	2090.50	1259.06	1715.26	1781.67	616.33	637.93
2013	675.57	980.42	1311.93	689.14	715.03	860.13	1453.86	1047.02	1465.49	1604.28	755.49	784.77
2014	553.47	791.20	1019.10	464.14	515.33	657.76	1487.43	994.72	1394.49	1566.87	505.60	585.00
2015	631.58	882.44	1107.50	512.27	531.79	633.74	1315.07	955.06	1311.40	1534.65	571.87	598.09
2016	452.06	698.13	1009.71	524.14	541.24	582.19	1118.54	721.54	1017.50	1236.07	515.82	571.99

(Continuación)

Año	E 85	E 86	E 87	E 88	E 89	E 90	E 91	E 92	E 93	E 94	E 95
1981	1192.52	2455.88	1434.28	1240.83	1341.16	1114.86	1707.89	883.13	1338.64	1171.07	1073.43
1982	1219.72	2851.08	1619.20	1334.25	1343.38	1145.86	1617.16	836.92	1553.52	1336.03	1239.45
1983	937.86	2096.16	1162.83	1036.21	1040.13	864.77	1247.35	736.70	1225.14	1066.40	922.85
1984	1103.20	2372.26	1505.99	1188.52	1383.57	1150.70	1678.95	839.77	1360.04	1223.76	1184.46
1985	1149.72	2470.22	1558.18	1326.38	1497.75	1232.57	1719.28	908.67	1418.98	1280.36	1243.07
1986	1039.41	2211.82	1323.75	1083.43	1202.18	1032.84	1380.05	795.22	1292.45	1149.70	1087.12
1987	948.85	2285.45	1343.90	1098.43	1174.15	1012.61	1483.86	767.68	1236.02	1105.31	1048.97
1988	930.18	1595.91	971.07	854.28	981.17	890.86	1345.29	720.04	953.16	891.14	885.06
1989	1044.26	2044.06	1135.55	1037.87	1154.00	1020.77	1545.14	857.16	1156.12	1018.22	1022.04
1990	1152.05	2726.50	1437.56	1179.06	1295.23	1109.25	1560.27	892.01	1485.16	1309.83	1094.48
1991	1104.00	2235.96	1364.65	1078.78	1156.90	1008.83	1415.30	834.97	1277.22	1125.53	1018.47
1992	971.33	2281.02	1314.22	1108.66	1118.57	947.91	1362.97	770.06	1303.33	1086.73	998.46
1993	1123.75	2736.49	1680.68	1308.62	1364.82	1138.20	1602.01	900.69	1523.76	1339.86	1214.62
1994	1134.37	2016.23	1383.06	1118.49	1269.23	1108.21	1558.31	948.73	1268.46	1157.31	1150.99
1995	973.59	2306.14	1214.62	1076.54	1105.44	943.44	1388.31	748.68	1260.90	1055.13	961.86
1996	1094.94	2378.70	1432.73	1139.26	1202.67	1072.77	1536.33	830.06	1315.27	1122.16	1093.78
1997	1104.38	1890.20	1355.49	1167.66	1281.37	1126.87	1449.02	868.32	1226.24	1148.21	1070.84
1998	965.10	2004.13	1219.08	1150.92	1140.12	931.91	1359.72	806.22	1281.30	1145.23	1024.88
1999	1129.75	2236.95	1424.00	1259.45	1459.36	1279.22	1681.99	928.01	1283.50	1172.32	1205.54
2000	1097.02	2089.81	1357.14	1139.00	1183.22	1037.41	1295.76	764.49	1235.27	1075.46	1011.11
2001	1339.68	2325.31	1458.75	1252.78	1346.50	1110.51	1464.91	895.85	1400.81	1301.19	1134.53
2002	1442.06	2708.35	1595.44	1310.29	1364.00	1155.14	1860.51	1046.71	1539.50	1345.05	1208.35
2003	1150.80	2626.72	1584.35	1288.12	1400.02	1205.08	1655.72	884.62	1537.16	1320.35	1239.66
2004	1089.84	2851.19	1535.19	1285.98	1284.24	1058.72	1532.48	811.14	1538.37	1325.37	1151.29
2005	930.90	3053.47	1731.24	1265.98	1238.99	940.12	1404.73	728.33	1656.34	1404.67	1233.68
2006	1266.05	2623.82	1483.07	1226.47	1324.14	1130.95	1834.47	1013.37	1519.34	1297.50	1196.86
2007	1204.15	3155.72	1713.02	1370.12	1413.64	1135.25	1642.95	902.18	1737.91	1497.14	1323.60
2008	1094.19	2348.12	1401.87	1142.71	1211.63	992.15	1472.69	796.54	1421.78	1257.50	1118.02
2009	1138.85	2417.56	1377.92	1146.07	1215.63	1054.50	1627.79	910.41	1421.33	1166.84	1074.96
2010	1144.31	2661.90	1545.07	1245.85	1304.59	1118.97	1569.93	871.06	1511.34	1307.76	1166.28
2011	1377.37	2541.18	1552.51	1357.20	1554.95	1364.85	1957.13	1010.02	1438.26	1311.11	1317.30
2012	1321.87	2790.59	1679.28	1322.90	1368.34	1104.37	1615.52	923.51	1443.38	1260.04	1124.02
2013	1348.48	1920.67	1389.28	1166.05	1356.94	1186.41	1709.62	1041.93	1311.23	1265.59	1220.21
2014	1377.42	2293.95	1464.43	1201.43	1353.65	1176.53	1634.33	966.16	1390.56	1264.41	1223.63
2015	1230.45	1849.32	1199.05	1089.25	1266.89	1110.13	1573.20	939.71	1129.49	1104.84	1073.60
2016	1129.96	1647.78	1080.35	861.10	937.42	871.06	1335.74	871.09	1028.79	950.47	902.93

