

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN  
LA VERTIENTE PERUANA DEL OCEANO PACÍFICO”**

**Presentada por:**

**SAMUELSON CURI TAPAHUASCO**

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

**Lima - Perú**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN  
LA VERTIENTE PERUANA DEL OCEANO PACÍFICO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE**

**Presentada por:  
SAMUELSON CURI TAPAHUASCO**

**Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:**

**Dra. Lía Ramos Fernández  
PRESIDENTE**

**Dr. Waldo Sven Lavado Casimiro  
PATROCINADOR**

**Dr. Wilson Suarez Alayza  
MIEMBRO**

**Mg.Sc. Ricardo Apaella Nalvarte  
MIEMBRO**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Deseo expresar un especial agradecimiento al Dr. Waldo Sven Lavado Casimiro por su constante apoyo, consejos significativos, dirección y entera colaboración para el término de la presente tesis.*

*A los profesores de la maestría en Recursos Hídricos de la UNALM por sus críticas y valiosos conocimientos compartidos que contribuyen a mí formación profesional. A mis amigos y compañeros que fueron parte de esta linda etapa especialmente a Carlos A. Teófila, Fiorella, Guido, Jennifer, Boris, Ing. Max, Ing. Alfredo y otros, la amistad y los momentos vividos serán inolvidables y espero que nuestras vidas sigan unidas por muchos años más.*

*Quisiera también expresar mis agradecimientos a los comentarios, sugerencias y consejos de todas aquellas otras personas que de forma desinteresada han contribuido a conseguir un mejor trabajo.*

*Por último, y siendo lo más importante, agradezco a mis padres y hermanos por la motivación brindada, en especial a mi madre por brindar su entera confianza y apoyo desinteresado hacia mi persona.*

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo lo dedico a mis hermanos Joe Samuel y Daysi, a quienes admiro por su consecuente lógica para manejarse por la vida y por dedicarme su tiempo, el constante interés en culminar este posgrado.*

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    Objetivos .....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1    El ciclo hidrológico y los extremos.....	3
2.2    Sequías .....	4
2.3    Tipos de sequías .....	6
2.3.1    Sequía Meteorológica o Climatológica .....	7
2.3.2    Sequía Edáfica o agrícola .....	8
2.3.3    Sequía Hidrológica .....	8
2.3.4    Sequía Socio Económica .....	8
2.4    Caracterización de sequías .....	9
2.4.1    Duración de la sequía .....	9
2.4.2    Magnitud de la sequía.....	10
2.4.3    Extensión de la sequía .....	10
2.5    Índices de sequías.....	10
2.5.1    Índices de Disponibilidad de Agua Superficial (1982) .....	11
2.5.2    Índices de sequía hidrológico de Palmer (1985) .....	13
2.5.3    Índice de Sequías - Demanda (1996).....	13
2.5.4    Índices Agregado de Sequías (2004).....	14
2.5.5    Índices de escorrentía estandarizado (2008).....	15
2.5.6    Índices de sequía hidrológico (2009) .....	15
2.5.7    Índices de sequía de caudal estandarizado (2012).....	15
2.6    Método de L-momentos .....	17
2.6.1    Propiedades de los L-momentos.....	18
2.6.2    Estimación de parámetros mediante el método de L-momentos.....	20

2.7	Selección de la distribución de probabilidad.....	22
2.7.1	Distancia mínima ortogonal (DMO).....	22
2.8	Análisis de series de tiempo .....	24
2.8.1	Descripción de los tests estadísticos.....	26
2.9	Método del Vector Regional .....	26
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
3.1	Área de estudio.....	28
3.1.1	Ubicación geográfica y política.....	28
3.2	Materiales .....	36
3.2.1	Información cartográfica .....	36
3.2.2	Información Hidrométrica .....	36
3.2.3	Softwares utilizados.....	40
3.3	Metodología .....	41
3.3.1	Tratamiento de datos .....	43
3.3.2	Calculo de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE).....	46
3.3.3	Caracterización de las sequías .....	48
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	52
4.1	Tratamiento de datos .....	52
4.1.1	Análisis exploratorio de datos .....	52
4.1.2	Estimación y completación de datos faltantes (caudales) .....	60
4.1.3	Análisis de Tendencia y quiebres .....	64
4.2	Cálculo de un índice de sequía de caudales estandarizado (IQE).....	68
4.2.1	Distribuciones de la Probabilidad.....	68
4.2.2	Calculo de parámetros (método de L-momentos) .....	69
4.2.3	Función de distribución y función de densidad.....	70
4.2.4	Distancia mínima ortogonal (DMO).....	76
4.2.5	Calculo de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE).....	84
4.2.6	Elección de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE).....	88

4.3	Caracterización de la sequía hidrológica en la Vertiente peruana del Pacífico	94
4.3.1	Duración .....	94
4.3.2	Intensidad y Magnitud .....	103
4.3.3	Tendencia de las sequías.....	108
4.3.4	Extensión espacial .....	111
V.	CONCLUSIONES.....	118
VI.	RECOMENDACIONES .....	120
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	121
VIII.	ANEXOS.....	126

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1:</b>	Resumen de índices de Sequías Hidrológicas.....	11
<b>Cuadro 2:</b>	Clasificación de sequías hidrológicas de Palmer PHDI.....	13
<b>Cuadro 3:</b>	Clasificación de la sequía hidrológica RDI.....	14
<b>Cuadro 4:</b>	Clasificación de estados de sequía hidrológica según SDI.....	15
<b>Cuadro 5:</b>	Clasificación de estados de sequía hidrológica según IQE.....	16
<b>Cuadro 6:</b>	Aprox. polinómicas de L-kurtosis ( $t^4$ ) en función de L-asimetría ( $t^3$ ).....	23
<b>Cuadro 7:</b>	Unidades Hidrográficas del Perú .....	29
<b>Cuadro 8:</b>	Características de las Unidades Hidrográficas de la Vertiente peruana del Pacífico.....	31
<b>Cuadro 9:</b>	Principales proyectos ubicados en la Vertiente peruana del Océano Pacífico..	35
<b>Cuadro 10:</b>	Principales proyectos que presentan trasvases a la Vertiente peruana del Pacífico.....	35
<b>Cuadro 11:</b>	Red de Estaciones Hidrométricas y su codificación .....	37
<b>Cuadro 12:</b>	Red de Estaciones Hidrométricas .....	38
<b>Cuadro 13:</b>	Red de Estaciones Hidrométricas con información mensual ausente.....	53
<b>Cuadro 14:</b>	Resumen de la Estadística descriptiva de caudales anuales (m <sup>3</sup> /s) .....	54
<b>Cuadro 15:</b>	Estadística descriptiva de la estación EH-02 (Ardilla) .....	57
<b>Cuadro 16:</b>	Estadístico G calculado del Test de Grubbs para la estación EH-02 (Ardilla)	57
<b>Cuadro 17:</b>	Estaciones con dato mensual faltante.....	60
<b>Cuadro 18:</b>	Resumen de regiones homogéneas formadas por el MVR (Caudal anual).....	61

<b>Cuadro 19:</b> Resumen del Test de Mann Kendall para el análisis de tendencia .....	65
<b>Cuadro 20:</b> Resumen del Test de Pettit para el análisis de homogeneidad.....	66
<b>Cuadro 21:</b> Estimación de parámetros método de L-momentos EH-01(El Tigre). ....	70
<b>Cuadro 22:</b> Estimación de parámetros método de L-momentos EH-02(Ardilla). ....	70
<b>Cuadro 23:</b> Parámetro de la función distribución: Valor extremo generalizado (GEV)...	71
<b>Cuadro 24:</b> Parámetro de la función de distribución: Log-Normal (LN3). ....	71
<b>Cuadro 25:</b> Parámetro de distribución de Logístic Generalizada (GLO).....	72
<b>Cuadro 26:</b> Parámetro de distribución de General de Pareto (GPA). ....	72
<b>Cuadro 27:</b> Parámetro de distribución de Pearson tipo III (PE3). ....	72
<b>Cuadro 28:</b> Parámetro de distribución de Weibull (WEI).....	72
<b>Cuadro 29:</b> Estimación de parámetros del mes de Enero (método de L-momentos).....	76
<b>Cuadro 30:</b> Distancia mínima ortogonal para el mes de Enero.....	80
<b>Cuadro 31:</b> Distancia mínima ortogonal para el mes de Febrero.....	81
<b>Cuadro 32:</b> Distancia mínima ortogonal para el mes de Marzo.....	81
<b>Cuadro 33:</b> Distribución de probabilidad que presentó el mejor ajuste mensual.....	83
<b>Cuadro 34:</b> Cuantificación de la distribución que presentó el mejor ajuste mensual .....	84
<b>Cuadro 35:</b> Cuantificación total y decadal de los eventos secos registrados en la Vertiente peruana del pacífico durante el periodo analizado (1960-2005) .....	98
<b>Cuadro 36:</b> Frecuencia de ocurrencia de eventos secos de diferentes duraciones registrados entre los años de 1960-2005 .....	99
<b>Cuadro 37:</b> Cuantificación de los eventos secos y la intensidad promedio ocurridos durante el periodo de 1960-2005.....	104
<b>Cuadro 38:</b> Valores de caudal correspondiente al IQE que indican el inicio y/o término de un evento de sequía hidrológica .....	105
<b>Cuadro 39:</b> Caracterización de las principales sequías según el IQE (1960-2005).....	107
<b>Cuadro 40:</b> Resumen de Tendencia observada, expresada en variación porcentual de la intensidad promedio anual del IQE.....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> El ciclo hidrológico.....	3
<b>Figura 2:</b> Secuencia de las sequías comúnmente aceptadas y sus efectos asociados al déficit del recurso hídrico. ....	7



<b>Figura 3:</b> Interacción entre la sequía Meteorológica, Agrícola, Hidrológica y socioeconómica.....	9
<b>Figura 4:</b> Serie cronológica de oferta - demanda para la identificación y caracterización de las sequías. ....	10
<b>Figura 5:</b> Diagrama de L-momentos ratios de dos y tres parámetros, basado en L-sesgo y L-kurtosis.....	19
<b>Figura 6:</b> Gráfica de L-momentos ratios. Distancia Mínima Ortogonal (DMO).....	24
<b>Figura 7:</b> Unidades Hidrográficas (UH) pertenecientes a la Vertiente peruana del Océano Pacífico y Modelo digital de elevación (DEM).....	30
<b>Figura 8:</b> Red de estaciones hidrométricas. ....	39
<b>Figura 9:</b> Proceso metodológico de la Caracterización de sequía hidrológica. ....	41
<b>Figura 10:</b> Esquema de la serie cronológica de oferta - demanda para la identificación y caracterización de la duración, intensidad y magnitud de la sequía bajo un nivel de truncamiento definido. ....	50
<b>Figura 11:</b> Gráfica de cajas del cauda anual para detección de outliers.....	55
<b>Figura 12:</b> Gráfica de caja, caudal mensual .....	56
<b>Figura 13:</b> Gráfica del Test de Grubbs a un paso de tiempo anual .....	58
<b>Figura 14:</b> Estaciones agrupadas en regiones hidrológicamente homogéneo .....	63
<b>Figura 15:</b> Gráfica del Test de Pettit (cambio en la media) .....	67
<b>Figura 16:</b> Diagrama de L-momentos ratios con las distribuciones candidatas para el cálculo de un Índice de Sequía de caudal estandarizado (IQE).....	69
<b>Figura 17:</b> Histograma de la serie de caudal mensual y la función de densidad teórica $f(x)$ que mejor describe el comportamiento hídrico mensual en la estación EH-01(El Tigre). ....	74
<b>Figura 18:</b> Histograma de la serie de caudal mensual y la función de densidad teórica $f(x)$ que mejor describe el comportamiento hídrico mensual en la estación EH-02(Ardilla). ....	75
<b>Figura 19:</b> Diagrama de L-momentos ratios, los puntos representan la asimetría y la kurtosis del mes de Enero para las 26 estaciones analizadas.....	76
<b>Figura 20:</b> Diagrama mensual de L-momentos ratios. ....	78
<b>Figura 21:</b> Diagrama estacional de L-momentos ratios. ....	79
<b>Figura 22:</b> Gráfica de cajas. Distancia Mínima Ortogonal (DMO) entre la muestra de L momentos en el sitio (i) y la relación de L-momentos teóricos. a cada una de las distribuciones teóricas evaluadas. ....	82

<b>Figura 23:</b> Evolución temporal del Índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), usando las seis distribuciones seleccionadas y el método de ajuste denominado DMO en la Estación EH-03(Puchaca) localizado en el departamento de Lambayeque .....	85
<b>Figura 24:</b> Evolución temporal del Índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), usando las seis distribuciones seleccionadas y el método de ajuste denominado DMO en la Estación EH-26(Aguas calientes) localizado en el departamento de Tacna .....	86
<b>Figura 25:</b> Valor medio del IQE de las seis distribuciones y el método de ajuste DMO evaluados para las 26 estaciones hidrométricas analizadas.....	89
<b>Figura 26:</b> Valor medio de la desviación estándar del IQE de las seis distribuciones analizadas y el método de ajuste DMO evaluados para las 26 estaciones analizadas.....	89
<b>Figura 27:</b> Patrón espacial de las distribuciones obtenidas aplicando el método de ajuste denominado Distancia Mínima Ortogonal (DMO), a la serie de escorrentía mensual.....	93
<b>Figura 28:</b> Evolución temporal del IQE, caracterización de la duración de los eventos de sequía ocurridos en la EH-01(El Tigre), localizado en la Und. Hidrográfica de Tumbes. ....	95
<b>Figura 29:</b> Evolución temporal del IQE, caracterización de la duración de los eventos de sequía ocurridos en la EH-07(Salinar–Tambo), ubicado Und. Hidrográfica de Chicama. ....	96
<b>Figura 30:</b> Evolución temporal del IQE, caracterización de la duración de los eventos de sequía ocurridos en la EH-17(La Capilla), localizado en la Unidad Hidrográfica de Mala. ....	97
<b>Figura 31:</b> Evolución temporal del IQE, caracterización de la duración de los eventos de sequía ocurridos en la EH-24(Chivaya), localizado Und. Hidrográfica de Ilo-Moquegua. ....	97
<b>Figura 32:</b> Grafica de barras. Cuantificación porcentual del número de eventos secos (mensual) registrados en cada estación hidrométrica durante el periodo (1960–2005).....	98
<b>Figura 33:</b> Identificación espacial de las Estaciones Hidrométricas que presentaron mayor frecuencia de eventos secos (superior al 20% de los meses analizados por década).....	100

<b>Figura 34:</b> Identificación espacial de las estaciones hidrométricas que presentaron mayor frecuencia de eventos secos, superior al 20% de los meses analizados para el quinquenio de 2000-2005 y para el periodo analizado de 1960 al 2005.....	101
<b>Figura 35:</b> Grafica de barras. Intensidad promedio multianual del IQE de las 26 Estaciones Hidrométricas analizadas durante el periodo de 1960 – 2005. ....	104
<b>Figura 36:</b> periodos húmedos y secos identificados aplicando la media móvil para un tiempo de 72 meses en la estación EH-16 Chosica, EH-21 La Achirana, EH-13 Yanapampa y la EH-24 Chivaya en el periodo analizado de 1960–2005. ....	110
<b>Figura 37:</b> Tendencias positivas y negativas del IQE registrados en la estación EH-16 Chosica y EH-24 Chivaya para un nivel de significancia del 5% (NS=0.05) .....	111
<b>Figura 38:</b> Extensión espacial de la intensidad promedio del IQE ocurrido entre los años de 1960 a 2005. ....	113
<b>Figura 39:</b> Caracterización espacial de la sequía hidrológica del año 1997 (Enero–Febrero - Marzo).....	114
<b>Figura 40:</b> Caracterización espacial de la sequía hidrológica del año 1997 (Abril – Mayo - Junio).....	115
<b>Figura 41:</b> Caracterización espacial de la sequía hidrológica del año 1997 (Julio – Agosto - Septiembre).....	116
<b>Figura 42:</b> Caracterización espacial de la sequía hidrológica del año 1997 (Octubre – Noviembre - Diciembre) .....	117

# “CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN LA VERTIENTE PERUANA DEL OCÉANO PACÍFICO”

## RESUMEN

En los últimos años las sequías han adquirido gran importancia por los daños que ocasionan, que superan en magnitud a otros fenómenos hidrometeorológicos, estos eventos son relativamente complejos, por tal motivo el conocimiento de este fenómeno es limitado. Por ello, en esta investigación se desarrolla la caracterización espacial y temporal de las sequías hidrológicas ocurridas en la Vertiente peruana del Océano Pacífico (VP), empleando un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) para el análisis de 26 estaciones hidrométricas (EH).

Inicialmente se realizó el análisis de la calidad de datos del caudal mensual, aplicándose para ello diferentes pruebas de verificación de datos atípicos, tendencia y homogeneidad de la serie en el tiempo. El cálculo de un IQE, se obtuvo evaluando las propiedades estadísticamente esperadas de la variable estandarizada (media =0 y desviación estandarizada =1), analizando seis diferentes distribuciones de probabilidad (PE3, GPA, WEI, LN3, GEV y GLO), la selección de la mejor Distribuciones de Probabilidad (DP) se obtuvo aplicando la prueba de bondad de ajuste denominada Distancia Mínima Ortogonal (DMO) evaluada en un diagrama de L-momentos ratios.

El cálculo de un IQE, permitió caracterizar espacial y temporalmente los eventos de sequía hidrológica ocurridas en la costa peruana entre los años de 1960-2005, posteriormente se evaluó sus tres principales características (duración, intensidad y extensión espacial). Para evaluar estas características, se aplicó el método de Umbrales a la serie estandarizada del caudal mensual de las 26 EH, se determinó la constante Percentil (20) para definir los eventos moderadamente secos y el Percentil (5) para definir los eventos extremadamente secos. La prueba de Mann-Kendall para detectar tendencias se aplicó a las 26 EH analizadas, detectando tendencia positiva en la EH-16 Chosica y tendencia negativa en la EH-24 Chivaya para un nivel significativo ( $\alpha = 0.05$ ), en términos de duración y severidad, los principales eventos secos se registraron en el Sur del Perú, mientras que la intensidad fue espacialmente significativa en una parte del Norte, Centro y Sur del Perú.

**PALABRAS CLAVES:** *Sequía hidrológica, índice de sequía de caudal estandarizado, método de umbral, L-momentos, Distancia mínima ortogonal, Vertiente peruana*

# “CHARACTERIZATION OF HYDROLOGICAL DROUGHTS IN THE PERUVIAN PACIFIC DRAINAGE BASINS”

## ABSTRACT

In recent years droughts have acquired great importance for the damages caused, that exceed in magnitude to other hydrometeorological phenomena, these events are relatively complex hence the knowledge of this phenomenon is limited. Therefore, in this study the spatial and temporal characterization of hydrological droughts is developed in the Peruvian Pacific drainage basins (VP) using a Drought Index Standardized Flow (IQE) for the analysis of 26 hydrometric stations (EH).

Initially the quality analysis of the monthly flow data was performed, applying different verification outliers tests, trend and homogeneity of the time series. The calculation of a IQE was obtained statistically evaluating the expected properties of the standardized variable (mean = 0 and standard deviation = 1), analyzing six different probability distributions (PE3, GPA, WEI, LN3, GEV and GLO), the selection of the best Probability Distributions (DP) was evaluated using the goodness of fitting test called Minimum Orthogonal Distance (DMO) evaluated in a L-moment ratios diagram.

The estimation of an IQE, it allowed to characterize spatial and temporal hydrological drought events occurred in the Peruvian coast between the years 1960-2005, subsequently his three main characteristics was assessed (duration, intensity and spatial extent). For assessing these features, the Thresholds method was applied to the standardized series of monthly flow of the 26 EH, the percentile (20) was determined to define moderately dry events and Percentile (5) to define the extreme dry events. The Mann-Kendall test to detect trends was applied to the 26 EH analyzed detecting positive trend in EH-16 Chosica and negative trend in the EH-24 Chivaya in a significant level ( $\alpha = 0.05$ ), in terms of duration and severity, the main dry events occurred in southern Peru, while the intensity was spatially significantly in a part of North, Central and Southern Peru.

**KEYWORDS:** *hydrological drought, standardized flow drought index, threshold method, L-moments, minimum orthogonal distance, Peruvian drainage basins.*

## I. INTRODUCCIÓN

La sociedad peruana se enfrenta a grandes problemas debido a la recurrencia de eventos extremos (sequías) propio de su alta variabilidad climática, es así que la zona Sur del Perú presenta un clima Árido, donde el déficit de la precipitación y la escorrentía es permanente durante casi todo el año, mientras que la zona Norte del Perú presenta un clima tropical húmedo, con una alta humedad relativa, con presencia de escurrimiento durante el año.

El rendimiento hídrico de las cuencas ubicadas a lo largo de la costa peruana, son de importancia para la gestión, planificación y el aprovechamiento del recurso hídrico, sin embargo esta información no siempre está disponible por el limitado número de estaciones y datos registrados, considerando que la costa peruana concentra alrededor del 60% de la población nacional y siendo el lugar donde se ubican los principales sectores productivos del Perú, es importante realizar estudios de eventos extremos (sequías) con la finalidad de minimizar los posibles impactos negativos que puedan ocurrir.

En los últimos años las sequías han adquirido una gran relevancia por los daños que ocasionan, que supera en magnitud a lo que producen otros fenómenos hidrometeorológicos y se torna más amenazador por el calentamiento global, entre cuyas secuelas el aumento de la recurrencia de los eventos secos en determinadas zonas del planeta, es uno de los más serios problemas que enfrenta la humanidad, en especial los países ubicados en las zonas subtropicales (Perú), donde la alta radiación y evaporación se combina con la escasa precipitación, favoreciendo la recurrencia de periodos prolongados de sequía en extensas áreas y/o países enteros (Salati y Nobre, 1991).

Mucho esfuerzo se han dedicado en desarrollar enfoques robustos para el cálculo de los índices de sequías hidroclimáticas Heim, (2002), estos índices tienen el potencial de cuantificar las principales características de todo evento hidroclimático seco. Este estudio analiza la caracterización de la sequía hidrológica mediante un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) que nos permitirá evaluar y comparar una gran variedad de regímenes hidrológicos muy diferentes entre sí, en características físicas y magnitudes de caudal,

tomando medidas preventivas ante un posible impacto de la sequía hidrológica en la Vertiente del Pacífico.

En este contexto, a fin de contribuir con el estudio, análisis y conocimiento de los eventos extremos, se analizaron las sequías hidrológicas ocurridas en las principales cuencas de la Vertiente peruana del Océano Pacífico mediante un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), identificando zonas vulnerables donde la presencia de eventos secos son recurrentes en el periodo analizado de 1960 al 2005.

## **1.1 Objetivos**

### **Objetivo General**

El presente trabajo tiene como objetivo general caracterizar espacial y temporalmente la sequía hidrológica en la Vertiente Peruana del Océano Pacífico mediante un índice de sequía hidrológico estandarizado.

### **Objetivo Especifico**

- Realizar el análisis exploratorio de datos de caudales de la Vertiente peruana del Pacífico y elaborar una base de datos hidrométricos de calidad; con una cobertura espacial y temporal representativa de la costa peruana.
- Determinar la capacidad de seis distribuciones teóricas de tres parámetros para obtener un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) y evaluar el rendimiento de la distancia mínima ortogonal (DMO) para la selección de la mejor distribución.
- Caracterizar las sequías hidrológicas ocurridas en la Vertiente peruana del Pacífico a través de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE).

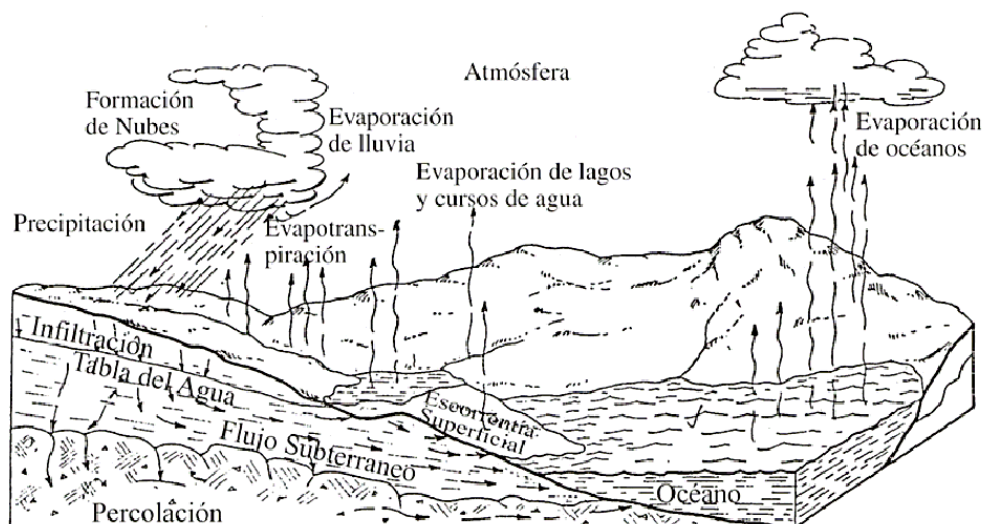
## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 El ciclo hidrológico y los extremos

Los eventos extremos son fenómenos meteorológicos naturales que se pueden presentar en cualquier lugar y momento, las sequías como las inundaciones son resultado de alteraciones en la dinámica de la humedad atmosférica, Velasco, (2013), La naturaleza de ambos fenómenos es compleja, mientras una parte sufre sequía, otra puede encontrarse inundada, simultáneamente (Velasco, 2013).

Se denomina evento extremo al evento hidroclimático (inundación y/o sequía) que tiene muy baja probabilidad de ocurrencia, es un episodio raro que se presenta en un lugar y en una época en particular, un evento extremo puede considerarse cuando el cuantil es superior e inferior a los percentiles 90 o 10 de una función de probabilidad (IPCC, 2009)

Algunos de los eventos extremos que alteran el proceso del ciclo hidrológico y por ende la humedad atmosférica son: El Niño, las erupciones volcánicas, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la actividad industrial (Velasco, 2013).



**Figura 1:** El ciclo hidrológico.

Fuente: Fattorelli & Fernandez, 2011



Considerando que los eventos hidrológicos extremos (sequías y/o inundaciones) son las manifestaciones más dramáticas en el ciclo hidrológico, es de esperar que estos fenómenos aumenten en intensidad, severidad y duración, atribuidas al cambio climático, incrementando la frecuencia de ocurrencia así como el impacto que ocasiona en la sociedad (Velasco, 2013).

## **2.2 Sequías**

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la sequía es considerada como un periodo de condiciones meteorológicas anormales secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico (OMM, 2006).

La convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD), define la sequía como un fenómeno natural del clima, causado por el déficit de la precipitación en condiciones considerablemente inferior a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción del recurso tierra (CLD, 2004).

Las sequías son fenómenos naturales, recurrentes, de un comportamiento complejo, que han afectado a las civilizaciones a través de la historia. Estas influyen sobre el hábitat natural, el ecosistema y muchos sectores económicos y sociales. La gran variedad de sectores que son afectados por las sequías, así como el amplio rango de demandas del recurso hacen que sea muy complicado realizar una única definición de sequía. Sin embargo, existe un consenso en definir a las “sequías” como una condición de insuficiencia de la cantidad de recursos hídricos, causados por un déficit de precipitaciones sobre un determinado periodo de tiempo (Heim, 2002).

La sequía es 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. El carácter no destructivo de la sequía, en comparación con el de avenidas, es probablemente responsable que la sociedad esté

dispuesta a asumir mayores riesgos, puesto que en el caso de avenidas se determina las crecidas anual, interanual, interdecadal y hasta las crecida máxima probable; sin embargo, es habitual que se considere para la sequía condiciones de diseño similares a las observadas en el pasado reciente, cuya frecuencia media corresponde a periodos de retorno de 20 a 50 años (Fernández, 1997).

En general, es posible organizar las definiciones de sequía como conceptual y operacional. La definición conceptual, es aquella de tipo teórico que, solo se limita a definir y describir al fenómeno. Por otro lado, la definición operacional intenta identificar el inicio, evolución y el fin del fenómeno, y a veces requiere considerar su frecuencia, severidad y duración. Analizar la sequía involucra diversas disciplinas, cada una de las cuales incorpora diferentes factores en su definición. Por ello, la sequía puede ser de tipo meteorológico, agrícola, hidrológico, socioeconómico, etc. y sus diferencias radican en el grado de intervención humana en el sistema (Kundzewicz et al., 1993).

Aunque no exista una definición universalmente aceptable del concepto de sequía, existen diversas definiciones, todas ellas dependen del sector en la que se experimenta el déficit del recurso hídrico, encontrando más de 150 definiciones de este tipo, categorizándola en grupos según la disciplina científica desde la que se analiza al fenómeno. La sequía también puede ser estudiada en un contexto político y social, delineando las consecuencias e impactos así como los productos de las políticas de manejo de sequías (Kundzewicz et al., 1993).

Las sequías son percibidas como eventos extremos del sistema climático; sin embargo, deberían ser consideradas como sucesos de ocurrencia normal puesto que estos eventos han ocurrido muchas veces y continuarán presentándose, además que debido al continuo incremento de las necesidades de agua a nivel mundial serán más continuas en el futuro con adversas consecuencias en la sociedad. Por este motivo el manejo de los impactos de las sequías deberían ser abordados utilizando análisis de riesgo en vez de un manejo de la crisis, procedimiento que es la práctica actual de muchos países (Panu & Sharma, 2002).

La disponibilidad del recurso hídrico incluye el contenido de humedad del suelo, el agua subterránea, la escorrentía superficial y el almacenamiento en reservorios. Los impactos de las sequías, provocan que la demanda de agua exceda al suministro de la fuente del recurso hídrico. Existe una gran variabilidad temporal de los procesos de transferencia de la precipitación hasta que el recurso hídrico esté disponible en su forma

aprovechable (ríos, riachuelos, pozos). Por el lado de la demanda, los usos del agua se manejan en diversas escalas temporales; en consecuencia, los impactos sobre los déficits de agua son el resultado de una compleja interacción entre las fuentes y los usos del agua (McKee et al., 1993).

El conocimiento del comportamiento de las sequías ha sido un importante aspecto del planeamiento y manejo de los sistemas de recursos hídricos. Generalmente los embalses cumplen una importante función supliendo los requerimientos de la demanda durante el episodio de las sequías de una determinada magnitud y duración (Hyun-Suk Shin & Salas, 2000).

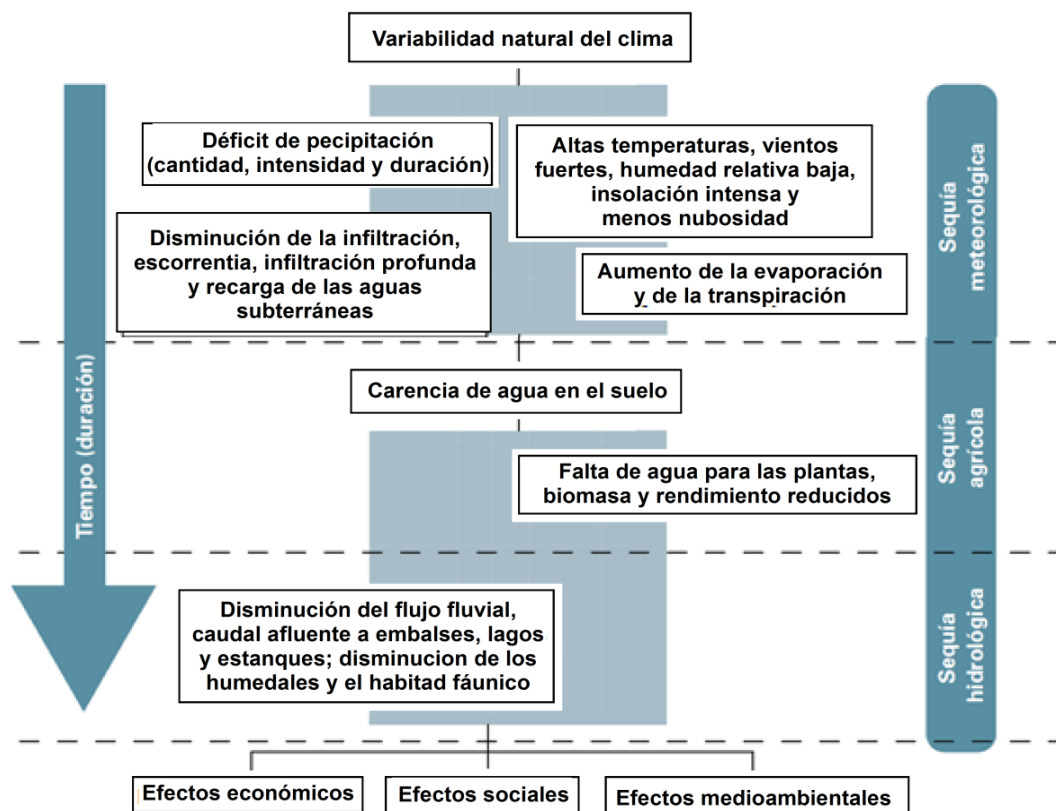
Los efectos de las sequías generalmente se acumulan de forma gradual durante periodos de tiempo extensos, pudiendo durar incluso años después de que el evento ha terminado dificultando la determinación del inicio y el fin del evento. Los impactos de las sequías son de carácter no destructivos y se producen sobre áreas extensas, en comparación con los impactos causados por otros desastres naturales, por lo que es complicado cuantificar sus efectos. Sin embargo, al comparar las sequías con otros desastres naturales, esta es la que presenta los impactos más importantes con respecto a la duración del evento, grado de severidad, extensión superficial, pérdidas de vidas, pérdidas económicas, efectos sociales y tiempo necesario para su desarrollo o recuperación (Villalobos, 2007).

Por lo general, se está de acuerdo en considerar a la sequía como un período prolongado de escasez del recurso hídrico capaces de provocar efectos adversos sobre la sociedad o los sistemas productivos teniendo su origen común: el déficit de la precipitación (Núñez et al., 2007, Wilhite and Glantz 1985).

### **2.3 Tipos de sequías**

Las sequías tienen su origen dentro del ciclo hidrológico con una deficiencia de la cantidad de precipitación, el cual provoca de forma directa una disminución de la presencia de agua en todos los estados del ciclo hidrológico, Brass, (1990). A esta deficiencia de la precipitación puede sumarse factores como una alta temperatura, presencia de fuertes vientos, una baja humedad relativa con una alta radiación solar, características del suelo y cobertura vegetal. Todo ello tiene en común el aumento de la evaporación y la transpiración que acentúa la disminución de la presencia de agua en la superficie terrestre y en el proceso del ciclo hidrológico.

Se han propuesto diferentes clasificaciones que catalogan a estas definiciones según el área afectada, por ejemplo Wilhite & Glantz (1985), agruparon diversas definiciones de sequías, en cuatro grupos según la disciplina científica desde la cual se analiza al fenómeno: sequía meteorológica, sequía agrícola, sequía hidrológica y la sequía socioeconómica. Las relaciones entre los tipos de sequías se muestran en la Figura 2



**Figura 2:** Secuencia de las sequías comúnmente aceptadas y sus efectos asociados al déficit del recurso hídrico.

Fuente: OMM, 2006.

### 2.3.1 Sequía Meteorológica o Climatológica

La sequía meteorológica se relaciona con la disminución de las precipitaciones, siendo evaluadas mediante la comparación entre la precipitación del periodo de análisis y un indicador estadístico de la serie temporal que generalmente es la media. Existen diversas definiciones de la sequía meteorológica que han sido desarrolladas para regiones específicas, debido a que las variaciones en los regímenes de precipitación tienen una fuerte influencia de las características climáticas de cada región.

### **2.3.2 Sequía Edáfica o agrícola**

La sequía agrícola se expresa en términos de disponibilidad de agua en los suelos para el sostenimiento de los cultivos, en muchos casos es valorada de acuerdo a los daños provocados sobre la producción agrícola.

Debido a que la cantidad de agua es diferente para cada cultivo y varía a lo largo de las fases de crecimiento de los cultivos, es complejo definir umbrales de sequía incluso para una misma región.

Este tipo de sequía no solo depende de las condiciones meteorológicas, sino también de las características biológicas del cultivo y las propiedades del suelo. Por lo que no es equivalente a la sequía meteorológica. Si los niveles de humedad del suelo son suficientes para sustentar el crecimiento de un determinado cultivo durante el periodo que se presente sequía meteorológica, la sequía agrícola no se producirá.

### **2.3.3 Sequía Hidrológica**

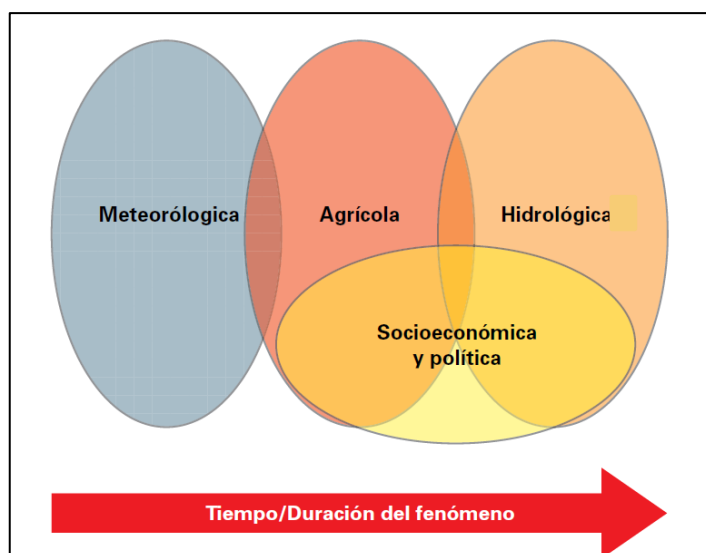
La sequía hidrológica se asocia fuertemente a la deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales y/o subterráneas, así como el volumen de almacenamientos. La sequía hidrológica tiene un desfase de ocurrencia en relación con la sequía meteorológica, puesto que se requiere de un desfase temporal para que se propaguen las anomalías pluviométricas a los diversos componentes del ciclo hidrológico.

A diferencia de la sequía agrícola que tiene lugar al poco tiempo de presentarse la sequía meteorológica, la sequía hidrológica puede tardar de meses a incluso años dependiendo de la región desde el momento que se inició de la sequía meteorológica, y si las lluvias retornan en poco tiempo, la sequía hidrológica no llegará a manifestarse.

La capacidad de gestión de los recursos hídricos influye sobre la sequía hidrológica, debido a que el déficit no solo depende de la disponibilidad del recurso hídrico superficial o subterráneo, sino también de la forma de uso del agua.

### **2.3.4 Sequía Socio Económica**

Este tipo de sequía se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de generar daños económicos o sociales sobre la población en las zonas afectadas por la escasez de precipitaciones.



**Figura 3:** Interacción entre la sequía Meteorológica, Agrícola, Hidrológica y socioeconómica.

Fuente: OMM, 2006.

## 2.4 Caracterización de sequías

La caracterización de las sequías presenta rasgos individuales distintivos, para su identificación se propuso la teoría de rachas o sucesiones propuesta por Yevjevich (1967), mencionado por García (2008). Esta analiza las sequías en base a los procesos espacio temporales que consideran la oferta y la demanda del recurso hídrico en una región. La diferencia en una serie cronológica, representa la disponibilidad del recurso hídrico, mientras que la necesidad de hacer uso de este recurso identifica las sequías.

La teoría de rachas permite la caracterización de una serie de episodio seco en base a tres características principales como son: duración, magnitud y área afectada (Lorenzo, 2012).

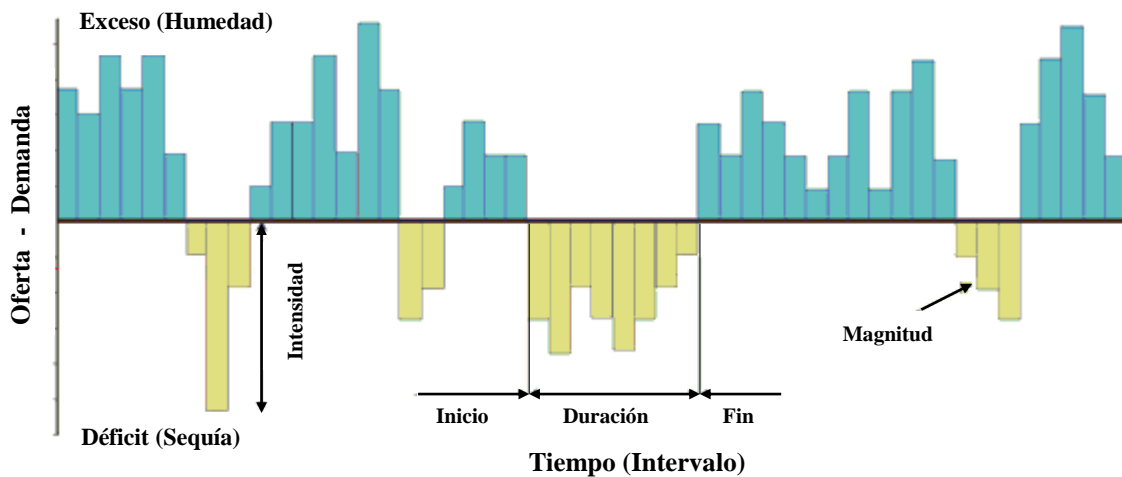
### 2.4.1 Duración de la sequía

La duración de un evento de sequía, se define como el número de sucesiones temporales consecutivas e ininterrumpidas (uno o más meses) con un caudal inferior al nivel promedio registrado en un periodo de tiempo relativamente largo.

## 2.4.2 Magnitud de la sequía

Este término hace referencia al déficit del volumen acumulado de caudal en una secuencia ininterrumpida de meses que delimita un evento de sequía, el cual se cuantifica mediante la sucesión negativa acumulada.

Hay un parámetro muy usual que se utiliza en la caracterización de sequías que viene ser la **intensidad**. La cual es una medida de severidad del evento, algunos autores la calculan como la magnitud entre la duración de la sequía y corresponde entonces a la intensidad promedio, en otros casos se define como el máximo valor del déficit ocurrido durante el evento, conocido como intensidad máxima.



**Figura 4:** Serie cronológica de oferta - demanda para la identificación y caracterización de las sequías.

Fuente: Fernández 1997.

## 2.4.3 Extensión de la sequía

La caracterización espacial de un evento de sequía, nos ayuda a entender la evolución, el inicio y el fin de este fenómeno, e identificar las zonas con mayor riesgo a sufrir temporadas secas, lo suficientemente severas como para ocasionar un grave desequilibrio hidrológico en un área extensa.