(Continuación)

Año	E 96	E 97
1981	1112.07	1536.16
1982	1129.92	1435.83
1983	988.33	1295.86
1984	1151.07	1514.04
1985	1200.26	1609.31
1986	1036.17	1357.61
1987	1019.83	1393.79
1988	892.97	1158.41
1989	1032.50	1449.02
1990	1146.96	1343.50
1991	986.81	1305.98
1992	1000.11	1324.07
1993	1178.91	1570.51
1994	1128.13	1481.61
1995	996.78	1305.64
1996	1066.76	1403.53
1997	1031.94	1227.90
1998	1043.13	1324.27
1999	1158.91	1510.90
2000	982.93	1205.31
2001	1119.64	1395.03
2002	1291.62	1738.19
2003	1213.50	1522.63
2004	1105.35	1395.03
2005	1087.08	1428.82
2006	1241.48	1689.47
2007	1238.70	1601.60
2008	1063.04	1353.34
2009	1140.99	1547.32
2010	1100.45	1345.69
2011	1244.98	1529.22
2012	1153.63	1535.27
2013	1263.99	1419.41
2014	1224.17	1415.73
2015	1176.54	1388.13
2016	935.23	1178.87

Anexo 3: Supuesto del Análisis Regional de Frecuencia - test de Mann Kendall

Región 1:

Nº	Estación	Tau de kendall	S	Var(S)	P	Hipótesis Nula
1	E 1	0.175	110	5390.00	0.14	Aceptado
2	E 2	0.035	22	5390.00	0.77	Aceptado
3	E 3	-0.013	-8.00	5390.00	0.92	Aceptado
4	E 4	-0.003	-2.00	5390.00	0.99	Aceptado
5	E 5	0.03	22.00	5390.00	0.77	Aceptado
6	E 6	-0.06	-40.00	5390.00	0.60	Aceptado
7	E 7	0.0413	26.00	5390.00	0.73	Aceptado
8	E 8	0.03	18.00	5390.00	0.82	Aceptado
9	E 9	0.09	54.00	5390.00	0.47	Aceptado
10	E 10	0.08	50.00	5390.00	0.50	Aceptado
11	E 11	0.02	10.00	5390.00	0.90	Aceptado
12	E 12	-0.07	-46.00	5390.00	0.54	Aceptado
13	E 13	0.01	4.00	5390.00	0.97	Aceptado
14	E 14	0.08	48.00	5390.00	0.52	Aceptado
15	E 15	-0.01	-6.00	5390.00	0.95	Aceptado
16	E 16	0.03	18.00	5390.00	0.82	Aceptado
17	E 17	-0.02	-10.00	5390.00	0.90	Aceptado
18	E 18	-0.03	-20.00	5390.00	0.80	Aceptado
19	E 19	0.03	20.00	5390.00	0.80	Aceptado
20	E 20	0.05	32.00	5390.00	0.67	Aceptado
21	E 21	0.03	16.00	5390.00	0.84	Aceptado
22	E 22	0.03	16.00	5390.00	0.84	Aceptado
23	E 23	0.02	12.00	5390.00	0.88	Aceptado
24	E 24	0.03	18.00	5390.00	0.82	Aceptado
25	E 25	0.10	62.00	5390.00	0.41	Aceptado
26	E 26	0.03	22.00	5390.00	0.77	Aceptado
27	E 27	0.06	38.00	5390.00	0.61	Aceptado
28	E 28	0.09	58.00	5390.00	0.44	Aceptado
29	E 29	0.03	16.00	5390.00	0.84	Aceptado
30	E 30	0.06	36.00	5390.00	0.63	Aceptado
31	E 31	0.09	58.00	5390.00	0.44	Aceptado
32	E 32	0.03	22.00	5390.00	0.77	Aceptado
33	E 33	0.04	26.00	5390.00	0.73	Aceptado
34	E 34	0.10	64.00	5390.00	0.39	Aceptado
35	E 35	0.19	118.00	5390.00	0.05	Aceptado
36	E 36	0.01	4.00	5390.00	0.97	Aceptado
37	E 37	0.12	74.00	5390.00	0.32	Aceptado
38	E 38	0.14	88.00	5390.00	0.24	Aceptado
39	E 39	0.03	20.00	5390.00	0.80	Aceptado
40	E 40	0.12	76.00	5390.00	0.31	Aceptado
41	E 41	0.15	96.00	5390.00	0.20	Aceptado

(Continuación)

Nº	Estación	Tau de kendall	S	Var(S)	P	Hipótesis Nula
42	E 42	0.10	62.00	5390.00	0.41	Aceptado
43	E 43	0.08	48.00	5390.00	0.52	Aceptado
44	E 44	0.13	84.00	5390.00	0.26	Aceptado
45	E 45	0.21	132.00	5390.00	0.07	Aceptado
46	E 46	0.37	232.00	5390.00	0.00	Rechazado
47	E 47	0.22	140.00	5390.00	0.06	Aceptado
48	E 48	0.14	86.00	5390.00	0.25	Aceptado
49	E 49	0.34	116.00	5390.00	0.34	Aceptado
50	E 50	0.21	132.00	5390.00	0.07	Aceptado
51	E 51	0.22	136.00	5390.00	0.07	Aceptado
52	E 52	0.11	70.00	5390.00	0.35	Aceptado
53	E 53	0.07	46.00	5390.00	0.54	Aceptado
54	E 54	0.18	114.00	5390.00	0.12	Aceptado
55	E 55	0.17	86.00	5390.00	0.23	Aceptado
56	E 56	0.18	90.00	5390.00	0.11	Aceptado
57	E 57	0.31	194.00	5390.00	0.01	Rechazado
58	E 58	0.36	228.00	5390.00	0.00	Rechazado
59	E 59	0.23	144.00	5390.00	0.05	Aceptado
60	E 60	0.06	38.00	5390.00	0.61	Aceptado
61	E 61	0.05	34.00	5390.00	0.65	Aceptado
62	E 62	0.11	66.00	5390.00	0.38	Aceptado
63	E 63	0.15	94.00	5390.00	0.21	Aceptado
64	E 64	0.28	108.00	5390.00	0.16	Aceptado
65	E 65	0.26	114.00	5390.00	0.26	Aceptado
66	E 66	0.33	210.00	5390.00	0.00	Rechazado
67	E 67	0.39	248.00	5390.00	0.00	Rechazado
68	E 68	0.24	105.00	5390.00	0.42	Aceptado
69	E 69	0.03	20.00	5390.00	0.80	Aceptado
70	E 70	-0.08	-50.00	5390.00	0.50	Aceptado
71	E 71	0.11	70.00	5390.00	0.35	Aceptado
72	E 72	0.32	102.00	5390.00	0.06	Aceptado
73	E 73	0.40	250.00	5390.00	0.00	Rechazado
74	E 76	0.25	60.00	5390.00	0.30	Aceptado
75	E 77	0.17	106.00	5390.00	0.15	Aceptado