## 2.5 Índices de sequías

Los esfuerzos que se han realizado en diversas partes del mundo para definir de forma objetiva un fenómeno tan complejo y que tiene diversas concepciones, ha dado lugar a que se desarrollen diversos índices o indicadores de sequías que buscan proporcionar una

escala uniforme de los criterios para evaluar las sequías. Los índices numéricos son necesarios para comparar valores de este fenómeno en diversas regiones, así como para comparar eventos del pasado. Sin embargo, debido a las múltiples definiciones de la sequía y el amplio rango de sectores afectados hace difícil cuantificar sus efectos, resultando problemático el desarrollo de un único índice numérico universal que pueda representar la intensidad, severidad así como los impactos sobre una determinada área (Heim, 2002).

Los índices también son utilizados para monitorear el comportamiento de las sequías en tiempo real y poder evaluar su evolución. Los índices deben ser valores simples determinados mediante procedimientos de cálculo estandarizados, que resuman los criterios y las características de un evento de sequías (Villalobos, 2007).

A continuación se mencionan los principales índices usados para el monitoreo y control de las sequías.

**Cuadro 1:** Resumen de índices de Sequías Hidrológicas

<u>Nombre</u>	<u>Parámetro</u>	<u>Autor</u>	<u>Año</u>
Índice de Disponibilidad de Agua Superficial (SWSI)	Precipitación, Temperatura, caudal	Shafer y Dezman	1982
Índice de sequía Hidrológico de Palmer (PHDI)	Caudales	Karl & Knight, 1985	1985
Índice de sequía del Bureau of Reclamation (RDI)	Precipitación, Temperatura, caudal	Weghorst	1996
Índice Agregado de Sequía (ADI)	Precipitación, suelo, Temperatura y caudal	Keyantash y Dracup	2004
Índice de Escorrentía Estandarizado (SRI)	Caudales	Shukla y Wood	2008
Índice de Sequía Hidrológico (SDI)	Caudales	Nalbantis, Tsakiris	2009
Índice de sequía de caudales estandarizado (IQE)	caudales	Vicente Serrano et al.	2012

Fuente: Elaboración propia.

### 2.5.1 Índices de Disponibilidad de Agua Superficial (1982)

El Índice de Disponibilidad de Agua Superficial (*Surface Water Supply Index, SWSI*) fue desarrollado por Shafer & Dezman (1982) para complementar el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI), es un índice empírico hidrológico desarrollado en el estado de



Colorado (EEUU). El PDSI es aplicable en regiones relativamente homogéneas, pero no fue diseñado para su uso sobre regiones montañosas o de una topografía variable.

El objetivo del SWSI fue englobar los aspectos climatológicos e hidrológicos en un único índice adaptando del PDSI para las principales cuencas del estado de Colorado (EEUU). Los valores del índice están estandarizados, permitiendo la comparación de las condiciones que se producen en diferentes cuencas. El cómputo del índice depende de la estación del año. Así durante el invierno el índice depende de la nieve acumulada, las aportaciones y el almacenamiento en lagos y embalses; mientras que en el resto del año la nieve acumulada se sustituye en el cómputo por las aportaciones.

El procedimiento para la determinación del SWSI en una determinada cuenca es el siguiente: a partir de datos mensuales, se agregan con la frecuencia deseada los datos de precipitación, niveles en embalses, y altura de nieve o aportaciones. Cada componente agregada se normaliza haciendo uso de un análisis de frecuencias, a partir de una serie que proporcione una muestra representativa.

La probabilidad de no excedencia se determina para cada componente a partir del análisis de frecuencia. Cada componente tiene un peso asignado de acuerdo a su contribución al volumen de agua superficial dentro de la cuenca, de modo que una suma ponderada determina el valor del SWSI representativo del conjunto de la cuenca, de forma similar al PDSI, el SWSI está centrado con una media de cero, y varía en el rango de valores entre -4.2 a 4.2.

Varias características del índice limitan su aplicación, entre ellas se encuentra que debido a que para cada cuenca difiere la ecuación que proporciona el SWSI, es difícil la comparación de valores del índice obtenidos en diferentes cuencas o regiones.

Adicionalmente, en una cuenca de estudio, cambios en el conjunto de puntos de medida considerados implica la necesidad de nuevas distribuciones de frecuencia. Además el índice está influenciado por la gestión producida sobre la cuenca, cuya modificación puede requerir de reajustes en los pesos asignados a cada componente. Esto hace que sea difícil mantener una serie temporal del SWSI homogénea (Heddinghaus & Sabol, 1991).

## 2.5.2 Índices de sequía hidrológico de Palmer (1985)

Karl y Knight (1985) mencionaron que un índice de tipo hidrológico que caracterice la situación de sequedad a partir del flujo superficial, humedad del suelo, niveles de lagos, embalses y acuíferos en un modelo hidrológico conceptual fue desarrollado con el nombre de Índice de sequía Hidrológico de Palmer (*Palmer Hydrological Drought Index, PHDI*).

Este índice surge de introducir modificaciones al PDSI, destinadas a detectar anomalías de humedad que afectan a la corriente de agua superficial. El PHDI evoluciona muy lentamente de un mes a otro, de tal forma que no muy útil para detectar las sequías meteorológicas, ya que las reservas de agua no empiezan a resultar afectadas hasta que esta se ha prolongado en el tiempo.

De igual forma, los valores del PHDI permanecen negativos meses después de que el PDSI retorne a valores próximos a cero, dado el tiempo necesario de recarga de las reservas hídricas. En cualquier caso, los valores de PDSI y PHDI son casi equivalentes, manteniendo los mismos valores de referencia para definir las situaciones de sequía (Valiente, 2001).

El **Cuadro 2** muestra la clasificación de las sequías desarrollada por Palmer, mencionado por Karl & Knight (1985), mencionan valores negativos indican condiciones de sequía, teóricamente el índice es cero en todas las estaciones del año.

**Cuadro 2:** Clasificación de sequías hidrológicas de Palmer PHDI

<u>Índice PHDI</u>	<u>Clasificación de sequía</u>
$0 < \text{PHDI} \leq -0.49$	Condición Normal
$-0.50 < \text{PHDI} \leq -0.99$	Sequía incipiente
$-1.00 < \text{PHDI} \leq -1.99$	Sequía Débil
$-2.00 < \text{PHDI} \leq -2.99$	Sequía Moderada
$-3.00 < \text{PHDI} \leq -3.99$	Sequía Severa
Menores de -4.00	Sequía Extrema

Fuente: Palmer 1965.

## 2.5.3 Índice de Sequías - Demanda (1996)

Desarrollado por Weghorst (1996), el índice de sequía – demanda (Reclamation Drought Index, RDI), permite conocer el equilibrio entre la oferta y demanda hídrica. Ha

sido recientemente desarrollado como una herramienta para la definición de la severidad, duración, inicio y final de un evento de sequía (Valiente, 2001).

De igual forma que el Índice de Disponibilidad de Agua Superficial (SWSI), el RDI es un indicador de la sequía hidrológica que se determina dentro del ámbito de la cuenca e incorpora la precipitación, el flujo de los ríos, las masas de nieve, y los almacenamientos como componentes del estado del suministro de agua.

El RDI difiere del SWSI en que incluye en la construcción de índice a la temperatura, la demanda y la duración de la sequía. El RDI se adapta a cada región en particular y su ventaja es la capacidad para incluir condiciones climáticas y factores de suministro de agua, pero por ser un indicador específico las comparaciones entre cuencas son limitadas.

**Cuadro 3:** Clasificación de la sequía hidrológica RDI

<i>Índice de RDI</i>	<i>Clasificación</i>
Menos de -4.00	Sequía severa
$-4.00 < RDI \leq -1.50$	Sequía moderada
$-1.50 < RDI \leq 0.00$	Condición normal a sequía suave
$0.00 < RDI \leq 1.50$	Condición normal a humedad suave
$1.50 < RDI \leq 4.00$	Humedad moderada
Más de 4.00	Humedad extrema

Fuente: Weghorst, 1996

#### 2.5.4 Índices Agregado de Sequías (2004)

El índice agregado de sequías (*Aggregate Drought Index*, ADI), fue propuesto por Keyantash & Dracup (2004), para la evaluación agregada de la ocurrencia de sequías en su forma meteorológica, hidrológica y agrícola, de forma similar al SWSI el índice se aplica sobre una región en particular y utiliza la precipitación, evapotranspiración, caudales, niveles en lagos y embalses, humedad en el suelo y las masas de nieve, que son las componentes de agua superficial del ciclo hidrológico.

El cómputo del índice requiere de una transformación estadística inicial de cada variable para normalizarla y estandarizarla, sobre el conjunto de variables se realiza un análisis de componentes principales, correspondiendo el ADI con los pesos tipificados de la primera componente. Al igual que el SWSI el índice ADI tiene limitaciones especialmente en la falta de homogeneidad que puede aparecer en la serie de diferentes regiones (Gonzalez, 2005).

### 2.5.5 Índices de escorrentía estandarizado (2008)

McKee et al., (1993) Introdujeron el SPI, y sugirió que el método podría ser aplicado a otras variables hidrometeorológicas relacionadas a la sequía como complemento para representar los aspectos hidrológicos de la sequía.

El cálculo del índice de escorrentía estandarizada (*Standardized runoff index*, SRI) es idéntico al cálculo de SPI, fue desarrollado por Shukla & Wood (2008), este análisis incorpora los procesos hidrológicos que determinan la pérdida estacional de caudal debido a la influencia del clima. Como resultado de ello en el mes para una escala de tiempo estacional, el SRI es un complemento útil de SPI para representar aspectos hidrológicos de las sequías (Damberg, 2013).

### 2.5.6 Índices de sequía hidrológico (2009)

Una variedad de índices para caracterizar la sequía hidrológica se han ideado, por el contrario para la sequía meteorológica se han utilizado índices muy simples y eficaces como el índice de precipitación estandarizada (SPI). Nalbantis & Tsakiris (2009) proponen una metodología para la caracterización de la gravedad de las sequías hidrológicas, el cual utiliza un índice análogo al SPI, se introdujo el termino de Índice de Sequía hidrológico (*the Streamflow Drought Index*, SDI) el cual usa los caudales acumulados para sobreponer periodos de análisis de 3, 6, 9 y 12 meses de superposición dentro de cada año hidrológico.

**Cuadro 4:** Clasificación de estados de sequía hidrológica según SDI

Estado	Descripción	Criterio	Probabilidad (%)
0	No hay Sequía	SDI mayor a 0.0	50.0
1	Sequía leve	$-1.0 \leq \text{SDI} < 0.0$	34.1
2	Sequía moderada	$-1.5 \leq \text{SDI} < -1.0$	9.2
3	Sequía severa	$-2.0 \leq \text{SDI} < -1.5$	4.4
4	Sequía extrema	$\text{SDI} < -2.0$	2.3

Fuente: Nalbantis, Tsakiris, 2009

### 2.5.7 Índices de sequía de caudal estandarizado (2012)

El índice de sequía de caudal estandarizado (cuya denominación en castellano es IQE), fue desarrollado por Vicente et al., (2012), con el nombre de (*Standardized Streamflow Index*, SSI), este índice nos permite realizar la comparación espacial y temporal de las

condiciones hidrológicas de una serie de corrientes o conjunto de corrientes a fin de poder cuantificar la sequía hidrológica haciendo uso de diferentes distribuciones de probabilidad acumulada  $F(x)$ .

Las distribuciones de probabilidad  $F(x)$  son transformadas en una variable estandarizada "Z" con una media y una desviación estándar de (0,1) mediante el uso de aproximaciones polinómicas propuesto por Abramowitz & Stegun (1965), que convierte la probabilidad acumulada  $F(x)$  a la equivalente de una variable normal estándar mediante:

$$IQE = W - \left( \frac{c_0 + c_1W + c_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \right) \quad (2.1)$$

$$\text{para } P \leq 0.5 \quad W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (2.2)$$

Dónde: P es la probabilidad de exceder un valor de "x" determinado. Si  $P = 1 - F(x)$ .

$$\text{para } P > 0.5 \quad W = \sqrt{-2 \ln(1 - P)} \quad (2.3)$$

Y el resultado de  $IQE$  se invierte.

*Las constantes polinómicas son:*

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.515517 & d_1 &= 1.432788 \\ c_1 &= 0.802853 & d_2 &= 0.189269 \\ c_2 &= 0.010328 & d_3 &= 0.001308 \end{aligned}$$

Para definir los eventos de sequía ocurridos en las diferentes cuencas se determinaron umbrales invariables en el tiempo y el espacio, dado que las series de caudales son convertidas en valores estandarizados mediante la aplicación del  $IQE$ .

La selección de los umbrales es una cuestión subjetiva, esta fue realizada siguiendo las recomendaciones de los trabajos recientes publicado sobre esta temática (Tallaksen et al., 1997; Fleig et al., 2006; Van Loon et al., 2010), estos autores utilizaron el percentil 30 para delimitar los episodios de sequías en un contexto espacial.

**Cuadro 5:** Clasificación de estados de sequía hidrológica según  $IQE$

<b>Descripción</b>	<b>Umbrales</b>	<b>Probabilidad (%)</b>
No hay Sequía	$IQE$ mayor a 0.00	50.0
Condición normal seca	$-0.84 \leq IQE < 0.0$	30
Sequía moderada	$-1.65 \leq IQE < -0.84$	15
Sequía extrema	$IQE < -1.65$	5

Fuente: Lorenzo, J. 2012

## 2.6 Método de L-momentos

Los L-momentos o momentos lineales, es un sistema alternativo a los métodos tradicionales de los momentos convencionales para describir la forma de las distribuciones de probabilidad Hosking, (1986), citado por Rahman et al., (2013), describe los L-momentos como combinaciones lineales de los momentos de probabilidad ponderados (MPP), definidos por Greenwood et al., (1979).

Los estadígrafos utilizados para la estimación de MPP de una variable aleatoria  $X$ , de tamaño  $n$ , de una función de la distribución acumulada  $F(X)$ , se define como:

$$M_{p,r,s} = E \left[ X^p F(X)^r (1-F(X))^s \right] \quad (2.4)$$

Donde  $E$  indica el valor de la Esperanza, siendo  $p$ ,  $r$  y  $s$  números reales. Los casos especiales particularmente útiles son los momentos de probabilidad ponderados  $\alpha_r = M_{1,0,r}$  y  $\beta_r = M_{1,r,0}$ ; siendo  $r = 0, 1, 2, \dots$ . Por tanto reemplazando en la ecuación (2.4) se tiene:

$$\alpha_r = E \left[ X (1-F(X))^r \right] \quad \text{y} \quad \beta_r = E \left[ X F(X)^r \right] \quad (2.5)$$

Por otro lado los  $r$ -ésimo L-momentos denominado  $\lambda_r$ , está relacionada con el  $r$ -ésimo momentos de probabilidad ponderados (Hosking, 1990); a través de:

$$\lambda_{r+1} = -1 \sum_{k=0}^r \alpha_k -1 \binom{r}{k} \binom{r+k}{k} = \sum_{k=0}^r \beta_k -1 \binom{r}{k} \binom{r+k}{k} \quad (2.6)$$

Por tanto, a partir de los momentos de probabilidad ponderados; los primeros cuatro L-momentos  $\lambda_r$ , están dados por:

$$\lambda_1 = \alpha_0 = \beta_0, \quad (2.7)$$

$$\lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 = 2\beta_1 - \beta_0, \quad (2.8)$$

$$\lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0, \quad (2.9)$$

$$\lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 30\alpha_3 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0, \quad (2.10)$$

El momento lineal de primer orden  $\lambda_1$  es el parámetro de localización o media de la muestra; el de segundo orden  $\lambda_2$  mide la escala o variación, indica el grado de dispersión

de los datos; el momento de tercer orden  $\lambda_3$  mide la forma o hace referencia a su asimetría; y el de cuarto orden  $\lambda_4$  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 cocientes Hosking, (1990), se definen dividiendo aquellos de mayor orden por la medida de escala  $\lambda_2$ :

$$\tau_r = \lambda_r / \lambda_2, \quad r = 3, 4, \dots$$

De la ecuación (2.16) se tiene:

$$\tau = \lambda_2 / \lambda_1 = L - C_v = L - \text{coeficiente de variación} \quad (2.11)$$

$$\tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2 = L - C_s = L - \text{coeficiente de asimetría} \quad (2.12)$$

$$\tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2 = L - C_k = L - \text{coeficiente de kurtosis} \quad (2.13)$$

Dónde:  $\tau$  es L-coeficiente de variación ( $L - C_v$ ),  $\tau_3$  es L-coeficiente de asimetría ( $L - C_s$ ) y  $\tau_4$  es L-coeficiente de kurtosis ( $L - C_k$ ).

### 2.6.1 Propiedades de los L-momentos

Los L-momentos de primer y segundo orden, y las razones entre los L-momentos son las expresiones que se utilizan para estimar los parámetros de las distribuciones de probabilidad asociadas a los L-momentos. Las principales propiedades de estas expresiones según Hosking, (1990), son las siguientes:

**a) Existencia:** Si el promedio de una distribución existe, entonces todos los L-momentos de esa distribución existen

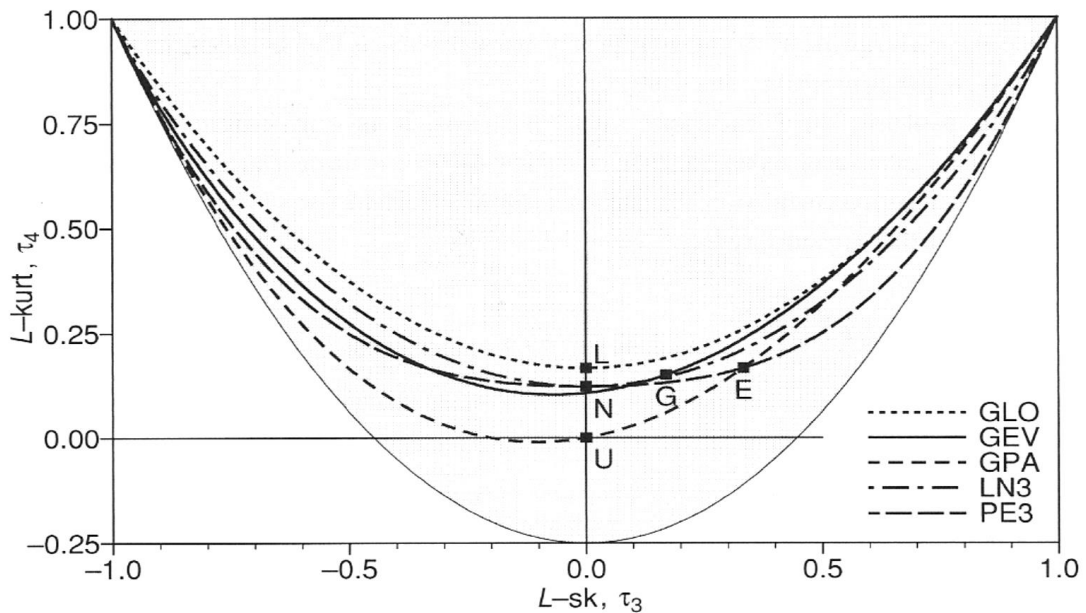
**b) Unicidad:** Si el promedio de una distribución existe, entonces los L-momentos caracterizan solamente a esa distribución. No existen dos distribuciones con los mismos valores de los L-momentos (Hosking, 1990).

Otra característica importante de los L-momentos es que se pueden obtener mejores estimaciones de cuantiles y probabilidades en comparación con otros métodos de análisis con muestras pequeñas. Además se pueden ajustar a un número mayor de distribuciones que mediante otros métodos, por eso son considerados a los L-momentos como un método robusto. Un total de 13 diferentes distribuciones se pueden ajustar mediante el método de L-momentos (Hosking & Wallis, 1997).

En el **Anexo I** se menciona las distribuciones de probabilidades más usadas, y su estimación de parámetros con la metodología de L-momentos.

Sobre la base de las características y propiedades de los L-momentos, estos se utilizan para ajustar muestras a distintos tipos de distribuciones. Para representar gráficamente las diferencias entre diferentes distribuciones ajustadas, comúnmente se hace uso de un gráfico que incluye todas las distribuciones conocido como “diagrama de L-momentos ratios” como se observa en la Figura 5.

Un diagrama de L-momentos proporciona una comparación visual de la muestra estimada de los valores de la población mediante la relación de los L-momentos (L-asimetría y L-kurtosis) (Stedinger et al., 1993).



**Figura 5:** Diagrama de L-momentos ratios de dos y tres parámetros, basado en L-sesgo y L-kurtosis. Las distribuciones representadas son: E: Exponencial, G: Gumbel, L: Logística, N: Normal, U: Uniforme, GPA: Generalizada de Pareto, GEV: Generalizada de valores extremos, GLO: Generalizada Logística, LN3: Lognormal y PE3: Pearson Tipo III. Fuente Hosking & Wallis, 1997.

Como se muestra en la **Figura 5**, las distribuciones de dos parámetros son representadas mediante puntos. Estas distribuciones solo varían en sus parámetros de escala y de localización. Las distribuciones representadas mediante líneas punteadas corresponden a distribuciones de tres parámetros (localización, escala y forma). Las distribuciones que tienen más de un parámetro de forma abarcan comúnmente dos áreas dimensionales del gráfico (Hosking & Wallis, 1997).



## 2.6.2 Estimación de parámetros mediante el método de L-momentos

Generalmente la estimación de una distribución de probabilidad asociada a una muestra aleatoria de tamaño determinado que involucra la identificación de un número finito de parámetros, es un problema difícil de abordar. Mediante el método de los L-momentos se pueden estimar parámetros, para describir las distribuciones, utilizando los primeros cuatro L-momentos, calculados a partir de la muestra, ecuaciones (2.7) al (2.10).

A continuación se describen las funciones de distribución acumulada y sus parámetros usando el método de L-momentos en la presente investigación.

### a) General de Pareto (GPA)

Parámetros (3):  $\xi$  (localización),  $\alpha$  (escala),  $k$  (forma).

La función de distribución y sus parámetros se expresa como:

$$F(x) = 1 - \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - \varepsilon) \right]^{\frac{1}{k}}, \text{ sus parámetros son } \begin{cases} k = \frac{(1 - 3\tau_3)}{(1 + \tau_3)} \\ \alpha = \lambda_2(1 + k)(2 + k) \\ \varepsilon = \lambda_1 - \lambda_2(2 + k) \end{cases}$$

Fuente : Hosking 1990

Citado por: Vicente Serrano 2012

### b) Pearson tipo III (PE3)

Parámetros (3):  $\gamma$  (localización),  $\alpha$  (escala),  $\beta$  (forma).

$$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_{\gamma}^x \left( \frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)},$$

sus parámetros son

$$\begin{cases} \text{si } \tau_3 \geq \frac{1}{3}, \text{ entonces } \tau_m = 1 - \tau_3. \\ \beta = \frac{(0.36067\tau_m - 0.5967\tau_m^2 + 0.25361\tau_m^3)}{(1 - 2.78861\tau_m + 2.56096\tau_m^2 - 0.77045\tau_m^3)} \\ \text{si } \tau_3 < \frac{1}{3}, \text{ entonces } \tau_m = 3\pi\tau_3^2 : \\ \beta = \frac{(1 + 0.2906\tau_m)}{(\tau_m + 0.1882\tau_m^2 + 0.0442\tau_m^3)} \\ \alpha = \sqrt{\pi} \lambda_2 \frac{\Gamma(\beta)}{\Gamma(\beta + \frac{1}{2})}, \quad \gamma = \lambda_1 - \alpha\beta \end{cases}$$

Fuente : Hosking 1990

Citado por: Vicente Serrano

(2012)

**c) General de Valores Extremos (GEV)**

Parámetros (3):  $\xi$  (localización),  $\alpha$  (escala),  $k$  (forma).

$$F(x) = e^{-\left[1 - \frac{k}{\alpha}(x - \varepsilon)\right]^k}$$

sus parámetros son:

$$\begin{cases} k = 7.859C + 2.9554C^2 \\ C = \frac{2}{3 + \tau_3} - 0.6309 \\ \alpha = \frac{\lambda_2 k}{\Gamma(1+k)(1-2^{-k})} \\ \varepsilon = \lambda_1 - \frac{\alpha}{k} (1 - \Gamma(1+k)) \end{cases}$$

Fuente: Hosking 1985  
Citado por: Vicente Serrano (2012)

**d) Weibull (WEI)**

Parámetros (3):  $m$  (localización),  $a$  (escala),  $b$  (forma).

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-m}{a}\right)^b}$$

sus parámetros son

$$\begin{cases} b = \frac{1}{(7.859C + 2.9554C^2)} \\ C = \frac{2}{3 - \tau_3} - 0.6309 \\ a = \frac{\lambda_2}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)\left(1 - 2^{-\frac{1}{b}}\right)} \\ m = \lambda_1 - a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \end{cases}$$

Fuente: Hosking 1986  
Mencionado por: Vicente Serrano 2012

**e) Logística Generalizada (GLO)**

Parámetros (3):  $u$  (localización),  $\alpha$  (escala),  $k$  (forma).

$$F(x) = \left(1 + e^{-\left[-k^{-1} \cdot \log\left(\frac{1-k \cdot (x-u)}{\alpha}\right)\right]}\right)^{-1}$$

sus parámetros son:

$$\begin{cases} k = -\tau_3 \\ \alpha = \lambda_2 \cdot \sin \frac{k\pi}{k\pi} \\ u = \lambda_1 - \alpha \left(\frac{1}{k} - \frac{\pi}{\sin k\pi}\right) \end{cases}$$

Fuente: Hosking (1990)

**f) Log Normal (LN3)**

Parámetros (3):  $\alpha$  (localización),  $\sigma$  (escala),  $\mu$  (forma).

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x - a) - u}{\sigma}\right)$$

donde  $\Phi$  es la función de distribución acumulada

$$\begin{cases} \sigma = 0.999281z - 0.006118z^2 + 0.000127z^5 \\ z = \sqrt{\frac{8}{3}} \Phi^{-1}\left(\frac{1 + \tau_3}{2}\right) \\ \mu = \ln\left[\frac{\lambda_2}{\text{erf}\left(\frac{\sigma}{2}\right)}\right] - \frac{\sigma^2}{2} \\ \text{erf es el error de gauss} \\ \text{función: } \text{erf}\left(\frac{\sigma}{2}\right) = 2\Phi\left(\frac{\sigma}{2}\sqrt{2}\right) - 1 \\ a = \lambda_1 - e^{\frac{u + \sigma^2}{2}} \end{cases}$$

Fuente: Hosking 1990  
Citado por: Vicente Serrano (2012)

## 2.7 Selección de la distribución de probabilidad

Ante la existencia de diferentes métodos de muestreo y distintas distribuciones, la selección del método más adecuado para el ajuste de los datos es algo tedioso, los tests estadísticos habituales de bondad de ajuste, como el chi-cuadrado o el de Kolmogorov-Smirnov pueden utilizarse para comprobar el grado de ajuste, sin embargo el desarrollo de nuevas metodologías proporcionan enfoques cada vez más robustos al momento de seleccionar la distribución teórica a la que se ajusten los datos (Beguería, S. 2002 ).

### 2.7.1 Distancia mínima ortogonal (DMO)

Kroll & Volge, (2002) proponen medir la proximidad entre los L-momentos de la muestra (datos) y los L-momentos teóricos (Probabilidad) en el diagrama de *L-momentos ratios*, utilizando un método que representa la Distancia Mínima Ortogonal (DMO), una distribución con el menor valor de DMO es la mejor elección entre varias posibles distribuciones.

Una inspección visual directa de las relaciones observadas (datos) y las relaciones teóricas de L-momentos en el diagrama de *L-momentos ratios* es algo subjetivo, y puede no ser posible distinguir las diferencias entre dos o más tipos de distribución, cuando todos ellos parecen ser posibles candidatos para representar los datos de la muestra en un diagrama de *L-momentos ratios* (Vicente, 2012).

La DMO se expresa mediante la siguiente relación:

$$DMO = \frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (2.14)$$

$$d_i = \begin{cases} \left| \tau_2 \left[ \tau_3^0(i) \right] - \tau_2^0(i) \right| & \text{para: } 2 \text{ parametros} \\ \left| \tau_4 \left[ \tau_3^0(i) \right] - \tau_4^0(i) \right| & \text{para: } 3 \text{ parametros} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\left| \tau_4 \left[ \tau_3^0(i) \right] - \tau_4^0(i) \right| \quad \text{para: } 3 \text{ parametros} \quad (2.16)$$

Dónde:  $N$ = Número de sitios de análisis  
 $n_i$ =longitud de registro del sitio  
 $(t=2, 3, 4)$ =observaciones de la muestra (*L-cv*, *L-asimetría* y *L-kurtosis*)

$\tau_2 \left[ \tau_3^0(i) \right]$  = Valores Teóricos de *L-coeficiente de Variación*. (*Lcv*.)

$\tau_4 \left[ \tau_3^0(i) \right]$  = Valores Teóricos de *L-Kurtosis*

Los valores teóricos de L-cv y L-Kurtosis provienen de la distribución de probabilidad de la muestra en función a su L-asimetría (Cuadro 6)

**Cuadro 6:** Aprox. polinómicas de L-kurtosis ( $\tau_4$ ) en función de L-asimetría ( $\tau_3$ )

	General de Pareto	Valor Extremo Generalizado	Logística Generalizada	Log Normal	Pearson tipo III	Weibull
	(GPA)	(GEV)	(GLO)	(LN3)	(PE3)	(WEI)
$A_0$	0.00000	0.10701	0.16667	0.12282	0.12240	0.10701
$A_1$	0.20196	0.11090	-	-	-	-0.11090
$A_2$	0.95924	0.84838	0.83333	0.77518	0.30115	0.84838
$A_3$	-0.20096	-0.06669	-	-	-	0.06669
$A_4$	0.04061	0.00567	-	0.12279	0.95812	0.00567
$A_5$	-	-0.04208	-	-	-	0.04208
$A_6$	-	0.03763	-	- 0.13638	-0.57488	0.03763
$A_7$	-	-	-	-	-	-
$A_8$	-	-	-	0.11368	0.198383	-

Fuente: Hosking & Wallis, 1997.

**a) Aproximaciones de la relación L-asimetría y L-kurtosis**

Hosking & Wallis (1997) mencionaron que una vez conocidas los coeficientes de  $A_i$  dado en la **Cuadro 6**, la construcción de los diagramas *de L-momentos ratios* con los parámetros de muestra *L-asimetría* ( $\tau_3$ ) para distintas distribuciones de probabilidad, los valores de *L-kurtosis* ( $\tau_4$ ) se calculan en función de los valores de *L-asimetría* ( $\tau_3$ ) mediante aproximaciones polinómicas de la siguiente forma:

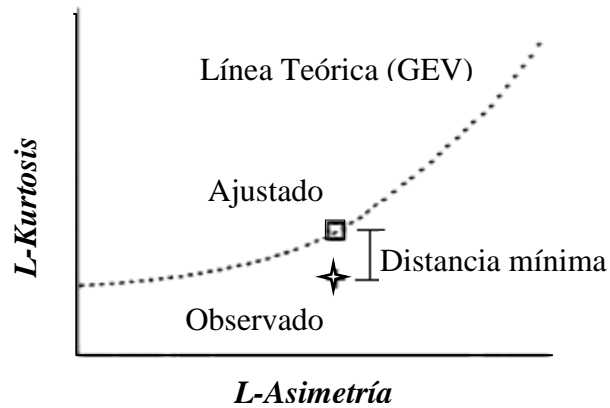
$$\tau_4 = \sum_{k=0}^8 A_i \tau_3^i \quad (2.17)$$

Dónde:

$A_i$  = constantes polinómicas de la distribución (i).

$\tau_3$  = Asimetría de la muestra para la distribución (i).

$\tau_4$  = Kurtosis teórica para la distribución (i).



**Figura 6:** Gráfica de L-momentos ratios. Distancia Mínima Ortogonal (DMO) de la data observada a la curva teórica.

## 2.8 Análisis de series de tiempo

El análisis de una serie temporal tiene por objetivo verificar los supuestos básicos de toda variable hidrológica, este análisis es una práctica habitual para poner a prueba la hipótesis de que la data observada sea homogénea (libre de tendencia y/o saltos), estacionario (constante en el tiempo y libre de tendencia), independiente (que los datos sean aleatorios)

El análisis de una serie temporal mejorar la comprensión de la variable hidrológica mediante mecanismos estadísticos que generan una serie de observaciones, (Kendall, G. 1975), este objetivo, solo puede ser estudiado a través de una serie de mediciones.

En este contexto una serie cronológica es la representación parcial de un fenómeno complejo que en la realidad es la representación de un conjunto de series que representan diversos fenómenos asociados. Estos procedimientos pueden ser puntuales o regionales, aun así, este tipo de análisis requiere de una explicación antes de hacer cualquier tipo de interpretación que abarque dimensiones espaciales del fenómeno producido por una serie puntual. Los autores están de acuerdo con las componentes de estas perturbaciones en una serie de tiempo típica y se definen en cuatro categorías:

- Tendencia: es el componente de largo plazo que representa el crecimiento o disminución en la serie sobre un periodo amplio.
- Periodicidad: fluctuaciones regulares alrededor de la tendencia
- Autocorrelación o efecto memoria: representa la magnitud de una observación dependiente de sus observaciones previas.

➤ Componente irregular aleatorio

El análisis de estas componentes (supuestos básicos) son muy útiles, sin embargo esto solo puede ser afirmado tomando en cuenta hipótesis suficientemente fuertes concernientes al carácter lineal o no lineal del sistema generado que muestra una serie de tiempo.

A continuación se desarrollan algunos conceptos estadísticos para posteriormente desarrollar los test estadísticos que determinaran la tendencia, quiebre o aleatoriedad de una serie hidrológica.

**Hipótesis:** El punto de inicio de una prueba o test estadístico es definir una hipótesis nula (H0) y una hipótesis alternativa (H1). Por ejemplo un test para la tendencia.

Hipótesis nula: H0 no hay tendencia en los datos.

Hipótesis alterna: H1 hay una tendencia incremental o descendente.

**Test estadístico:** es un medio de comparación entre H0 y H1, representa un valor numérico calculado de las series de datos que están siendo testeadas.

**Nivel de significancia ( $\alpha$ ):** Al contrastar una cierta hipótesis, la máxima probabilidad con la que estamos dispuestos a correr el riesgo de cometer un error de tipo I se llama nivel de significancia. Según Kundzewicz & Robson, (2000) una posible interpretación del nivel de significancia sería:

$\alpha > 0.1$  poca evidencia contra H0

$0.05 < \alpha < 0.1$  posible evidencia contra H0

$0.01 < \alpha < 0.05$  fuerte evidencia contra H0

$\alpha < 0.01$  muy fuerte evidencia contra H0.

También es necesario definir los tipos de test paramétricos y no paramétricos:

- Los **test paramétricos** asumen que los datos y errores de una serie de tiempo siguen una distribución particular (usualmente una distribución normal) y son muy útiles para cuantificar el cambio en la media o gradiente. Los tests paramétricos son generalmente más potentes que los no paramétricos.
- Los **tests no paramétricos** detectan la tendencia y el cambio pero no cuantifican el tamaño de estas, pero son más útiles porque la mayoría de series de tiempo no son distribuidas normalmente.

### **2.8.1 Descripción de los tests estadísticos**

La literatura correspondiente a la aproximación estadística para las variables hidrometeorológicas es particularmente abundante, en este ítem se describen algunas pruebas estadísticas aplicadas a la presente investigación.

En el **Anexo II** se detallan las pruebas estadísticas implementadas en esta investigación, para el análisis de tendencia, se implementó la prueba de Mann-Kendall (Kendall, 1975), el análisis de Homogeneidad (cambios en la media) se ha implementado la prueba de Pettit (Pettit, 1979) y por último para el tratamiento de datos cuantitativos (atípicos) se ha implementado la prueba de Grubbs (Grubbs, 1969), los mismos que se describen detalladamente en este anexo.

### **2.9 Método del Vector Regional**

Acuña (2010) y Vauchel (2004) mencionan: El Método del Vector Regional (MVR) está orientado a tres tareas definidas: La crítica de datos, la homogenización y la extensión completación de datos.

La idea básica del MVR, es comparar estaciones por correlación o doble masa, como se hace en los métodos clásicos, se elabora una estación ficticia que es una “especie de promedio” de todas las estaciones de la zona, con la cual se comparan cada una de las estaciones.

El MVR se emplea entonces, para el cálculo de esta estación ficticia “Vector” el concepto de Precipitación Media Extendida al período de trabajo, salvando los problemas del peso de estaciones más lluviosas sobre las menos lluviosas (como ocurriría con un promedio simple) y la existencia de datos faltantes o diferentes períodos de funcionamiento (que calcularían promedios alterados en caso de tener solamente años húmedos o solamente años secos de determinada estación) como ocurriría al obtener valores estandarizados o centrados reducidos de lluvia. Bajo estos conceptos, se emplea el método de mínimos cuadrados para encontrar los Índices Pluviométricos Regionales Anuales “Zi” y la Precipitación Media Extendida “Pj”.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{X_{ij}}{\bar{X}_j - Z_i} \right)^2 \quad (2.18)$$

Dónde:

- I : Índice de año
- J : Índice de estación
- X<sub>ij</sub> : Precipitación anual en la estación j el año i.
- X<sub>j</sub> : Precipitación media extendida al periodo de “n” años.
- Z<sub>i</sub> : Índice pluviométrico regional del año i.

El método del vector regional es un método original desarrollado en el IRD en los años 1970 por dos hidrólogos, G. Hiez y Y. Brunet-Moret, con el fin de realizar estudios de homogeneidad de las precipitaciones. Puede aplicarse también a otros tipos de datos, siempre que estos sean **independientes entre sí** y **seudo-proporcionales**. Es muy superior al método tradicional de los dobles acumulados y correlaciones entre estaciones formadas de dos en dos estaciones.

El método puesto a punto por Y. Brunet-Moret calcula mediante los mínimos cuadrados los **promedios extendidos** de cada estación durante el periodo de estudio y los **índices del vector** para cada año. Una simple prueba de diferencia con el promedio elimina del cálculo los valores erróneos.



### III. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la presente investigación, se emplearon los siguientes materiales y/o datos: se desarrolló una metodología para el procesamiento y la automatización de datos hidrométricos mediante el lenguaje de programación R.

#### 3.1 Área de estudio

##### 3.1.1 Ubicación geográfica y política

La Vertiente peruana del Pacífico, geográficamente está comprendida entre los paralelos 3° 22' 38" y 18° 21' 03" Latitud sur y meridianos 70° 02' 02" y 81° 19' 34.5" Longitud oeste, cubre una gran extensión que representa el 21.7% del área total del país, está constituida por 62 cuencas principales (unidades hidrográficas), de las cuales analizaremos 26 unidades hidrográficas, estas se mencionan a continuación de Sur a Norte: Caplina, Sama, Locumba, Tambo, Acarí, Ica, Pisco, San Juan, Cañete, Mala, Rimac, Chancay-Huaral, Huaura, Pativilca, Casma, Nepeña, Santa, Virú, Moche, Chicama, Jequetepeque, Zaña, Chancay-Lambayeque, Motupe, Chira y Tumbes (estas 02 últimas binacionales).

Estas dos últimas cuencas Chira y Tumbes son transfronterizas, abarcando parte del territorio ecuatoriano conocidas como cuenca Catamayo y Puyando respectivamente.

Políticamente, los departamentos que integran las unidades hidrográficas analizadas se mencionan de Sur a Norte: Tacna, Moquegua, Arequipa (parte andina de Puno y Ayacucho), Ica (parte andina de Huancavelica), Lima, Ancash, La libertad, Cajamarca, Lambayeque, Piura y Tumbes.

En el **Cuadro 7** se observa las Unidades Hidrográficas que conforman parte del territorio peruano, la Vertiente peruana del Pacífico (VP) está conformada por 62 cuencas y 65 intercuenas cubriendo el 21.7% del territorio peruano, mientras que la región Hidrográfica del Amazonas está conformado por 84 cuencas y 45 intercuenas, cubriendo la mayor parte del territorio peruano con 74.5% del área total, mientras que la región Hidrográfica del Titicaca está conformado por 13 cuencas, 5 intercuenas y el lago del Titicaca, cubriendo el 3.8% del territorio peruano.

**Cuadro 7:** Unidades Hidrográficas del Perú

Región Hidrográfica	Superficie		Unidades Hidrográficas		
	(Km <sup>2</sup> )	(%)	Cuencas	Intercuenca	Lagos
Pacífico	278 482.44	21.7	62	65	----
Amazonas*	957 822.52	74.5	84	45	----
Titicaca	48 910.64	3.8	13	5	1
<b>Total</b>	<b>1 285 215.60</b>	<b>100.0</b>	<b>159</b>	<b>70</b>	<b>1</b>

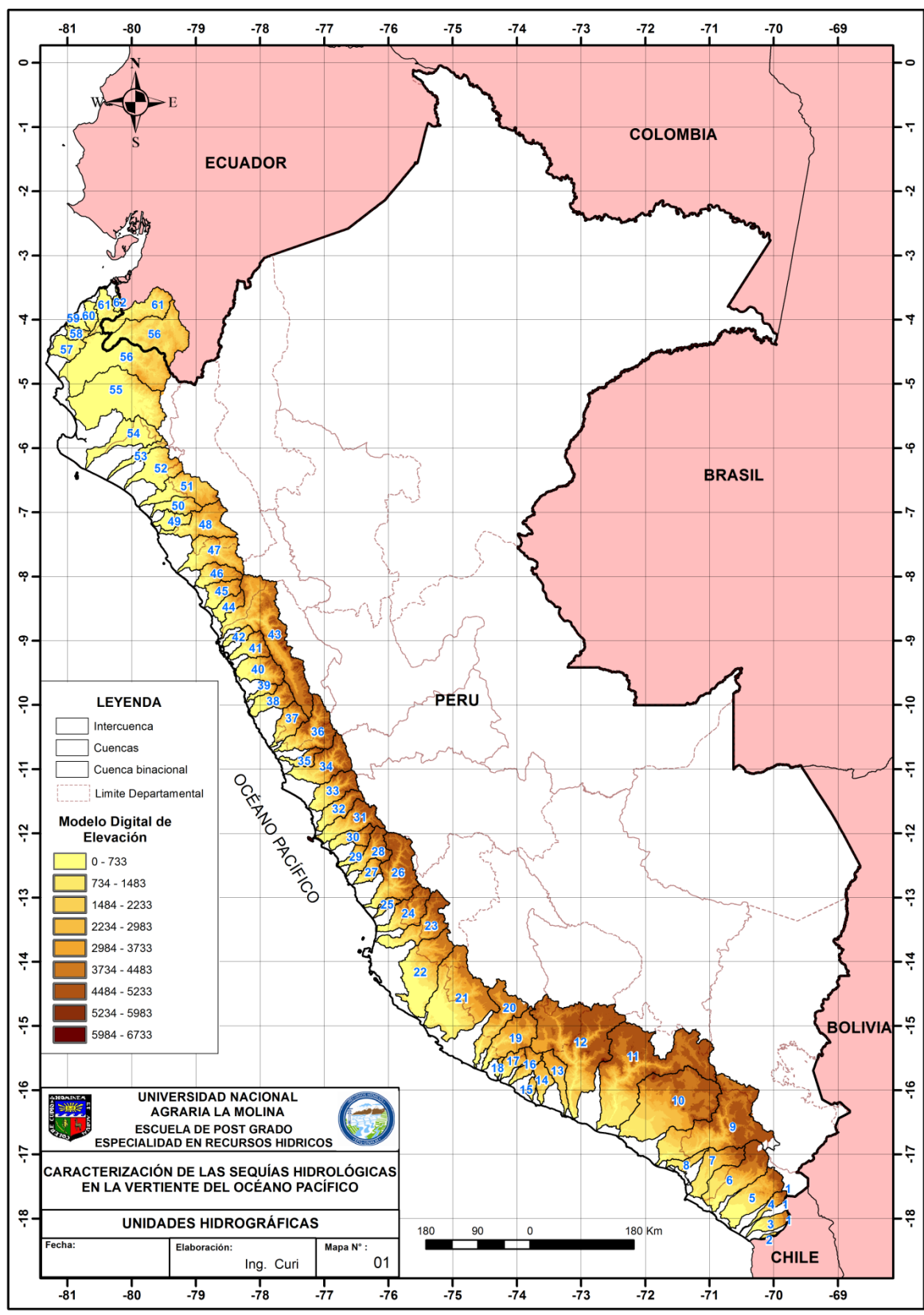
Fuente: ANA y MINAGRI, 2010.