Región 2:

N°	Estación	Tau de kendall	S	Var(S)	p	Hipótesis Nula
1	E 74	0.42	266.00	5390.00	0.00	Rechazado
2	E 75	0.28	178.00	5390.00	0.02	Rechazado
3	E 78	0.36	226.00	5390.00	0.00	Rechazado
4	E 79	0.20	126.00	5390.00	0.09	Aceptado
5	E 80	0.23	146.00	5390.00	0.11	Aceptado
6	E 81	0.19	120.00	5390.00	0.11	Aceptado
7	E 82	0.13	80.00	5390.00	0.28	Aceptado
8	E 83	0.26	104.00	5390.00	0.26	Aceptado
9	E 84	0.16	64.00	5390.00	0.24	Aceptado
10	E 85	0.31	108.00	5390.00	0.07	Aceptado
11	E 86	0.04	28.00	5390.00	0.71	Aceptado
12	E 87	0.04	84.00	5390.00	0.26	Aceptado
13	E 88	0.16	98.00	5390.00	0.19	Aceptado
14	E 89	0.15	92.00	5390.00	0.22	Aceptado
15	E 90	0.11	68.00	5390.00	0.36	Aceptado
16	E 91	0.12	78.00	5390.00	0.29	Aceptado
17	E 92	0.21	96.00	5390.00	0.08	Aceptado
18	E 93	0.13	80.00	5390.00	0.28	Aceptado
19	E 94	0.16	98.00	5390.00	0.19	Aceptado
20	E 95	0.18	114.00	5390.00	0.12	Aceptado
21	E 96	0.15	58.00	5390.00	0.32	Aceptado
22	E 97	0.04	28.00	5390.00	0.71	Aceptado

Anexo 4: Distribuciones Teóricas y sus Relaciones

Formulas por distribución, L-momentos y sus ratios para las distribuciones analizadas.

Parámetro 3: localización (ε, u^*), escala (α, σ^*), forma (k, γ)

Distribución	Función de distribución F(x) o función cuantil x(F)	L-momentos y ratios de L-momentos	Estimación de parámetros
Pareto Generalizado (GPA) (tres parámetros: ξ (localización), α (escala) y k (forma))	$k \neq 0$: $x(F) = \xi + \alpha \cdot \frac{1 - [1 - F(X)]^k}{k}$ $k = 0$: $x(F) = \xi - \alpha \cdot \log(1 - F(X))$	L-momentos está definido para $k > -1$. $\lambda_1 = \xi + \frac{\alpha}{1 + k}$ $\lambda_2 = \frac{\alpha}{(1 + k) \cdot (2 + k)}$ $\tau_3 = \frac{1 - k}{3 + k}$ $\tau_4 = \frac{(1 - k) \cdot (2 - k)}{(3 + k) \cdot (4 + k)}$ La relación entre τ_3 y τ_4 esta dado por: $\tau_4 = \frac{\tau_3(1 + 5\tau_3)}{5 + \tau_3}$	Si ξ es conocido, los dos parámetros k y α están dados por: $k = (\lambda_1 - \xi) / \lambda_2 - 2$ $\alpha = (1 + k)(\lambda_1 - \xi)$ Si ξ no es conocido, los tres parámetros estan dados por: $k = (1 - 3\tau_3) / (1 - \tau_3)$ $\alpha = (1 + k)(2 + k)\lambda_2$ $\xi = \lambda_1 - (2 + k)\lambda_2$

<p>Valor Extremo Generalizado (GEV) (tres parámetros: ξ (localización), α (escala) y k (forma))</p>	<p>$k \neq 0$:</p> $x(F) = \xi + \alpha \cdot \frac{1 - [-\log F(X)]^k}{k}$ <p>$k = 0$:</p> $x(F) = \xi - \alpha \cdot \log(-\log F(X))$	<p>L-momentos está definido para $k > -1$</p> $\lambda_1 = \xi + \alpha \cdot \frac{1 - \Gamma(1+k)}{k}$ $\lambda_2 = \alpha \cdot \frac{(1 - 2^{-k}) \cdot \Gamma(1+k)}{k}$ $\tau_3 = \frac{2 \cdot (1 - 3^{-k})}{1 - 2^{-k}} - 3$ $\tau_4 = \frac{5(1 - 4^{-k}) - 10(1 - 3^{-k}) + 6(1 - 2^{-k})}{1 - 2^{-k}}$	$k \approx 7.8590c + 2.9554c^2$ $c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\log 2}{\log 3}$ $\alpha = \frac{\lambda_2 k}{(1 - 2^{-k})\Gamma(1+k)}$ $\xi = \lambda_1 - \frac{\alpha(1 - \Gamma(1+k))}{k}$
<p>Logístico Generalizado (GLO) (tres parámetros: ξ (localización), α (escala) y k (forma))</p>	<p>$k \neq 0$:</p> $x(F) = \xi + \alpha \cdot \frac{1 - \left[\frac{1 - F(X)}{F(X)}\right]^k}{k}$ <p>$k = 0$:</p> $x(F) = \xi - \alpha \cdot \log\left(\frac{1 - F(X)}{F(X)}\right)$	<p>L-momentos está definido para $-1 < k < 1$</p> $\lambda_1 = \xi + \alpha \left(\frac{1}{k} - \frac{\pi}{\sin k\pi}\right)$ $\lambda_2 = \frac{\alpha k \pi}{\sin k\pi}$ $\tau_3 = -k$ $\tau_4 = \frac{1 - 5k^2}{6}$	$k = -\tau_3$ $\alpha = \lambda_2 \sin k\pi / k\pi$ $\xi = \lambda_1 - \alpha \left(\frac{1}{k} - \frac{\pi}{\sin k\pi}\right)$

<p>Normal Generalizado (GNO) (tres parámetros: ξ (localización), α (escala) y k (forma))</p>	$f(x) = \frac{e^{k \cdot y - y^2/2}}{\alpha \sqrt{2\pi}}$ <p>$k \neq 0$:</p> $y = -k^{-1} \log \left[1 - \frac{k(x - \xi)}{\alpha} \right]$ <p>$k = 0$:</p> $y = \frac{x - \xi}{\alpha}$ <p>$F(x) = \Phi(y)$ x(F) no tiene forma analítica explícita. Φ, es la función de distribución acumulada de la distribución normal estándar.</p>	<p>L-momentos está definido para todos los valores de k</p> $\lambda_1 = \xi + \alpha \frac{1 - e^{k^2/2}}{k}$ $\lambda_2 = \frac{\alpha \cdot e^{\frac{k^2}{2}}}{k} \left[1 - 2\Phi\left(-\frac{k}{\sqrt{2}}\right) \right]$ $\tau_3 \approx -k \frac{A_0 + A_1 k^2 + A_2 k^4 + A_3 k^6}{1 + B_1 k^2 + B_2 k^4 + B_3 k^6}$ $\tau_4 \approx \tau_4^0 + k^2 \frac{C_0 + C_1 k^2 + C_2 k^4 + C_3 k^6}{1 + D_1 k^2 + D_2 k^4 + D_3 k^6}$ <p>τ_3, τ_4; Estos no tienen simples expresiones, por lo que no se utiliza aproximaciones con precisión de 2×10^{-7} y 5×10^{-7} respectivamente.</p>	<p>k</p> $\approx -\tau_3 \frac{E_0 + E_1 \tau_3^2 + E_2 \tau_3^4 + E_3 \tau_3^6}{1 + F_1 \tau_3^2 + F_2 \tau_3^4 + F_3 \tau_3^6}$ $\alpha = (\lambda_2 k e^{-k^2/2}) / (1 - 2\Phi(-k/\sqrt{2}))$ $\xi = \lambda_1 - \alpha/k(1 - e^{k^2/2})$
<p>Pearson tipo III (PE3) (tres parámetros: μ (localización), σ (escala) y γ (forma))</p>	<p>si $\gamma \neq 0$</p> $\alpha = \frac{4}{\gamma^2}, \beta = \frac{1}{2} \sigma \gamma \quad y \quad \xi = \mu - 2\sigma/\gamma$ <p>si $\gamma > 0$</p> $\xi \leq x < \infty$ $F(x) = \frac{G\left(\alpha, \frac{x - \xi}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)}$ <p>si $\gamma = 0$</p> $F(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$ <p>si $\gamma < 0$</p>	$\lambda_1 = \xi + \alpha\beta$ $\lambda_2 = \pi^{-1/2} \beta \Gamma(\alpha + 1/2) / \Gamma(\alpha)$ <p>si $0 < \alpha < \infty$</p> $\tau_3 = 6I_{1/3}(\alpha, 2\alpha) - 3$ <p>si $\alpha \geq 1$</p>	<p>si $0 < \tau_3 < 1/3$</p> $\alpha \approx \frac{1 + 0.2906z}{z + 0.1882z^2 + 0.0442z^3}$ <p>si $1/3 \leq \tau_3 < 1$</p> $\alpha \approx \frac{0.361z - 0.596z^2 + 0.254z^3}{1 - 2.789z + 2.561z^2 - 0.770z^3}$ $\gamma = 2\alpha^{-1/2} \text{sign}(\tau_3)$