La **Figura 7** muestra las Unidades Hidrográficas (UH) que están localizadas en la Vertiente peruana del Pacífico (VP), estas fueron elaboradas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

La VP está conformada por 62 unidades hidrográficas (codificadas de Sur a Norte) y 65 intercuencas, la altura de estas UH se encuentra en el orden de 0 m.s.n.m en su desembocadura (Océano Pacífico) y 6733 m.s.n.m en la parte más alta (Cordillera de los andes) que es la divisoria continental entre la Vertiente del Pacífico y Atlántico.

El **Cuadro 8** muestra las UH ordenadas de Sur a Norte y su respectiva codificación, este cuadro detalla las características generales de las 62 UH localizadas en la Vertiente peruana del Pacífico, del total de UH el 88% son cuencas naturales, mientras que un 12% son cuencas reguladas (desnaturalizadas) por presentar algún tipo de transvases o represamiento.

Se menciona que las 26 UH evaluadas en la presente investigación están marcadas (negrita) por presentan control hidrométrico.



**Figura 7:** Unidades Hidrográficas (UH) pertenecientes a la Vertiente peruana del Océano Pacífico y Modelo digital de elevación (DEM), las UH son codificadas de Sur a Norte.

**Cuadro 8:** Características de las Unidades Hidrográficas de la Vertiente peruana del Pacífico.

<b>Cod.</b>	<b>CUENCA</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GENERAL</b>
1	Lluta	Cuenca natural y tiene como límite a Chile por el sur.
2	Concordia	Cuenca natural
3	Hospicio	Cuenca natural
4	<b>Caplina</b>	Nace en el nevado de Achacollo a 5 690 msnm, tiene agua durante todo el año en su sector interandino; en la costa es un pequeño canal que el uso agrícola seca por completo. Su escurrimiento depende del deshielo de glaciales y del agua subterránea.
5	<b>Sama</b>	Sus nacientes están a 5050 msnm en el cerro Llocollone. En su cuenca se ha construido la represa de Conorpico, de 2 MMC de capacidad. En época de estiaje el río Salado o Yabroco es un foco de contaminación hidrotermal.
6	<b>Locumba</b>	Sus nacientes se ubican en tres fuentes: La primera en el nevado Chuquiananta, límite con Moquegua, en cuya vertiente oriental se genera la Qda. Tacalaya que luego se denomina río Camilaca; por la vertiente del lado sur se generan las Qdas. Borogueña y Cinto. La segunda fuente se localiza en la cadena volcánica, con una serie de afluentes que forman el río Callazas, destacando en sus nacientes la laguna Suches. La tercera fuente la constituye el nevado Larjanco, al este del volcán Yucamane, cuyos deshielos se juntan con las aguas de los geysers de la Qda. Calientes, éste confluye con el río Salado, que es la otra vertiente, cuyos orígenes están en el cerro sulfuroso.
7	Moquegua	Nace en el límite con la meseta del Titicaca, entre una serie de arroyos y desagües de lagunas formadas en las cumbres nevadas del sur del departamento de Puno, sus afluentes son el Torate, Huancarane y Tumulaca.
8	Honda	
9	<b>Tambo</b>	Nace en Moquegua al sur del sistemas Lagunillas (Puno) de la unión del río Paltiture e Ichuña. Sus afluentes principales son el Ichuña y el Coralque. Alberga al reservorio Pasto Grande de 210 MMC de capacidad, el área de la cuenca, desde sus nacimientos hasta su llegada al Océano Pacífico es de 12 953,36 km <sup>2</sup>
10	Quilca – Victor - Chili	Nace en la laguna de Coline entre los conos volcánicos del Misti y el Chachani. Está cuenca está formado por dos grandes sectores: Siguas y Vitor. Su sistema hidrológico está conformado por Chili Regulado y el No Regulado (Sub Cuencas Yura y Oriental). El regulado comprende el Embalse El Pañe de 99.6 MMC de capacidad, el Canal de derivación Pañe – Sumbay (77,5 km) trasvasa estos recursos, hacia el río Sumbay; el Embalse Dique los Españoles de 11 MMC almacena las aguas del río Colca (captados en la bocatoma Jancolacay). El Embalse El Fraile de 127.2 MMC de capacidad regula las aguas de la cuenca alta del río Blanco. El embalse Aguada Blanca de 30.4 MMC y Pillones de 78.5 MMC de capacidad.
11	Camaná	Nace en los cerros Yarenate y Torre, con el nombre de Paco Paco, adopta, luego el de río Chilamayo, Colca, Majes y Camaná. Alberga a la Represa de Condoroma de 285 MMC de capacidad y realiza transvases del río Colca hacia el río Sumbay (cuenca del Chili).
12	Ocoña	Nace a 5 444 msnm en los nevados de Chancoaña, que concentran sus deshielos en la laguna de Huanzo. En su recorrido forma el Cañón del Cotahuasi con vertientes rocosas y escarpadas que sobrepasan los 1 200 m desde el lecho fluvial
13	Pescadores - Caravelí	Tiene su origen en una serie de quebradas que se originan en la Cordillera Occidental Volcán Sara-Sara y laguna de Parinacochas, estas quebradas Chuñuña, Macha y Chucane se juntan confluyendo en el río Caravelí.
14	Ático	Nace en los cerros de Altos de Cachica, Cortaderas y Checcheorcco (quebradas Tucune, Huinllo, Crucero y Cachica), las cuales al juntarse toman el nombre de quebrada Pozo Guanaco; de la unión de esta quebrada con de la Río Seco, se forma el río Ático.

<b>Cod.</b>	<b>CUENCA</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GENERAL</b>
15	Choclón	Cuenca natural
16	Chaparra	Nace a 3 950 msnm; con el nombre de río Vituco, después de unirse con la Quebrada Yurca Huayco toma el nombre de quebrada Quicacha hasta el poblado del mismo nombre, aguas abajo de este toma el nombre de río Chaparra
17	Chala	Nace con el nombre de quebrada Huayllayacc, adoptando en su recorrido la denominación de río Chacras, quebrada Huampampa, Chactasja, La Charpa y Tocoto, y a partir de su confluencia con la quebrada San Andrés toma el nombre de río Chala.
18	Honda	Cuenca natural de grandes extensiones áridas y no presenta mediciones hidrométricas
19	Yauca	Nace en la laguna de Pallapalla (Ayacucho) con el nombre de Antapallca; luego adoptada denominaciones de río Pallacarona, río Sangarara y río Lampalla, conociéndosele con él de río Yauca a partir de su confluencia con la quebrada de Languirre.
20	<b>Acari</b>	Nace en la Laguna de Huanccacocha, tomando el nombre de Acari, en la ciudad del mismo nombre, con el cual desemboca en el océano Pacífico. Tiene como principales afluentes a los ríos Yaurihuiri, Chilquis, Jochangay, San Pedro, Chontay y San José
21	Grande	Nace únicamente a base de las precipitaciones que ocurren en la cuenca alta y dan origen a un conjunto de cauces secos intermitentes, y después de recibir aportes de los ríos Pajonal y Trancas dan origen al río Grande.
22	<b>Ica</b>	Nace de la confluencia de los ríos Tambo y Jatunchaca, sus afluentes son Huacceyoc, Tombillos, Trapiche, Cansas, Tingué, Santiago y Olaya. El sistema Choclococha (Orcococha, Choclococha y Ccaracocha) de 160 MMC, permite la derivación del río Pampas, hacia el río Ica para aprovechamiento durante estiaje desde 1959.
23	<b>Pisco</b>	Nace en Chojcho a 5050 msnm con el nombre de Luicho, luego se llama río Chiris, y después de confluir con el río Castrovirreyna se denomina Pisco.
24	<b>San Juan</b>	Se origina al norte de la provincia de Castrovirreyna, en el departamento de Huancavelica, con el nombre de río San Juan. Recibe el nombre de Chinchá cuando recorre la costa, donde forma un extenso valle agrícola.
25	Topara	Sirve de límite a los departamentos de Lima e Ica ésta quebrada es alimentada por filtraciones de la Quebrada de Ñoco y el aporte proveniente de las lluvias. Tienen cauces secos rara vez poseen escorrentía.
26	<b>Cañete</b>	Sus orígenes se inician en la laguna Ticllacocha, a 5000 msnm. Su primera denominación es quebrada Huachic-Pampa, cambiando a río Cañete cuando confluye con el efluente de la laguna Mollococha.
27	Omas	Se origina en los cerros Ocupampa, Puchicampampa, Quishuar y Maururo a 4600 msnm con el nombre de río Omas, no cuenta con lagunas o nevados que favorezcan la escorrentía de sus cauces. Sus afluentes son Patar, Tres Cruces y Marangalla.
28	<b>Mala</b>	Sus nacientes más lejanas están al sureste de Matucana, donde se llama río Carhuapampa, pasa a llamarse Mala después de confluir con el río Ayavirí. Su valle interandino es gran productor de frutales, en especial manzanas y plátano.
29	Chilca	No forma un río, pero deja fluir sus aguas de las partes altas.
30	Lurín	Nace en los nevados Suerococha, Chanape y Otoshmicunan. Sus afluentes son los ríos: Huillcapampa, Quiruchaqui, Pachachaca, Catavilla, Taquia y Characuayqui, desde el lugar denominado San Damián de Huarochirí adopta el nombre de Lurín.
31	<b>Rímac</b>	Nace en las lagunas formadas por los deshielos del nevado Ticlio, a más de 5000 msnm. El régimen natural del río es regulado de su afluente del río Blanco (embalse Yuracmayo de 48 MMC), el Santa Eulalia (19 lagunas) y la derivación del sistema Marcapomacocha (1963). Totalizando un almacenamiento de 282 MMC.
32	Chillon	Tiene sus nacientes en las inmediaciones de la cordillera La Viuda, en las lagunas de Pucracocha, Aguascocha y Chuchón. Sus afluentes principales son el río Yamacoto, Huancho, Ucaña y Quisquichaca.

Cod.	CUENCA	CARACTERÍSTICAS GENERAL
33	<b>Chancay-huaral</b>	Nace en las lagunas de Acoscocha, Lichicocha y Verdecocha, ubicadas al pie del glaciar Alcoy (Lima). De estas lagunas salen sus aguas con el nombre de río Ragrampi, a partir de la confluencia del río Baños cambia a río Acos y finalmente a Chancay.
34	<b>Huaura</b>	Tiene sus orígenes en las lagunas que separa a las cuencas de los ríos Marañón, Huallaga y Mantaro. Entre estas lagunas destacan las de Surasaca, Cochaquillo, Patón, Coyllarcocha y Mancancocha, embalsadas y en actual operación.
35	Supé	Nace en las lagunas Agfuascocha y Jurucocha, mantiene este nombre hasta la localidad de Lashcamayo, para luego cambiar como río Ambar, continua con este nombre hasta su confluencia con la quebrada Carrizal o Jaiva, donde se origina el río Supé.
36	<b>Pativilca</b>	Tiene su origen en la Cordillera de Huayhuash a más de 5,000 msnm, es alimentado por lluvias, deshielos y lagunas ubicadas en las cabeceras de la cuenca, se ha identificado a la Laguna Viconga. y proyectos hidroeléctricos como la central Cahua.
37	Fortaleza	Se origina en la Cordillera Negra (Ancash), y desemboca al norte de la ciudad de Paramonga (Lima), es de régimen irregular, pues depende de las lluvias estacionales de verano, las variaciones de su caudal son muy grandes.
38	Huarmey	Se origina en las lagunas de Utato, Toco, Psiquis y Murga, con el nombre de Huayup, manteniendo este nombre hasta la confluencia con el río Yanaparin, donde adopta el de Huarmey. Sus afluentes principales son las quebradas Pillac, Huli-Huran y Huayán, Tiene una superficie de drenaje total de 2 232,96 km <sup>2</sup>
39	Culebras	Nace en la parte occidental de la cordillera negra, formando las quebradas Huanchay y Cotapuquio, las que se unen a la altura de la localidad de Quian, dando lugar al denominado Culebras.
40	<b>Casma</b>	Nace en la cordillera negra, es de régimen irregular, por esa razón que solo en algunos meses lleva agua y largas temporadas permanece seco, tiene una superficie de la cuenca colectora húmeda de 1 521 km <sup>2</sup> .
41	<b>Nepeña</b>	Nace en la laguna Chupicocha a 4 600 msnm (Cordillera Negra) con el nombre de río Tocanca; a medida que desciende en su cauce recibe afluentes de las lagunas de Capado, Coñocranra y Wirí, La cuenca del río Nepeña, presenta un área de drenaje total de 1 878,29 km <sup>2</sup> .
42	Lacramarca	Tiene su origen en la parte occidental de la Cordillera Negra formado en base a dos quebradas en la parte alta, conocidas como de Santa Ana y Coles, denominándose río o quebrada Lacramarca a partir de su confluencia.
43	<b>Santa</b>	Nace en la cordillera Blanca, en el nevado de Tucto vierte sus aguas en la laguna de Conococha. A través de los Proyectos CHINECAS y CHAVIMOCHIC se derivan sus aguas hasta Chicama por el norte y hasta Nepeña por el sur. La superficie de la cuenca, desde sus nacientes hasta la desembocadura al mar, es de 11 596,52 km <sup>2</sup>
44	Huamansaña	El río Chao está prácticamente seco todo el año, con excepción de pocos días en los meses de enero a abril, en que las lluvias, que en ese periodo caen en la Sierra, cargan su cauce con descargas que no llegan al mar debido a la aridez de dicho cauce.
45	<b>Viru</b>	La superficie de la cuenca, desde sus nacimientos hasta su desembocadura en el océano Pacífico, es de 1 911,96 km <sup>2</sup> de los cuales aproximadamente 1 081 km <sup>2</sup> corresponden a la cuenca húmeda, situada por encima de los 1500msnm. Tiene su origen en las pequeñas lagunas denominadas Usgón, Brava y Negra, ubicadas en las faldas del Cerro Pelón Chico, dando origen al río Huacapongo. Sus principales afluentes son: Palconque, Carabamba, Tantada, Pirhuay y La Vega.
46	<b>Moche</b>	La superficie de la cuenca, desde sus nacimientos hasta su desembocadura en el océano pacífico, es de 2 115,41 km <sup>2</sup> corresponde a la cuenca húmeda, situado por encima de los 1500msnm.
47	<b>Chicama</b>	La superficie de la cuenca del río Chicama, desde sus nacimientos hasta su llegada al océano pacífico, es de 4 493,7 km <sup>2</sup> .

Cod.	CUENCA	CARACTERÍSTICAS GENERAL
48	Jequetepeque	Nace en los cerros Malca Huarcaya y Collatan; formando las lagunas Cyshuro, Tapada y Mamacocha. En 1988, entró en operación el reservorio Gallito Ciego de 400 MMC de capacidad de almacenamiento.
49	Chaman	Está conformado por las quebradas San Gregorio y río San José, con escasos o casi nulo escurrimiento en estiaje, pero en épocas de avenidas extraordinaria sus aguas modifican su cauce; especialmente en la parte baja del Valle.
50	Zaña	Nace en la confluencia de los cerros Cushuro y Ranga, sobre los 3000 msnm, recibe en sus trayectos diversos aportes y uno de los principales es la quebrada Chulis, el área de la cuenca desde sus nacimientos hasta su desembocadura en el Océano Pacífico es de 1745,40 km <sup>2</sup> .
51	Chancay – Lambayeque	Nace en la laguna Mishacocha a 3800 msnm. El río Chancay Lambayeque se divide en tres ramales: canal de Taymi, río Lambayeque y el río Reque. Está formado por la derivación del río Chotano (1956) y río Conchano (1983) y presenta regulación del Reservorio Tinajones de 320 MMC.
52	Motupe	Nace en las confluencias de los ríos Chiñiama y Chóchope. Las aguas del río Motupe normalmente no llegan hasta el mar, debido al uso en la actividad agrícola.
53	Olmos	Nace en la cordillera occidental a una altitud de 2100 msnm su régimen es estacional, su caudal es pequeño; sólo en épocas de lluvias presenta caudal.
54	Cascajal	Nace en el Cerro Peña Blanca (Huarmana), con el nombre de la quebrada Cuculí, recibiendo luego las aguas de las quebradas El Tocto y Palo Blanco. Su curso continúa hacia el oeste, perdiéndose en el territorio de la provincia de Sechura (Piura).
55	Piura	Se origina en el cerro Sorogon, con el nombre de San Martín, esta cuenca recibe las aguas del reservorio Poechos a través del canal Daniel Escobar. En su afluente Chipillico opera el reservorio San Lorenzo de 260 MMC desde 1959.
56	Chira	Nace en Loja (Ecuador) con el nombre Catamayo y luego cambia a Chira aguas debajo de su confluencia con el Matará o Calvas, que en un tramo sirve de límite entre Perú y Ecuador. La cuenca alberga al reservorio Poechos de 480 MMC.
57	Pariñas	Cuenca natural con una extensión de 1704.9 km <sup>2</sup>
58	Fernández	Cuenca natural con una extensión de 740.3 km <sup>2</sup>
59	Qda. Seca	Cuenca natural con una extensión de 483.9 km <sup>2</sup>
60	Bocapan	Cuenca natural de régimen intermitente y no presente antecedentes de mediciones hidrométricas, cuenta con una extensión de 900.6 km <sup>2</sup>
61	Tumbes	La cuenca del río Puyango-Tumbes, se ubica en las provincias de El Oro y Loja en Ecuador; y en el departamento de Tumbes, en el Perú, Nace en las cordilleras del Zaruma (Ecuador) y cambia de nombre a Tumbes al ingresar a territorio peruano. Su permanente caudal lo hace el único río navegable de la Costa peruana.
62	Zarumilla	Políticamente se encuentra ubicada en el departamento de Tumbes, en la provincia de Zarumilla, Agua Verdes, Papayal y Matapalo, Tiene su origen en las serranías del Ecuador, su cauce constituye el límite entre Perú y Ecuador.

Fuente: ANA y el MINAGRI. 2010

Acuña, J. 2010.

El **Cuadro 9** muestra los principales proyectos especiales ubicados en la costa del Perú, estos proyectos cuentan con una gran infraestructura hidráulica para el aprovechamiento y gestión del recurso hídrico, estos se localizan en las principales cuencas dadas la importancia para los diferentes sectores productivos involucrados en el desarrollo del Perú.

**Cuadro 9:** Principales proyectos ubicados en la Vertiente peruana del Océano Pacífico..

N°	PROYECTO ESPECIAL	CUENCA	VERTIENTE	DEPARTAMENTO
1	Puyango Tumbes	Puyango	Pacífico	Tumbes
2	Chira - Piura	Chira	Pacífico	Piura
3	Olmos - Tinajones	Chancay - Lambayeque	Pacífico	Lambayeque, Cajamarca y Piura
4	Jequetepeque - Zaña	Jequetepeque	Pacífico	Lambayeque, La Libertad y Cajamarca
5	Chavimochic	Chao - Viru - Moche	Pacífico	La Libertad
6	Chinecas	Nepeña - Casma Sechin	Pacífico	Ancash
7	Ccaracocha	Ica	Pacífico	Ica, Huancavelica
8	Majes - Siguas	Majes, Siguas	Pacífico	Arequipa
9	Pasto Grande	Moquegua	Pacífico	Moquegua
10	Tacna	Caplina, Sama y Locumba	Pacífico	Tacna

Fuente: ANA y el MINAGRI “Recursos Hídricos del Perú – 2010”

El **Cuadro 10** muestra los principales proyectos especiales que presentan trasvases hacia la Vertiente peruana del Pacífico, estos proyectos aseguran el afianzamiento hídrico en las cuencas deficitarias, dado que el recurso hídrico es fundamental para el desarrollo de los diferentes sectores productivos del país.

**Cuadro 10:** Principales proyectos que presentan trasvases a la Vertiente peruana del Pacífico.

N°	CUENCA APORTANTE		CUENCA RECEPTORA	INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA	CAUDAL (m3/s)	PROYECTO
	CUENCA	VERTIENTE				
1	Puyango	Pacífico	Zarumilla	Tunel	30,00	Puyango - Tumbes (1)
2	Chira	Pacífico	Piura	Canal Chira - Piura (2)	70,00	Chira - Piura
3	Quiroz	Pacífico	Chipilico	Tunel Culqui Canal Quiroz	60,00 60,00	San Lorenzo
4	Conchano	Amazonas	Chancay - Lambayeque	Tunel	13,00	Olmos - Tinajones
5	Chotano	Amazonas	Chancay - Lambayeque	Tunel	31,00	Olmos - Tinajones
6	Huancabamba	Amazonas	Olmos	Tunel	12,90	Olmos
7	huancabamba	Amazonas	Piura	Tunel	30,00	Irrigacion e hidroenerg
8	Santa	Pacífico	Chao - Viru - Moche	Canal Santa-Chao-Viru-moche	50,00	Chavimochic
9	Santa	Pacífico	Chicama	Canal Moche-Chicama	35,00	Chavimochic^3
10	Santa	Pacífico	Nepeña - Casma Sechin	Tunel canal	30,00 30,00	Chinecas
11	Pativilca	Pacífico	Supe	Canal Canal	1,20 8,00	Santa Elena Purmacana
12	Mantaro	Amazonas	Rimac	Tunel Canal	3,00 3,00	Marcapomacocha
13	Mantaro	Amazonas	Rimac	Tuberia y Sifones Canal	2,80 2,80	Huascacocha
14	Alto Pampas	Amazonas	Ica	Tunel Canal	12,00 12,00	Tambo Ccaracocha
15	Colca	Pacífico	Chili	Canal Pañe-Sumbay	3,60	Chili Regulado
16	Vizcachas	Pacífico	Moquegua	Canal Pasto Grande	9,00	Pato Grande
17	Maure	Titicaca	Caplina	Canal Calachaca-Chuapalca Canal Chuapalca-Uchusuma Canal Uchusuma-Huaylillas Sur	1,00 3,50 4,50	Vilavilani
18	Maure	Titicaca	Locumba	Tunel Kovire Canal Cano-Salado	6,00 5,00	Kovire

Fuente: ANA y el MINAGRI, 2010.



## **3.2 Materiales**

La Caracterización de las sequías hidrológicas en la Vertiente peruana del Océano Pacífico, ha empleado los siguientes materiales y/o información, estos se detallan a continuación:

### **3.2.1 Información cartográfica**

#### **3.2.1.1 Modelo de elevación digital de terreno (DEM)**

La cartografía se obtuvo a partir de los datos SRTM (Misión Topográfica Radar Shuttle, NASA-NGA, EEUU), el cual es una organización que brinda modelo digital de elevación, el área de influencia de las cuencas pertenecientes a la Vertiente del Pacífico (VP) está comprendida entre: Paralelos 3°22'38" y 18° 21'03" Latitud sur y Meridianos 81°19'34.5" y 70°2'2" Longitud oeste, de modo que genere una base completa de datos topográficos digitales de alta resolución de la zona de estudio.

La resolución tiene una equivalencia de 0.0008° o una grilla de 90m x 90m de resolución aproximadamente, esta información se encuentra disponible en la base de datos del CGIAR–CSI (Consortio para la información espacial), disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org/>

El modelo digital de elevación (DEM) de las UH de la Vertiente peruana del Pacífico, han sido recopilado del sistema nacional de información de recursos hídricos, información geoespacial del banco de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA-PERÚ) en formato Shp, disponible en el portal: <http://www.ana.gob.pe/sistema-nacional-de-informacion-de-recursos-hidricos.aspx>

Políticamente, los departamentos que integran las unidades hidrográficas analizadas se mencionan de Sur a Norte: Tacna, Moquegua, Arequipa (parte andina de Puno y Ayacucho), Ica (parte andina de Huancavelica), Lima, Ancash, La libertad, Cajamarca, Lambayeque, Piura y Tumbes.

### **3.2.2 Información Hidrométrica**

Las estaciones hidrométricas localizadas en la Vertiente peruana del Pacífico (VP), se encuentran administradas mayoritariamente por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), adscrita al Ministerio de Ambiente, la Autoridad

Nacional Agua (ANA), mediante un convenio con la SENAMHI recibe información de los ríos que solicite según el Art. 18° de la Ley de Recursos Hídricos.

La información recopilada para la presente investigación provienen de varias fuentes como: Compendio del ANA y el MINAGRI titulada “RECURSOS HÍDRICOS DEL PERÚ - 2010”, así como del portal Web de la Autoridad Nacional del Agua (ANA-PERÚ) disponible en: <http://www.ana.gob.pe:8080/snrh2/consPluviometria.aspx>

Para definir el periodo de análisis se tuvo en cuenta una serie de requisitos, siguiendo la recomendación de la organización Meteorológica Mundial (OMM), los análisis sobre la variabilidad climática han de comprender un periodo de al menos 30 años (Lorenzo, 2012).

Siguiendo esta recomendación los datos analizados poseen un registro de caudal mensual de 45 años (1960-2005), de un total de 26 estaciones hidrométricas distribuidas a lo largo de la costa peruana en la Vertiente del Pacífico.

El **Cuadro 11** muestra la codificación de las estaciones analizadas en la presente investigación, esta codificación se encuentra numerada de Norte a Sur según sus coordenadas geográficas (Latitud), su codificación tiene un objetivo netamente práctico.

**Cuadro 11:** Red de Estaciones Hidrométricas y su codificación

<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Código</b>	<b>Nombre</b>
EH-01	El Tigre	EH-14	Puente Alco
EH-02	Ardilla	EH-15	Santo Domingo
EH-03	Puchaca	EH-16	Chosica
EH-04	Raca Rumi	EH-17	La Capilla
EH-05	El Batan	EH-18	Socsi-s y Toma imperial
EH-06	Yonan	EH-19	Conta
EH-07	Salinar-Tambo	EH-20	Letrayoc
EH-08	Quirihuac-Moche	EH-21	La Achirana
EH-09	Huacapongo	EH-22	Bella Unión
EH-10	Condorcerro	EH-23	Chucarapi
EH-11	San Jacinto	EH-24	Chivaya
EH-12	Sector Tutuma	EH-25	La Tranca
EH-13	Yanapampa	EH-26	Aguas Calientes

Fuente: Elaboración propia.

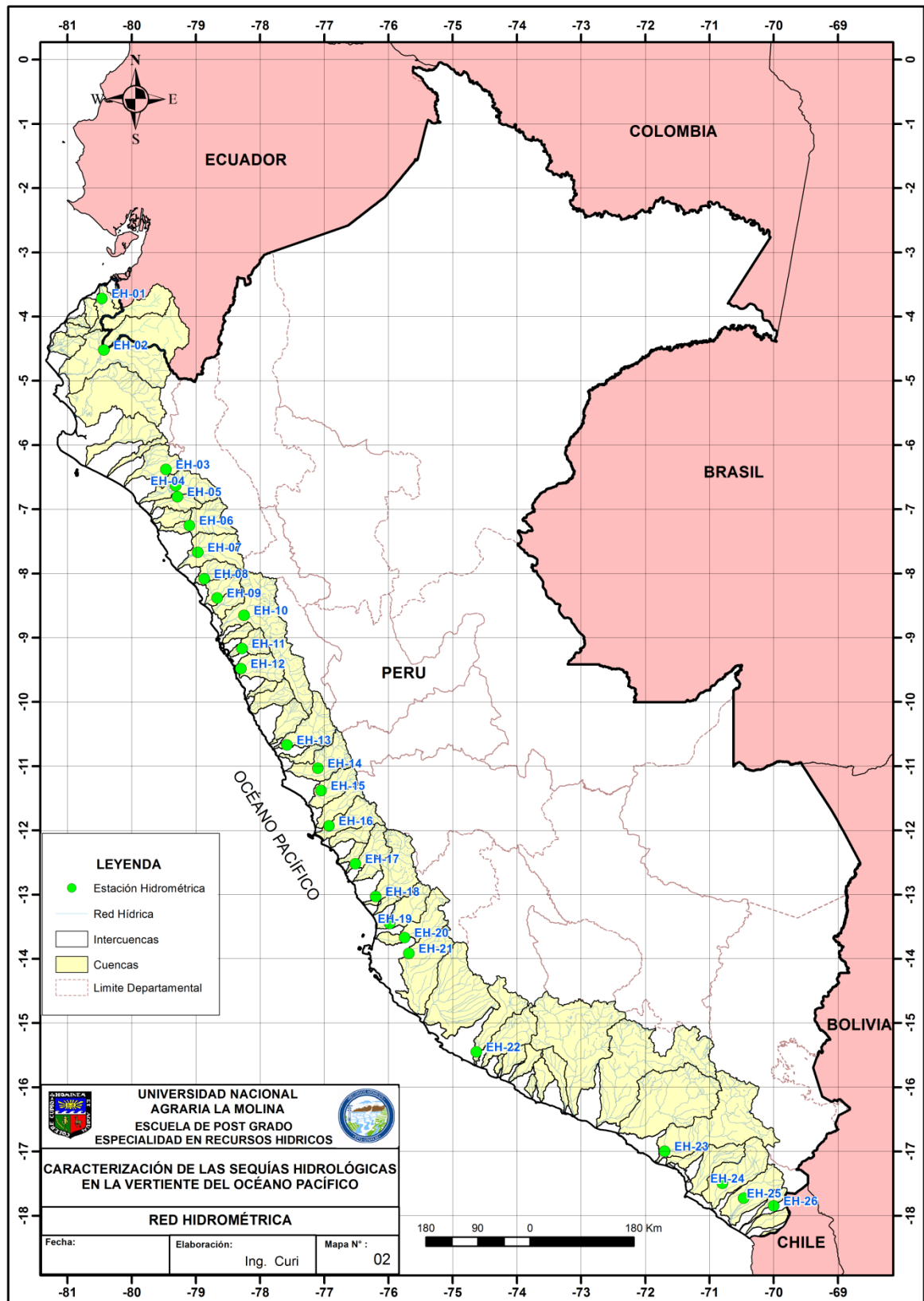
El **Cuadro 12** detalla las características geográficas de la red de estaciones hidrométricas analizadas, estas se encuentran localizadas de Norte a Sur según sus coordenadas geográficas (Latitud).

**Cuadro 12:** Red de Estaciones Hidrométricas

<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Lat S (°)</b>	<b>Long W (°)</b>	<b>Alt (m.s.n.m)</b>	<b>Unidad Hidrográfica</b>	<b>Río</b>	<b>Fuente</b>
EH-01	El Tigre	-3.717	-80.467	30	Tumbes	Tumbes	SENAMHI
EH-02	Ardilla	-4.520	-80.433	150	Chira	Chira	SENAMHI
EH-03	Puchaca	-6.380	-79.467	325	Motupe	La Leche	SENAMHI
EH-04	Raca Rumi	-6.633	-79.317	254	Chancay-Lambayeque	Chancay-Lambayeque	SENAMHI
EH-05	El Batan	-6.804	-79.289	212	Zaña	Zaña	SENAMHI
EH-06	Yonan	-7.250	-79.100	428	Jequetepeque	Jequetepeque	SENAMHI
EH-07	Salinar-Tambo	-7.670	-78.970	350	Chicama	Chicama	SENAMHI
EH-08	Quirihuac-Moche	-8.080	-78.870	200	Moche	Moche	SENAMHI
EH-09	Huacapongo	-8.380	-78.670	280	Viru	Viru	SENAMHI
EH-10	Condorcerro	-8.650	-78.250	526	Santa	Santa	SENAMHI
EH-11	San Jacinto	-9.167	-78.283	200	Nepeña	Nepeña	SENAMHI
EH-12	Sector Tutuma	-9.480	-78.300	71	Casma	Casma	SENAMHI
EH-13	Yanapampa	-10.670	-77.583	859	Pativilca	Pativilca	SENAMHI
EH-14	Puente Alco	-11.030	-77.100	1000	Huaura	Huaura	SENAMHI
EH-15	Santo Domingo	-11.380	-77.050	650	Chancay.Huaral	Chancay.Huaral	SENAMHI
EH-16	Chosica	-11.930	-76.930	906	Rimac	Rimac	SENAMHI
EH-17	La Capilla	-12.520	-76.517	468	Mala	Mala	SENAMHI
EH-18	Socsi-s y Toma imperial	-13.030	-76.200	500	Cañete	Cañete	SENAMHI
EH-19	Conta	-13.450	-75.983	320	San Juan	San Juan	SENAMHI
EH-20	Letrayoc	-13.670	-75.750	640	Pisco	Pisco	SENAMHI
EH-21	La Achirana	-13.920	-75.683	420	Ica	Ica	SENAMHI
EH-22	Bella Unión	-15.450	-74.633	70	Acari	Acari	SENAMHI
EH-23	Chucarapi	-17.000	-71.700	133	Tambo	Tambo	SENAMHI
EH-24	Chivaya	-17.500	-70.800	3200	Ilo-Moquegua	Ilo-Moquegua	SENAMHI
EH-25	La Tranca	-17.730	-70.467	620	Sama	Sama	SENAMHI
EH-26	Aguas Calientes	-17.850	-70.000	1300	Caplina	Caplina	SENAMHI

Estaciones seleccionadas.

Fuente: ANA y el MINAGRI, 2010.



**Figura 8:** Red de estaciones hidrométricas codificación de Norte a Sur según su ubicación geográfica (Latitud).

La **Figura 8** Muestra la distribución espacial de las estaciones hidrométricas, la demarcación coloreada especifica las unidades hidrográficas (UH) evaluadas, la codificación fue enumerada de Norte a Sur según su ubicación geográfica (Latitud), la costa peruana está conformada por 62 unidades hidrográficas, de las cuales 26 son evaluadas en la presente investigación.

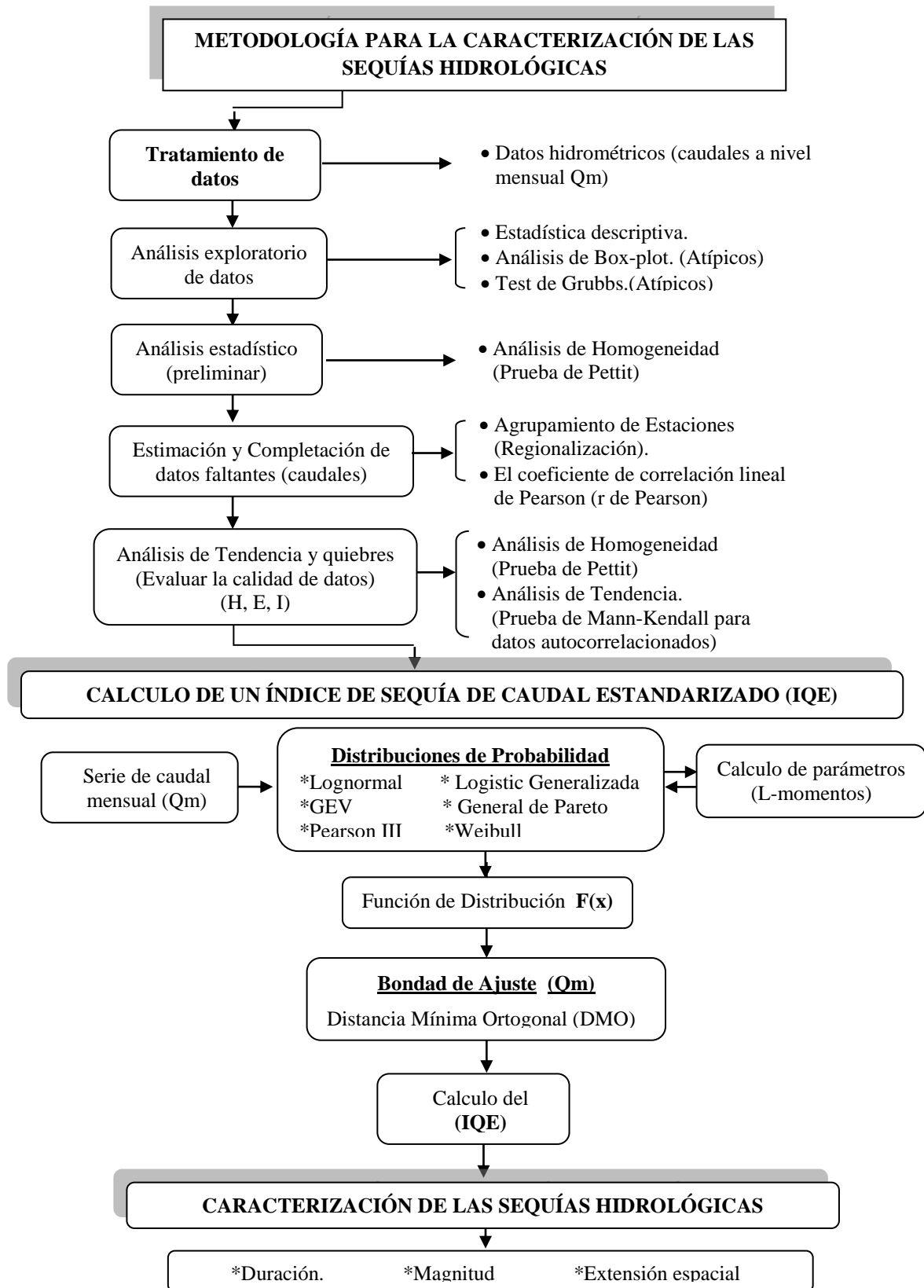
### 3.2.3 Softwares utilizados

- **Minitab v15**, permitió el análisis exploratorio de la información hidrométrica a escala mensual, estacional y anual.
- **Microsoft Office**, se realizó la automatización de cálculos y digitalización de textos mediante códigos en visual Basic en Microsoft Excel y Word, se implementaron códigos para el cálculo de un índice se sequía estandarizado (SSI).
- **XLSTAT v2013**, se empleó para la obtención del estadístico de Grups and Beck para los datos atípicos, el estadístico Mann-Kendal (modificado) para evaluar la homogeneidad (No tendencias), el estadístico de Pettit para el análisis de saltos en la serie, las pruebas evaluadas son no paramétricas y está disponible en forma gratuita durante 30 días en la web <http://www.xlstat.com>.
- **Hydraccess v4.2**, permitió la creación y organización en una base de datos hidrométricos en Microsoft Access para la sistematización de los datos recopilados, de igual manera este software evalúa la crítica de datos Hidrometeorológicos, está disponible en: [www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess\\_sp](http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess_sp)
- **ArcGis 10.1**, con las extensiones 3D Análisis, spatial analysis. Se elaboró las presentaciones de mapas y otros gráficos que representen el objetivo de la investigación a un nivel espacial.
- **R (Lenguaje de programación)**, es un lenguaje y entorno de programación, diseñado para el tratamiento de datos, cálculos y desarrollo de gráficos, permitió trabajar con facilidad mediante vectores y matrices, ofreciendo diversas herramientas para el análisis de datos, se empleó para el cálculo de las diferentes distribuciones, análisis de datos y algunas presentaciones gráficas, es de uso libre y se puede descargar de la siguiente página web <http://www.r-project.org/index.html>.

El software R fue desarrollado inicialmente por Robert Gentleman y Ross Ihaka del Departamento de Estadística de la Universidad de Auckland en 1993. Su desarrollo actual es responsabilidad del *R Development Core Team*.

### 3.3 Metodología

El procedimiento metodológico desarrollado posee la siguiente secuencia:



**Figura 9:** Proceso metodológico de la Caracterización de sequía hidrológica.

### **a) Información hidrométrica**

Las estaciones hidrométricas que se encuentran localizadas en la Vertiente peruana del Pacífico (VP), son administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), la Autoridad Nacional del Agua (ANA), mediante un convenio con la SENAMHI, recibe información de los ríos que solicite según el Art. 18° de la Ley de Recursos Hídricos.

La información para el presente estudio fueron obtenidos de diferentes fuentes como la central de información de recursos hídricos del portal web de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), y de un compendio elaborado entre el ANA y el Ministerio de Agricultura (MINAGRI) el cual es titulada como: "RECURSOS HÍDRICOS DEL PERÚ - 2010", este material nos proporciona datos de caudal a nivel mensual de las principales cuencas en la VP con un registro mensual mínimo de 45 años (1960-2005).

La información obtenida fue almacenada en una base de datos hidrométricos creada para tal fin haciendo uso de un software hidrológico denominado *Hydraccess* para la organización y sistematización de datos hidrométricos.

### **b) Selección de estación hidrométrica**

La selección de las estaciones hidrométrica se realizó mediante el análisis de un cuadro de líneas de tiempo, este primer análisis visual muestra la información cronológica existente en cada estación hidrométrica, comprobando la irregularidad de los periodos de registro, debido a esta irregularidad se implementaron dos criterios para su selección:

Primer criterio: se consideró las estaciones hidrométricas que cuenten con un registro continuo de al menos 30 años, siguiendo la recomendación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para relacionar y realizar comparaciones con otros estudios relacionados a la temática (Lorenzo. 2012).