	$F(x) = 1 - G\left(\alpha, \frac{\xi - x}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha)$ $G(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$	$\tau_3 \approx \alpha^{-1/2} \frac{A_0 + A_1 \alpha^{-1} + A_2 \alpha^{-2} + A_3 \alpha^{-3}}{1 + B_1 \alpha^{-1} + B_2 \alpha^{-2}}$ $\tau_4 \approx \frac{C_0 + C_1 \alpha^{-1} + C_2 \alpha^{-2} + C_3 \alpha^{-3}}{1 + D_1 \alpha^{-1} + D_2 \alpha^{-2}}$ <p>si $\alpha < 1$</p> $\tau_3 \approx \frac{1 + E_1 \alpha + E_2 \alpha^2 + E_3 \alpha^3}{1 + F_1 \alpha + F_2 \alpha^2 + F_3 \alpha^3}$ $\tau_4 \approx \frac{1 + G_1 \alpha + G_2 \alpha^2 + G_3 \alpha^3}{1 + H_1 \alpha + H_2 \alpha^2 + H_3 \alpha^3}$ <p>Las aproximaciones de τ_3, τ_4 tienen precisión de 10^{-6}.</p>	$\sigma = \lambda_2 \pi^{1/2} \alpha^{1/2} \Gamma(\alpha + 1/2)$ $\mu = \lambda_1$
--	--	---	--

Fuente: Hosking y Wallis (1997)

Coeficientes de las aproximaciones para GNO

$$\tau_4^0 = 1.2260172 \times 10^{-1}$$

$A_0 = 4.8860251 \times 10^{-1}$	$C_0 = 1.8756590 \times 10^{-1}$	$E_0 = 2.0466534$
$A_1 = 4.4493076 \times 10^{-3}$	$C_1 = -2.5352147 \times 10^{-3}$	$E_1 = -3.6544371$
$A_2 = 8.8027039 \times 10^{-4}$	$C_2 = 2.6995102 \times 10^{-4}$	$E_2 = 1.8396733$
$A_3 = 1.1507084 \times 10^{-6}$	$C_3 = -1.8446680 \times 10^{-6}$	$E_3 = -0.20360244$
$B_1 = 6.4662924 \times 10^{-1}$	$D_1 = 8.2325617 \times 10^{-2}$	$F_0 = -2.0182173$
$B_2 = 3.3090406 \times 10^{-1}$	$D_2 = 4.2681448 \times 10^{-3}$	$F_1 = 1.2420401$
$B_3 = 7.4290680 \times 10^{-1}$	$D_3 = 1.1653690 \times 10^{-5}$	$F_2 = -0.21741801$

Fuente: Hosking y Wallis (1997)