Segundo criterio: se excluyeron las estaciones hidrométricas que posean más del 10% de datos perdidos (vacíos), en comparación de la longitud total de la serie analizada.

El periodo de evaluación óptimo según los criterios mencionados se fijó en 45 años de registro continuo, entre los años de 1960 - 2005. De este modo fueron seleccionadas 26 estaciones hidrométricas en la VP, visualizándose en la Figura 8.

### 3.3.1 Tratamiento de datos

#### 3.3.1.1 Análisis exploratorio de datos

Las series de caudales fueron analizadas cualitativamente mediante el *análisis exploratorio de datos (AED)*, este análisis nos ayuda a detectar posibles errores o inconsistencia en los datos de partida, en él se ha elaborado el diagrama de cajas (Box plot) para tener una primera aproximación del comportamiento hídrico de las estaciones analizadas (calidad de datos).

El AED realiza una visión general de todos los datos a ser analizados, detectando posibles datos atípicos (outliers) dentro de la muestra, estos datos (outliers), serán contrastado conociendo su fecha de ocurrencia y el evento que los produjo, realizando una comparación con las estaciones hidrométricas vecinas; es aquí donde se pone en juico la posible presencia de valores atípicos, en base a este análisis se considera su posible eliminación o inclusión en las siguientes etapas del análisis para no alterar la muestra.

Como segundo análisis que ayude a confirmar estos posibles valores atípicos, se evaluó la prueba estadística de Grubbs, el cual posee unos estadísticos en base la data estandarizada y a su longitud de registro, definiendo un nivel de truncamiento, cuyo resultado identifica los valores atípicos presentes para un nivel de significancia de 99%.

Este análisis se realizó haciendo uso del paquete estadístico XLSTAT para la prueba de Grubbs, este paquete ejecuta varias estaciones y/o meses en forma simultánea contrastando las hipótesis a un nivel de significancia de 99%.

Hipótesis nula (H0): No hay valores atípicos en los datos

Hipótesis alterna (H1): El valor mínimo o máximo es un valor atípico

La gráfica de Box-plot se realizó mediante algoritmos creados específicamente para cumplir este análisis en un lenguaje de programación denominado R, que es un programa estadístico diseñado para el tratamiento de datos, cálculos y desarrollo de gráficos, muy difundido en la comunidad científica.

#### 3.3.1.2 Análisis estadístico preliminar

La prueba denominado *análisis estadístico (preliminar)* identifica cambio en la media o la no homogeneidad de los datos analizados mediante la prueba de Pettit, cambio abruptos en los valores medio anuales de una serie de caudales suelen estar asociados a



cambios en los procesos de observación, emplazamiento de la estación hidrométrica (avenidas) y alteraciones antrópicas (trasvase o represamiento) en el cauce.

Este tipo de cambios en la media conocidos como “saltos” son fácilmente detectables mediante los test no paramétricos, el uso de esta prueba estadística permitió visualizar los cambios en la media y la fecha en la cual se produjo este cambio para el análisis posteriores (completación de datos).

### **3.3.1.3 Estimación y completación de datos faltantes**

El procedimiento para la estimación y completación de datos faltantes, se realizó utilizando el programa *Hydraccess* para la organización y/o sistematización de los datos hidrométricos, este programa utiliza el Método del Vector Regional de índices Pluviométricos (MVR) para agrupar estaciones con una alta correlación con el vector y posteriormente realizar la completación de data faltante entre las estaciones seleccionadas.

El método MVR es ampliamente utilizado por la SENAMHI en muchos estudios de Regionalización pluviométrica como el realizado el 2008.”Caracterización hidrológica de las cuencas del Mantaro, Pampas, Apurímac y Urubamba”, este mismo método fue aplicado por el Ing. Philippe Vauchel del Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) creador del Hydraccess para el análisis de datos hidrométricos realizado el 2006 denominado “Análisis, crítica y tratamiento de los datos hidrométricos de la cuenca alta del río Pilcomayo disponibles aguas arriba de Misión La Paz (Argentina)”, este método selecciona las estaciones optimas basado en su proporcionalidad e índice de correlación con el Vector Regional.

La estimación y completación de datos mensuales de caudal, se estimó siguiendo dos metodologías:

- a) **El promedio aritmético simple:** se empleó para la estimación de un dato faltante de caudal mensual en el registro de un año de la estación analizada.
- b) **El Método del Vector Regional (MVR):** Se empleó para seleccionar estaciones con un comportamiento hídrico similar (Regionalización), el dato analizado para formar la región homogénea fue el caudal promedio anual, la misma que deben contar con un alto índice de correlación con el Vector.

Las estaciones seleccionadas según el MVR, se agruparon en regiones con un comportamiento hídrico similar. La estimación de datos faltantes en cada región

hidrológica se realizó aplicando el **método de regresión múltiple** cuando la data ausente fue superior al registro de un año.

El método de regresión múltiple se aplicó teniendo en cuenta la prueba de Pettit (cambio en la media), la completación de dato ausente se realizó sabiendo el año cuando se produjo este cambio, a fin de minimizar los posibles errores que pudiera cometerse en la estimación si se analizara la serie completa.

#### **3.3.1.4 Análisis de tendencia y quiebres**

El análisis de toda variable hidroclimática, evalúa los estadísticos, que son supuestos básicos que nos ayuda a aumentar la confiabilidad de los datos analizados, poniendo a prueba hipótesis con respecto a la data observada: homogéneo (libre de tendencia y saltos) y/o estacionario (constante en el tiempo y libre de tendencia).

En el presente estudio se analizaron dos supuestos básicos como son: el análisis de tendencia mediante el test de Mann-Kendall modificado y el análisis de homogeneidad mediante la prueba de Pettit (cambio en la media).

El análisis de tendencia indica que los datos no deben aumentar o disminuir en el tiempo, para su evaluación se utilizó la prueba de Mann-Kendall (test no paramétrico) mediante el paquete estadístico XLSTAT, el cual ejecuta la prueba para varias estaciones en forma simultánea contrastando las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H0): No existe tendencia en la serie (*Tendencia = 0*)

Hipótesis alterna (H1): Hay una tendencia en la serie (*Tendencia  $\neq$  0*)

Para un nivel de significancia de 5%.

El test de Mann-Kendal modificado realiza un análisis pre-blanqueo internamente, mediante este análisis de (pre-blanqueo) se elimina la Autocorrelación que pueda tener los datos analizados (caudales).

La prueba de Pettit analiza los “saltos” o la “no homogeneidad”, cambios abruptos en los valores medios anuales y/o mensuales de una serie de datos observados.

Esta prueba se evaluó mediante el paquete XLSTAT, el cual ejecuta la prueba para varias estaciones simultáneamente contrastando las hipótesis:

Hipótesis nula (H0): Los datos son Homogéneos ( $H = 0$ )

Hipótesis alterna (H1): Hay una fecha de cambio en los datos ( $H \neq 0$ )

Para un nivel de significancia de 5%.

La construcción de una **base de datos hidrométricos de calidad** fue el resultado de haber realizado el análisis de tratamiento de datos, esta data posee rasgos representativos del comportamiento hídrico en la Vertiente peruana del Pacífico.

### 3.3.2 Cálculo de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE)

El cálculo de un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) que caracterice los eventos secos ocurridos en la Vertiente peruana del Pacífico, se obtuvo evaluando la capacidad de seis distribuciones de probabilidad (DP), todos ellos de tres parámetros que son ampliamente usados en la hidrología. La selección de la DP que mejor describa el comportamiento hídrico mensual interanual en cada estación analizada, fue evaluada mediante una prueba de bondad de ajuste denominada Distancia Mínima Ortogonal (DMO), el proceso metodológico se describe a continuación.

#### 3.3.2.1 Distribución de probabilidad

No existe una distribución de probabilidad (DP) que pueda representar perfectamente el comportamiento hídrico en una sección de control (estación), pero si se puede encontrar aquella DP que proporcione las estimaciones más precisas para cada muestra analizada.

Los criterios más importantes para la selección de una DP son:

Tener una teoría sólida que describa al fenómeno y que la DP simule la mayor cantidad de información de la data observada.

La capacidad de una DP para ajustar los datos observados, depende de la flexibilidad y la forma de la función de distribución  $F(x)$ , mientras más parámetros formen al modelo, más versátil será la función de distribución.

Es por este motivo que se hace uso de distribuciones que estén formados por tres parámetros que son ampliamente utilizados en el análisis hidrológico (Bobée & Ashkar. 1991; Volge et al., 1993; Rao & Hamed 2000), estas funciones de distribución  $F(x)$  son: Valor Extremo Generalizado (GEV), Log-Normal (LN3), Pearson tipo III (PE3), Weibull (WEI), Logistic Generalizada (GLO) y Pareto Generalizado (GPA).

### **3.3.2.2 Cálculo de parámetros mediante el método de L-momentos**

El cálculo de parámetros mediante el método de L-momentos se realizó para cada serie de caudal observada, estos parámetros representan los principales estadísticos de la muestra analizada, siendo los primeros cuatro L-momentos los más importantes (L1: media, L2: Coeficiente de variación, L3: Asimetría y L4: Kurtosis)

El método de L-momentos puede estimar una amplia variedad de distribuciones en comparación con los momentos convencionales, este método es más robusto ante la presencia de valores atípicos. Los L-momentos son estadísticamente precisos al estimar los parámetros que describan a la función de distribución  $F(x)$ .

La estimación de parámetros de la serie de caudal analizada (26 Est. Hidrométricas), se realizó ejecutando algoritmos creados para este análisis elaborados en el programa R, el cálculo manual sería muy engorroso y llevaría a cometer errores en su estimación.

### **3.3.2.3 Función de distribución y función de densidad**

El cálculo de la función de distribución  $F(x)$  se realizó utilizando los parámetros previamente calculados por el método de L-momentos.

La función de distribución  $F(x)$  de cada DP (Valor Extremo Generalizado (GEV), Log-Normal (LN3), Pearson tipo III (PE3), Weibull (WEI), Logistic Generalizada (GLO) y Pareto Generalizado (GPA).) fue estimada según la metodología propuesta por Hosking & Wallis (1997) para cada estación hidrométrica analizada, obteniendo la probabilidad para un cuantil determinado (dato observado). La elaboración del histograma de frecuencia para cada serie de caudal, se realizó a fin de visualizar que función de densidad  $f(x)$  presenta el mejor ajuste a la data observada, este cálculo y el histograma de frecuencias se elaboraron en el programa R y Easyfit.

### **3.3.2.4 Distancia mínima ortogonal (DMO)**

La prueba de bondad de ajuste denominado Distancia Mínima Ortogonal (DMO) evalúa la mínima distancia entre los L-momentos teóricos y los L-momentos muestrales en una gráfica de L-momentos ratios, la selección de la distribución de probabilidad (DP) que describa la mayor información de la data observada, sigue un enfoque cuantitativo, la distribución que tenga el menor valor de la DMO o aquella que converja a 0, será elegida para describir el comportamiento hídrico de un determinado mes, esta prueba de bondad de

ajuste se repite para cada mes del año y para cada estación analizada aplicando las ecuaciones (2.14) al (2.17).

El proceso metodológico se realizó en su totalidad en el programa R.

### **3.3.2.5 Cálculo de un Índice de sequía de caudal estandarizado (IQE)**

Una vez identificada la DP que presentó el mejor ajuste mensual según el método de la DMO, se calculó la probabilidad de excedencia ( $P(X \geq x)$ ) de la serie de caudal observado. La probabilidad de excedencia fue transformada a una variable estandarizada aplicando el método de aproximaciones polinómicas propuesta por: Abramowitz & Stugun (1965), ecuación (2.1) al (2.3), cuyo resultado muestra los valores de un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE), este índice permite visualizar y cuantificar los principales periodos húmedos y secos que se han producido en cada estación hidrométrica analizada en la Vertiente peruana del Pacífico.

El procedimiento metodológico se realizó utilizando macros de Microsoft Excel y R con archivos que interactúan simultáneamente entre ambos softwares.

### **3.3.3 Caracterización de las sequías**

La caracterización de las sequías hidrológicas sobre la zona de estudio es muy variada, para definir los eventos de sequías ocurridos en diferentes cuencas a lo largo de la costa peruana entre los años de 1960 al 2005, se desarrolló un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE), su cuantificación se evaluó mediante el método de umbrales invariables en tiempo y espacio propuesto por Yevjevich (1967).

La selección de los umbrales es algo subjetivo, esta fue realizada siguiendo las recomendaciones de trabajos recientemente publicados sobre esta temática (Tallaksen et al., 1997; Fleig et al., 2006; Van Loon et al., 2010, Lorenzo, 2012), se utilizó un promedio del percentil(20), (20% de probabilidad) para definir eventos de sequía moderada correspondiente a un valor del IQE de -0.84, y del percentil (5), (5% de probabilidad) para definir los eventos de sequía extrema con un valor del IQE de -1.65.

Las sequías hidrológicas se diferencian unas de otras en tres características principales como son: la duración, intensidad (magnitud) y extensión espacial, estas tres características en conjunto nos ayudan a determinar los impactos negativos que producen en los recursos

hídricos superficiales (ríos y embalses) y subterráneos (pozos), permitiendo estimar la vulnerabilidad del recurso hídrico ante la ocurrencia de eventos secos.

### 3.3.3.1. Principales características de las sequías hidrológicas

#### a) Duración

La duración es el número de eventos temporales consecutivos con un caudal inferior al nivel de truncamiento, pudiendo ser meses o años consecutivos.

El nivel de truncamiento ha sido definido en:

Sequía moderada (20% de la probabilidad) entre  $-1.65 < IQE < -0.84$

Sequía extrema (5% de la probabilidad) inferior a  $IQE < -1.65$

#### b) Intensidad y Magnitud

La intensidad se determina en función del Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE), corresponde al valor máximo en un evento seco, esta investigación considera dos tipos de evento de sequía según el nivel de truncamiento:

El evento que sobrepasa el nivel de truncamiento de -0.84 en la escala del IQE es:

*Sequía moderada*  $-1.65 < IQE < -0.84$

El evento que sobrepasa el nivel de truncamiento de -1.65 en la escala del IQE es:

*Sequía extrema*  $IQE < -1.65$

La intensidad de la sequía puede ser cuantificada de dos formas: intensidad máxima y la intensidad promedio.

**Intensidad Máxima.** Es la mayor diferencia entre el nivel de truncamiento y los eventos producidos, también definido como el déficit máximo, se caracteriza por su máxima desviación con respecto al umbral de truncamiento.

$$I_{max} = \max(U - Xi) \quad (3.1)$$

Dónde:

$U$  = umbral de truncamiento definido

$Xi$  = evento máximo producido (índice de sequía de caudal estandarizado IQE)

**Intensidad Promedio.** Es el déficit promedio producido durante un evento de sequía, se define como la relación entre la sumatoria de déficit a partir del nivel de truncamiento y la duración de este evento, otro termino es la relación de la magnitud entre la duración.

$$I_{prom} = \frac{\sum(U - Xi)}{D} \quad (3.2)$$

Dónde:

$U$  = umbral de truncamiento definido

$Xi$  = evento máximo producido (índice de sequía de caudal estandarizado IQE)

$D$  = duración temporal de un evento de sequía

La magnitud es la sumatoria de los valores deficitarios del IQE durante un evento de sequía a partir de un nivel de truncamiento.

$$Magnitud = \sum(U - Xi) \quad (3.3)$$

Dónde:

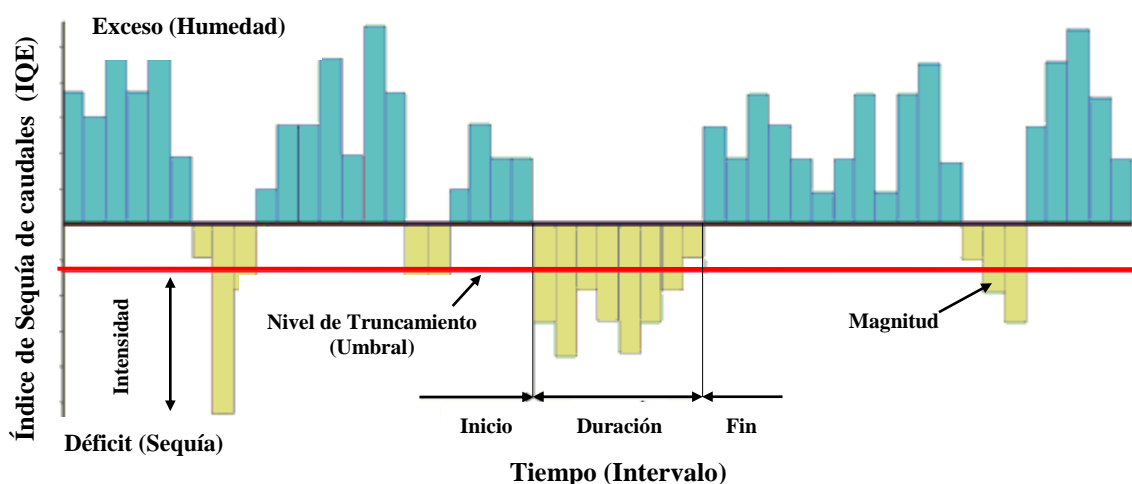
$U$  = umbral de truncamiento definido

$Xi$  = evento máximo producido (índice de sequía de caudal estandarizado IQE)

El cálculo de la duración, intensidad y magnitud de un evento seco, se realiza en una serie cronológica de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) a nivel mensual.

La sequía comienza cuando la intensidad es inferior al nivel de truncamiento de -0.84 (sequía moderada) y termina cuando la intensidad supera el valor de truncamiento (-0.84).

En la **Figura 10**, se muestra un ejemplo.



**Figura 10:** Esquema de la serie cronológica de oferta - demanda para la identificación y caracterización de la duración, intensidad y magnitud de la sequía bajo un nivel de truncamiento definido.

En el ejemplo de la **Figura 10**, se esquematiza un evento de sequía, las intensidades del IQE de los 7 meses involucrados son -2.1, -2.6, -1.5, -2.2, -2.6, -2.1 y -1,5, que al sumarlas, dan una Magnitud de +14.6 (recuérdese que la fórmula multiplica a la sumatoria por -1 para su cuantificación).

### c) **Extensión espacial**

La extensión espacial así como los daños producidos por un evento de sequía están relacionados con la intensidad y su duración, la caracterización del desarrollo espacial y temporal de un evento de sequía, nos ayuda a entender el inicio, desarrollo y el fin de este fenómeno e identifica las zonas vulnerables a sufrir mayor recurrencia estas temporadas secas.

La caracterización espacial es de mucha importancia dada su complejidad, pues son muchos los sectores afectados por este fenómeno, sus principales efectos son sociales y económicos.

El monitoreo de la sequía, nos permitirá determinar de forma oportuna medidas preventivas o acciones para reducir los impactos de las sequías hidrológicas en los diferentes sectores afectados, la respuesta y mitigación ante su ocurrencia, involucra una cuidadosa gestión de los recursos hídricos, generando planes de contingencia para reducir futuros impactos de sequía hidrológica en la sociedad.



## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Tratamiento de datos

Las estaciones hidrométricas seleccionadas según su registro histórico, fueron evaluadas mediante una estadística descriptiva como es el análisis exploratorio de datos, este análisis evalúa parámetros estadísticos (test) que ayude a tener una visión clara de los procesos que han ocurrido durante el periodo analizado.

El **Cuadro 13** muestra las estaciones seleccionadas y su registro histórico mediante líneas de tiempo coloreadas, correspondiente a un periodo de análisis de 1960 a 2005 (45 años), se consideró que la ausencia de datos no debe ser más del 10% de la longitud total del registro, de acuerdo a esta restricción las estaciones con mayor ausencia de información son:

- EH-01 (El Tigre) ubicada en la unidad hidrográfica de Tumbes (Tumbes), con un total de 3.9 años de ausencia de información.
- la EH-16 (Chosica) ubicado en la unidad hidrográfica del río Rimac (Lima), con 3.5 años de ausencia de información.

#### 4.1.1 Análisis exploratorio de datos

En análisis exploratorio, realizado a la muestra de datos hidrométricos consta de tres pruebas las cuales son: la estadística descriptiva, que nos proporciona información para clasificar y/o caracterizar los datos hidrométricos, la gráfica de BoxPlots, para detectar datos atípicos (outliers) de manera cualitativa y el estadístico de Grubbs que corrobora la presencia de estos datos atípicos (outliers).

**La estadística descriptiva** del caudal medio anual registrada en las estaciones analizadas en la Vertiente peruana del Pacífico (VP) **Cuadro 14**, muestra que las estaciones localizadas en el Norte del Perú (EH-1 y EH-2), son de carácter caudaloso, con un caudal medio superior a 100 m<sup>3</sup>/s, estas estaciones registran el caudal pertenecientes a dos cuenca binacional (Perú-Ecuador) respectivamente.

**Cuadro 13:** Red de Estaciones Hidrométricas con información mensual ausente

DATO AUSENTE (AÑOS)	CODIGO	ESTACIÓN	RÍO	1960-61	1961-62	1962-63	1963-64	1964-65	1965-66	1966-67	1967-68	1968-69	1969-70	1970-71	1971-72	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76	1976-77	1977-78	1978-79	1979-80	1980-81	1981-82	1982-83	1983-84	1984-85	1985-86	1986-87	1987-88	1988-89	1989-90	1990-91	1991-92	1992-93	1993-94	1994-95	1995-96	1996-97	1997-98	1998-99	1999-20	2000-01	2001-02	2002-03	2003-04	2004-05	2005-06							
3.9	EH - 1	EL TIGRE	TUMBES	12	12	12	1									1		1																																						
	EH - 2	ARDILLA	CHIRA																																																					
0.2	EH - 3	PUCHACA	LA LECHE																																																					
0.4	EH - 4	RACA RUMI	CHANCAY LAMBAYEQUE		4												1																																							
0.1	EH - 5	EL BATAN	ZAÑA																								1																													
	EH - 6	YONAN	JEQUETEPEQUE																																																					
	EH - 7	SALINAR - TAMBO	CHICAMA																																																					
0.3	EH - 8	QUIRIHUAC-MOCHE	MOCHE																																																					
0.3	EH - 9	HUACAPONGO	VIRU																																																					
	EH - 10	CONDORCERRO	SANTA																																																					
3.3	EH - 11	SAN JACINTO	NEPEÑA																																																					
2.1	EH - 12	SECTOR TUTUNA	CASMA																																																					
0.3	EH - 13	YANAPAMPA	PATIVILCA																																																					
0.3	EH - 14	PUENTE ALCO	HUAURA																																																					
0.3	EH - 15	SANTO DOMINGO	CHANCAY HUARAL																																																					
3.5	EH - 16	CHOSICA	RIMAC	1					1			1																																												
0.1	EH - 17	LA CAPILLA	MALA																																																					
1.0	EH - 18	SOCSI - TOMA IMPER	CAÑETE										4	2	3	1																																								
1.7	EH - 19	CONTA	SAN JUAN																																																					
0.1	EH - 20	LETRAYOCC	PISCO																																																					
2.1	EH - 21	LA ACHIRANA	ICA																																																					
0.9	EH - 22	BELLA UNIÓN	ACARÍ																																																					
0.6	EH - 23	CHUCARAPI	TAMBO																																																					
0.2	EH - 24	CHIVAYA	LOCUMBA																																																					
3.1	EH - 25	LA TRANCA	SAMA	12	12	12																																																		
	EH - 26	AGUAS CALIENTES	CAPLINA																																																					

INFORMACIÓN HIDROMETRICA COMPLETA

5: INFORMACIÓN HIDROMETRICA FALTANTE  
5 MESES DE DATO FALTANTE AL AÑO.

Fuente: Elaboración propia.

Las estaciones ubicadas geográficamente en el Centro Norte y Centro del Perú presentan un caudal medio aproximado de 25 m<sup>3</sup>/s, a excepción de la estación EH-10(Condorcerro), esta presenta un caudal medio de 140.40 m<sup>3</sup>/s, este caudal es resultado del aporte glaciario proveniente de la Cordillera Blanca, mientras que las estaciones ubicadas al Sur del Perú presentan un caudal medio anual de 3.1 m<sup>3</sup>/s, propio de su condición climática (Clima Árido).

La estadística descriptiva muestra una alta variabilidad de la escorrentía superficial (caudales) en función de la latitud y del área de la cuenca que lo produce.

El **Cuadro 14** muestra el resumen de la estadística descriptiva del caudal promedio anual de las estaciones representativas de la VP, ubicada en el norte, centro y sur del Perú.

**Cuadro 14:** Resumen de la Estadística descriptiva de caudales anuales (m<sup>3</sup>/s)

	Código	Estación	Unidad Hidrográfica	Río	Reg	Min	Max	Media	Desv típica
Norte	EH-01	El Tigre	Tumbes	Tumbes	46	38.28	519.70	110.59	77.23
	EH-02	Ardilla	Chira	Chira	46	53.23	1463.00	291.95	280.68
Centro	EH-14	Puente Alco	Huaura	Huaura	46	13.12	49.03	27.13	7.99
	EH-15	Santo Domingo	Chancay-Huaral	Chancay-Huaral	46	5.19	33.48	16.02	5.64
	EH-16	Chosica	Rimac	Rimac	46	14.70	49.83	29.84	7.61
	EH-17	La Capilla	Mala	Mala	46	4.43	45.46	16.37	8.31
Sur	EH-24	Chivaya	Ilo-Moquegua	Moquegua	46	0.23	2.87	1.07	0.56
	EH-25	La Tranca	Sama	Sama	46	0.31	5.79	2.10	1.34
	EH-26	Aguas Calientes	Caplina	Caplina	46	0.42	2.25	0.81	0.31

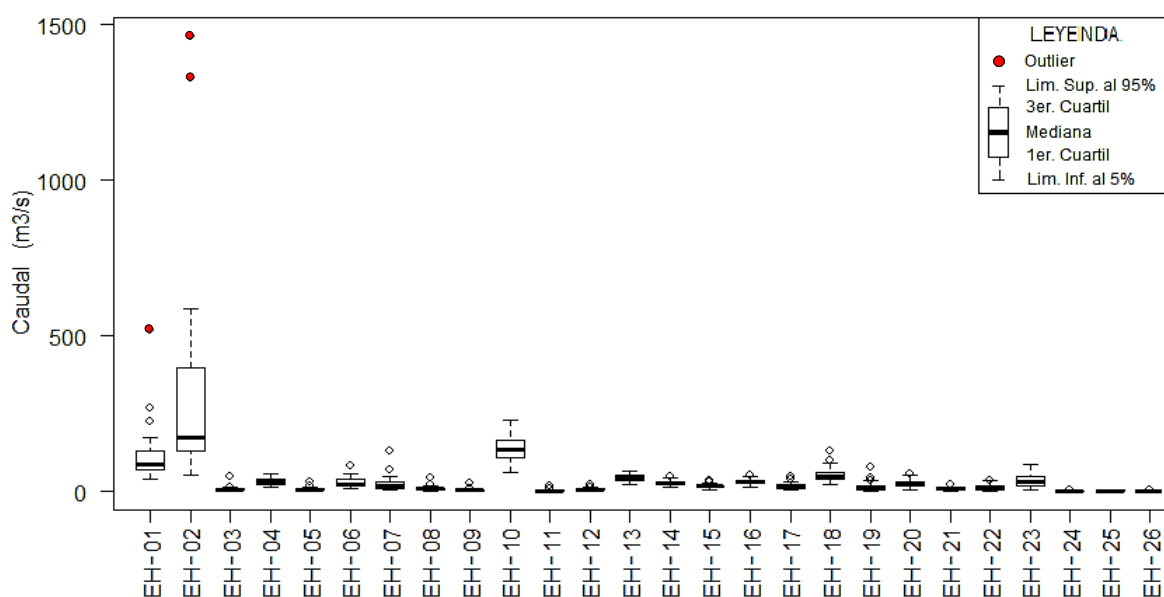
La gráfica de **Boxplot**, correspondientes al caudal medio anual de las estaciones analizadas en la VP, muestra un patrón común, la media y la desviación estándar aumentan en las estaciones ubicadas cerca al Ecuador, donde hay presencia de datos extremos (probables outliers), estos ríos son de régimen caudaloso.

Se identificó que las estaciones próximas al trópico tienen un gran número de observaciones alejadas 1,5 veces del valor del rango intercuartil (cuartiles 1 y 3), los que podrían considerarse como valores atípicos. Sin embargo al examinar la totalidad de las estaciones, no es posible considerar tales valores como atípicos, ya que provienen de una muestra atribuida a un fenómeno global como es El Niño Oscilación del Sur (ENOS), por tanto no se considera como datos atípicos a las observaciones explicadas por un fenómeno natural.

La **Figura 11** muestra la distribución de los caudales medio anuales (m<sup>3</sup>/s) de las 26 estaciones hidrométricas analizadas pertenecientes a la VP, estas se encuentran ordenadas según su ubicación geográfica (latitud) de Norte a Sur.

La gráfica Boxplot, muestra la presencia de valores atípicos, estos valores son más recurrentes durante los eventos de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) del año 1982-83 y 1997-98, los datos clasificados como atípicos pierden significancia al examinar la totalidad de las estaciones, ya que estas presentan una tendencias similares a las estaciones vecinas.

El tamaño de la cajas nos indica una alta variabilidad del comportamiento hídrico que poseen estas cuencas, las estaciones hidrométricas EH-01(El Tigre), ubicada en la cuenca del río Tumbes y EH-02(Ardilla), ubicada en la cuenca del río Chira, ambos poseen una alta variabilidad por encontrarse cerca al trópico (cuencas binacionales Perú - Ecuador), la estación EH-10 (Condorcerro), ubicado en la cuenca del río Santa, presenta el caudal promedio anual multianual de 140.4 m<sup>3</sup>/s superior al de las estaciones vecinas, este caudal es explicado por la presencia de glaciares en la Cordillera Blanca, la fusión del hielo aporta el recurso hídrico a la cuenca del Santa.



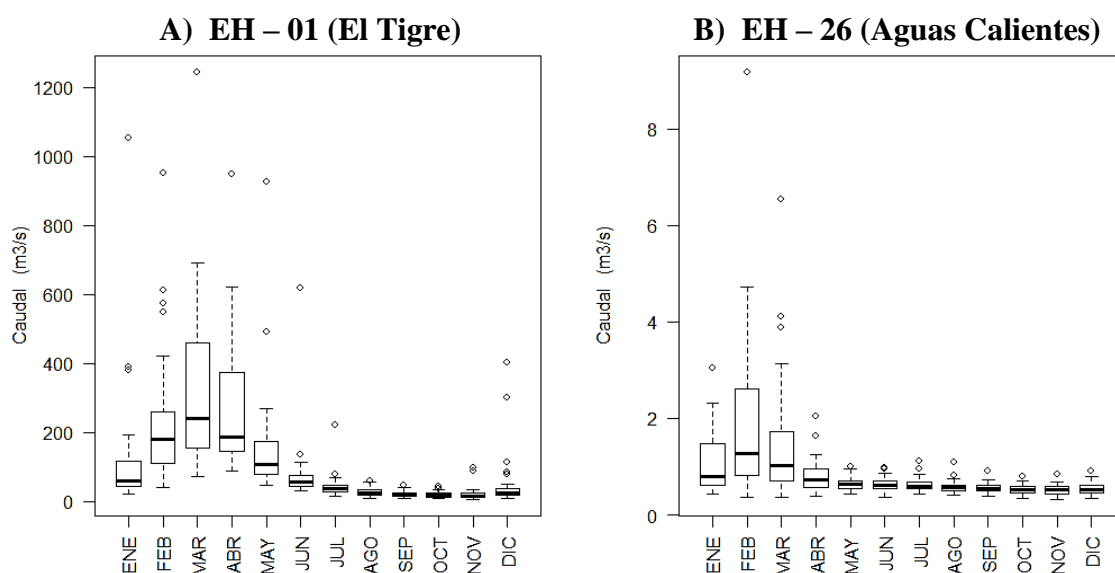
**Figura 11:** Gráfica de cajas del cauda anual para detección de outliers

La **Figura 12** muestra la distribución de los caudales a nivel mensual de la Estación hidrométrica EH-01 (El Tigre) y EH-26 (Aguas Calientes), la gráfica de cajas muestra la presencia de valores atípicos (1.5 veces del rango intercuartil) durante los meses lluviosos (diciembre - abril) y son recurrentes en los ENOS (El Niño Oscilación del Sur) del año 1982-83 y 1997-98.

Los cuantiles mensuales producidos en los años 1982-83 y 1997-98 son semejantes a las estaciones vecinas, descartando la condición de datos atípicos (datos dudosos) y aceptamos que los datos provienen de un fenómeno global (ENOS).

En la **Figura 12 (A)** se muestra el comportamiento hídrico mensual de la estación EH-01 (El Tigre) con respecto a la media y la desviación estándar, los caudales aumentan en los meses lluviosos (Diciembre - Abril), mientras que los meses de estiaje (Junio - Octubre) estos valores tienden a disminuir. De esta manera se demuestra que los caudales tienen una marcada estacionalidad (época de avenida y estiaje), de igual manera se demuestra el comportamiento estacionario a nivel anual (ciclo hidrológico).

En la **Figura 12 (B)** se muestra la distribución de los caudales mensuales de la estación EH-26 (Aguas Calientes), la gráfica de cajas muestra los valores atípicos que se producen en los meses lluviosos (diciembre - abril), mientras que en los meses de estiaje, estos valores disminuyen, la variabilidad mensual del caudal que se produce en la cuenca Caplina es mínima pues el rango de caudales aforados fluctúa entre 0.30 m<sup>3</sup>/s (meses de estiaje) a 9.5 m<sup>3</sup>/s (meses de avenida), la estación hidrométrica EH-26 se caracteriza por encontrarse en una zona climática árida (Tacna).



**Figura 12:** Gráfica de caja, caudal mensual

(A) comportamiento estacional y/o hidrológico de la estación EH-01 (El Tigre).

(B) comportamiento estacional y/o hidrológico de la estación EH-26 (Aguas calientes).

En el **Anexo III** se muestran las gráficas de cajas (Boxplot) a un paso de tiempo mensual para cada una de las 26 estaciones hidrométricas analizadas.

Otro procedimiento que ayude a confirmar estos posibles valores atípicos, es el Test de Grubbs, este evalúa la data estandarizada y su longitud de registro, definiendo un nivel de truncamiento, este nivel para un registro de 45 años es ( $G_{\text{crítico}} = 3.094$ ).

**La prueba de Grubbs** evalúa la detección de datos atípicos, a muestra de ejemplo se evalúa la detección de datos atípicos en la estación hidrométrica EH-02 (Ardilla).

**Cuadro 15:** Estadística descriptiva de la estación EH-02 (Ardilla)

Est. Hidrométrica	N° datos	Min	Max	Media	Desviación Típica
EH-02 (Ardilla) Observado	46	53.23	1463	291.95	280.683
EH-02 (Ardilla) Normalizado	46	3.975	7.288	5.382	0.732

Los valores observados de caudal promedio anual (m<sup>3</sup>/s), se normalizan tomando los logaritmos, posterior a este análisis se evalúa la prueba de Grubbs. Aplicando la ecuación del anexo II (II.20) obteniendo el estadístico “ $G_{\text{calculado}}$ ” para cada data observada (Cuadro 16).

**Cuadro 16:** Estadístico  $G_{\text{calculado}}$  del Test de Grubbs para la estación EH-02 (Ardilla)

N°	Año	Dato Obs	Dato Normalizado	Estadístico G	N°	Año	Dato Obs	Dato Normalizado	Estadístico G
1	1960	130.00	4.868	-0.577	<b>24</b>	<b>1983</b>	<b>1328.00</b>	<b>7.191</b>	3.691
2	1961	102.40	4.629	-0.675	25	1984	550.20	6.310	0.920
3	1962	176.30	5.172	-0.412	26	1985	146.10	4.984	-0.520
4	1963	85.15	4.444	-0.737	27	1986	166.00	5.112	-0.449
5	1964	81.29	4.398	-0.751	28	1987	306.40	5.725	0.051
6	1965	393.90	5.976	0.363	29	1988	116.80	4.760	-0.624
7	1966	89.76	4.497	-0.720	30	1989	339.20	5.827	0.168
8	1967	82.09	4.408	-0.748	31	1990	148.30	4.999	-0.512
9	1968	53.23	3.975	-0.850	32	1991	164.90	5.105	-0.453
10	1969	110.30	4.703	-0.647	33	1992	416.10	6.031	0.442
11	1970	177.20	5.177	-0.409	34	1993	437.50	6.081	0.519
12	1971	277.30	5.625	-0.052	35	1994	395.90	5.981	0.370
13	1972	424.50	6.051	0.472	36	1995	124.50	4.824	-0.597
14	1973	364.80	5.899	0.260	37	1996	135.90	4.912	-0.556
15	1974	149.00	5.004	-0.509	38	1997	186.70	5.230	-0.375
16	1975	291.00	5.673	-0.003	<b>39</b>	<b>1998</b>	<b>1463.00</b>	<b>7.288</b>	4.172
17	1976	442.90	6.093	0.538	40	1999	584.80	6.371	1.043
18	1977	290.80	5.673	-0.004	41	2000	509.50	6.233	0.775
19	1978	124.20	4.822	-0.598	42	2001	482.10	6.178	0.677
20	1979	136.50	4.916	-0.554	43	2002	517.60	6.249	0.804
21	1980	150.10	5.011	-0.505	44	2003	166.00	5.112	-0.449
22	1981	158.40	5.065	-0.476	45	2004	124.60	4.825	-0.596
23	1982	136.80	4.919	-0.553	46	2005	191.70	5.256	-0.357

El estadístico “ $G_{\text{cal}}$ ”, se verifica con el  $G_{\text{crítico}}$  para un nivel de significancia de  $\alpha=0.01$ .

Se prueba la siguiente hipótesis:

H0: No hay valores atípicos en los datos

H1: El valor mínimo o máximo de los datos observados es un valor atípico.

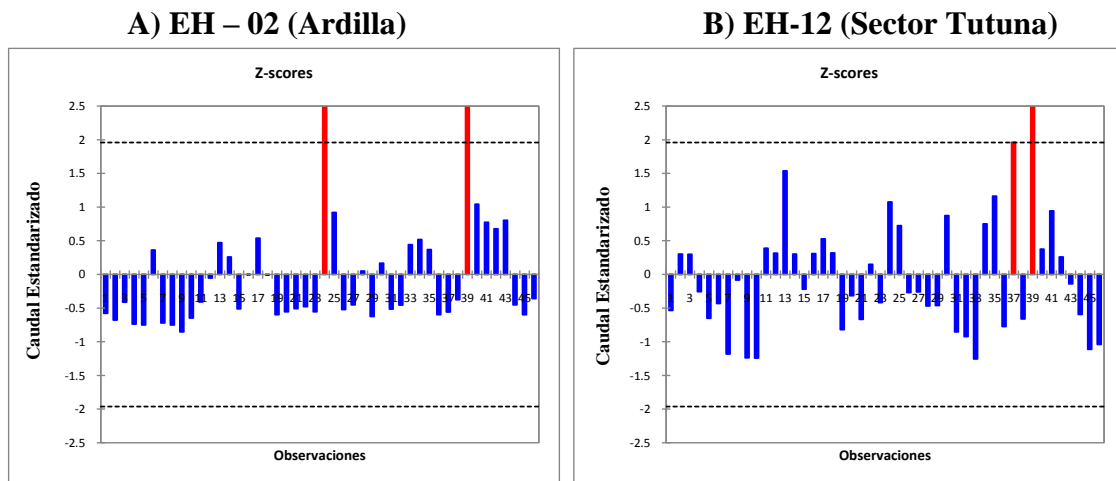
Para 45 datos observados y un nivel de significancia de  $\alpha=0.01$  se tiene un G crítico de 3.094 y un p-valor de 0.003, de aquí se desprende que los valores de “Gcalc>Gcrítico” hacen que se rechace la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna.

Del **cuadro 16** se obtiene que en la estación EH-02 (Ardilla), se han identificado dos eventos atípicos con un estadístico G cal.= 3.691 y 4.172, que sobrepasan el G. crítico (3.094), por tanto rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna.

Estos valores que sobrepasan el nivel de truncamiento, no pueden ser considerados como atípicos, pues son atribuidos a un fenómeno natural como son los ENOS (El Niño Oscilación del Sur) del año 1982-83 y 1997-98, Ver Cuadro 16.

Se recuerda que cada barra corresponde al registro del caudal medio anual de la estación hidrométrica analizada.

En el **Anexo IV** se muestran los gráficos del Test de Grubbs a un paso de tiempo anual para cada una de las 26 estaciones hidrométricas analizadas.



**Figura 13:** Gráfica del Test de Grubbs a un paso de tiempo anual

La **Figura 13 (A)** muestra la representación gráfica del Test de Grubbs para la Estación EH-02 (Ardilla), el nivel de truncamiento está definido según la longitud de registro, este valor es 3.094 en una escala estandarizada y el límite de confianza está próximo a 2 (escala estandarizada).

La **Figura 13 (B)** muestra la representación del test de Grubbs de la estación EH-12 (Sector Tutuna), se observa la presencia de dos eventos atípicos, el mayor de ellos atribuido a un fenómeno natural ENOS producido el año de 1997-98, mientras que el otro valor atípico producido el año 1995-96, guarda relación con la escases del recurso hídrico que empezó a desarrollarse próximo al fenómeno del niño del año 1997-98, el factor antrópico tiene significancia ya que la EH-12(Sector Tutuna), se encuentra ubicado en la cuenca Casma donde existe el Proyecto Especial CHINECAS.

Como resultado del análisis exploratorio de datos (AED), se encontró una alta variabilidad de la oferta hídrica con excesos en la zona Norte y déficit en el Sur, debido a esta variabilidad el factor antrópico es de importancia en la regulación y aprovechamiento de los recursos hídricos, es así que en la costa peruana se encuentran los principales proyectos hidráulicos del Perú (Ver Cuadro 9 y 10).

Las cuencas que por su formación geológica son reguladas, se analizaron dado su importancia, comprobando que la mayoría de las unidades hidrográficas (UH) no han sufrido alteraciones de su oferta hídrica a excepción de:

- La UH Chancay-Lambayeque y la UH Ica, han sufrido el trasvase de las aguas de la Vertiente del Atlántico al Pacífico incrementando la oferta hídrica en la EH-4 (Raca Rumi) cuenca del río Chancay y la EH-21 (La Achirana) cuenca del río Ica.
- La UH Sama, UH Caplina y la UH Rimac, son cuencas altamente reguladas, dada la ubicación geográfica (Sama y Caplina) y el aprovechamiento hídrico (Rímac) del que se hace uso, ocasionan la desnaturalización del caudal registrado en las EH-25 (Tranca) cuenca del río Sama, EH-26 (Aguas Calientes) cuenca del río Caplina y la EH-16 (Chosica) cuenca del río Rimac.

Como síntesis se observó que el comportamiento hídrico en las secciones de control a lo largo de la costa peruana, corresponden mayoritariamente a cuencas naturales a excepción de las cuencas mencionadas líneas arriba por presentar trasvases y/o exceso del aprovechamiento hídrico (desnaturalización de caudales), sin embargo estas serán analizadas dada la importancia.

Las cuencas que albergan los grandes proyectos hidráulicos tendrán el mismo análisis que las cuencas naturales, ya que las estaciones que registran el comportamiento hídrico se ubican río arriba de estos grandes proyectos hidráulicos.



#### 4.1.2 Estimación y completación de datos faltantes (caudales)

La estimación de datos faltantes, se obtuvo aplicando diferentes pruebas estadísticas, entre ellos el **promedio aritmético simple**, el cual es un método comúnmente usado por su simplicidad al estimar un dato ausente para el periodo de un año, la data faltante entre los meses de (Noviembre-Abril) del año 1982-83 y 1997-98, no se completaron por ser Niños.

El **método del vector regional (MVR)**, fue utilizado cuando la data ausente varió de 2 a 12 datos para el periodo de un año. Estos dos métodos se aplicaron teniendo como referencia el Cuadro 13, donde se observa los datos ausente para el periodo de un año.

El **MVR** integra la información de una región en una estación ficticia (Vector), seleccionando las estaciones que tengan una buena correlación con el vector y realizando la completación del dato ausente mediante el método de regresión múltiple.

**Cuadro 17:** Estaciones con dato mensual faltante

Código	Estación	Río	Metododo de Completación	
			Met. Arit. Simple	Met. Regre. Multiple
EH - 1	El tigre	Tumbes	3	4
EH - 3	Puchaca	La leche	2	-
EH - 4	Raca rumi	Chancay lambayeque	1	1
EH - 5	El batan	Zaña	1	-
EH - 8	Quirihuac-moche	Moche	3	-
EH - 9	Huacapongo	Viru	3	-
EH - 11	San jacinto	Nepeña	4	5
EH - 12	Sector tutuna	Casma	2	3
EH - 13	Yanapampa	Pativilca	1	1
EH - 14	Puente alco	Huaura	1	1
EH - 15	Santo domingo	Chancay-huaral	2	1
EH - 16	Chosica	Rimac	6	4
EH - 17	La capilla	Mala	1	-
EH - 18	Socsi - toma imper	Cañete	3	3
EH - 19	Conta	San juan	1	5
EH - 20	Letrayocc	Pisco	1	-
EH - 21	La achirana	Ica	2	4
EH - 22	Bella unión	Acarí	3	2
EH - 23	Chucarapi	Tambo	3	2
EH - 24	Chivaya	Locumba	2	-
EH - 25	La tranca	Sama	1	3
<b>TOTAL</b>			<b>46</b>	<b>39</b>

El **Cuadro 17** muestra el resultado de los datos mensuales faltantes por estación, se ha considerados dos métodos de completación, estos son: promedio aritmético simple y regresión múltiple. La completación mediante el promedio aritmético simple requiere estimar un total de 46 datos por encontrarse ausentes, mientras que la completación de datos por el método de regresión múltiple requiere previamente realizar la regionalización, agrupando estaciones con una alta correlación con el Vector.

#### 4.1.2.1 Agrupamiento de estaciones (Regionalización)

La agrupación de estaciones con un comportamiento hídrico similar (regionalización) se obtuvo aplicando el Método del Vector Regional (MVR).

Los resultados de la variable analizada (caudal medio anual), muestran que las estaciones hidrométricas (EH) localizadas en la Vertiente peruana del Pacífico (VP) se agruparon en cuatro regiones estadísticamente homogéneas, cada una de ellas con una alta correlación con el Vector.

A partir de estas regiones, se realizó la completación de data faltante entre las estaciones hidrométricas que integrantes una región, la variable analizada fue el caudal medio anual.

En el **Anexo V** se muestran las estaciones agrupadas por regiones estadísticamente homogéneas con una alta correlación con el Vector.

**Cuadro 18:** Resumen de regiones homogéneas formadas por el MVR (Caudal anual)

Codigo	Estación	Río	Región	Correl. /Vector	D.E. Desvíos
EH - 1	EL TIGRE	Tumbes	1	0.951	0.147
EH - 2	ARDILLA	Chira	1	0.857	0.306
EH - 3	PUCHACA	La Leche	1	0.96	0.155
EH - 4	RACA RUMI	Chancay-Lambayeque	1	0.869	0.206
EH - 5	EL BATAN	Zaña	1	0.922	0.18
EH - 6	YONAN	Jequetepeque	2	0.911	0.182
EH - 7	SALINAR-TAMBO	Chicama	2	0.923	0.204
EH - 8	QUIRIHUAC-MOCHE	Moche	2	0.812	0.296
EH - 9	HUACAPONGO	Viru	2	0.886	0.33
EH - 10	CONDORCERRO	Santa	2	0.824	0.284
EH - 11	SAN JACINTO	Nepeña	2	0.923	0.38
EH - 12	SECTOR TUTUMA	Casma	2	0.815	0.327
EH - 13	YANAPAMPA	Pativilca	3	0.737	0.216
EH - 14	PUENTE ALCO	Huaura	3	0.736	0.214
EH - 15	SANTO DOMINGO	Chancay-Huaral	3	0.927	0.165
EH - 16	CHOSICA	Rimac	3	0.495	0.284
EH - 17	LA CAPILLA	Mala	3	0.860	0.236
EH - 18	SOCSI-S Y TOMA IMPER	Cañete	3	0.906	0.135
EH - 19	CONTA	San Juan	3	0.900	0.516
EH - 20	LETRAYOC	Pisco	3	0.945	0.215
EH - 21	LA ACHIRANA	Ica	4	0.809	0.257
EH - 22	BELLA UNIÓN	Acari	4	0.729	0.431
EH - 23	CHUCARAPI	Tambo	4	0.843	0.265
EH - 25	LA TRANCA	Sama	4	0.955	0.256
EH - 26	AGUAS CALIENTES	Caplina	4	0.681	0.422

El **Cuadro 18** muestra el resultado de las regiones formadas por el MVR, estas presentan una alta correlación con el Vector, de este análisis se obtuvo cuatro regiones con un comportamiento hídrico similar, estas se encuentran ubicadas geográficamente de Norte

Sur las cuales presentan un régimen irregular, con marcadas diferencias entre épocas de avenida y estiaje y cuyas características mencionamos a continuación.

### **Región N° 01**

Conformada por cinco estaciones hidrométricas (EH-1 al EH-5), se ubica en la zona Norte del Perú, esta región se caracteriza por presentar un rango del caudal promedio multianual variado, con una máxima de 422 m<sup>3</sup>/s y una mínima de 21.8 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal promedio de 89.4 m<sup>3</sup>/s, la variabilidad multianual de los registros hidrométricos, muestran que no hay un cambio significativo de la oferta hídrica a excepción de la EH-2(Ardilla), el cual muestra un incremento de la oferta hídrica en la UH del río Chira.

### **Región N° 02**

Conformada por siete estaciones hidrométricas (EH-6 al EH-12), se encuentra ubicado en la zona Centro Norte del Perú, esta región presenta un rango del caudal promedio multianual variado, con un máximo de 78.2 m<sup>3</sup>/s y una mínima de 10.6 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal promedio de 30.12 m<sup>3</sup>/s, en esta región se encuentra ubicado la EH-10 (Condorcerro) el cual registra la oferta hídrica del río Santa, único río que presenta un régimen regular a lo largo de la costa peruana, la variabilidad multianual de esta región no presenta un cambio significativo de la oferta hídrica.

### **Región N° 03**

Conformada por ocho estaciones hidrométricas (EH-13 al EH-20), se encuentra ubicado en la zona Centro del Perú, esta región presenta un rango del caudal promedio multianual con un máximo de 62.9 m<sup>3</sup>/s y una mínima de 10.8 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal promedio de 28.1 m<sup>3</sup>/s, la variabilidad multianual de esta región no presenta un cambio significativo de la oferta hídrica.

### **Región N° 04**

Conformada por seis estaciones hidrométricas (EH-21 al EH-26), se encuentra ubicado en el Sur del Perú, esta región presenta un rango del caudal promedio multianual máximo de 25.3 m<sup>3</sup>/s y una mínima de 1.4 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal promedio 9.3 m<sup>3</sup>/s, la variabilidad multianual de esta región no presenta un cambio significativo de la oferta hídrica.

La **Figura 14** muestra las estaciones hidrométricas con un comportamiento homogéneo del caudal promedio anual, agrupadas en cuatro regiones hidrológicas, estas se encuentran localizadas geográficamente de Norte a Sur.



La región 01 está formada por cinco estaciones hidrométricas (color verde), ubicadas en el Norte del Perú, la región 02 se encuentra en el Centro Norte, entre la región 01 y 03, formada por siete estaciones hidrométricas (color lila), la región 03 se encuentra en el centro del Perú, conformada por ocho estaciones hidrométricas (color celeste), mientras que la región 04 se ubica en la parte Sur del Perú, conformadas por cinco estaciones hidrométricas (color negro), todas ellas con una alta correlación con el Vector.

La completación de datos faltantes se realizó entre las estaciones que forman una región hidrológicamente homogénea aplicando el método de regresión múltiple.

#### **4.1.3 Análisis de Tendencia y quiebres**

Se analizó dos supuestos básicos: Homogeneidad (libre de tendencia) y Estacionariedad (constante en el tiempo), estos análisis aumentan la confiabilidad de los datos, detectando anomalías producidas por la actividad antrópica (trasvases y/o represamiento).

Se evaluaron estadísticamente aplicando dos pruebas no paramétricas, estas son:

##### **a) Análisis de tendencia**

La prueba no-paramétrica más utilizada para la identificación de tendencia en series de variables hidrometeorológicas es la prueba de Mann Kendall, la autocorrelación presente en series de caudal afecta los resultados de la prueba, causando problemas en la detección y evaluación del nivel de significancia, la presencia de autocorrelación positiva tiende a aumentar la probabilidad de detección de tendencia, cuando en realidad esta no existe, mientras que la autocorrelación negativa tiende a disminuirla (Yue et al., 2002).

Para corregir este efecto, Yue et al., (2002) presentaron una técnica de pre-blanqueo que remueve la correlación serial sin alterar la tendencia presente en la serie. Esta última técnica fue aplicada a la serie de caudal medio anual, puesto que esta variable hidrológica presenta correlaciones seriales.

El **Cuadro 19** muestra el resultado del análisis de tendencia aplicando el estadístico de Mann Kendall modificado para un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

Los datos analizados corresponden al caudal promedio anual multianual de cada estación hidrométrica, con un registro continuo de 45 años, evaluando la siguiente hipótesis.

- H0 (Hipótesis Nula) : No existe una tendencia en la serie analizada  
H1 (Hipótesis Alternativa) : Hay una tendencia en la serie

Del resultado del **Cuadro 19**, se observa que:

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

Fue aceptada en la mayoría de las estaciones analizadas para un nivel de significancia del 5%, a excepción de la estación hidrométrica EH-02(Ardilla), esta presenta tendencia en el registro de caudal promedio anual multianual de la serie analizada, para comprobar este resultado se aplicaran otras pruebas estadísticas que corroboren el aumento o disminución del caudal registrado en esta estación.

**Cuadro 19:** Resumen del Test de Mann Kendall para el análisis de tendencia

Código	Estación	Tau de Kendall	S	Var(S)	P-valor	Hipotesis Nula
EH - 1	El tigre	0.06	63	24993.23	0.69	Aceptado
EH - 2	Ardilla	0.31	322	26013.42	0.05	<b>Rechazado</b>
EH - 3	Puchaca	-0.11	-114	26716.35	0.49	Aceptado
EH - 4	Raca rumi	0.15	153	24005.15	0.33	Aceptado
EH - 5	El batan	0.05	49	24283.97	0.76	Aceptado
EH - 6	Yonan	0.09	93	24418.17	0.56	Aceptado
EH - 7	Salinar-Tambo	-0.04	-43	25039.98	0.79	Aceptado
EH - 8	Quirihuac-moche	-0.03	-31	26753.02	0.85	Aceptado
EH - 9	Huacapongo	-0.12	-125	24279.00	0.43	Aceptado
EH - 10	Condorcerro	-0.11	-116	23370.05	0.45	Aceptado
EH - 11	San jacinto	0.00	-1	27431.52	1.00	Aceptado
EH - 12	Sector tutuna	0.02	19	25470.26	0.91	Aceptado
EH - 13	Yanapampa	-0.29	-301	23494.60	0.05	Aceptado
EH - 14	Puente alco	0.01	13	26370.67	0.94	Aceptado
EH - 15	Santo domingo	-0.12	-127	24801.31	0.42	Aceptado
EH - 16	Chosica	0.27	281	24789.52	0.08	Aceptado
EH - 17	La capilla	0.06	67	24928.51	0.68	Aceptado
EH - 18	Socsi - toma imper	0.00	3	23119.57	0.99	Aceptado
EH - 19	Conta	-0.16	-164	29804.03	0.35	Aceptado
EH - 20	Letrayocc	0.01	13	23890.82	0.94	Aceptado
EH - 21	La achirana	0.06	67	23996.62	0.67	Aceptado
EH - 22	Bella unión	-0.04	-39	26725.91	0.82	Aceptado
EH - 23	Chucarapi	-0.09	-95	23598.44	0.54	Aceptado
EH - 24	Chivaya	-0.29	-297	27279.21	0.07	Aceptado
EH - 25	La tranca	0.01	10	24640.14	0.95	Aceptado
EH - 26	Aguas Calientes	-0.04	-38	25843.59	0.82	Aceptado

#### b) Análisis de homogeneidad

Se aplicó el test de Pettit para el análisis de rotura de serie o cambios en la media, para verificar la homogeneidad del caudal registrado durante 45 años continuos. La hipótesis evaluada para un nivel de significancia del 5%. ( $\alpha = 0.05$ ) es:

H0 (Hipótesis Nula) : Los datos son homogéneos

H1 (Hipótesis Alternativa) : hay una fecha de cambio en la media de los datos

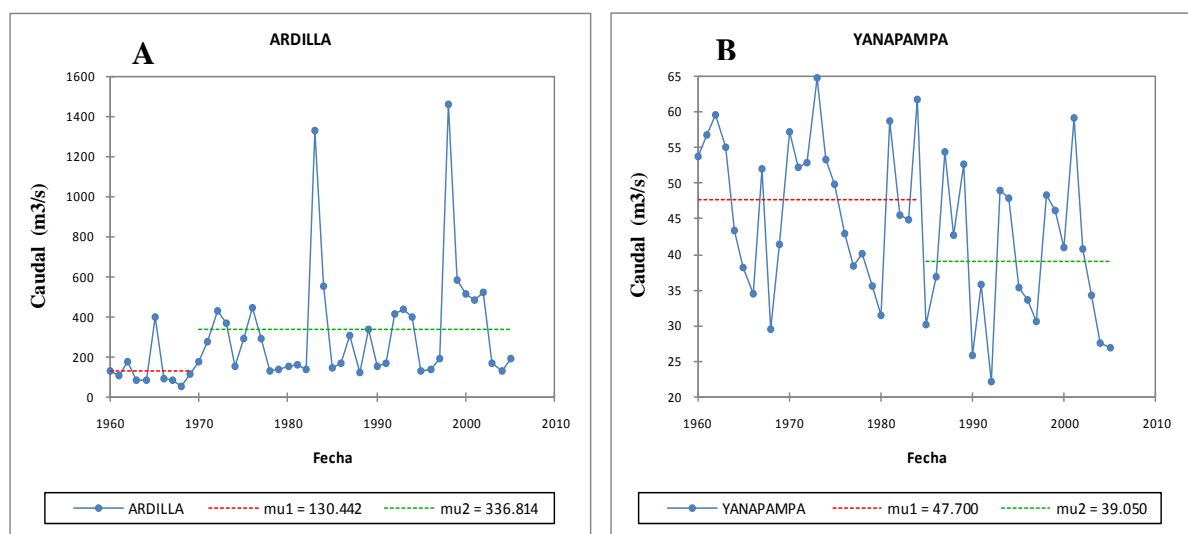
Mediante la aplicación de esta prueba, se detectaron cambios importantes en la serie histórica del caudal promedio anual multianual de las estaciones analizadas, en total se detectaron 04 estaciones que han sufrido cambios con respecto al caudal promedio anual multianual registrado.

**Cuadro 20:** Resumen del Test de Pettit para el análisis de homogeneidad

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>K</b>	<b>año de cambio (T)</b>	<b>P</b>	<b>Hipotesis nula</b>
EH - 1	El tigre	145.0	1968	0.43	Aceptado
EH - 2	Ardilla	274.0	1969	0.01	<b>Rechazado</b>
EH - 3	Puchaca	192.0	1977	0.15	Aceptado
EH - 4	Raca rumi	214.0	1968	0.08	Aceptado
EH - 5	El batan	111.0	1992	0.73	Aceptado
EH - 6	Yonan	163.0	1992	0.29	Aceptado
EH - 7	Salinar-Tambo	136.0	1977	0.51	Aceptado
EH - 8	Quirihuac-moche	128.0	1975	0.57	Aceptado
EH - 9	Huacapongo	162.0	1977	0.30	Aceptado
EH - 10	Condorcerro	164.0	1984	0.30	Aceptado
EH - 11	San jacinto	90.0	1993	0.91	Aceptado
EH - 12	Sector tutuna	142.0	1969	0.46	Aceptado
EH - 13	Yanapampa	241.0	1984	0.03	<b>Rechazado</b>
EH - 14	Puente alco	150.0	1969	0.39	Aceptado
EH - 15	Santo domingo	189.0	1974	0.15	Aceptado
EH - 16	Chosica	219.0	1968	0.06	Aceptado
EH - 17	La capilla	141.0	1980	0.46	Aceptado
EH - 18	Socsi - toma imper	91.0	1992	0.90	Aceptado
EH - 19	Conta	235.0	1976	0.04	<b>Rechazado</b>
EH - 20	Letrayocc	127.0	1992	0.59	Aceptado
EH - 21	La achirana	136.0	1993	0.51	Aceptado
EH - 22	Bella unión	176.0	1977	0.22	Aceptado
EH - 23	Chucarapi	140.0	1989	0.47	Aceptado
EH - 24	Chivaya	350.0	1977	0.00	<b>Rechazado</b>
EH - 25	La tranca	121.0	1977	0.65	Aceptado
EH - 26	Aguas Calientes	161.0	1977	0.30	Aceptado

Del **Cuadro 20** se observa que el P valor calculado es mayor que el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ) en la mayoría de las estaciones evaluadas, cuyo estadístico acepta la hipótesis nula  $H_0$ . Así mismo, se observa que se han producido cambios en la serie histórica entre años (1969-1984) en las estación (EH-02(Ardilla), EH-13(Yanapampa, EH-19(Conta) y EH-24(Chivaya)), estas estaciones son consideradas no homogéneas dado que su registro promedio anual multianual ha cambiado debidos a factores antrópicas (trasvases o represamiento), alterando la oferta hídrica de la cuenca en un determinado año.

La **Figura 15 (A)** muestra la serie de caudal anual multianual de la estación EH-02(Ardilla) ubicado en la UH Chira, departamento de Piura, se observa la alteración en su registro medio anual multianual (cambio en la media), la línea roja muestra el registro del año 1960 a 1969 con un valor medio de  $130.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que la línea verde muestra el registro del año 1969 al 2005 cuyo valor medio es de  $336.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , debido a estas alteraciones, los supuestos básicos de toda variable hidroclimática no se cumplen en esta estación. (No es Homogéneo, no es estacionario, hay tendencia y cambio en la media), estas alteraciones son explicadas por la actividad antrópica, construcción de la presa Poechos en el cauce del río Chira que entro en funcionamiento en el año de 1970.



**Figura 15:** Gráfica del Test de Pettit (cambio en la media) en la estación hidrométrica (A) EH-02(Ardilla) y la estación hidrométrica (B) EH -03(Yanapampa).

La **Figura 15 (B)** muestra la serie de caudal anual multianual de la estación EH-13(Yanapampa), ubicado en la UH Pativilca, departamento de Lima, el cual posee alteración en su registro medio anual multianual, la línea roja muestra el registro del año 1960 a 1984 con un valor medio anual de  $47.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que la línea verde muestra el registro del año 1984 a 2005 cuyo valor medio anual es de  $39.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , esta disminución del registro medio anual multianual se debe al trasvase de la cuenca del río Pativilca a la cuenca del río Supe en la Vertiente del Pacífico.

En el **Anexo VI** se muestran los gráficos de la prueba de Pettit a un paso de tiempo anual para cada una de las 26 estaciones hidrométricas analizadas.



Como resumen del análisis de tendencia de los registros de caudal anual multianual, se concluye que: para un nivel de significancia del 5%, no se encontraron tendencia significativa en la mayoría de estaciones, a excepción de la estación EH-02(Ardilla), esta tendencia es explicado por un proceso antrópicos (construcción de la presa Poechos) en el cauce del río Chira, entrando en funcionamiento en los años de 1970.

El resultado de la prueba de Pettit, muestra que existe un cambio en el registro histórico del caudal anual multianual en 04 estaciones hidrométricas, para un nivel de significancia del 5%, estos cambios en la media producidos en la EH-2(Ardilla), EH-13(Yanapmapa) y la EH-24(Chivaya) son explicados por la actividad antrópica (represamiento y trasvase) respectivamente, mientras que las EH-19(Conta) es explicado por la sobre explotación del recurso hídrico.

## **4.2 Cálculo de un índice de sequía de caudales estandarizado (IQE)**

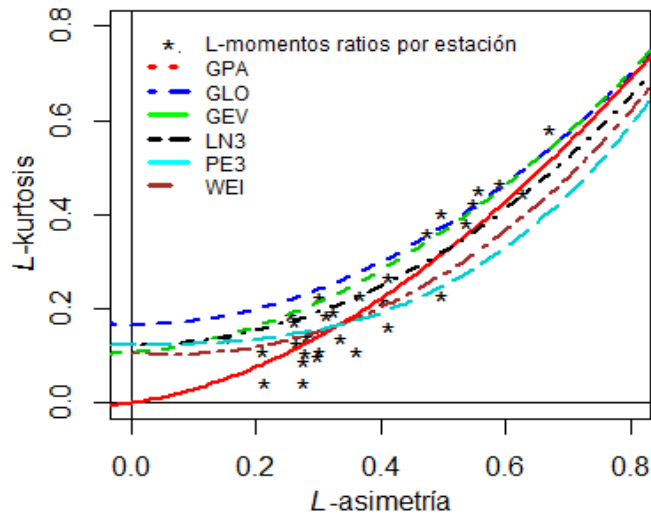
El desarrollo de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) que cuantifique los eventos de sequía producidos en la vertiente peruana del Pacífico (VP), nos permitirá realizar la comparación espacial y temporal de las condiciones hidrológicas de un río o conjunto de ríos, para tal fin se evaluó la capacidad de seis distribuciones de probabilidad (DP), seleccionando aquella distribución (DP) que presente el mejor ajuste mensual interanual o describa la mayor cantidad de datos observados aplicando la prueba de bondad de ajuste denominado Distancia Mínima Ortogonal (DMO).

La metodología para el desarrollo de un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) muestra los siguientes resultados.

### **4.2.1 Distribuciones de la Probabilidad**

Las distribuciones evaluadas para estimar un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) son seis, todas las DP son de tres parámetros siendo: Valor extremo generalizado (GEV), Log-Normal(LN3), Logistic Generalizada (GLO), Pearson Tipo III (PE3), Weibul (WEI) y Pareto Generalizado (GPA).

La **Figura 16** muestra el diagrama de L-momentos ratios y las distribuciones empleadas para estimar un IQE, este diagrama identifica cualitativamente la distribución que mejor se ajuste a la data observada, evaluando el método de la Distancia Mínima Ortogonal (DMO) para el cálculo de un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE).



**Figura 16:** Diagrama de L-momentos ratios con las distribuciones candidatas para el cálculo de un Índice de Sequía de caudal estandarizado (IQE).

#### 4.2.2 Cálculo de parámetros (método de L-momentos)

Los parámetros son valores representativos que describen la estadística de la muestra analizada (caudal mensual), estas se obtienen para representar el comportamiento hídrico mediante un modelo probabilístico (distribución de probabilidad), siendo los primeros cuatro L-momentos los más importantes.

$\lambda_1 = L_1 =$  parámetros de **localización** o media de la distribución.

$\lambda_2 = L_2 =$  Parámetro de **variación** o dispersión de los datos

$\lambda_3 = L_3 =$  Parámetro de **forma**, hace referencia a la **asimetría**

$\lambda_4 = L_4 =$  Parámetro hace referencia a la **kurtosis**.

Los resultados obtenidos de este análisis se muestran en los Cuadros 21 y 22.

El **Cuadro 21** muestra los principales parámetros estimados por el método de L-momentos para la estación EH-01(El Tigre) para un registro de 45 años, el análisis del mes de enero muestra la siguiente estimación, el parámetro ( $L_1$ ) representa la media de la serie analizada con un valor calculado de 111.528 m<sup>3</sup>/s, el parámetro ( $L_2$ ) representa la dispersión de los datos, que en una gráfica de función de densidad  $f(x)$  representaría la escala de la curva (campana), el parámetro ( $L_3$ ) representa la forma de la distribución, en una gráfica de densidad  $f(x)$  representaría la simetría o asimetría de la curva (campana). El coeficiente de variación ( $t = L_{CV}$ ) es la relación entre ( $L_2$ ) / ( $L_1$ ) son adimensionales, de igual manera la relación ( $T_3$ ) representa la asimetría y ( $T_4$ ) representa la kurtosis de la serie de datos analizados (caudal mensual).

**Cuadro 21:** Estimación de parámetros método de L-momentos EH-01(El Tigre).

N°	name	n	L_1	L_2	L_3	L_4	t	t_3	t_4
1	ENE	46	111.5280	54.2727	31.9922	25.4052	0.4866	0.5895	0.4681
2	FEB	46	223.0439	85.1606	29.4243	21.8672	0.3818	0.3455	0.2568
3	MAR	46	315.7848	113.1266	30.4997	13.1873	0.3582	0.2696	0.1166
4	ABR	46	270.6926	90.4835	29.7793	10.6126	0.3343	0.3291	0.1173
5	MAY	46	151.7763	54.6117	26.7927	19.8998	0.3598	0.4906	0.3644
6	JUN	46	75.4987	24.8523	14.7817	12.9046	0.3292	0.5948	0.5193
7	JUL	46	42.6396	11.0872	4.6394	4.0863	0.2600	0.4184	0.3686
8	AGO	46	27.5365	5.6767	1.1319	0.6079	0.2062	0.1994	0.1071
9	SEP	46	21.6891	4.5817	1.0898	0.5380	0.2112	0.2379	0.1174
10	OCT	46	20.4037	4.6234	1.2643	0.4395	0.2266	0.2734	0.0950
11	NOV	46	22.1494	6.9059	3.3317	2.6106	0.3118	0.4824	0.3780
12	DIC	46	44.3289	22.7138	15.1997	12.6688	0.5124	0.6692	0.5578

**Cuadro 22:** Estimación de parámetros método de L-momentos EH-02(Ardilla).

N°	name	n	L_1	L_2	L_3	L_4	t	t_3	t_4
1	ENE	46	234.1122	125.2869	83.9470	73.2008	0.5352	0.6700	0.5843
2	FEB	46	422.8924	215.8860	116.1033	83.6936	0.5105	0.5378	0.3877
3	MAR	46	931.5278	463.8394	181.7961	67.8670	0.4979	0.3919	0.1463
4	ABR	46	773.3559	410.1491	210.8688	117.9243	0.5303	0.5141	0.2875
5	MAY	46	362.5822	169.5067	85.8872	60.3711	0.4675	0.5067	0.3562
6	JUN	46	224.6289	97.0805	39.7412	28.7003	0.4322	0.4094	0.2956
7	JUL	46	144.1389	47.6060	12.6239	7.0817	0.3303	0.2652	0.1488
8	AGO	46	93.4883	30.2646	8.4531	5.3656	0.3237	0.2793	0.1773
9	SEP	46	66.1078	21.0827	5.1702	3.2221	0.3189	0.2452	0.1528
10	OCT	46	67.9541	23.0508	7.4943	5.5086	0.3392	0.3251	0.2390
11	NOV	46	62.6489	19.3659	3.6254	2.6057	0.3091	0.1872	0.1346
12	DIC	46	119.9104	55.8987	24.3907	20.4418	0.4662	0.4363	0.3657

En el **Anexo VII** se menciona la estimación de parámetros con el método de L-momentos para cada una de las 26 estaciones analizadas en la Vertiente peruana del Pacífico.

#### 4.2.3 Función de distribución y función de densidad

La función de distribución  $F(x)$  y la función de densidad  $f(x)$  son dos formas alternativas de describir el comportamiento hídrico de la variable analizada (caudal mensual).

La función de distribución  $F(x)$  estima la frecuencia de ocurrencia (probabilidad) de un determinado cuantil, esta función de distribución  $F(x)$  y la función de densidad  $f(x)$  están formados por tres parámetros (forma, escala y posición), cuyo resultados se muestran a continuación para cada una de las seis distribuciones evaluadas.

a) **Parámetros de distribución  $F(x)$  Estación EH-01(El Tigre)**

**Cuadro 23:** Parámetro de la función distribución: Valor extremo generalizado (GEV)

$$F(x) = e^{-\left[1-k\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{k}}}$$

$$\text{forma} = \text{Kappa} = k = 7.859C + 2.9554C^2 \quad C = \frac{2}{3 + \tau_3} - 0.6309$$

$$\text{Escala} = \text{Alpha} = \alpha = \frac{\lambda_2 k}{\Gamma(1+k)(1-2^{-k})}$$

$$\text{Posición} = xi = \varepsilon = \lambda_1 - \frac{\alpha}{k} [1 - \Gamma(1+k)]$$

	row.names	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
1	xi	53.90180	140.01627	211.42901	183.40084	94.95376	49.09431
2	alpha	31.36078	91.00969	139.31309	99.87196	41.91325	14.11891
3	kappa	-0.56556	-0.25614	-0.14939	-0.23355	-0.44575	-0.57181
		JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	xi	31.40458	22.64415	17.58146	16.12497	14.98158	20.09422
2	alpha	10.14152	7.83992	5.95355	5.65558	5.41292	9.93883
3	kappa	-0.35367	-0.04534	-0.10302	-0.15493	-0.43554	-0.65732

El **Cuadro 23** muestra el resultado del cálculo de parámetros de la función de distribución de Valor Extremo Generalizado (GEV), la formulación matemática se menciona líneas arriba, los tres parámetros que conforman la función de distribución  $F(x)$  fueron calculados para cada mes, asumiendo que el comportamiento de los caudales son independientes para cada mes a lo largo de un año.

Los tres parámetros que la conforman son:

La **Forma** que hace referencia a la asimetría, denominado **Kappa** ( $k$ )

La **Escala** que hace referencia a la dispersión de los datos, denominado **Alpha** ( $\alpha$ )

La **Posición** que hace referencia a la media de la distribución, denominado **xi** ( $\varepsilon$ )

**Cuadro 24:** Parámetro de la función de distribución: Log-Normal (LN3).

*Parámetros 3 :  $\alpha = \text{posición}$  ,  $\sigma = \text{escala}$  ,  $\mu = \text{forma}$  .*

	row.names	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
1	zeta	28.33267	6.55722	-50.71493	29.53093	52.54320	37.71190
2	mulog	3.53917	5.11241	5.74635	5.24629	4.02597	2.73017
3	sigmalog	1.32818	0.72818	0.56151	0.69163	1.06911	1.34298
		JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	zeta	19.20965	2.76641	4.89734	5.63159	9.40112	13.25104
2	mulog	2.75344	3.12478	2.69914	2.53041	1.99532	2.21533
3	sigmalog	0.89507	0.41196	0.49345	0.56980	1.04889	1.56279

Los **Cuadros 24** al **28** muestran los parámetros estimados de la función de distribución  $F(x)$ , de cada una de las distribuciones de probabilidad analizadas, estas son: (Log-Normal, Logístico Generalizada, General de Pareto, Pearson tipo III y Weibull).

**Cuadro 25:** Parámetro de distribución de Logística Generalizada (GLO)*Parámetros 3 :  $\mu =$  posición ,  $\alpha =$  escala ,  $k =$  forma .*

	row.names	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
1	xi	67.22398	177.41555	267.38398	224.26029	112.65228	55.09225
2	alpha	28.15682	69.39531	100.07739	75.20204	35.41731	12.71489
3	kappa	-0.58947	-0.34552	-0.26961	-0.32911	-0.49060	-0.59478
		JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	xi	35.64092	25.71070	19.94575	18.39948	17.26509	24.30444
2	alpha	8.15866	5.31267	4.16698	4.07539	4.54955	9.31375
3	kappa	-0.41845	-0.19940	-0.23787	-0.27344	-0.48244	-0.66918

**Cuadro 26:** Parámetro de distribución de General de Pareto (GPA).*Parámetros 3 :  $\xi =$  posición ,  $\alpha =$  escala ,  $k =$  forma .*

	row.names	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
1	xi	29.22007	55.03580	72.49681	88.86361	59.83880	38.01700
2	alpha	42.51717	163.44466	279.92276	183.56110	62.83706	19.04736
3	kappa	-0.48344	-0.02716	0.15058	0.00953	-0.31652	-0.49182
		JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	xi	22.46100	14.28128	11.46575	10.50452	10.42138	12.61179
2	alpha	16.54604	17.69573	12.58856	11.29582	8.18914	12.57207
3	kappa	-0.18002	0.33501	0.23136	0.14109	-0.30175	-0.60362

**Cuadro 27:** Parámetro de distribución de Pearson tipo III (PE3).*Parámetros 3 :  $u =$  posición ,  $\sigma =$  escala ,  $y =$  forma .*

	row.names	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
1	mu	111.52804	223.04392	315.78478	270.69261	151.77630	75.49870
2	sigma	137.98351	171.76938	217.38080	180.44851	124.43274	63.60744
3	gamma	3.78421	2.07354	1.62091	1.97465	3.01227	3.83080
		JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	mu	42.63957	27.53646	21.68907	20.40370	22.14941	44.32891
2	sigma	23.65665	10.52738	8.65381	8.90387	15.61020	64.51225
3	gamma	2.52702	1.20641	1.43369	1.64358	2.95483	4.56527

**Cuadro 28:** Parámetro de distribución de Weibull (WEI).*Parámetros 3 :  $\xi =$  posición ,  $\alpha =$  escala ,  $k =$  forma .*

	row.names	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
1	zeta	-35.97141	-56.38215	-59.64123	-88.33356	-66.07696	-41.10298
2	beta	44.02029	164.36597	271.67253	183.19972	66.14704	19.66754
3	delta	0.54711	0.96896	1.18939	1.01109	0.68355	0.54064
		JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	zeta	-23.37424	-12.42384	-10.56936	-10.01885	-11.19402	-15.22677
2	beta	17.13802	16.70054	12.04940	10.98220	8.61274	12.15514
3	delta	0.80895	1.47162	1.30517	1.17649	0.69646	0.45712

La **Figura 17** muestra el histograma de caudal mensual y la función de densidad teórica  $f(x)$  que mejor describe el comportamiento hídrico en la estación EH-01(El Tigre), para un registro mensual interanual de 45 años (1960 al 2005).

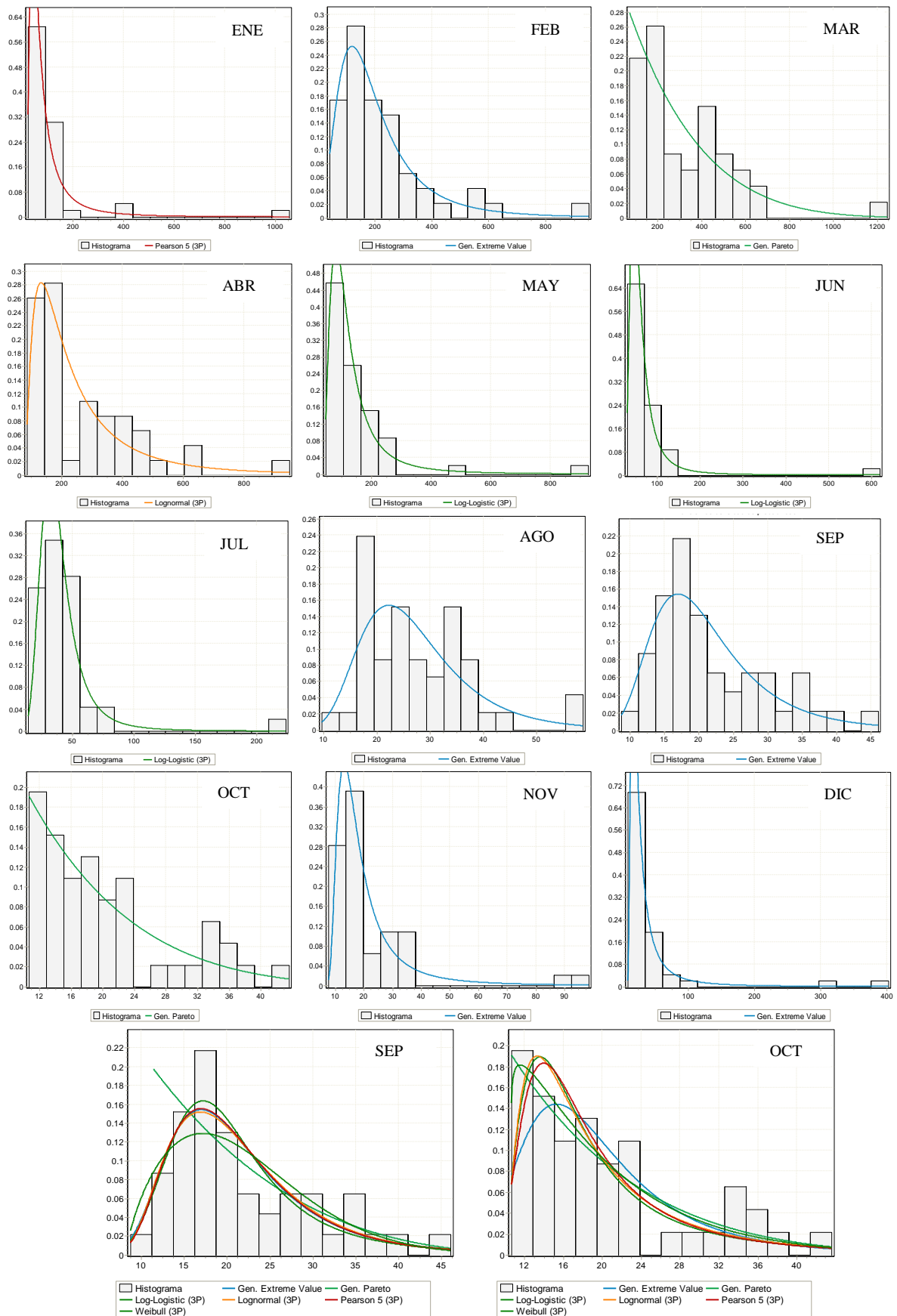
El histograma mensual muestra que la función de densidad teórica  $f(x)$  tiene un sesgo positivo (cola a la derecha), como corresponde a los valores de eventos extremos (sequías), sin embargo la distribución teórica que mejor describe el comportamiento hídrico mensual no sigue un patrón específico (una sola distribución), el comportamiento hídrico en la estación EH-01(El tigre), es descrito por varias distribuciones (DP) para el periodo de un año hídrico.

El registro de caudal mensual interanual observado, es descrito por varias distribuciones en el periodo de un año hídrico (ciclo hidrológico), es así que describir el comportamiento del ciclo hidrológico mediante una sola distribución, conllevaría a la sobreestimación en periodos de estiaje y a una subestimación en periodos de avenida dada la marcada estacionalidad del recurso hídrico.

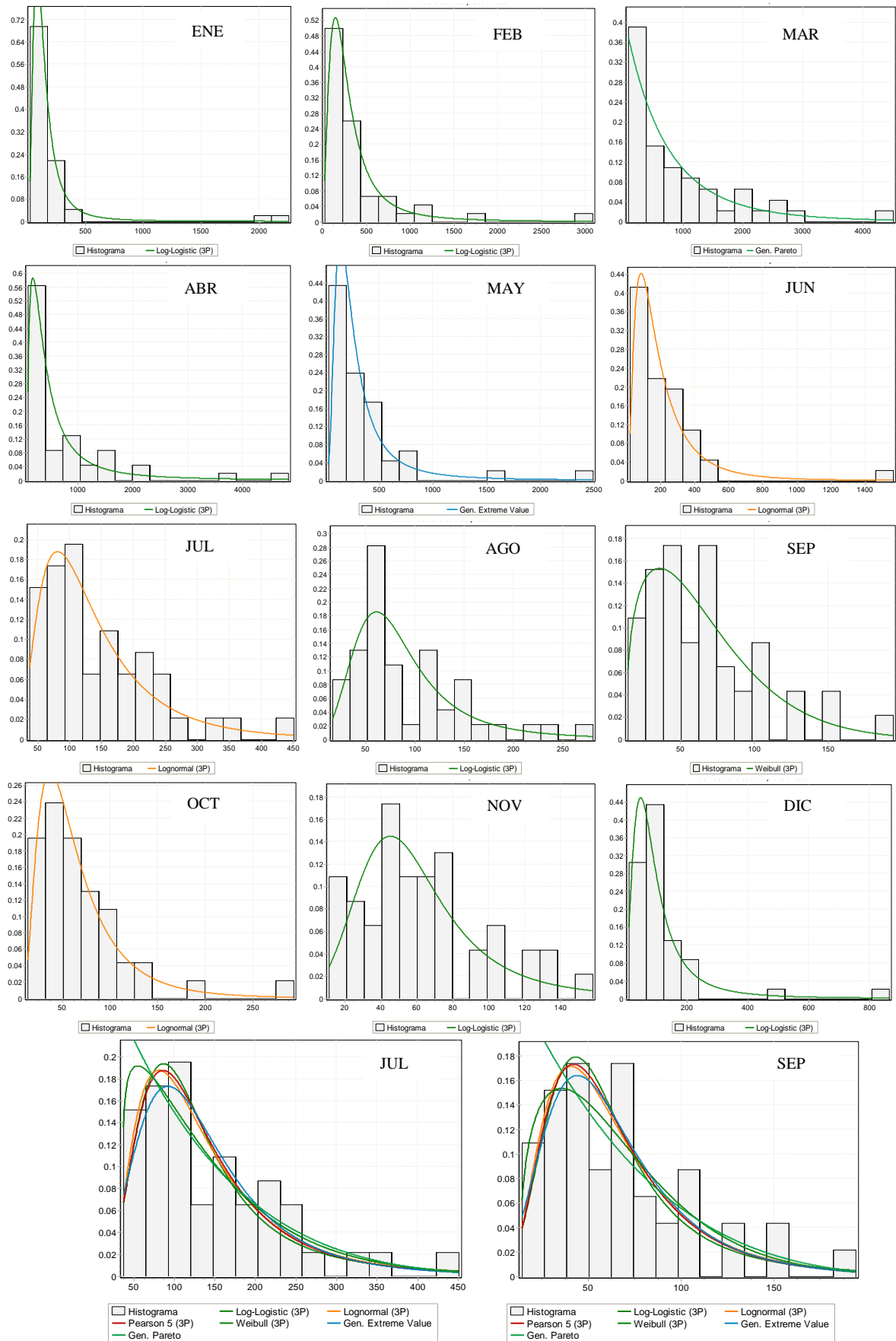
En la estación EH-01(El Tigre), la distribución con mayor recurrencia al momento de representar los datos observados, es la distribución de Valor Extremo Generalizado (GEV), con una representación en cinco (5) meses (Feb, Ago, Sep, Nov y Dic), la segunda distribución que mejor representa el comportamiento hídrico en la estación EH-01(El Tigre) es la distribución Logistic Generalizada (GLO), que representa tres (3) meses (May, Jun, Jul), la tercera distribución con mayor representatividad es General de Pareto (GPA), con una representación en dos (2) meses (Mar y Oct) y por último las distribuciones con un mes de representación cada una en la serie historia del caudal mensual interanual es Log-normal (LN3) en el mes de Abril y Pearson Tipo III (PE3) en el mes de Enero.