Coeficientes de las aproximaciones para PE3

$A_0 = 3.2573501 \times 10^{-1}$	$C_0 = 1.2260172 \times 10^{-1}$
$A_1 = 1.6869150 \times 10^{-1}$	$C_1 = 5.3730130 \times 10^{-2}$
$A_2 = 7.8327243 \times 10^{-2}$	$C_2 = 4.3384378 \times 10^{-2}$
$A_3 = -2.9120539 \times 10^{-3}$	$C_3 = 1.1101277 \times 10^{-3}$
$B_1 = 4.6697102 \times 10^{-1}$	$D_1 = 1.8324466 \times 10^{-1}$
$B_2 = 4.6697102 \times 10^{-1}$	$D_2 = 2.0166036 \times 10^{-1}$
$E_1 = 2.3807576$	$G_1 = 2.1235833$
$E_2 = 1.5931792$	$G_2 = 4.1670213$
$E_3 = 1.1618371 \times 10^{-1}$	$G_3 = 3.1925299$
$F_1 = 5.1533299$	$E_3 = 9.0551443$
$F_2 = 7.1425260$	$E_3 = 2.6649995 \times 10^1$
$F_3 = 1.9745056$	$E_3 = 2.6193668 \times 10^1$

Fuente: Hosking y Wallis (1997)

Aproximaciones polinómicas de L-C_k en función de L-C_s

A _k	GPA	GEV	GLO	LN3	PE3
A ₀	0	0.10701	0.16667	0.12282	0.1224
A ₁	0.20196	0.1109	-	-	-
A ₂	0.95924	0.84838	0.83333	0.77518	0.30115
A ₃	-0.20096	-0.06669	-	-	-
A ₄	0.04061	0.00567	-	0.12279	0.95812
A ₅	-	-0.04208	-	-	-
A ₆	-	0.03763	-	-0.13668	-0.57488
A ₇	-	-	-	-	-
A ₈	-	-	-	0.11368	0.9383

Fuente: Hosking y Wallis (1997)

Anexo 5: Cuantiles de precipitación media anual por estación estimada por ARF-LM

Estación	0.01	0.02	0.04	0.050	0.07	0.10	0.20	0.50
E 4	411.68	437.30	466.43	476.77	490.96	512.93	558.13	649.08
E 5	441.18	468.63	499.86	510.94	526.14	549.69	598.12	695.59
E 6	553.18	587.60	626.75	640.65	659.71	689.23	749.96	872.17
E 7	401.32	426.29	454.69	464.77	478.60	500.02	544.08	632.74
E 8	457.42	485.88	518.26	529.75	545.51	569.92	620.14	721.20
E 9	359.33	381.69	407.12	416.15	428.53	447.71	487.15	566.54
E 10	393.17	417.64	445.47	455.34	468.89	489.88	533.04	619.90
E 11	502.83	534.12	569.71	582.33	599.66	626.50	681.70	792.79
E 12	504.04	535.40	571.07	583.73	601.10	628.00	683.34	794.69
E 13	513.20	545.14	581.46	594.35	612.03	639.42	695.76	809.14
E 14	478.16	507.92	541.76	553.77	570.25	595.77	648.26	753.90
E 17	451.15	479.22	511.15	522.48	538.03	562.11	611.64	711.31
E 19	424.13	450.52	480.54	491.19	505.81	528.44	575.00	668.71
E 20	451.42	479.51	511.46	522.80	538.35	562.45	612.00	711.74
E 21	473.71	503.19	536.71	548.61	564.93	590.22	642.22	746.88
E 22	516.82	548.98	585.56	598.54	616.35	643.93	700.67	814.85
E 23	443.25	470.83	502.20	513.34	528.61	552.27	600.93	698.85
E 24	495.65	526.49	561.57	574.02	591.10	617.55	671.96	781.47
E 25	479.69	509.54	543.49	555.54	572.07	597.67	650.34	756.31
E 26	490.33	520.84	555.54	567.86	584.75	610.93	664.75	773.08
E 27	424.37	450.77	480.81	491.47	506.09	528.74	575.33	669.08
E 28	452.18	480.32	512.32	523.68	539.26	563.40	613.04	712.94
E 29	537.84	571.31	609.37	622.88	641.41	670.12	729.17	847.99
E 30	534.34	567.59	605.41	618.83	637.24	665.76	724.42	842.47
E 31	534.23	567.48	605.29	618.70	637.11	665.63	724.27	842.30
E 32	610.77	648.78	692.01	707.35	728.39	760.99	828.04	962.98
E 33	551.81	586.15	625.20	639.06	658.07	687.53	748.10	870.01
E 35	447.49	475.33	507.00	518.24	533.66	557.55	606.67	705.53
E 36	605.69	643.38	686.25	701.46	722.33	754.66	821.15	954.97
E 37	551.18	585.48	624.49	638.33	657.33	686.75	747.25	869.03
E 38	463.82	492.68	525.51	537.16	553.14	577.90	628.82	731.29
E 39	602.08	639.55	682.16	697.28	718.03	750.16	816.26	949.28
E 40	529.37	562.31	599.78	613.07	631.31	659.57	717.68	834.63
E 41	573.05	608.71	649.27	663.66	683.41	713.99	776.90	903.51
E 47	495.10	525.91	560.95	573.38	590.44	616.87	671.22	780.60
E 48	616.34	654.70	698.32	713.80	735.04	767.93	835.60	971.76
E 49	431.78	458.65	489.21	500.05	514.93	537.98	585.38	680.77
E 50	532.31	565.44	603.11	616.48	634.82	663.23	721.67	839.27
E 52	524.11	556.73	593.82	606.98	625.04	653.02	710.55	826.34
E 53	496.91	527.84	563.01	575.49	592.61	619.13	673.68	783.46
E 56	492.04	522.66	557.48	569.84	586.80	613.06	667.07	775.78
E 59	517.64	549.86	586.49	599.49	617.33	644.96	701.79	816.15
E 61	531.17	564.22	601.82	615.16	633.46	661.81	720.12	837.47
E 62	422.64	448.94	478.86	489.47	504.03	526.59	572.99	666.37