Hay 02 meses Septiembre y Octubre donde las seis distribuciones evaluadas (PE3, GPA, WEI, LN3, GEV y GLO) coinciden en representar el comportamiento hídrico en la estación EH-01(El Tigre), estas distribuciones demuestran una amplia flexibilidad para ajustar los datos observados a una curva teórica.

La **Figura 18** representa la serie de caudal mensual interanual en la Estación EH-02(Ardilla), la serie es representada por distintas distribuciones de probabilidad, confirmando así que el comportamiento hídrico en una estación no puede ser representado mediante el uso de una distribución de probabilidad única.



**Figura 17:** Histograma de la serie de caudal mensual y la función de densidad teórica  $f(x)$  que mejor describe el comportamiento hídrico mensual en la estación EH-01(El Tigre).



**Figura 18:** Histograma de la serie de caudal mensual y la función de densidad teórica  $f(x)$  que mejor describe el comportamiento hídrico mensual en la estación EH-02(Ardilla).

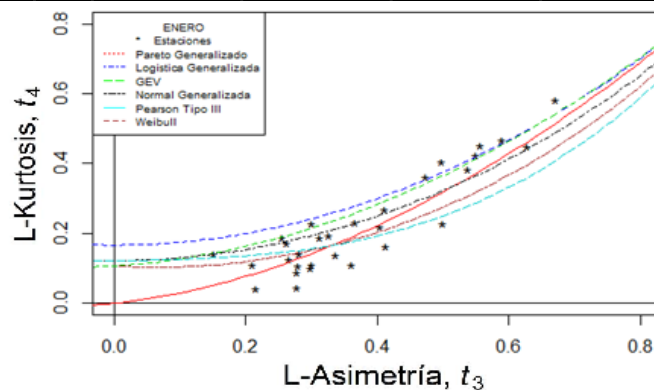


#### 4.2.4 Distancia mínima ortogonal (DMO)

La distribución que presente el mejor ajuste del comportamiento hídrico mensual interanual es seleccionada según la DMO. Los resultados muestran que una serie de caudal mensual interanual es ajustada por varias distribuciones de probabilidad dada la marcada estacionariedad del recurso hídrico entre las épocas de avenida y estiaje.

**Cuadro 29:** Estimación de parámetros del mes de Enero (método de L-momentos).

ENERO							
	Código	n	l_1	t	t_3	t_4	t_5
1	EH-1	46	111.52804	0.48663	0.58947	0.46810	0.39860
2	EH-2	46	234.11217	0.53516	0.67004	0.58427	0.49679
3	EH-3	46	6.06011	0.53415	0.55646	0.45205	0.40396
4	EH-4	46	30.93230	0.35180	0.21000	0.11236	0.04106
5	EH-5	46	6.48017	0.44098	0.49708	0.40537	0.33112
6	EH-6	46	27.03548	0.45934	0.31230	0.18897	0.14969
7	EH-7	46	19.88546	0.52122	0.41101	0.26816	0.21730
8	EH-8	46	9.40491	0.56916	0.40384	0.21885	0.17595
9	EH-9	46	5.00196	0.71398	0.62787	0.44849	0.36961
10	EH-10	46	200.03804	0.27877	0.27914	0.10770	-0.02352
11	EH-11	46	3.48465	0.66709	0.49842	0.22972	0.11789
12	EH-12	46	7.92148	0.59191	0.47317	0.36228	0.33775
13	EH-13	46	62.97652	0.25684	0.26530	0.12777	0.02899
14	EH-14	46	37.87674	0.24414	0.30045	0.22795	0.11896
15	EH-15	46	22.81137	0.33473	0.28165	0.14314	0.11596
16	EH-16	46	37.72500	0.22926	0.26170	0.17335	0.09134
17	EH-17	46	29.92759	0.42702	0.30030	0.11180	-0.00097
18	EH-18	46	94.05261	0.32715	0.21448	0.04395	0.03673
19	EH-19	46	19.90333	0.52530	0.41191	0.16425	0.08196
20	EH-20	46	47.98633	0.41872	0.27747	0.09006	0.06764
21	EH-21	46	14.40274	0.41283	0.25555	0.18809	0.05028
22	EH-22	46	23.00970	0.49673	0.27684	0.04607	-0.00716
23	EH-23	46	69.20793	0.47332	0.33637	0.13926	0.05942
24	EH-24	46	1.69152	0.47218	0.53719	0.38406	0.27837
25	EH-25	46	3.62437	0.54181	0.36046	0.11254	0.02861
26	EH-26	46	1.04593	0.29483	0.29825	0.10163	0.04630



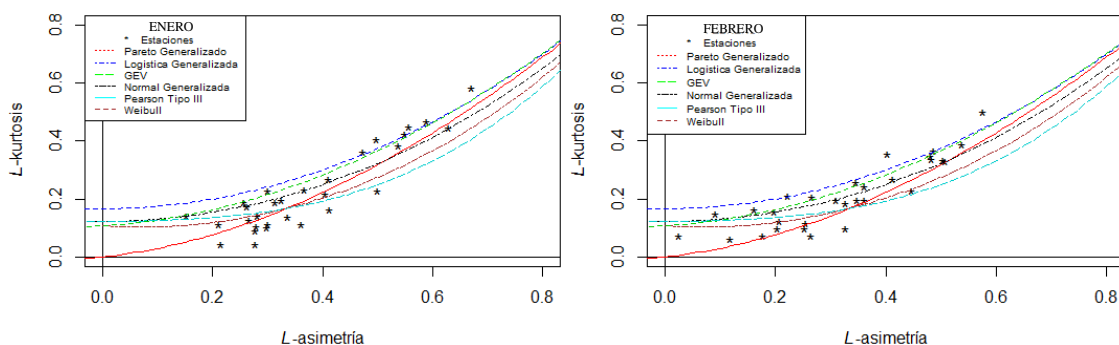
**Figura 19:** Diagrama de L-momentos ratios, los puntos representan la asimetría y la kurtosis del mes de Enero para las 26 estaciones analizadas.

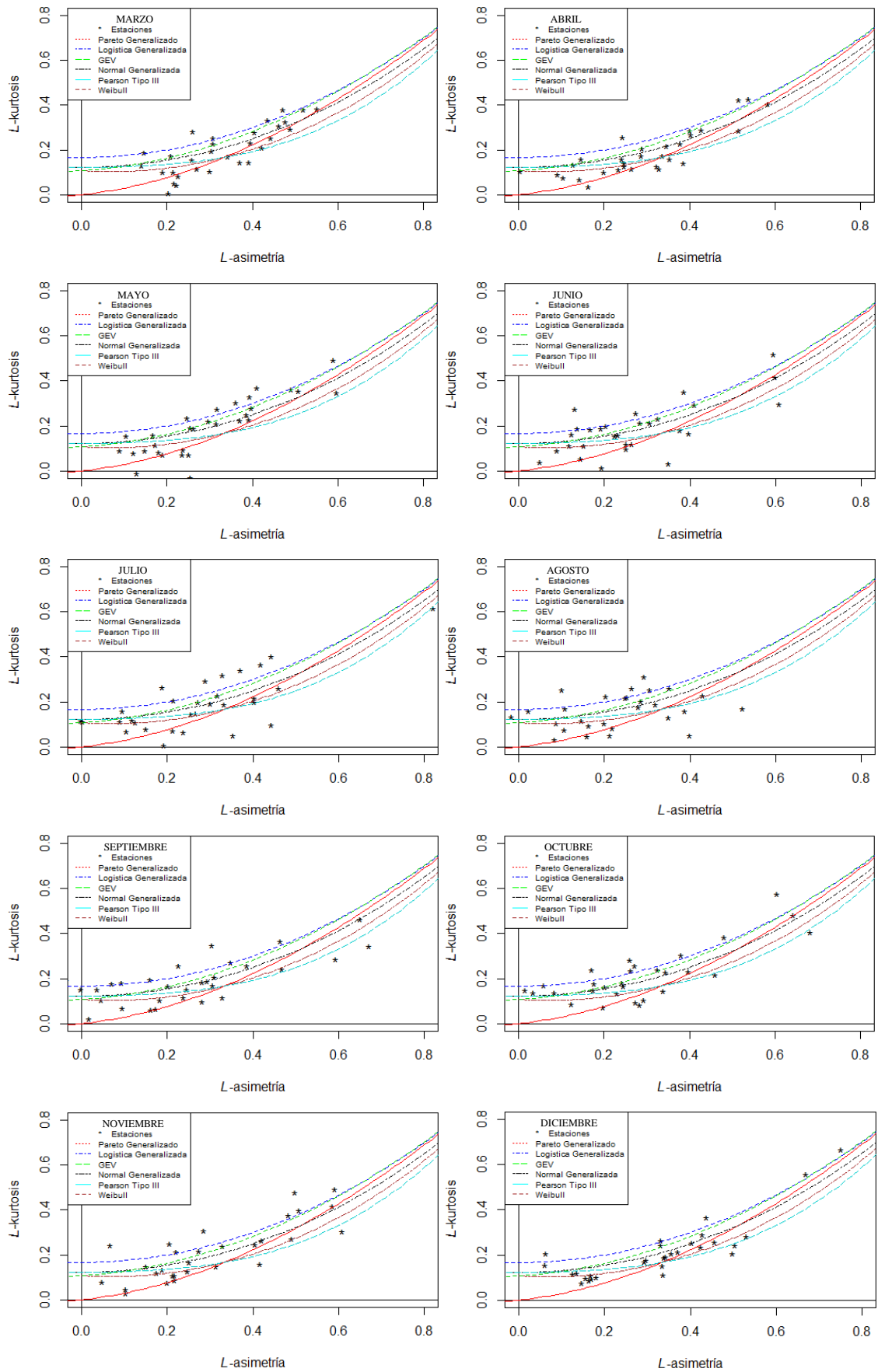
El **Cuadro 29** muestra el resultado de los parámetros del mes de Enero aplicando el método de L-momentos para todas las estaciones analizadas, los parámetros requeridos para el ajuste mediante el método de Distancia mínima ortogonal son:  $\tau_3$  que representa la asimetría y  $\tau_4$  que representa la Kurtosis del mes de Enero.

La **Figura 19** muestra el diagrama de L-momentos ratios de la serie de caudales para el mes de Enero, este resultado gráfico nos permite realizar una evaluación visual del comportamiento hídrico de las 26 estaciones analizadas del mes de Enero, la kurtosis (concentración de datos) muestra los datos dispersos, mientras que la asimetría muestra un comportamiento positivo (cola a la derecha), que es propio de eventos extremos (sequías), los asteriscos (\*) representan la estadística de cada estación analizada.

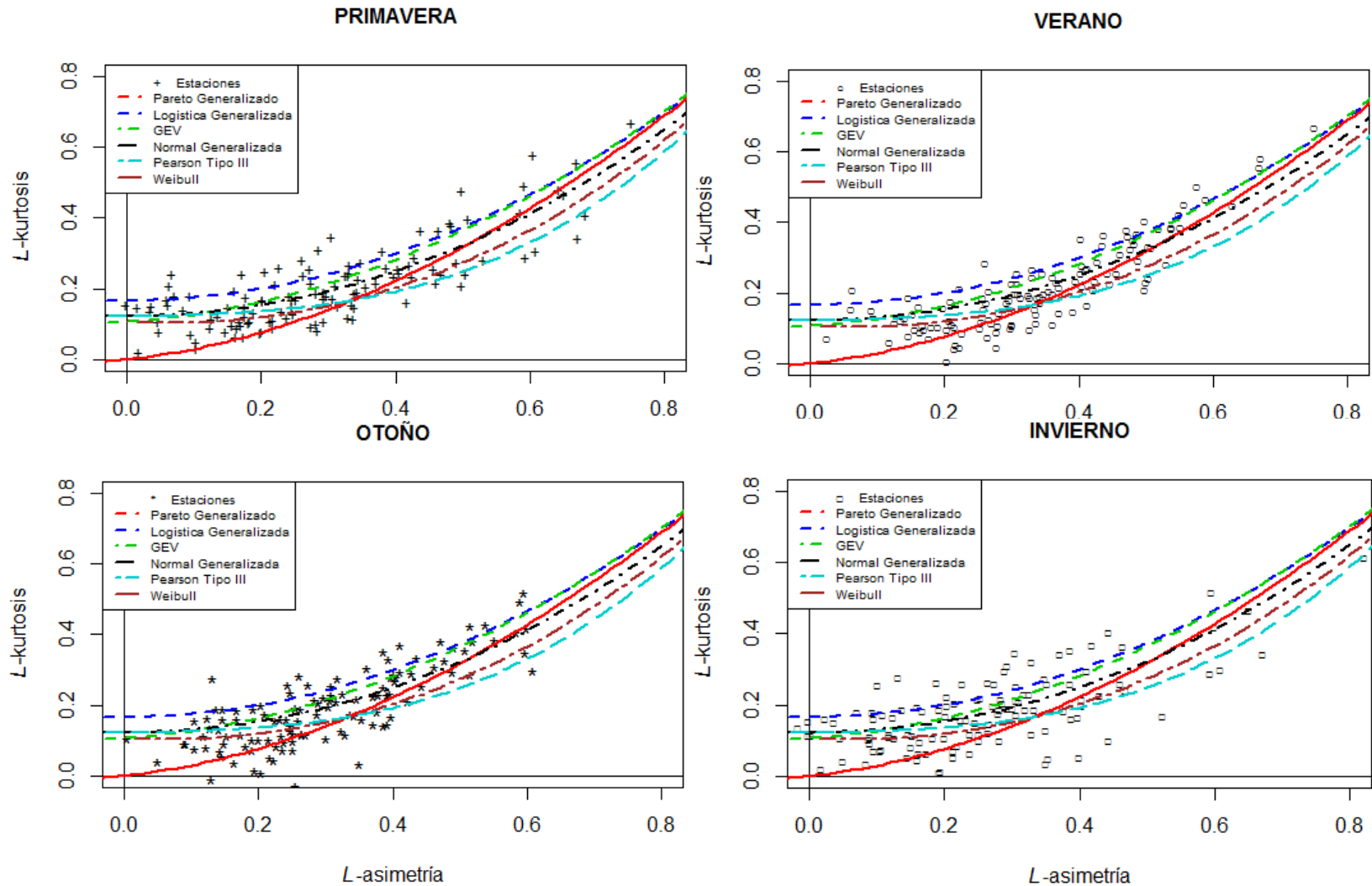
El resultado del mes de Enero muestra que no hay un patrón claro en relación a la distribución que presente el mejor ajuste a la serie de caudales (datos dispersos), lo que sugiere que la selección de una distribución de probabilidad única que describa el comportamiento hídrico de todas las estaciones analizadas para el mes de Enero sea imposible mediante una inspección visual del diagrama de L-momentos ratios.

La **Figura 20** muestra los resultados del diagrama de L-momentos ratios para las 26 estaciones analizadas, se visualiza el comportamiento de los datos de cada estación a un nivel mensual, la kurtosis o grado de concentración de los datos y la asimetría, muestran que los datos analizados no siguen una determinada distribución de probabilidad para cada mes del año. Por ejemplo sería erróneo afirmar que el comportamiento de todas las estaciones analizadas para el mes de Enero se ajusten a una determinada distribución de probabilidad, pero si podemos afirmar que en el mes de Enero cada estación se ajuste a una distribución de probabilidad diferente.





**Figura 20:** Diagrama de L-momentos ratios, las líneas representan a las distribuciones y los puntos representan la estadística del caudal mensual de las 26 estaciones analizadas.



**Figura 21:** Diagrama estacional de L-momentos ratios, las líneas representan las distribuciones teóricas de 3 parámetros, los puntos representan la estadística del caudal estacional de las 26 estaciones analizadas.

En la **Figura 21** muestra los resultados del diagrama de L-momentos ratios de las 26 estaciones analizadas a un paso de tiempo estacional (Primavera, verano, otoño e Invierno), los símbolos representan la estadística de la asimetría y la kurtosis para cada estación hidrométrica, los diagramas de caudal estacional no muestran un patrón claro de la distribución que mejor representa el comportamiento hídrico para cada estación analizada.

El **Cuadro 30** muestra el resultado de las distribuciones de probabilidad que mejor ajuste presentaron a los datos observados del mes de Enero, la prueba Distancia Mínima Ortogonal (DMO) evalúa la mínima distancia entre la muestra de L-momentos en el sitio (i) y la los L-momentos teóricos, seleccionando la DP que describe la mayor información observada.

La distribución seleccionada es aquella que se encuentra próxima a la muestra para cada serie mensual interanual, es así que para cada estación evaluada, una distribución de probabilidad mensual interanual es seleccionada.

El **Cuadro 30**, muestra el resultado de las distribuciones con la mínima distancia ortogonal entre la muestra de L-momentos en el sitio (i) y los L-momentos teóricos (DP) para cada estación evaluada durante el mes de Enero.

**Cuadro 30:** Distancia mínima ortogonal para el mes de Enero.

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - ENERO								
Código	Dist. Min	Distribución	Código	Dist. Min	Distribución	Código	Dist. Min	Distribución
EH-1	0.0118715	GLO	EH-10	0.0192970	GPA	EH-19	0.0341828	PE3
EH-2	0.0432638	GEV	EH-11	0.0185481	PE3	EH-20	0.0357761	GPA
EH-3	0.0273385	GLO	EH-12	0.0090361	GLO	EH-21	0.0015393	GEV
EH-4	0.0094279	WEI	EH-13	0.0102210	GPA	EH-22	0.0793318	GPA
EH-5	0.0327921	GLO	EH-14	0.0128763	GEV	EH-23	0.0286823	PE3
EH-6	0.0105051	LN3	EH-15	0.0015531	WEI	EH-24	0.0164962	GEV
EH-7	0.0114474	LN3	EH-16	0.0030955	LN3	EH-25	0.0639632	PE3
EH-8	0.0069951	GPA	EH-17	0.0302398	GPA	EH-26	0.0389173	GPA
EH-9	0.0066081	LN3	EH-18	0.0415950	GPA			

Dónde: *GEV = Valor Extremo Generalizado*  
*LN3 = Log-normal*  
*PE3 = Pearson Tipo III*

*GLO = Logistic Generalizado*  
*GPA = General de Pareto*  
*WEI = Weibull*

Los **Cuadros 31 y 32** muestran los resultados de las distribuciones de probabilidad que mejor se ajusten a los datos observados para los meses de Febrero y Marzo aplicando la prueba de Distancia Mínima Ortogonal (DMO) entre la muestra de L-momentos en el sitio (i) y la relación de L-momentos teóricos para cada estación hidrométrica analizada.

**Cuadro 31:** Distancia mínima ortogonal para el mes de Febrero.

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - FEBRERO								
Código	Dist. Min	Distribución	Código	Dist. Min	Distribución	Código	Dist. Min	Distribución
EH-1	0.0093774	GLO	EH-10	0.0020341	WEI	EH-19	0.0022501	GEV
EH-2	0.0134705	GEV	EH-11	0.0013443	LN3	EH-20	0.0041052	GLO
EH-3	0.0593603	GLO	EH-12	0.0095812	GEV	EH-21	0.0076675	GPA
EH-4	0.0247493	GPA	EH-13	0.0040315	GEV	EH-22	0.0199570	LN3
EH-5	0.0039073	GLO	EH-14	0.0182853	GPA	EH-23	0.0083284	GPA
EH-6	0.0195295	LN3	EH-15	0.0213304	LN3	EH-24	0.0006114	LN3
EH-7	0.0111851	GEV	EH-16	0.0318466	WEI	EH-25	0.0428732	GPA
EH-8	0.0078751	LN3	EH-17	0.0113623	GEV	EH-26	0.0082706	GPA
EH-9	0.0062416	WEI	EH-18	0.0159646	GEV			

**Cuadro 32:** Distancia mínima ortogonal para el mes de Marzo..

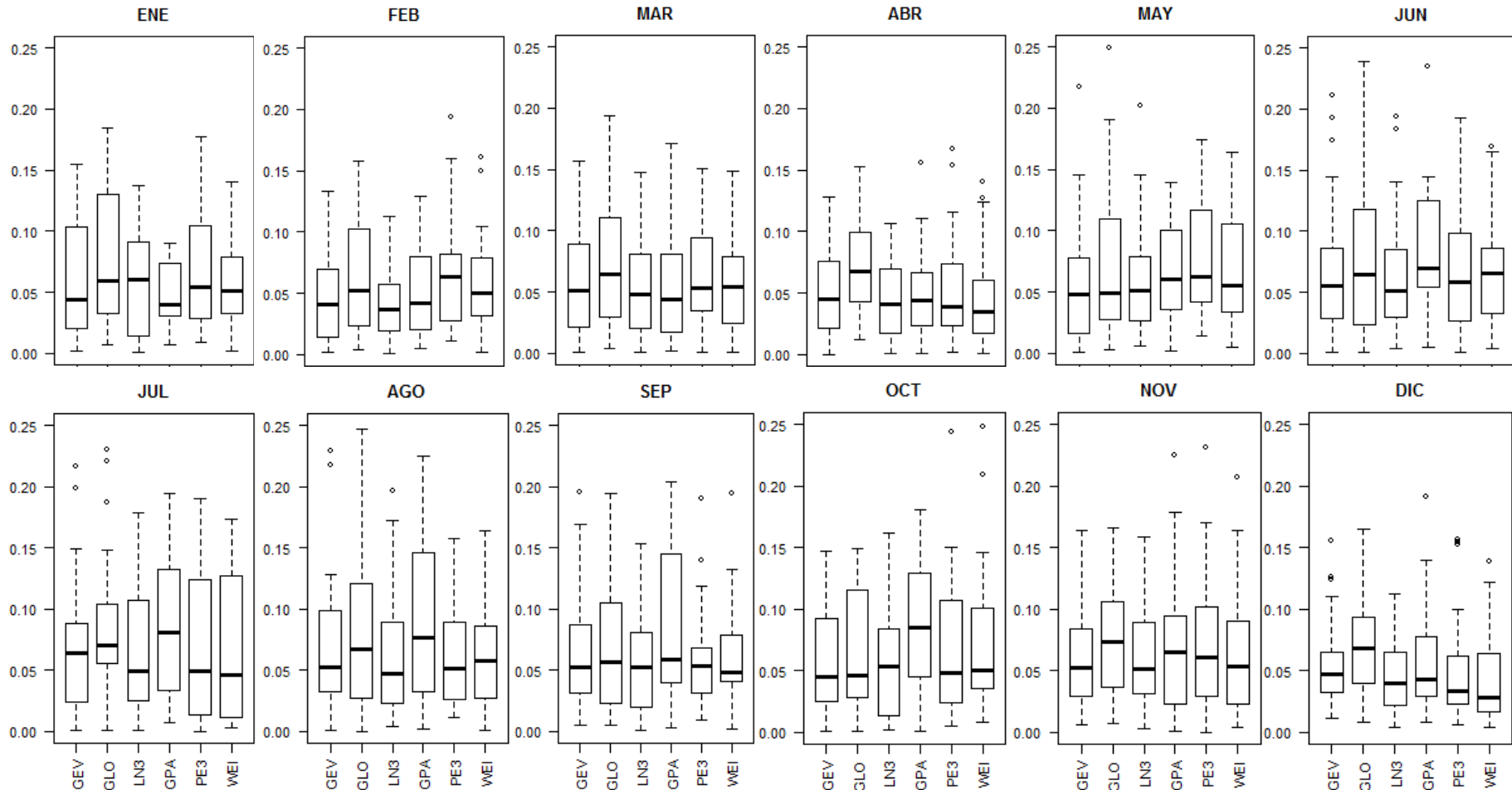
DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - MARZO								
Código	Dist. Min	Distribución	Código	Dist. Min	Distribución	Código	Dist. Min	Distribución
EH-1	0.0038799	GPA	EH-10	0.0131816	WEI	EH-19	0.0181296	LN3
EH-2	0.0429787	PE3	EH-11	0.0117371	GPA	EH-20	0.0623253	GLO
EH-3	0.0142456	GPA	EH-12	0.0012368	LN3	EH-21	0.0103185	GEV
EH-4	0.0720837	GPA	EH-13	0.0011711	PE3	EH-22	0.0441770	GPA
EH-5	0.0184951	GEV	EH-14	0.0060652	GPA	EH-23	0.0346275	GPA
EH-6	0.0175986	GPA	EH-15	0.0095017	GLO	EH-24	0.0130990	LN3
EH-7	0.0070220	GEV	EH-16	0.0037003	GLO	EH-25	0.0348582	PE3
EH-8	0.0113412	GLO	EH-17	0.0101265	PE3	EH-26	0.0064280	GPA
EH-9	0.0010449	GEV	EH-18	0.0085149	GEV			

En el **Anexo VIII** se muestra el resultado de la prueba Distancia Mínima Ortogonal de los meses de Enero a Diciembre para todas las estaciones hidrométricas analizadas.

La **Figura 22** muestra la gráfica de Boxplot de la serie de caudal mensual de las 26 estaciones analizadas en la Vertiente peruana del Pacífico (VP), la distancia mínima ortogonal (DMO) entre la muestra de L-momentos en el sitio (i) y la relación de L-momentos teóricos para cada una de las seis distribuciones, muestra que en la estación de verano (Dic, Ene, Feb, Mar), los ríos localizados en la VP aumenta su caudal y la DMO, tiende a aproximar a su valor mínimo, en comparación con los meses de invierno (Jun, Jul, Ago, Sep) que son meses de estiaje y donde la DMO tiende a aumentar sus valores.

De un análisis mensual, se observa la alta variabilidad de las distribuciones para representar los valores mínimos según la prueba de DMO, la gráfica de Bxplot, muestra la concentración de los valores mínimos de cada distribución (media), la distribución que represente el comportamiento hídrico mensual, será aquella que tenga el mínimo valor entre todas las distribuciones analizadas para cada mes del año.

### DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL



**Figura 22:** Gráfica de cajas. Distancia Mínima Ortogonal (DMO) entre la muestra de L-momentos en el sitio (i) y la relación de L-momentos teóricos. Evalúa la distancia mínima ortogonal de las 26 estaciones hidrométricas a cada una de las distribuciones teóricas evaluadas.

El **Cuadro 33** muestra el resultado de las distribuciones de probabilidad (DP) que presentaron el mejor ajuste mensual a cada una de las 26 estaciones analizadas, las DP seleccionadas fueron evaluadas por el método de la Distancia Mínima Ortogonal (DMO), estas describen el comportamiento hídrico mensual interanual de cada estación analizada.

Del Cuadro 33, se observa que el caudal mensual de la EH-01 (El tigre) es representado por varias DP dado la marcada estacionariedad del recurso hídrico, confirmando que la oferta hídrica es descrita por varias DP.

Las DP seleccionadas, no presentan un patrón homogéneo del comportamiento hídrico mensual interanual, esto es explicado por el proceso antrópico, las cuencas analizadas presentan desnaturalización del caudal, dado que no existe una relación incluso entre estaciones vecinas

**Cuadro 33:** Distribución de probabilidad que presentó el mejor ajuste mensual

CÓDIGO ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A) DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL (DMO)												
EH - 1	GLO	GLO	GPA	GPA	GLO	GLO	GLO	WEI	WEI	GPA	GLO	GEV
EH - 2	GEV	GEV	PE3	WEI	GEV	GEV	PE3	LN3	PE3	GEV	PE3	GLO
EH - 3	GLO	GLO	GPA	GLO	GLO	GPA	GPA	GPA	GPA	GPA	WEI	WEI
EH - 4	WEI	GPA	GPA	GPA	GEV	GLO	GLO	GEV	LN3	GPA	GPA	GPA
EH - 5	GLO	GLO	GEV	LN3	GLO	GLO	GEV	GLO	LN3	LN3	WEI	WEI
EH - 6	LN3	LN3	GPA	GPA	GEV	GEV	LN3	WEI	GEV	GPA	GPA	PE3
EH - 7	LN3	GEV	GEV	GEV	GLO	LN3	WEI	GPA	GPA	PE3	GLO	GPA
EH - 8	GPA	LN3	GLO	GPA	GEV	PE3	WEI	PE3	LN3	PE3	GPA	GPA
EH - 9	LN3	WEI	GEV	GPA	LN3	PE3	GPA	WEI	WEI	PE3	PE3	PE3
EH - 10	GPA	WEI	WEI	GLO	GEV	GLO	PE3	GLO	GLO	LN3	WEI	WEI
EH - 11	PE3	LN3	GPA	GPA	WEI	GPA	GPA	PE3	GPA	GPA	GPA	PE3
EH - 12	GLO	GEV	LN3	PE3	GPA	PE3	PE3	PE3	PE3	PE3	PE3	PE3
EH - 13	GPA	GEV	PE3	LN3	WEI	WEI	PE3	WEI	GLO	LN3	GPA	LN3
EH - 14	GEV	GPA	GPA	WEI	GPA	GLO	WEI	LN3	GLO	GEV	WEI	WEI
EH - 15	WEI	LN3	GLO	WEI	WEI	WEI	GEV	LN3	WEI	GLO	GEV	GPA
EH - 16	LN3	WEI	GLO	GEV	GLO	WEI	WEI	WEI	WEI	WEI	GPA	PE3
EH - 17	GPA	GEV	PE3	GPA	LN3	GPA	LN3	GLO	LN3	LN3	LN3	LN3
EH - 18	GPA	GEV	GEV	LN3	GPA	GPA	GLO	GLO	GLO	GLO	LN3	PE3
EH - 19	PE3	GEV	LN3	LN3	GPA	GPA	PE3	PE3	GPA	LN3	GEV	GEV
EH - 20	GPA	GLO	GLO	WEI	WEI	GPA	WEI	WEI	GPA	GLO	GLO	LN3
EH - 21	GEV	GPA	GEV	GEV	GPA	PE3	PE3	LN3	PE3	GPA	GEV	GLO
EH - 22	GPA	LN3	GPA	WEI	GPA	GPA	GPA	GPA	GEV	GLO	WEI	PE3
EH - 23	PE3	GPA	GPA	GEV	GPA	GPA	GPA	GPA	PE3	LN3	GLO	GPA
EH - 24	GEV	LN3	LN3	GLO	GLO	GLO	GLO	GLO	GLO	GLO	GLO	GLO
EH - 25	PE3	GPA	PE3	GPA	GEV	LN3	GEV	GLO	GLO	GLO	GLO	LN3
EH - 26	GPA	GPA	GPA	GEV	WEI	GLO	GLO	GLO	GLO	GLO	WEI	WEI

El **Cuadro 34** muestra el resultado cuantitativo de las distribuciones seleccionadas para cada mes según el método de la Distancia Mínima Ortogonal (DMO). El número representa la frecuencia con que ha sido seleccionada una distribución de probabilidad para un determinado mes.



El método de ajuste denominado DMO, mostró que la distribución General de Pareto representa el 25% de las distribuciones seleccionadas, la distribución logistic generalizada representa el segundo mejor ajuste con el 20% de las distribuciones seleccionadas, la distribución Weibull, Log-normal, Valor extremo generalizado y Pearson tipo III representan el 15%, 14%, 13% y 13% de las distribuciones seleccionadas.

**Cuadro 34:** Cuantificación de la distribución que presentó el mejor ajuste mensual

DISTRIBUCIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	ANUAL (%)
	A) DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL (DMO)													
GEV	4	7	5	5	6	2	3	1	2	2	3	2	42	13
GLO	4	4	4	3	6	7	5	7	7	7	6	3	63	20
LN3	4	6	3	4	2	2	2	4	4	6	2	4	43	14
GPA	8	6	9	8	7	8	5	4	5	6	6	5	77	25
PE3	4	0	4	1	0	4	6	4	4	4	3	7	41	13
WEI	2	3	1	5	5	3	5	6	4	1	6	5	46	15

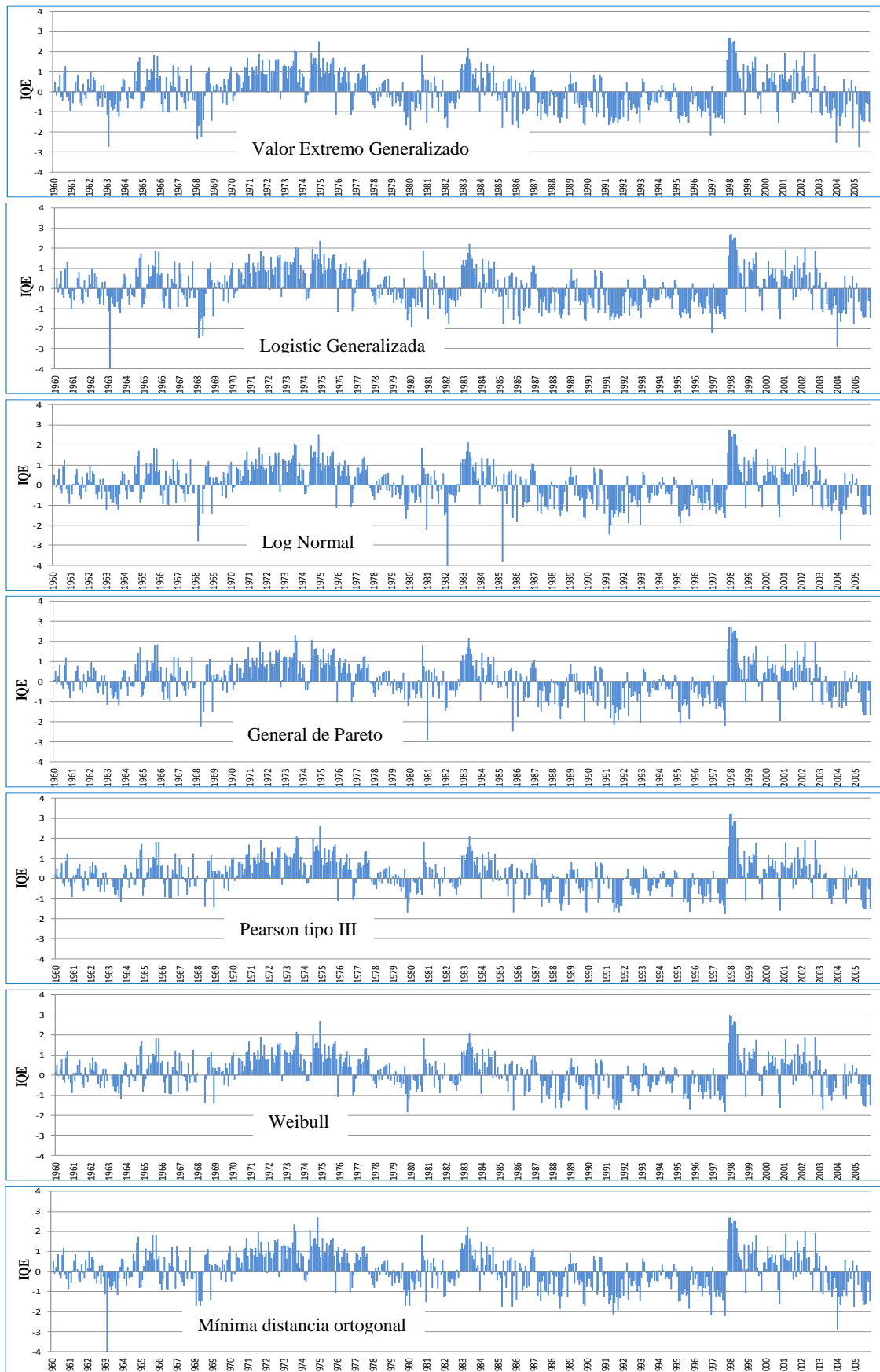
#### 4.2.5 Cálculo de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE)

El cálculo de un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE), se obtuvo transformando la probabilidad de excedencia ( $P(X \geq x)$ ) a una variable estandarizada aplicando el método de aproximaciones polinómicas (ecuación 2.1 al 2.3) propuesta por: Abramowitz & Stugun (1965), el resultado obtenido fue la evolución temporal de un IQE para cada una de las seis distribuciones analizadas (GEV, LN3, GLO, PE3, WEI, GPA).

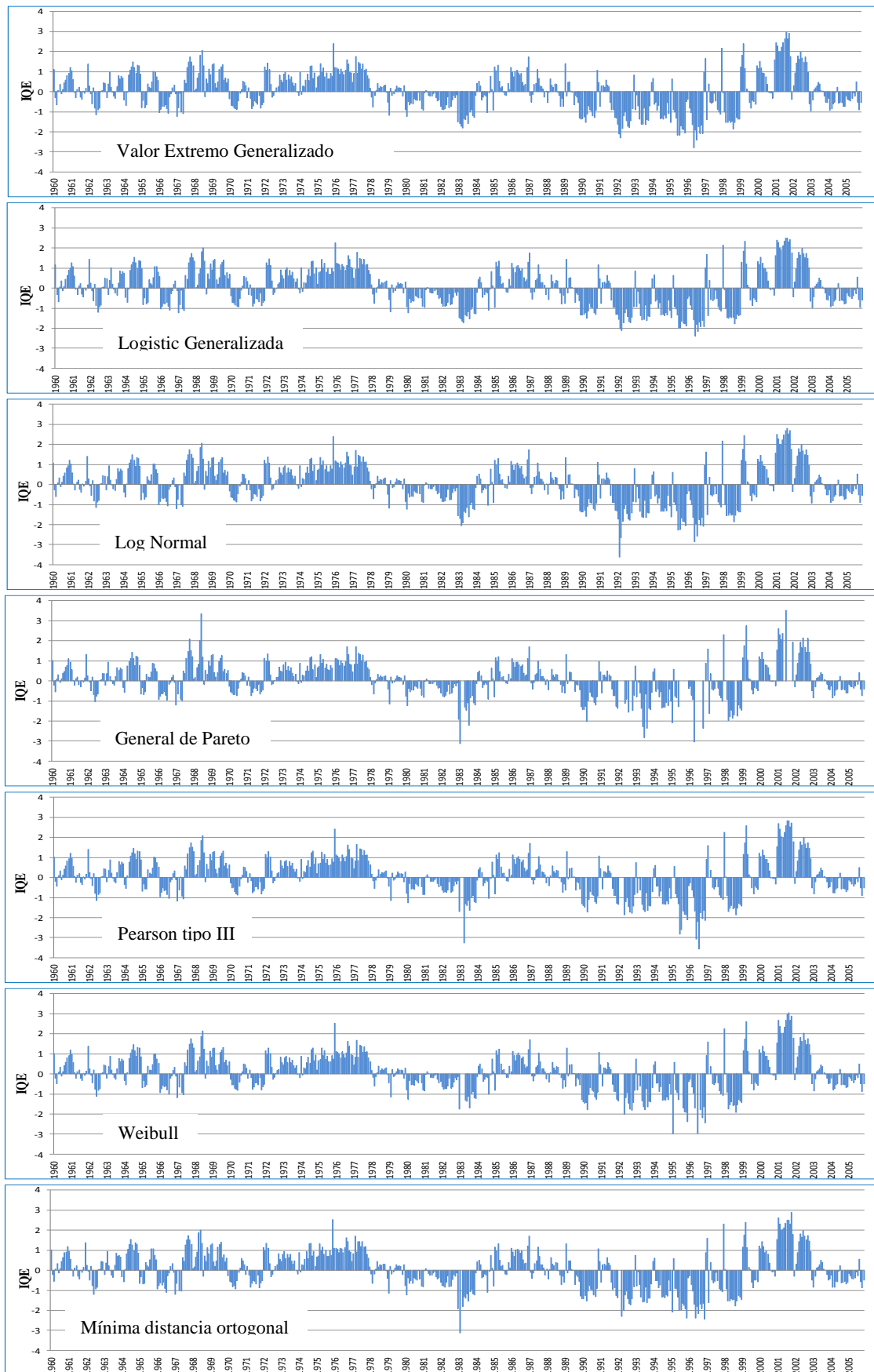
El método de ajuste denominado DMO, calcula un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) a partir de la distribución que presentó el mejor ajuste a cada serie de caudal mensual interanual cuyo resultado muestra la evolución temporal de un Índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) para cada una de las estaciones hidrométricas analizadas.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 23 y 24

La elección de una distribución de probabilidad para el cálculo de un IQE, debe cumplir los valores estadísticamente esperados de toda variable estandarizada, el cual debe tener una media de cero y una desviación estándar de uno (media = 0 y desvest = 1).



**Figura 23:** Evolución temporal del Índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), usando las seis distribuciones seleccionadas y el método de ajuste denominado DMO en la Estación EH-03(Puchaca) localizado en el departamento de Lambayeque



**Figura 24:** Evolución temporal del Índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), usando las seis distribuciones seleccionadas y el método de ajuste denominado DMO en la Estación EH-26(Aguas calientes) localizado en el departamento de Tacna

La **Figura 23 y 24** muestran la evolución temporal de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) en dos estaciones con características muy diferentes.