Región 1

(Continuación)

	Estación	0.01	0.02	0.04	0.050	0.07	0.10	0.20	0.50
Región 1	E 63	382.53	406.33	433.40	443.01	456.19	476.61	518.60	603.11
	E 64	463.94	492.81	525.65	537.30	553.28	578.05	628.98	731.48
	E 65	565.01	600.17	640.16	654.35	673.82	703.98	766.01	890.83
	E 68	550.76	585.04	624.02	637.85	656.83	686.22	746.69	868.37
	E 69	505.61	537.08	572.86	585.56	602.98	629.97	685.48	797.18
	E 70	449.85	477.84	509.68	520.98	536.48	560.49	609.88	709.26
	E 71	381.25	404.98	431.96	441.54	454.67	475.02	516.87	601.10
	E 72	372.49	395.67	422.03	431.39	444.22	464.11	505.00	587.29
	E 76	323.76	343.91	366.82	374.95	386.11	403.39	438.93	510.46
	E 77	355.92	378.07	403.26	412.20	424.46	443.46	482.53	561.16
	E 83	355.59	377.72	402.88	411.81	424.06	443.04	482.08	560.64
	E 84	354.50	376.56	401.65	410.55	422.77	441.69	480.60	558.92
Región 2	E 80	724.00	758.29	795.83	808.80	826.30	852.76	904.87	1001.22
	E 81	995.51	1042.66	1094.28	1112.11	1136.18	1172.57	1244.22	1376.69
	E 82	1149.71	1204.16	1263.78	1284.37	1312.16	1354.19	1436.94	1589.93
	E 87	1028.06	1076.76	1130.07	1148.48	1173.33	1210.91	1284.90	1421.71
	E 88	855.41	895.92	940.28	955.60	976.28	1007.55	1069.11	1182.94
	E 89	919.42	962.96	1010.64	1027.11	1049.33	1082.94	1149.11	1271.46
	E 90	783.40	820.50	861.13	875.16	894.09	922.73	979.11	1083.36
	E 91	1124.72	1178.00	1236.32	1256.47	1283.65	1324.76	1405.71	1555.38
	E 92	629.59	659.41	692.06	703.33	718.55	741.56	786.88	870.66
	E 93	987.59	1034.37	1085.58	1103.27	1127.14	1163.24	1234.32	1365.74
	E 94	873.55	914.93	960.23	975.87	996.99	1028.92	1091.79	1208.04
	E 95	811.11	849.53	891.59	906.12	925.73	955.38	1013.75	1121.69
	E 96	803.55	841.61	883.28	897.67	917.09	946.47	1004.30	1111.23
	E 97	1032.26	1081.15	1134.68	1153.17	1178.12	1215.85	1290.15	1427.51

Anexo 6: Daños causados por las sequías en los años 2005, 2006, 2016 y 2018