Los caudales mensuales del río La Leche en la estación EH-03(Puchaca), departamento de Lambayeque, poseen un caudal medio anual multianual de 6.12 m<sup>3</sup>/s, el periodo de avenida (diciembre-abril) presenta un caudal medio estacional de 11.42 m<sup>3</sup>/s, mientras que los periodos de estiaje (mayo-noviembre) poseen un caudal medio estacional de 2.35m<sup>3</sup>/s. en comparación con los caudales mensuales registrados en la estación EH-26(Aguas calientes), localizados en la cuenca Caplina, en el departamento de Tacna, el cual posee un caudal medio anual multianual de 0.81 m<sup>3</sup>/s, los meses correspondientes a los periodos de avenidas (diciembre-abril) poseen un caudal medio estacional de 2.25m<sup>3</sup>/s, y los meses de estiaje (mayo-noviembre) poseen un caudal medio estacional de 0.42m<sup>3</sup>/s. Se puede notar claramente la diferencia del comportamiento hídrico en ambas estaciones.

Un resultado visual realizado a la serie del IQE, correspondiente a cada una de las seis distribuciones analizadas y al IQE que presentó el mejor ajuste mensual (DMO), ellos muestran de forma independiente los principales eventos secos y húmedos ocurridos en la estación EH-03(Puchaca) y la EH-26(Aguas calientes).

En la estación EH-03(Puchaca) los principales eventos de sequía registrados, se han producido entre los años de 1985-1997, siendo estos eventos recurrentes entre los años de 2003-2005, el año 2005 se consideró como fin del periodo evaluado.

Los eventos de sequía más importantes que se han producido en la estación EH-26(Aguas calientes), han ocurridos entre los años de 1989-1998 y 2003-2005, estos IQE tienen una similitud entre todas las distribuciones analizadas incluido el método de ajuste denominado DMO para representar los principales periodos húmedos y secos producidos en la Vertiente peruana del Pacífico.

Sobre la base de una inspección visual, es muy difícil de distinguir que distribución es la que representa mejor el comportamiento hídrico en ambas estaciones, pero algunas características, son comunes entre las distribuciones analizadas, estas son:

- La distribución Pearson tipo III tiende a subestimar la intensidad y la magnitud de los eventos secos durante los periodos de avenida (Dic-Abr), minimizando algunas lecturas de sequías hasta el punto de no poder visualizar.

- La distribución de general de Pareto tiende a generar valores altos de sequía en épocas donde en el resto de distribuciones no presenta, la distribución Weibull tienen a generar valores erróneos en la intensidad en épocas de avenida (Dic-Abr), estos valores son subestimados en comparación con el resto de distribuciones, estas dos distribuciones (General de Pareto y Weibull) no muestran solución para algunos bajos valores de caudales debido a la forma de la función de densidad, esto explica porque algunos meses los registros tienen a cero.

El índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) obtenido a partir de las distribuciones Log-normal, Valor Extremo Generalizado y Logistic Generalizada, mostraron características similares de la intensidad de los valores extremos (eventos húmedos y secos), es por este motivo la dificultad de seleccionar una única distribución que caracterice la sequía hidrológica ocurridas en la Vertiente peruana del Pacífico.

El método de la DMO muestra un IQE formadas por varias DP que mejor describen la serie mensual interanual dada la marcada estacionalidad del recurso hídrico, los periodos de avenida y estiaje son ajustadas por diferentes distribuciones de probabilidad para cada series analizadas.

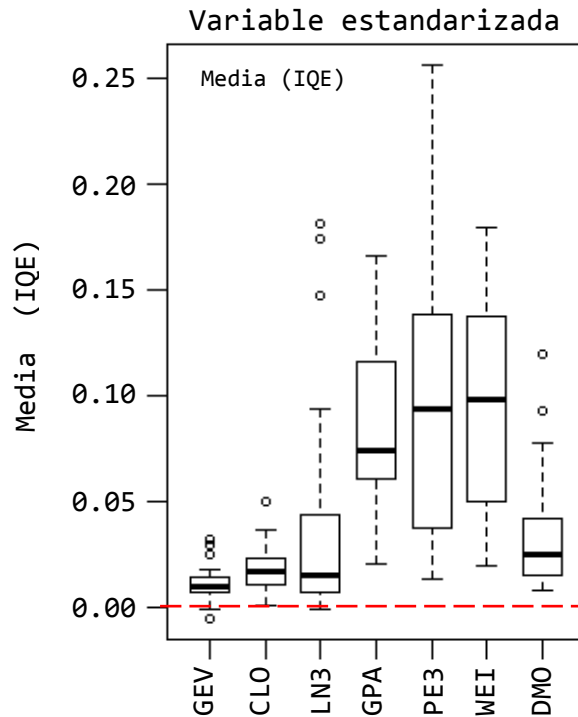
La selección visual de un IQE es erróneo de por sí, por lo que se aplica una prueba basada en la estandarización, esta prueba selecciona la distribución que cumpla los valores estadísticamente esperados de toda variable estandarizada (media = 0 y desvest = 1).

#### **4.2.6 Elección de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE)**

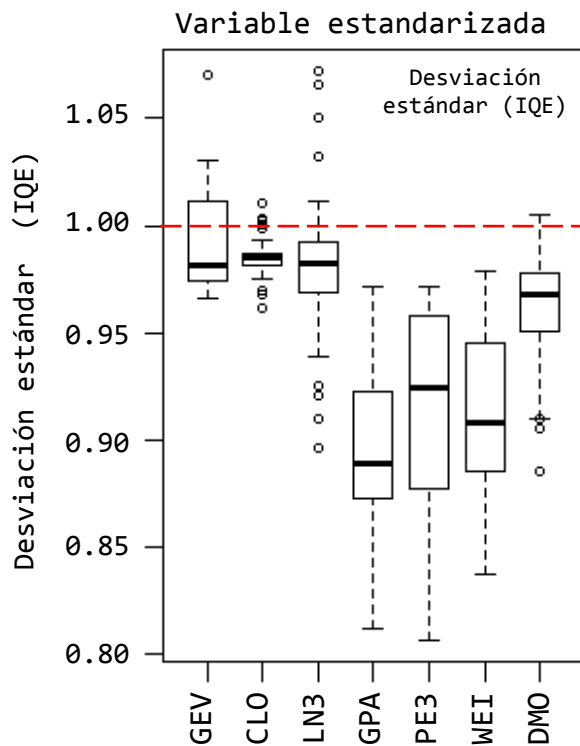
La elección de un IQE que caracterice los eventos de sequía hidrológica, se obtuvo evaluando las características estadísticas de toda variable estandarizada, debido a que el IQE es una variable estandarizada, se espera que la media a lo largo del periodo analizado sea igual a 0 y la desviación estándar sea igual a 1.

La elección de un Índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) que presente los valores estadísticamente esperados de toda variable estandarizada (media = 0 y desvest =1), permitirá caracterizar espacial y temporalmente las sequías hidrológicas producidas en la Vertiente peruana del Pacífico.

Las siguientes figuras muestran la evaluación de los valores estadísticamente esperados del IQE formado por seis DP y el método de ajuste DMO



**Figura 25:** Valor medio del IQE de las seis distribuciones y el método de ajuste DMO evaluados para las 26 estaciones hidrométricas localizadas en la Vertiente peruana del Pacífico.



**Figura 26:** Valor medio de la desviación estándar del IQE de las seis distribuciones analizadas y el método de ajuste DMO evaluados para las 26 estaciones hidrométricas localizadas en la Vertiente peruana del Pacífico.

La **Figura 25** muestra el resultado gráfico (diagrama de Boxplot) de la **media** del Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) obtenida a partir de las seis distribuciones analizadas y el método de ajuste Distancia Mínima Ortogonal (DMO), sobre la base de las propiedades estadísticamente esperadas de toda variable estandarizada, se espera que la **media sea igual a cero** (línea entre cortada roja).

Los índices IQE provenientes de cada distribución evaluada, mostraron deficiencias en el cálculo del valor estadísticamente esperado (media = 0), como se puede observar la media de los valores del IQE de todas las distribución son positivas, las distribuciones que poseen una media alejadas del valor esperado son: (Weibull, General de Pareto y Pearson tipo III), mientras que los valores promedios del IQE cuyos datos son cercanos a cero (valor estadísticamente esperado) pertenecen a las distribuciones de: (Valor extremo Generalizado, Logistic Generalizado y Log Normal).

El índice IQE formado por las distribuciones que mejor ajuste presentaron (método de la DMO) a la serie de caudal mensual, proporcionaron valores cercanos a cero (valores estadísticamente esperados), este método DMO garantiza la fiabilidad de un Índice IQE que caracterice la sequías hidrológica mediante la aplicación de diferentes distribuciones (DP) para la serie de caudal mensual interanual, dada la marcada estacionalidad del recurso hídrico.

La **Figura 26** muestra el diagrama de Bpxplot de la desviación estándar del Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) obtenida a partir de las seis distribuciones analizadas y el método de ajuste Distancia Mínima Ortogonal (DMO), sobre la base de las propiedades estadísticamente esperadas de toda variable estandarizada, se espera que la **desviación estándar sea igual a uno** (línea entre cortada roja).

Los índices IQE provenientes de cada distribución evaluada, mostraron deficiencias en el cálculo del valor estadísticamente esperado (Desviación estándar =1), se puede observar que la media de la desviación estándar de los valores del IQE de todas las distribución son positivas, las distribuciones menos recomendadas por tener una valor de promedio de la desviación estándar alejadas del valor estadísticamente esperado son: (Weibull, General de Pareto y Pearson tipo III), mientras que los valores promedios del IQE cuyos datos son cercanos a uno (valor estadísticamente esperado) pertenecen a las distribuciones de: (Valor extremo Generalizado, Logistic Generalizado y Log Normal).

El índice IQE formado por las distribuciones que mejor ajuste presentaron (método de la DMO) a la serie de caudal mensual, proporcionaron valores cercanos a uno, este método garantiza la fiabilidad de un Índice IQE que caracterice la sequía hidrológica mediante la aplicación de diferentes distribuciones (DP) para la serie de caudal mensual interanual.

Del resultado mostrado en la **Figura 25 y 26**, la selección de un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) que caracterice los eventos de sequía hidrológica ocurridos en la Vertiente peruana del Pacífico, se evaluó los valores estadísticamente esperados de toda variable estandarizada, estos valores son: media = 0 y desviación estándar = 1.

Los resultados obtenidos de esta investigación, muestran que el uso de una **distribución de probabilidad** que caracterice los eventos de sequía hidrológica, no proporciona un índice IQE fiable, debido a la marcada estacionalidad del recurso hídrico (épocas de estiaje y avenida) Ver **Figura 17 y 18**.

**Si una distribución de probabilidad** es requerido para caracterizar la sequía hidrológica a través de un índice IQE, los resultados de esta investigación sugieren que las distribuciones (Valor extremo Generalizado, Log Normal y Logistic Generalizado), deben ser seleccionados, sin embargo estas dos primeras distribuciones (Valor extremo Generalizado y Log Normal) tienden a subestimar y sobrestimar los valores estadísticamente esperados de la variable estandarizada (IQE).

Esta investigación recomienda el uso de la **distribución Logistic Generalizado** para caracterizar la sequía hidrológica mediante el uso de **una distribución de probabilidad**, sin embargo el comportamiento hídrico de un río o conjunto de ríos, no puede ser descrito por una sola distribución dada la estacionalidad del recurso hídrico con excesos y déficit en épocas de avenida y estiaje (demostrado en la **Figura 17 y 18**).

El comportamiento hídrico está influenciado por la estacionalidad (primavera, verano, otoño e invierno) de los recursos hídricos, siendo estos comportamientos descritos por diferentes distribuciones de probabilidad para cada serie de caudal mensual interanual registrado en el periodo de un año hidrológico.



El método de ajuste Distancia Mínima Ortogonal (DMO), proporciona mayor flexibilidad al momento de describir el comportamiento hídrico de un río o conjunto de ríos dado que lo conforman **diferentes distribuciones de probabilidad**, este método venció las limitaciones que fueron asociados al uso de una distribución de probabilidad única.

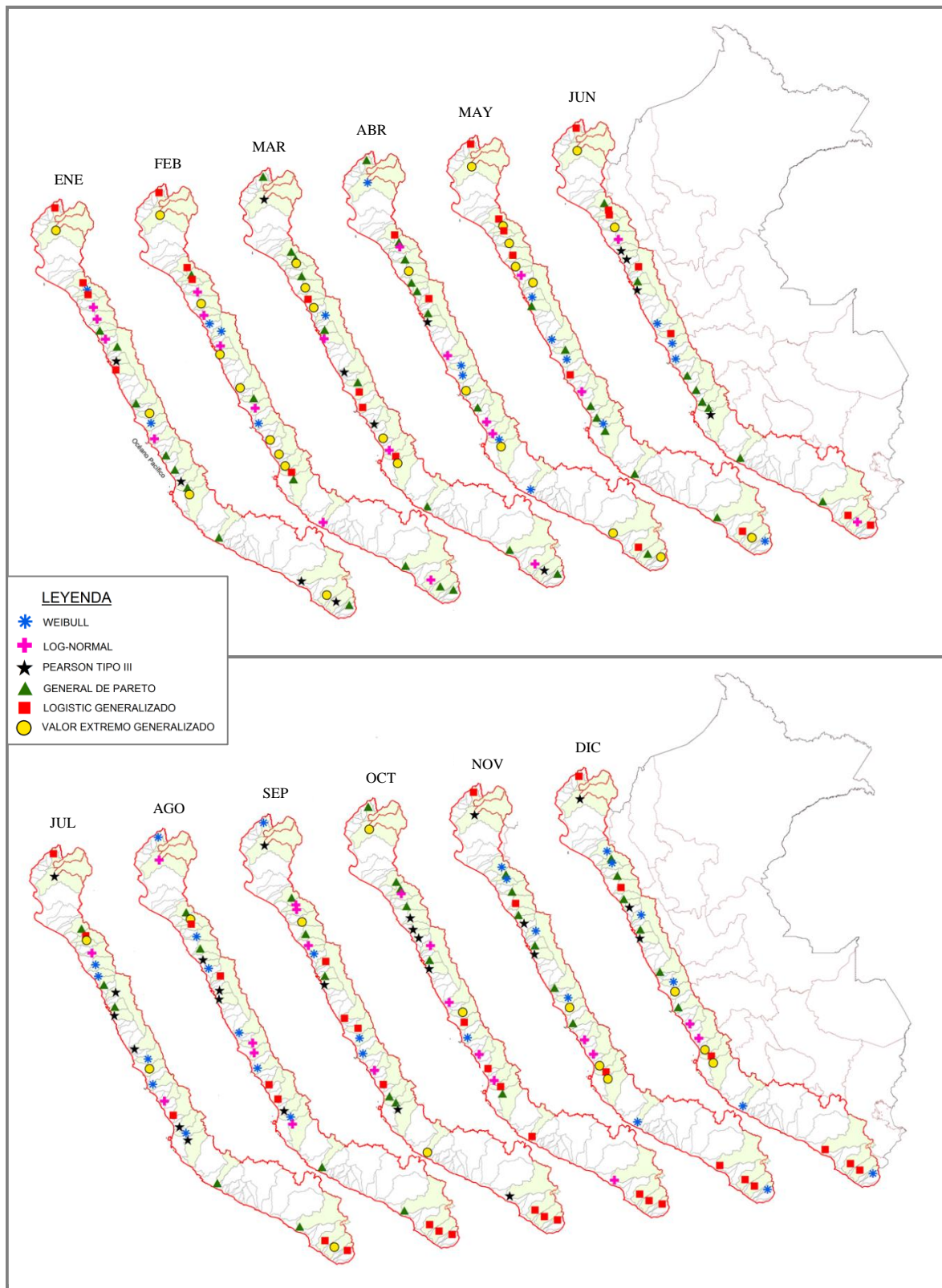
Este método DMO proporciona un robusto Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) permitiendo comparar espacial y temporalmente las condiciones hídricas de una vasta cantidad de ríos con características muy diferentes entre sí.

La **Figura 27** muestra el resultado de las distribuciones de probabilidad que mejor describen el comportamiento hídrico mensual interanual en cada una de las estaciones analizadas, este resultado se obtuvo evaluando el método de ajuste DMO.

Las distribuciones seleccionadas se diferencian una de otras en símbolo y color, ellos describen el comportamiento hídrico mensual mediante diferentes DP para cada una de las estaciones analizadas, esto explica la marcada estacionalidad del recurso hídrico entre las épocas de avenida y estiaje.

Las DP seleccionadas para describir los periodos secos y/o húmedos, no presenta un patrón definido para describir el comportamiento hídrico, incluso entre estaciones vecinas.

Hablar de regionalización de caudales para un análisis mensual es erróneo dado que estas son descritas por diferentes DP, siendo el factor antrópico quien afecta significativamente el normal comportamiento hídrico de un río o conjunto de ríos.



**Figura 27:** Patrón espacial de las distribuciones obtenidas aplicando el método de ajuste denominado Distancia Mínima Ortogonal (DMO), para cada una de las 26 estaciones analizadas (caudal mensual).

### 4.3 Caracterización de la sequía hidrológica en la Vertiente peruana del Pacífico

La caracterización de la sequía hidrológica se obtuvo evaluando la metodología de umbrales o límites que definen el inicio o término de un evento de sequía aplicado a una serie de caudal mensual. Los umbrales son constantes determinadas (percentil 20, sequía moderada y percentil 5, sequía extrema) que ayudan a inferir las principales características de la sequía como son: duración, intensidad (magnitud) y extensión espacial, que diferencia a una sequía de otras.

Los eventos de sequía se determinaron mediante el uso de umbrales invariables en el tiempo y el espacio evaluando un índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), desarrollado mediante el método de ajuste Distancia Mínima Ortogonal (DMO), cuyos resultados son valores comparables en el tiempo y el espacio.

Los umbrales en la presente investigación se fijaron de la siguiente manera:

- Sequía Moderada (percentil 20 o 20% de la probabilidad del IQE)  
Correspondiente a un valor de IQE de -0.84.
- Sequía Extrema (percentil 5 o 5% de la probabilidad del IQE)  
Correspondiente a un valor de IQE de -1.65

La elección de los umbrales es algo subjetivo, esta se realizó siguiendo la recomendación de trabajos recientemente publicados sobre esta temática (Tallaksen et al., 1997; Fleig et al., 2006; Van Loon et al., 2010).

El uso de umbrales permitió la caracterización de los eventos secos en la Vertiente peruana del Pacífico usando los principales parámetros (duración, intensidad y extensión espacial).

#### 4.3.1 Duración

La duración es el tiempo en meses o años consecutivos durante el cual el caudal registrados en las estaciones hidrométricas son inferiores al caudal medio para un mismo período analizado. La caracterización del parámetro duración de la sequía hidrológica se realizó en una gráfica de evolución temporal del Índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), definiendo los umbrales que den inicio y término a un evento de sequía hidrológica.

Las **Figuras 28 al 31** muestran el resultado gráfico de la evolución temporal del índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) localizado en la Vertiente peruana del Pacífico (VP), estas muestran las duraciones de las principales sequías que se han ocurrido a lo largo del

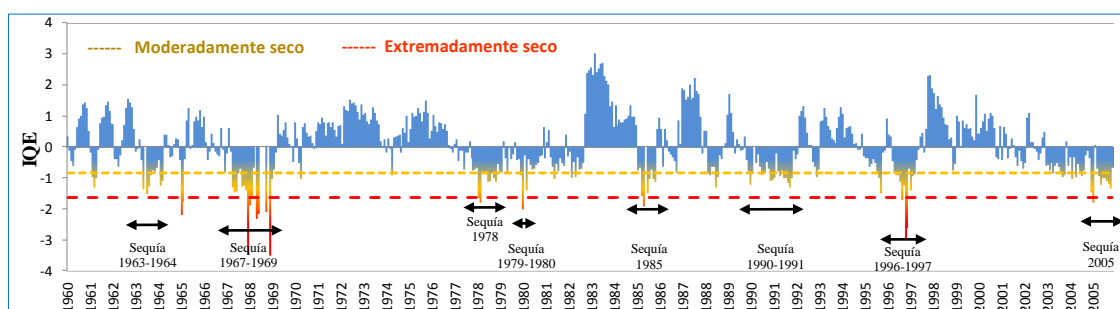
periodo analizado (1960-2005), se visualiza gráficamente el inicio, desarrollo y término de los eventos de sequía hidrológicas ocurridas en cuatro estaciones seleccionadas aleatoriamente.

La línea de color amarillo define el umbral de truncamiento del inicio y término de un evento de sequía moderada, la duración de estas sequías pueden ser meses o años consecutivos, los eventos que sobrepasan este nivel de truncamiento se presentan con mayor recurrencia.

La línea de color rojo define el umbral que da inicio y termino de un evento de sequía extrema, este se produce por un incremento de la intensidad, los impactos que ocasiona este evento puede alterar el normal comportamiento hídrico de un río o conjunto de ríos en una vasta región durante meses o incluso años consecutivos.

La **Figura 28** muestra la evolución temporal del índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), perteneciente a la EH-01(El Tigre), localizada en la zona Norte del Perú, el IQE muestra las duraciones de las principales sequías que han ocurrido en la Und. Hidrográfica del río Tumbes durante el periodo de 1960 al 2005.

Los resultados de la evolución temporal del IQE, muestra que los valores negativos indican déficit del recurso hídrico (sequías), en la última década (1995-2005) se han producido dos sequías importantes como son: la sequía ocurrida en el año de 1996-1997, que se clasificó como sequía extrema, se produjo previo al fenómeno del niño del año 1997-1998, este fenómeno produjo un corte en la evolución temporal de un evento seco, produciendo un evento húmedo en la zona norte, en la Unidad Hidrográfica del río Tumbes, un segundo evento de importancia en esta década se produjo el año 2005, este evento fue clasificado como sequía moderada, la duración de este evento no pudo ser definido por coincidir con el límite del periodo de análisis (1960 al 2005).

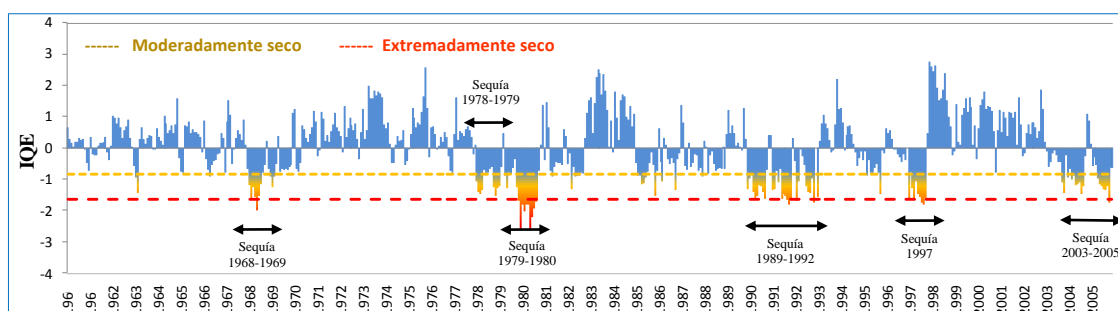


**Figura 28:** Evolución temporal del IQE, caracterización de la duración de los eventos de sequía ocurridos en la EH-01(El Tigre), localizado en la Und. Hidrográfica de Tumbes.

La **Figura 29** muestra la evolución temporal del índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), perteneciente a la EH-07(Salinar Tambo), localizada en el departamento de la Libertad en la zona Norte del Perú, la gráfica de la evolución temporal del IQE muestra las duraciones de las principales sequías que han ocurrido en la Und. Hidrográfica de Chicama entre los años de 1960 a 2005, produciéndose seis sequías de considerable duración.

Los valores del IQE con signo negativo, indican un déficit de caudal (sequías), de un análisis de los valores estandarizados en la última década (1995-2005) se observa que se han producido dos sequías de importante duración, la sequía ocurrida el año de 1997, se clasificó como sequía extrema, se produjo anterior al fenómeno del niño del año de 1997-1998, este fenómeno produjo un corte de la evolución temporal del evento de sequía, produciendo un evento húmedo en la Und Hidrográfica de Chicama.

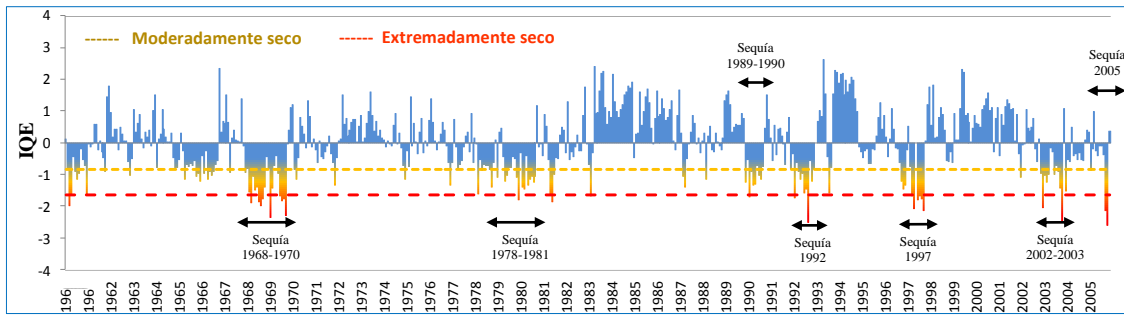
El segundo evento seco más importante, se produjo en el año de 2005, el cual se clasificó como sequía moderada, no pudiendo definir la duración ni el desarrollo de este evento por coincidir con el límite del periodo de análisis de esta investigación (1960-2005).



**Figura 29:** Evolución temporal del IQE, caracterización de la duración de los eventos de sequía ocurridos en la EH-07(Salinar–Tambo), ubicado en la Und. Hidrográfica de Chicama.

La **Figura 4.30** muestra la evolución temporal del índice de sequía de caudal estandarizado (IQE), perteneciente a la EH-17(La Capilla), localizada en el centro del Perú, en el departamento de Lima y en la Und. Hidrográfica de Mala.

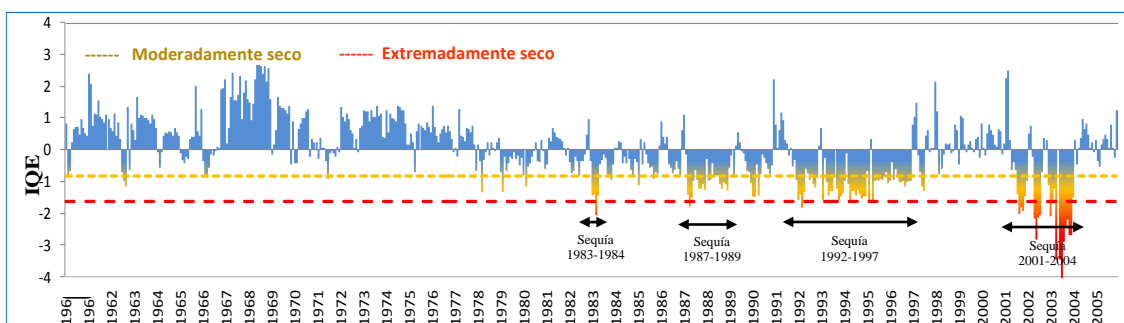
De un análisis de la evolución temporal del IQE, se observa que las principales sequías que se han producido entre los años de 1960 al 2005, son en total siete eventos de importante duración, el análisis de la última década (1995-2005), muestra que han ocurrido tres eventos de sequía de considerable duración como es: la sequía del año 1997, la sequía del año 2002-2003 y la sequía del año 2005 clasificados como sequías extremas, no pudiendo definir la duración ni el desarrollo de este último evento por coincidir con el límite del periodo analizado (1960-2005).



**Figura 30:** Evolución temporal del IQE, caracterización de la duración de los eventos de sequía ocurridos en la EH-17(La Capilla), localizado en la Unidad Hidrográfica de Mala.

De igual manera la **Figura 31** muestra la evolución temporal del índice de sequía de caudal estandarizado (IQE) perteneciente a la EH-24(Chivaya), ubicado en la zona sur del Perú, en la Und. Hidrográfica de Ilo-Moquegua

El resultado del análisis de la evolución temporal del IQE, se observa que las principales sequías que se han producido entre los años de 1960 al 2005, son en total cinco eventos de importante duración, el análisis de la última década (1995-2005), muestra dos eventos de duración importantes como es la sequía del año 1992 a 1997, fue clasificado como sequía moderada pero con una duración de 5 años, y la sequía del 2001 a 2004, que fue clasificado como sequía extrema. La presencia de sequías con duraciones importantes en esta zona, se debe a que la zona Sur del Perú presenta un clima árido, este clima se caracteriza por presentar permanentemente déficit hídrico a lo largo de todo el año.

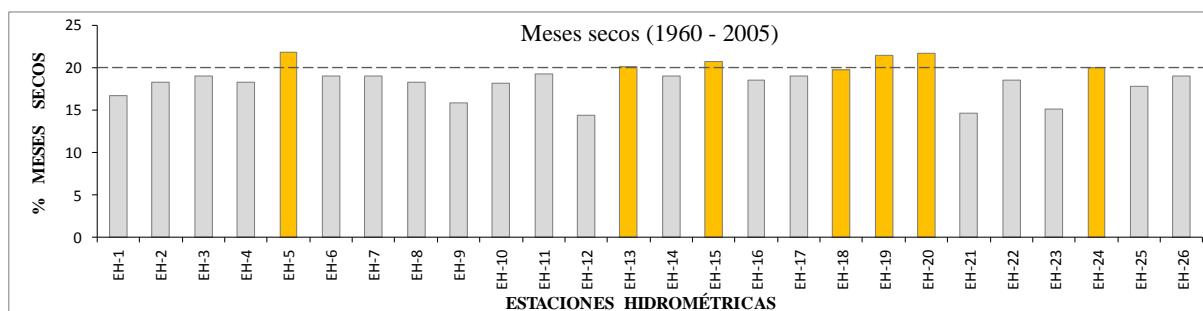


**Figura 31:** Evolución temporal del IQE, caracterización de la duración de los eventos de sequía ocurridos en la EH-24(Chivaya), localizado en la Und. Hidrográfica de Ilo-Moquegua.

En el **ANEXO IX** se muestra el resultado grafico de la caracterización de las sequías mediante una gráfica de evolución temporal del IQE para cada estación analizada, visualizando los principales parámetros analizados (duración, intensidad (magnitud))

**Cuadro 35:** Cuantificación total y decadal de los eventos secos registrados en la Vertiente peruana del pacífico durante el periodo analizado (1960-2005)

Código	Estación	Año 1960 - 2005			60 - 1970		70 - 1980		80 - 1990		90 - 2000		00 - 2005	
		Meses Analizados	TOTAL Meses Secos	Porcent (%)	Mes secos	Porcent (%)	Mes secos	Porcent (%)	Mes secos	Porcent (%)	Mes secos	Porcent (%)	Mes secos	Porcent (%)
EH-1	EL TIGRE	540	90	17	25	20.8	10	8.3	15	12.5	26	21.7	14	23.3
EH-2	ARDILLA	540	99	18	64	53.3	8	6.7	11	9.2	12	10.0	4	6.7
EH-3	PUCHACA	540	103	19	13	10.8	5	4.2	25	20.8	40	33.3	20	33.3
EH-4	RACA RUMI	540	99	18	26	21.7	11	9.2	22	18.3	25	20.8	15	25.0
EH-5	EL BATAN	540	118	22	27	22.5	14	11.7	27	22.5	32	26.7	18	30.0
EH-6	YONAN	540	103	19	25	20.8	11	9.2	24	20.0	30	25.0	13	21.7
EH-7	SALINAR - TAMBO	540	103	19	13	10.8	13	10.8	24	20.0	36	30.0	17	28.3
EH-8	QUIRIHUAC MOCHE	540	99	18	17	14.2	18	15.0	18	15.0	31	25.8	15	25.0
EH-9	HUACAPONGO	540	86	16	13	10.8	13	10.8	23	19.2	20	16.7	17	28.3
EH-10	CONDORCERRO	540	98	18	37	30.8	12	10.0	11	9.2	28	23.3	10	16.7
EH-11	SAN JACINTO	540	104	19	8	6.7	12	10.0	22	18.3	42	35.0	20	33.3
EH-12	SECTOR TUTUMA	540	78	14	38	31.7	5	4.2	7	5.8	18	15.0	10	16.7
EH-13	YANAPAMPA	540	109	20	7	5.8	8	6.7	28	23.3	42	35.0	24	40.0
EH-14	PUENTE ALCO	540	103	19	36	30.0	5	4.2	27	22.5	27	22.5	8	13.3
EH-15	SANTO DOMINGO	540	112	21	27	22.5	15	12.5	12	10.0	49	40.8	9	15.0
EH-16	CHOSICA	540	100	19	41	34.2	22	18.3	14	11.7	20	16.7	3	5.0
EH-17	LA CAPILLA	540	103	19	36	30.0	14	11.7	15	12.5	24	20.0	14	23.3
EH-18	SOCSI Y TOMA IMPERIAL	540	107	20	38	31.7	14	11.7	16	13.3	32	26.7	7	11.7
EH-19	CONTA	540	116	21	32	26.7	14	11.7	26	21.7	36	30.0	8	13.3
EH-20	LETRAYOCC	540	117	22	14	11.7	24	20.0	36	30.0	38	31.7	5	8.3
EH-21	LA ACHIRANA	540	79	15	29	24.2	18	15.0	20	16.7	12	10.0	0	0.0
EH-22	BELLA UNIÓN	540	100	19	11	9.2	21	17.5	28	23.3	29	24.2	11	18.3
EH-23	CHUCARAPI	540	82	15	11	9.2	4	3.3	20	16.7	43	35.8	4	6.7
EH-24	CHIVAYA	540	108	20	3	2.5	3	2.5	27	22.5	52	43.3	23	38.3
EH-25	LA TRANCA	540	96	18	29	24.2	9	7.5	24	20.0	32	26.7	2	3.3
EH-26	AGUAS CALIENTES	540	103	19	9	7.5	4	3.3	15	12.5	71	59.2	4	6.7
<b>Σ Total de eventos</b>		<b>2615</b>			<b>629</b>		<b>307</b>		<b>537</b>		<b>847</b>		<b>295</b>	



**Figura 32:** Grafica de barras. Cuantificación porcentual del número de eventos secos (mensual) registrados en cada estación hidrométrica durante el periodo analizado (1960–2005).

Las estaciones hidrométricas son numeradas según su ubicación geográfica (Norte a Sur).

Los resultados del **Cuadro 35** muestran la cuantificación de los eventos secos con un valor del IQE inferior a -0.84, este índice ha identificado un total de 2615 eventos secos en 26 estaciones hidrométricas durante el periodo analizado de 1960-2005.

De un total de 540 meses analizados (45 años) por estación, las Estaciones Hidrométricas (EH) que presentan mayor frecuencia de meses secos son siete (EH-5, EH-13, EH-15, EH-18, EH-19, EH-20 y EH-24 ), estas EH presentan periodos secos (meses) que exceden el 20% de los datos analizados por estación hidrométrica.

Las EH que registraron el mayor porcentaje de eventos secos se ubican en: costa Norte (Lambayeque), en el centro del Perú (Ancash, Lima e Ica) y el Sur del Perú (Moquegua), estas presentaron más de 108 meses secos (9 años) de un total de 540 meses (45 años) analizados por estación, esta recurrencia de eventos secos es explicado por el proceso antrópico, dado que los principales proyectos construidos en la costa peruana se ejecutaron en la década de los '80s, tal es el caso del Proyectos Especial (PE) Jequetepeque – Zaña, PE Chavimochic, PE Chincas, PE Tacna, etc (Ver Cuadro 9 y 10 Pag. 35)

La **Figura 32** muestra gráficamente el porcentaje de meses secos entre los años de 1960-2005. La barra de color amarillo muestra las EH que registraron más de un 20% de meses secos, identificados mayoritariamente en el Centro del Perú.

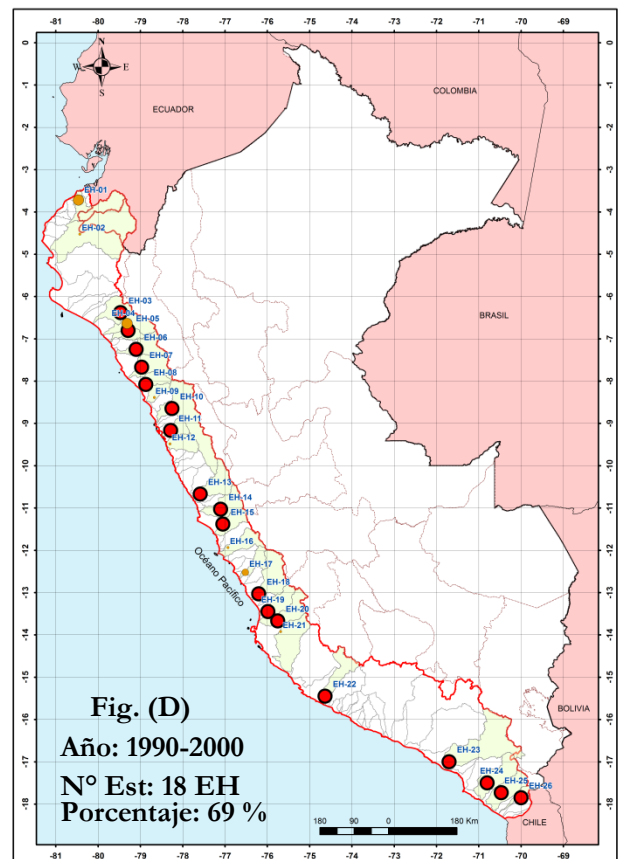
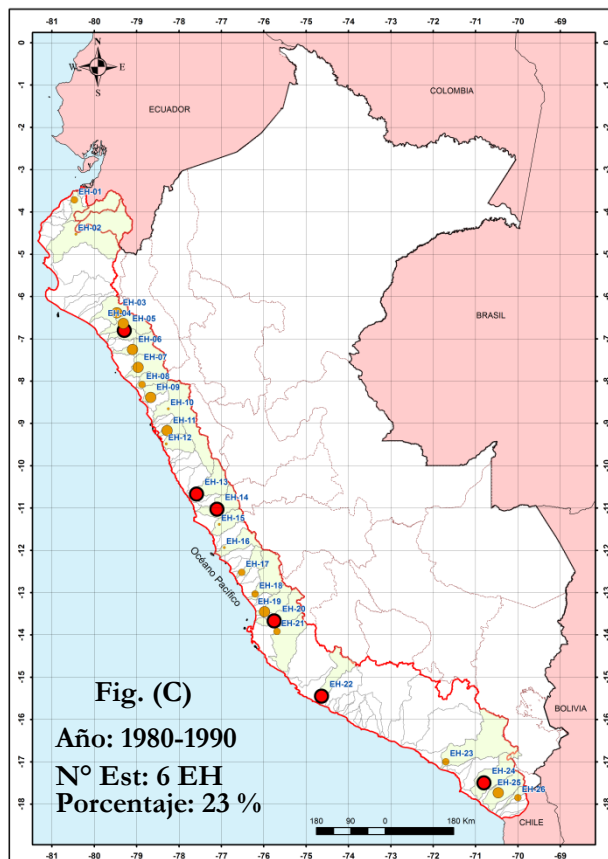
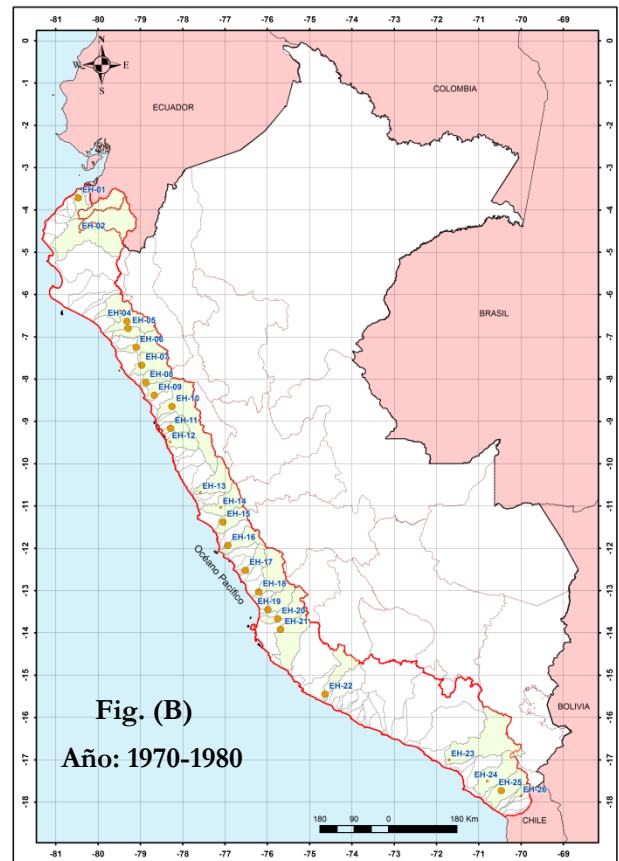
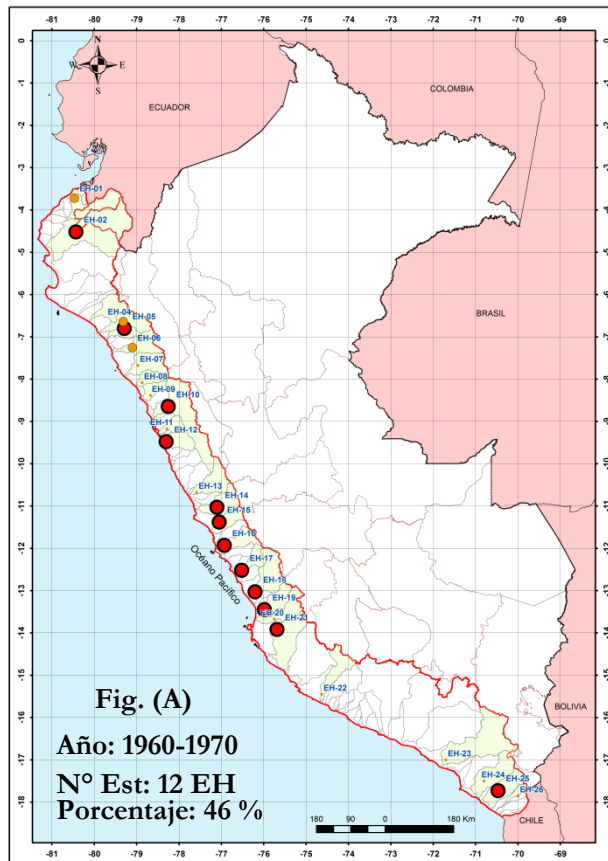
De un análisis de la frecuencia relativa y acumulada de la duración de los eventos secos registrados en el periodo de 1960-2005, se muestra en el **Cuadro 36**, donde se observa que los eventos secos de mayor frecuencia presentan una duración de uno y dos meses consecutivos.

**Cuadro 36:** Frecuencia de ocurrencia de eventos secos de diferentes duraciones registrados entre los años de 1960-2005

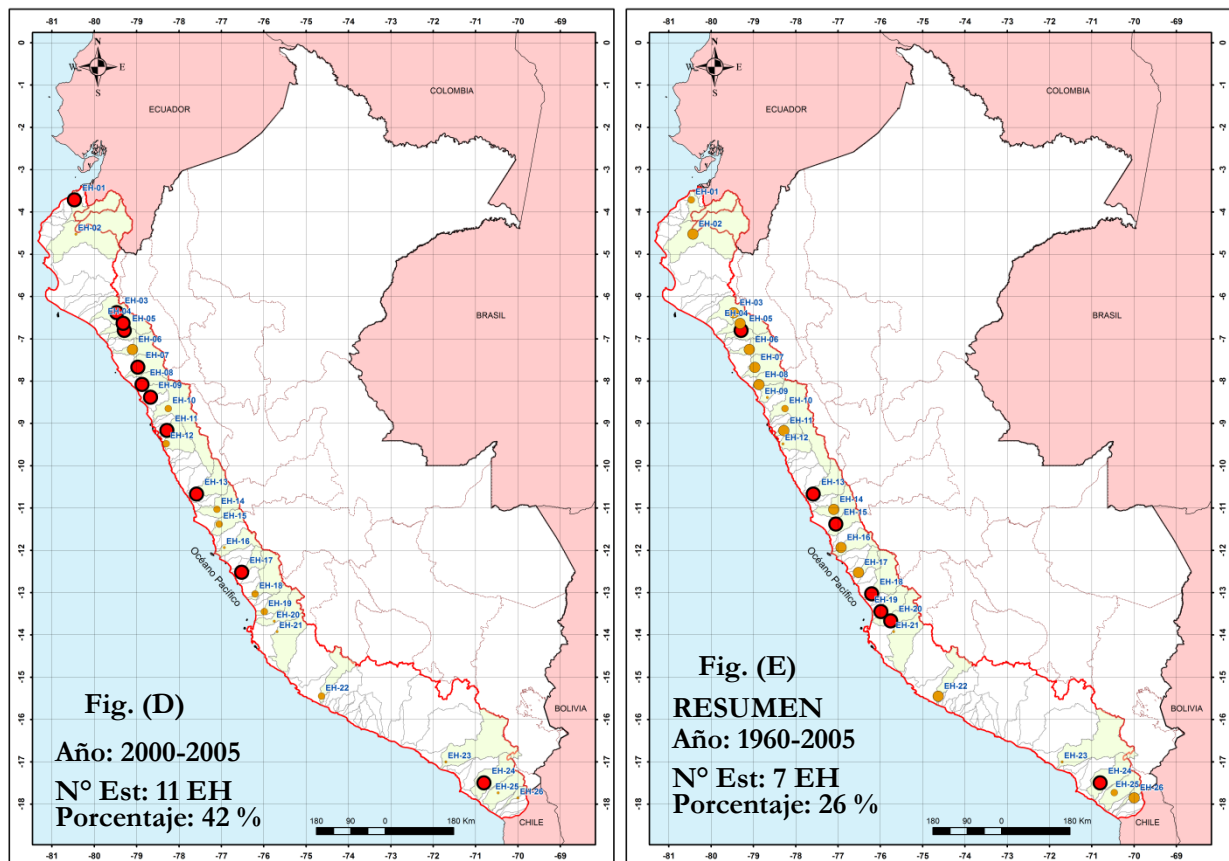
Duración de eventos secos				
DURACIÓN (MES)	CASOS	FREC. REL (%)	FREC. ACUM (%)	LONG. MESES SECOS
1	2615	83.63	100.00	1 mes o más
2	208	6.65	16.37	2 meses o más
3	102	3.26	9.72	3 meses o más
4	53	1.69	6.46	4 meses o más
5	48	1.54	4.76	5 meses o más
6	23	0.74	3.23	6 meses o más
7	27	0.86	2.49	7 meses o más
8	18	0.58	1.63	8 meses o más
9	10	0.32	1.06	9 meses o más
10	7	0.22	0.74	10 meses o más
11	5	0.16	0.51	11 meses o más
12	8	0.26	0.35	12 meses o más
> 12	3	0.10	0.10	mayor a 12 meses

El **Cuadro 36** muestra la frecuencia de eventos secos registrados según el IQE, se observa que las duraciones de 1 y 2 meses consecutivos, ocurrieron frecuentemente con un total de 83.63% y 90.28% del total de eventos secos; las sequías con duraciones de 3 meses o más meses consecutivos ocurren con una frecuencia de 9.72% o menos del total de eventos secos, estas duraciones son poco frecuentes.





**Figura 33:** Identificación espacial de las Estaciones Hidrométricas que presentaron mayor frecuencia de eventos secos (superior al 20% de los meses analizados por década).



**Figura 34:** Identificación espacial de las estaciones hidrométricas que presentaron mayor frecuencia de eventos secos, superior al 20% de los meses analizados para el quinquenio de 2000-2005 y para el periodo analizado de 1960 al 2005

La **Figura 33** muestra la identificación espacial (círculo rojo) de las Estaciones Hidrométricas (EH) que presentaron mayor frecuencia de eventos secos, las EH identificadas registraron meses secos superior al 20% de los datos analizados de una década (120 meses), de ellos se desprende los siguientes resultados:

- ✓ La Figura (A) analiza la década de 1960-1970, en él se ha identificado 12 EH que presentaron meses secos superior al 20% de los datos analizados de una década (120 meses), esta figura ha identificado espacialmente 12 EH las cuales presentan mayor vulnerabilidad a eventos de sequía, dada la frecuencia con que han ocurrido, las EH se ubican mayoritariamente en el Centro del Perú.

En esta década se ha identificado 629 meses secos en 26 EH analizadas.

- ✓ La Figura (B) analiza la década de 1970-1980, en él no se ha identificado la presencia de meses secos superior al 20% de los datos de una década (120 meses).

En esta década se ha identificado 307 meses secos en 26 EH analizadas.

- ✓ La Figura (C) analiza la década de 1980-1990, en él se ha identificado 6 EH que presentaron meses secos superior al 20% de los datos analizados de una década (120 meses), esta figura ha identificado espacialmente seis zonas vulnerables donde los eventos secos se han producido frecuentemente, estas son: EH-05 El Batán, EH-13 Yanapampa, EH-14 Puente Alco, EH-20 Letrayocc, EH-22 Bella Unión y EH Chivaya.

En esta década se han identificado 537 meses secos en 26 EH analizadas.

- ✓ La Figura (D) analiza la década de 1990-2000, en él se ha identificado 18 EH que presentaron meses secos superior al 20% de los datos analizados de una década (120 meses), esta figura ha identificado espacialmente que la costa peruana es vulnerable a eventos de sequías, dada la frecuencia con que han ocurrido.

En esta década se ha identificado 847 meses secos en 26 EH analizadas.

Estos meses secos (847) son explicados por el factor antrópico. Los principales proyectos hidráulicos del Perú fueron construidos entre los años de 1980 al 1990, a partir de este año el recurso hídrico fue represado y/o trasvasado produciendo un incremento de los eventos de sequía en las EH, estos grandes proyectos permitieron regular y/o aprovechar el recurso hídrico superficial incrementando el área agrícola disponible en la costa peruana.

La emigración población de la sierra a la costa peruana es otro factor significativo que contribuye a la reducción del recurso hídrico superficial, incrementando las sequías hidrológicas en las estaciones de control (EH).

La **Figura 34** identifica espacialmente (círculo rojo) las Estaciones Hidrométricas (EH) que presentaron mayor frecuencia de eventos secos, ellos se describen a continuación:

- ✓ La Figura (D) analiza el quinquenio del 2000 al 2005, en él se ha identificado 11 EH que presentaron meses secos superior al 20% de los datos analizados de un quinquenio (60 meses), esta figura ha identificado espacialmente 11 EH que presentan mayor vulnerabilidad a eventos de sequía, de este análisis se ha identificado 295 meses secos en 26 estaciones analizadas para un periodo de 5 años.
- ✓ La Figura (E) muestra el resumen la frecuencia de eventos secos registrados en el periodo analizado de 1960 al 2005, identificando 7 EH donde se han presentado eventos secos con mayor frecuencia, las EH son: EH-05 El Batán, EH-13 Yanapampa, EH-15 Santo domingo, EH-18 Socci, EH-19 Conta, EH-20 Letrayocc y EH-24 Chivaya, los resultados de este análisis muestran que las 7 EH identificadas

en la costa peruana, presentan mayor vulnerabilidad a eventos de sequía hidrológica dado la alta frecuencia de meses secos registrados en todo el periodo analizado.

#### **4.3.2 Intensidad y Magnitud**

La intensidad o el máximo valor negativo de un evento seco, mide el déficit o severidad con que es afectado el recurso hídrico, su evaluación se determinó mediante el método de umbrales clasificando a la sequía hidrológica en función de su intensidad.

Los umbrales que definen la sequía hidrológica según su intensidad son:

**Sequía moderada** (corresponden a un valor de intensidad inferior a -0.84)

**Sequía extrema** (corresponden a un valor de intensidad inferior a -1.65)

La magnitud es la sumatoria de las intensidades negativas (volumen acumulado) que se produce durante un evento seco

La intensidad es el déficit con que el recurso hídrico es afectado, este valor negativo es multiplicado por (-1) para su cuantificación.

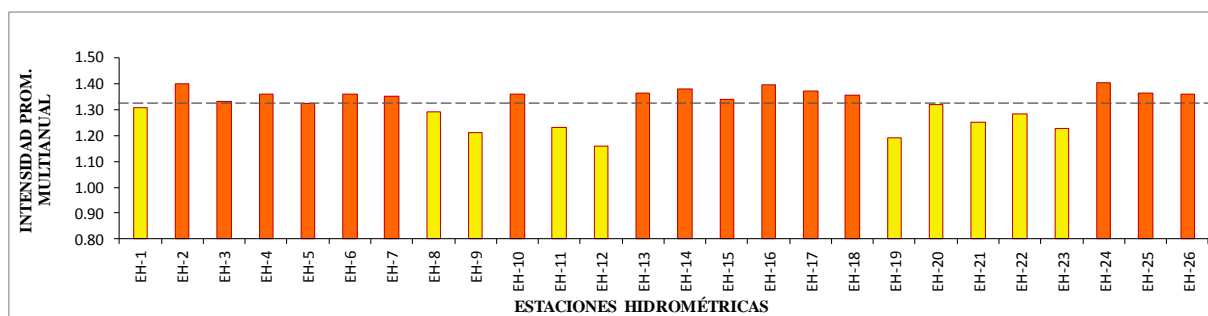
El **Cuadro 37** muestra la cuantificación de los eventos secos registrados en cada Estación Hidrométrica (EH), en él se observa que la totalidad de eventos secos ocurridos durante el periodo de 1960 - 2005 haciende a 2615 (meses secos) para las 26 EH analizadas, sin embargo el promedio de las intensidades de cada una de las EH se ha clasificado en moderadamente secos según la escala del IQE ( $0.84 < \text{Moderadamente secos} < 1.65$ ).

La intensidad promedio multianual de las 26 estaciones analizadas se ha determinado en 1.32 según el IQE, las estaciones hidrométricas que presentaron un valor superior al promedio de esta intensidad (1.32), fueron afectados con eventos moderadamente secos de mayor severidad, este dato es resaltado con negrita para una mejor identificación.

Se recuerda que la intensidad es de signo negativo por representar déficit del recurso hídrico, este valor es multiplicado por (-1) para su cuantificación.

**Cuadro 37:** Cuantificación de los eventos secos y la intensidad promedio ocurridos durante el periodo de 1960-2005

Código	Estación	Meses analizad	EVENTOS SECOS			MODERADAMENTE SECOS			EXTREMADAMENTE SECOS		
			Total Eventos Secos	Porcentaje (%)	Intensidad Prom.	Eventos Moderad. Secos (M.S)	Porcentaje M.S (%)	Intensidad Prom. (M.S)	Eventos Extremad. Secos (E.S)	Porcentaje E.S (%)	Intensidad Prom. (E.S)
EH-1	EL TIGRE	540	90	16.7	1.30	75	13.9	1.11	15	2.8	2.27
EH-2	ARDILLA	540	99	18.3	<b>1.40</b>	76	14.1	1.15	23	4.3	2.23
EH-3	PUCHACA	540	103	19.1	<b>1.33</b>	85	15.7	1.16	18	3.3	2.11
EH-4	RACA RUMI	540	99	18.3	<b>1.36</b>	76	14.1	1.19	23	4.3	1.91
EH-5	EL BATAN	540	118	21.9	1.32	92	17.0	1.14	26	4.8	1.98
EH-6	YONAN	540	103	19.1	<b>1.36</b>	85	15.7	1.22	18	3.3	2.03
EH-7	SALINAR - TAMBO	540	103	19.1	<b>1.35</b>	85	15.7	1.24	18	3.3	1.90
EH-8	QUIRIHUAC MOCHE	540	99	18.3	1.29	84	15.6	1.16	15	2.8	2.04
EH-9	HUACAPONGO	540	86	15.9	1.21	76	14.1	1.12	10	1.9	1.90
EH-10	CONDORCERRO	540	98	18.1	<b>1.36</b>	78	14.4	1.19	20	3.7	2.01
EH-11	SAN JACINTO	540	104	19.3	1.23	94	17.4	1.16	10	1.9	1.90
EH-12	SECTOR TUTUMA	540	78	14.4	1.16	75	13.9	1.13	3	0.6	1.75
EH-13	YANAPAMPA	540	109	20.2	<b>1.36</b>	86	15.9	1.21	23	4.3	1.93
EH-14	PUENTE ALCO	540	103	19.1	<b>1.38</b>	81	15.0	1.17	22	4.1	2.16
EH-15	SANTO DOMINGO	540	112	20.7	<b>1.34</b>	87	16.1	1.16	25	4.6	1.97
EH-16	CHOSICA	540	100	18.5	<b>1.39</b>	77	14.3	1.21	23	4.3	2.00
EH-17	LA CAPILLA	540	103	19.1	<b>1.37</b>	76	14.1	1.16	27	5.0	1.95
EH-18	SOCSI Y TOMA IMPERIAL	540	107	19.8	<b>1.35</b>	82	15.2	1.18	25	4.6	1.92
EH-19	CONTA	540	116	21.5	1.19	106	19.6	1.11	10	1.9	2.03
EH-20	LETRAYOCC	540	117	21.7	1.32	96	17.8	1.17	21	3.9	2.03
EH-21	LA ACHIRANA	540	79	14.6	1.25	70	13.0	1.17	9	1.7	1.85
EH-22	BELLA UNIÓN	540	100	18.5	1.28	88	16.3	1.20	12	2.2	1.87
EH-23	CHUCARAPI	540	82	15.2	1.23	73	13.5	1.14	9	1.7	1.95
EH-24	CHIVAYA	540	108	20.0	<b>1.40</b>	88	16.3	1.17	20	3.7	2.40
EH-25	LA TRANCA	540	96	17.8	<b>1.36</b>	76	14.1	1.20	20	3.7	1.98
EH-26	AGUAS CALIENTES	540	103	19.1	<b>1.36</b>	81	15.0	1.18	22	4.1	2.01
<b>Σ Total de eventos</b>			<b>2615</b>			<b>2148</b>			<b>467</b>		
<b>Media</b>					<b>1.32</b>			<b>1.17</b>			<b>2.00</b>



**Figura 35:** Grafica de barras. Intensidad promedio multianual del IQE de las 26 Estaciones Hidrométricas analizadas durante el periodo de 1960 – 2005.

La **Figura 35** muestra el resultado grafico (barras) de la intensidad promedio multianual de los eventos secos registrados durante el periodo de 1960-2005 de las 26 estaciones hidrométricas analizadas. La línea entrecortada (negra) representa el valor promedio de las intensidades (1.32 en la escala del IQE), este valor identifica las EH donde se presentaron eventos moderadamente secos de mayor severidad.

La barra de color naranja identifican las EH donde los eventos moderadamente secos se presentaron con mayor intensidad, superior al promedio de las intensidades (1.32 en la escala del IQE), siendo estos lugares los más afectados por los eventos de sequía hidrológica.

La barra de color amarillo identifica las EH donde los eventos moderadamente secos se presentaron con menor intensidad.

Esta figura nos permite realizar una comparación visual de las EH donde se han producido eventos de sequía hidrológica de mayor o menor intensidad a lo largo de la costa peruana entre los años de 1960-2005, identificando la presencia de 16 estaciones hidrométricas donde los eventos moderadamente secos se han presentado con mayor severidad.

**Cuadro 38:** Valores de caudal correspondiente al IQE que indican el inicio y/o término de un evento de sequía hidrológica

Código	Estación 1960 - 2005	Río	TOTAL Meses Secos	SEQUÍAS MODERADAS			SEQUÍAS EXTREMA		
				Meses Secos	IQE	Caudal (m3/s)	Meses Secos	IQE	Caudal (m3/s)
EH-1	EL TIGRE	Tumbes	90	75	-0.84	18.59	15	-1.65	11.70
EH-2	ARDILLA	Chira	99	76	-0.84	68.60	23	-1.65	28.94
EH-3	PUCHACA	La Leche	103	85	-0.84	1.00	18	-1.65	0.31
EH-4	RACA RUMI	Chancay -Labaye..	99	76	-0.84	11.17	23	-1.65	5.40
EH-5	EL BATAN	Zaña	118	92	-0.84	2.57	26	-1.65	1.58
EH-6	YONAN	Jequetepeque	103	85	-0.84	3.97	18	-1.65	1.12
EH-7	SALINAR - TAMBO	Chicama	103	85	-0.84	2.39	18	-1.65	0.95
EH-8	QUIRIHUAC MOCHE	Moche	99	84	-0.84	0.62	15	-1.65	0.06
EH-9	HUACAPONGO	Virú	86	76	-0.84	0.05	10	-1.65	0.01
EH-10	CONDORCERRO	Santa	98	78	-0.84	44.92	20	-1.65	28.26
EH-11	SAN JACINTO	Nepeña	104	94	-0.84	0.08	10	-1.65	0.00
EH-12	SECTOR TUTUMA	Casma	78	75	-0.84	0.000	3	-1.65	0.000
EH-13	YANAPAMPA	Pativilca	109	86	-0.84	15.93	23	-1.65	12.28
EH-14	PUENTE ALCO	Huaura	103	81	-0.84	11.26	22	-1.65	8.44
EH-15	SANTO DOMINGO	Chancay.Huaral	112	87	-0.84	4.91	25	-1.65	3.41
EH-16	CHOSICA	Rimaac	100	77	-0.84	18.03	23	-1.65	13.11
EH-17	LA CAPILLA	Mala	103	76	-0.84	1.70	27	-1.65	1.10
EH-18	SOCSI Y TOMA IMPERIAL	Cañete	107	82	-0.84	12.12	25	-1.65	8.99
EH-19	CONTA	San Juan	116	106	-0.84	0.56	10	-1.65	0.00
EH-20	LETRAYOCC	Pisco	117	96	-0.84	3.52	21	-1.65	0.92
EH-21	LA ACHIRANA	Ica	79	70	-0.84	0.21	9	-1.65	0.004
EH-22	BELLA UNIÓN	Acarí	100	88	-0.84	0.43	12	-1.65	0.13
EH-23	CHUCARAPI	Tambo	82	73	-0.84	7.75	9	-1.65	4.56
EH-24	CHIVAYA	Ilo-Moquegua	108	88	-0.84	0.44	20	-1.65	0.38
EH-25	LA TRANCA	Sama	96	76	-0.84	0.55	20	-1.65	0.29
EH-26	AGUAS CALIENTES	Caplina	103	81	-0.84	0.50	22	-1.65	0.39

El **Cuadro 38** muestra el resultado del Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE) que da inicio o término a los eventos moderadamente secos y/o extremadamente secos.

Los eventos moderadamente secos son definidos por el percentil 20 o 20% de la probabilidad de una determinada distribución, este percentil transformado a una variable

estandarizada es definido en -0.84, este valor invariable en el tiempo y el espacio, define el inicio o término de los evento moderadamente seco.

Los caudales identificados para un valor de -0.84 en la escala del IQE limitan los periodos húmedos y secos en cada una de las estaciones analizadas, valores inferiores indican que nos encontramos en un periodo moderadamente seco.

De igual manera los eventos extremadamente secos son definidos por el percentil 5 o 5% de la probabilidad, este percentil transformado a una variable estandarizada es definido en -1.65, este valor define el inicio o término de un evento extremadamente seco.

Los caudales identificados para un valor de -1.65 en la escala del IQE limitan los periodos moderadamente secos y extremadamente secos en cada una de las estaciones analizadas, valores inferiores a estos caudales indican periodo crítico (sequía extrema).

Estos límites (Sequía moderada (-0.84) y Sequía extrema (-1.65)) identifican valores altos de caudal en las EH cercanas al trópico (Norte peruano), mientras que las EH ubicadas en el Sur del Perú presentan valores de caudal próximos a cero. Se ha identificado que la EH-12 Sector Tutuna presenta valores de caudal cero para definir los eventos moderado y extremadamente secos, esto es explicado por el comportamiento hídrico del río Casma, este río presenta un régimen irregular, por tal razón conduce agua solo en algunos meses del periodo de avenida, permaneciendo largas temporadas secas.

Los caudales que definen los eventos moderadamente secos y/o extremadamente secos, son herramientas básicas para la gestión de los recursos hídricos a nivel de Cuenca, permitiendo desarrollar tácticas operativas que son requeridas para implementar medidas de mitigación ante posible impacto de las sequías hidrológicas en la Vertiente peruana del Pacífico.

**Cuadro 39:** Caracterización de las principales sequías según el IQE (1960-2005)

Código	Estación 1960 - 2005	Total Eventos Secos	Periodo de Máxima duración			Intesidad máxima		Magnitud máxima	
			N° de Meses	Fecha de inicio	Fecha de término	Valor de IQE	Fecha de registro	Valor de Magnitud	Topo de Sequía
EH-1	EL TIGRE	90	12	May. 1996	Abr. 1997	2.93	Nov. 1996	15.42	Extrema
EH-2	ARDILLA	99	9	May. 1996	Ene. 1997	2.12	Nov. 1966	14.64	Extrema
EH-3	PUCHACA	103	13	Abr. 1991	Feb. 1992	2.13	Jul. 1991	17.29	Extrema
EH-4	RACA RUMI	99	12	Oct. 1979	Sep. 1980	2.09	Dic. 1979	18.95	Extrema
EH-5	EL BATAN	118	12	Oct. 1979	Sep. 1980	2.32	May. 1980	22.99	Extrema
EH-6	YONAN	103	12	Oct. 1979	Sep. 1980	2.65	May. 1980	23.61	Extrema
EH-7	SALINAR - TAMBO	103	12	Oct. 1979	Sep. 1980	2.60	May. 1980	26.37	Extrema
EH-8	QUIRIHUAC MOCHE	99	8	Oct. 1979	May. 1980	3.26	Abr. 1980	18.05	Extrema
EH-9	HUACAPONGO	86	7	Ene. 1980	Sep. 1980	2.12	May. 1980	13.28	Extrema
EH-10	CONDORCERRO	98	13	Ene. 1992	Ene. 1993	1.53	Mar. 1992	15.86	Moderado
EH-11	SAN JACINTO	104	12	Ene. 1992	Dic. 1992	2.10	Nov. 1992	17.45	Extrema
EH-12	SECTOR TUTUMA	78	7	Dic. 1968	Jun. 1969	1.83	Mar. 1969	9.64	Extrema
EH-13	YANAPAMPA	109	17	Ago. 1991	Dic. 1992	2.61	Dic. 1991	27.75	Extrema
EH-14	PUENTE ALCO	103	13	Ene. 1992	Ene. 1993	3.91	May. 1992	20.66	Extrema
EH-15	SANTO DOMINGO	112	11	Ene. 1992	Nov. 1992	3.29	Nov. 1992	21.29	Extrema
EH-16	CHOSICA	100	11	Oct. 1988	Ago. 1989	2.50	Abr. 1989	19.98	Extrema
EH-17	LA CAPILLA	103	9	Feb. 1968	Oct. 1968	1.99	Ago. 1968	14.39	Extrema
EH-18	SOCSI Y TOMA IMPERIAL	107	14	Dic. 1991	Ene. 1993	2.13	Dic. 1992	21.53	Extrema
EH-19	CONTA	116	7	Ene. 1992	Jul. 1992	2.13	Mar. 1992	9.84	Extrema
EH-20	LETRAYOCC	117	12	Ene. 1992	Dic. 1992	3.51	Dic. 1992	19	Extrema
EH-21	LA ACHIRANA	79	5	Ene. 1992	May. 1992	2.21	Mar. 1992	6.63	Extrema
EH-22	BELLA UNIÓN	100	13	Dic. 1991	Dic. 1992	2.29	Jul. 1992	16.67	Extrema
EH-23	CHUCARAPI	82	12	Ene. 1983	Dic. 1983	1.72	Jul. 1983	16.03	Extrema
EH-24	CHIVAYA	108	37	Sep. 1992	Sep. 1995	1.65	Abr. 1995	38.64	Extrema
EH-25	LA TRANCA	96	10	Ene. 1992	Oct. 1992	2.11	Oct. 1992	16.1	Extrema
EH-26	AGUAS CALIENTES	103	31	Jun. 1996	Dic. 1998	2.44	Dic. 1996	38.02	Extrema

El **Cuadro 39** muestra los resultados de las principales características (Duración, Intensidad y Magnitud) de las sequías ocurridas en la Vertiente peruana del Pacífico (VP) entre los años de 1960-2005.

El promedio de eventos secos ocurridos en la VP oscila entre 78 y 118 eventos, de los cuales los eventos secos de mayor duración (meses consecutivos) se encuentran en un rango de 5 a 37 meses, estos evento se han localizado en el Sur del Perú, específicamente en la EH-24 Chivaya con 37 meses consecutivos (3 años aprox.) y la EH-26 Aguas calientes con 31 meses consecutivos (2 – 3 años aproximadamente).

De un análisis del periodo de inicio y término de las principales sequías, la mayoría de las estaciones hidrométricas (EH) presentan un periodo en común como es el año de 1979-1980 con 6 EH, estas son: (EH-4 Raca Rumi, EH-5El Batán, EH-6 Yonan, EH-7 Salinar, EH-8 Quirihuac y EH-9 Huacapongo) y un segundo periodo común fue el año de 1991-1992 con 13 EH, la mayoría de ellas se ubican en el Centro y Sur del Perú.

En cuanto a la máxima intensidad y magnitud de las sequías registradas, resaltan valores extremos superiores a 3.00 en la escala del IQE, estos valores fueron registrados en la



estación EH-08 Quirihuaq moche en el mes de Abril de 1980 con un valor de la intensidad de 3.26 (escala del IQE) y una magnitud de 18.05 correspondiente a un evento extremadamente seco, la estación EH-14 Puente Alco presenta en el mes de Mayo de 1992 una intensidad cuyo valor es de 3.91 en la escala del IQE y una magnitud de 20.66 clasificado como extremadamente secos, la EH-15 Santo Domingo presenta en el mes de Noviembre de 1992 una intensidad cuyo valor es de 3.29 en la escala del IQE y una magnitud de 21.29 clasificado como sequía extrema y por último la EH-20 Letrayoc presenta en el mes de Diciembre de 1992 una intensidad de valor 3.51 según el IQE y una magnitud de 19 clasificado como sequía extrema.

Las sequías de mayor intensidad presentan una duración de 5 a 17 meses, clasificándose como sequía Extrema a excepción de la EH-10 Condorcero que se ha clasificado como sequía moderada, sin embargo la severidad (magnitud) con que el recursos hídrico ha sido afectado es inferior a los valores obtenidos en la zona **Sur del Perú**, en particular en la EH-24 Chivaya y la EH-26 Aguas calientes, las intensidades máximas registradas en ambas EH corresponden a sequías extremas cuya duración supera los 30 meses consecutivos, de este análisis se afirma que ambas EH ubicadas en el Sur del Perú presentan sequías con una magnitud superior a 30 en la escala del IQE, presentando un déficit permanente del recurso hídrico explicado por su condición climática (Clima Árido).

#### **4.3.3 Tendencia de las sequías**

El **Cuadro 40** muestra el resultado del análisis de tendencia para un nivel de significancia del 5% (NS=0.05).

Los datos analizados corresponden al IQE pertenecientes a cada Estación Hidrométrica (EH), evaluando la siguiente hipótesis:

- H0 (Hipótesis nula) : No existe tendencia en la serie estandarizada (IQE)
- H1 (Hipótesis alterna) : Hay una tendencia en la serie estandarizada (IQE)

Los resultados muestran: H0: No existe tendencia en la serie estandarizada (IQE)

Fue aceptada en la mayoría de estaciones para un nivel de significancia del 5%, a excepción de la EH-16 Chosica y la EH-24 Chivaya, estas presentan tendencia en la serie estandarizada del IQE.

La tendencia positiva se presentó en la EH-16 Chosica con una variación de la intensidad promedio multianual de 242.17%, esta tendencia se debe un incremento del caudal, explicado por un proceso antrópico (trasvase de la cuenca del Mantaro a la cuenca del río Rimac).

La tendencia negativa se presentó en la EH-24 Chivaya con una variación de la intensidad promedio multianual de -888.67%, esta tendencia se debe a un déficit del caudal registrado, explicado por la actividad antrópica (derivación de las aguas río arriba de la EH-24 mediante un canal hacia el proyecto especial Pasto grande, Ver Cuadro 9 y 10).

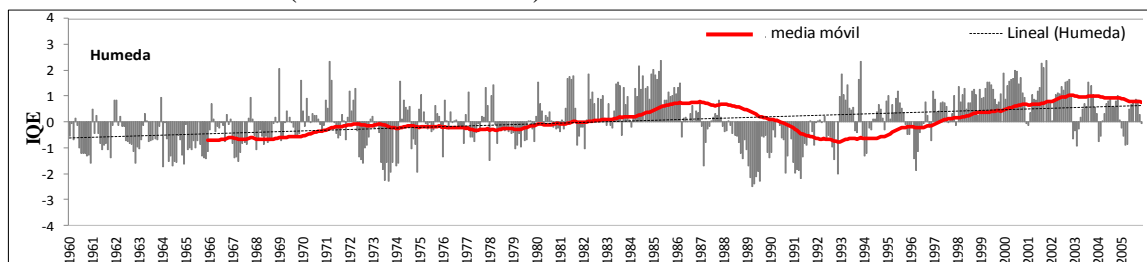
Se ha identificado la frecuencia de periodos húmedos y secos aplicando la media móvil para un tiempo de 72 meses, de este análisis se ha detectado periodos húmedos en 11 estaciones hidrométricas, mientras las 15 restantes presentan periodos secos, los signos (+) y/o (-) identifican la presencia de periodos húmedos o secos en la escala de un IQE.

**Cuadro 40:** Resumen de Tendencia observada, expresada en variación porcentual de la intensidad promedio anual del IQE

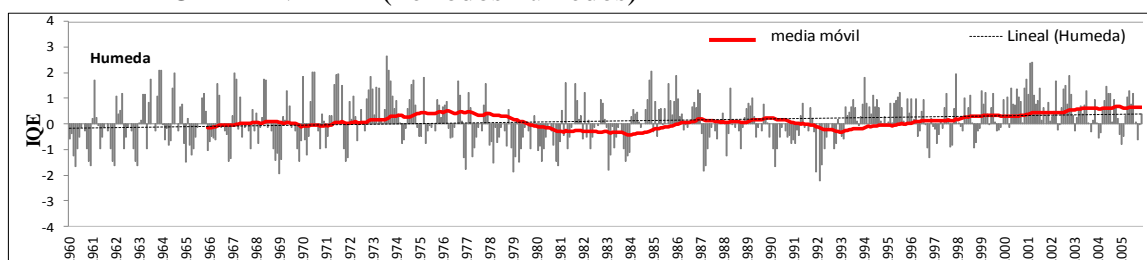
CODIGO	ESTACIÓN	ALT (m.s.n.m)	PENDIENTE	VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD PROM. ANUAL (%)	Media movil (Periodos)	TENDENCIA	
						P-valor	Hipotesis Nula
EH - 1	EL TIGRE	30	-0.003	-10.33	(-) Secos	0.615	Rechazado
EH - 2	ARDILLA	150	0.026	130.53	(+) Húmedos	0.058	Rechazado
EH - 3	PUCHACA	325	-0.014	-48.59	(-) Secos	0.131	Rechazado
EH - 4	RACA RUMI	254	0.004	24.99	(+) Húmedos	0.656	Rechazado
EH - 5	EL BATAN	212	-0.001	-6.53	(-) Secos	0.739	Rechazado
EH - 6	YONAN	428	0.004	18.80	(+) Húmedos	0.897	Rechazado
EH - 7	SALINAR-TAMBO	350	-0.005	-21.68	(-) Secos	0.679	Rechazado
EH - 8	QUIRIHUAC-MOCHE	200	0.005	11.79	(+) Húmedos	0.837	Rechazado
EH - 9	HUACAPONGO	280	-0.007	-8.24	(-) Secos	0.344	Rechazado
EH - 10	CONDORCERRO	526	-0.005	-19.86	(-) Secos	0.404	Rechazado
EH - 11	SAN JACINTO	200	-0.007	-15.26	(-) Secos	0.370	Rechazado
EH - 12	SECTOR TUTUMA	71	0.011	13.92	(+) Húmedos	0.363	Rechazado
EH - 13	YANAPAMPA	859	-0.019	-134.94	(-) Secos	0.067	Rechazado
EH - 14	PUENTE ALCO	1000	0.005	59.56	(+) Húmedos	0.618	Rechazado
EH - 15	SANTO DOMINGO	650	-0.008	-60.79	(-) Secos	0.499	Rechazado
<b>EH - 16</b>	<b>CHOSICA</b>	<b>906</b>	<b>0.027</b>	<b>242.17</b>	<b>(+) Húmedos</b>	<b>0.016</b>	<b>Aceptado (T. Positiva)</b>
EH - 17	LA CAPILLA	468	0.009	38.96	(+) Húmedos	0.582	Rechazado
EH - 18	SOCSI-S Y TOMA IMPEF	500	0.005	37.23	(+) Húmedos	0.486	Rechazado
EH - 19	CONTA	320	-0.006	-22.91	(-) Secos	0.578	Rechazado
EH - 20	LETRAYOC	640	0.000	-0.32	(-) Secos	0.845	Rechazado
EH - 21	LA ACHIRANA	420	0.012	11.25	(+) Húmedos	0.163	Rechazado
EH - 22	BELLA UNIÓN	70	-0.006	-19.07	(-) Secos	0.705	Rechazado
EH - 23	CHUCARAPI	133	-0.017	-32.99	(-) Secos	0.117	Rechazado
<b>EH - 24</b>	<b>CHIVAYA</b>	<b>3200</b>	<b>-0.037</b>	<b>-888.67</b>	<b>(-) Secos</b>	<b>0.004</b>	<b>Aceptado (T. Negativa)</b>
EH - 25	LA TRANCA	620	0.007	25.82	(+) Húmedos	0.554	Rechazado
EH - 26	AGUAS CALIENTES	1300	-0.014	-102.41	(-) Secos	0.198	Rechazado

Prueba de MK para un nivel de significancia del 5% (NS=0.05).

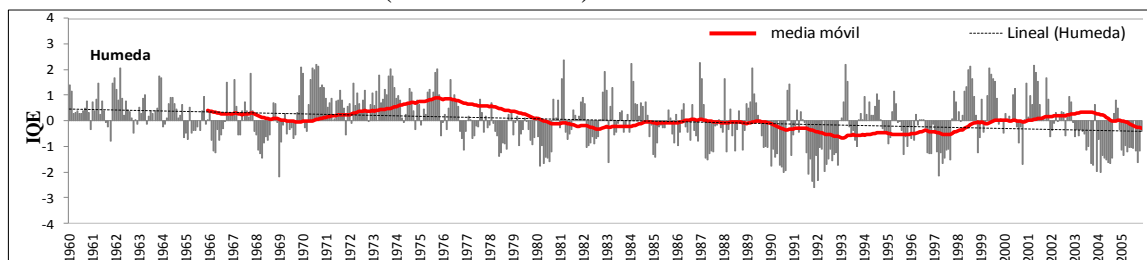
### EH-16 CHOSICA (Periodos húmedos)



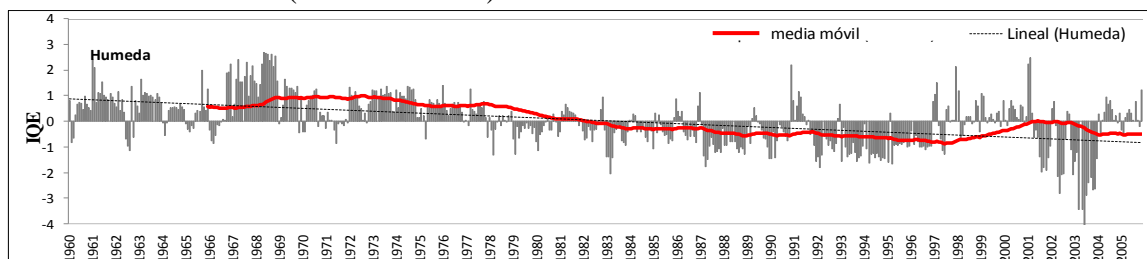
### EH-21 LA ACHIRANA (Periodos húmedos)



### EH-13 YANAPAMPA (Periodos secos)



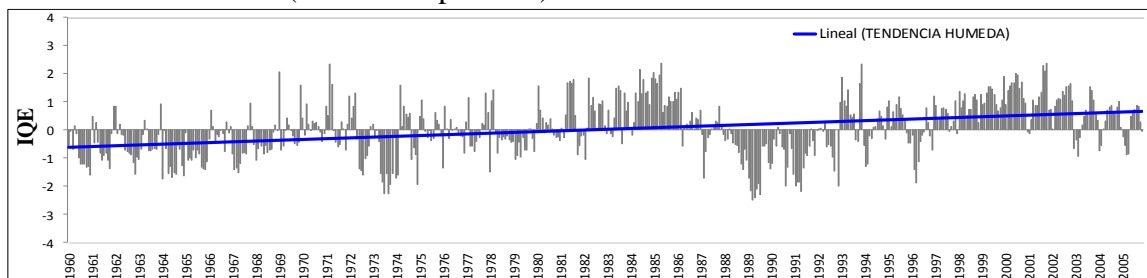
### EH-24 CHIVAYA (Periodos secos)



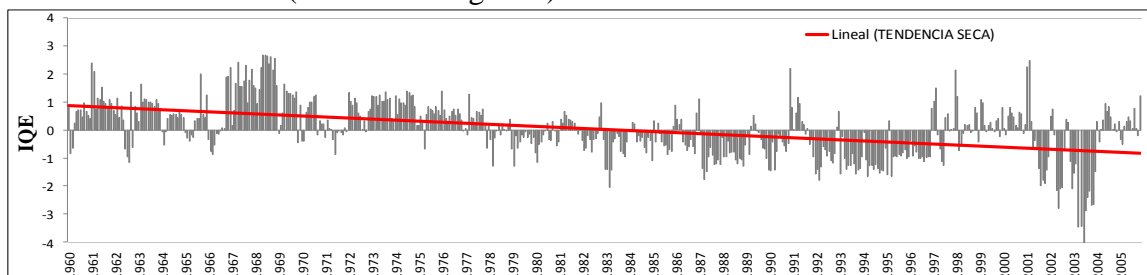
**Figura 36:** periodos húmedos y secos identificados aplicando la media móvil para un tiempo de 72 meses en la estación EH-16 Chosica, EH-21 La Achirana, EH-13 Yanapampa y la EH-24 Chivaya en el periodo analizado de 1960–2005.

La **Figura 36** muestra el resultado gráfico de los periodos húmedos y secos identificados en cuatro estaciones aplicando la media móvil (72 meses), la estación EH-16 y la EH-21, presentan mayor periodos húmedos explicado por el trasvase de las aguas de la Vertiente del Atlántico a la Vertiente del pacifico, mientras que la estación EH-13 y la EH-24, presentan mayor periodos secos explicado por el trasvase de las aguas de la cuenca Pativilca a la cuenca Supe (EH-13) y la presencia del Proyecto Especial Pasto Grande, que deriva las aguas río arriba de la estación EH-24 hacia reservorio y canales de irrigación.

#### EH-16 CHOSICA (Tendencia positiva)



#### EH-24 CHIVAYA (Tendencia negativa)



**Figura 37:** Tendencias positivas y negativas del IQE registrados en la estación EH-16 Chosica y EH-24 Chivaya para un nivel de significancia del 5% (NS=0.05)

La **Figura 37** muestra el resultado gráfico de la tendencia positiva y negativa, la estación EH-16 Chosica presenta tendencia positiva explicado por el trasvase de las aguas de la vertiente del Atlántico a la Vertiente del Pacífico, mientras que la estación EH-24 Chivaya presenta tendencia negativa explicada por el trasvase de las aguas río arriba de esta cuenca al Proyecto Especial Pasto Grande.

#### 4.3.4 Extensión espacial

La caracterización espacial y temporal de las sequías hidrológicas mediante el uso de umbrales, muestra la evolución del inicio, desarrollo y el fin de un evento seco e identifica zonas con mayor riesgo a sufrir temporadas secas lo suficientemente severas como para ocasionar un grave desequilibrio hidrológico en la Vertiente peruana del Pacífico.

La **Figura 38** muestra espacialmente las zonas donde se han presentado eventos de sequía con una intensidad promedio multianual iguales o inferiores a  $\leq -0.84$  en la escala del IQE, producidos entre los años de 1960-2005, esta gráfica muestra las zonas vulnerables donde los eventos secos se producen frecuentemente, estas zonas se identifican puntualmente en forma de bolsones (color naranja) siendo la zona Norte, Centro y Sur del Perú afectados significativamente.

El resultado de la intensidad promedio multianual muestra que ninguna estación presentó un valor inferior a -1.65, que es el umbral definido que caracteriza la sequía extrema, pero si podemos encontrar zonas con intensidad moderada de grado 3 (IQE entre -1.16 a -1.32), grado 4 (IQE entre -1.32 a -1.48) y grado 5 (IQE entre -1.48 a -1.65) en la escala del índice de sequía de caudal estandarizado (IQE).

La intensidad de la sequía moderada, se dividió en rangos de menor intensidad a fin de apreciar con mayor detalle el grado de afección más recurrente, las estaciones analizadas se encuentran codificadas según su ubicación geográfica (Latitud) de Norte a Sur a lo largo de la costa peruana.

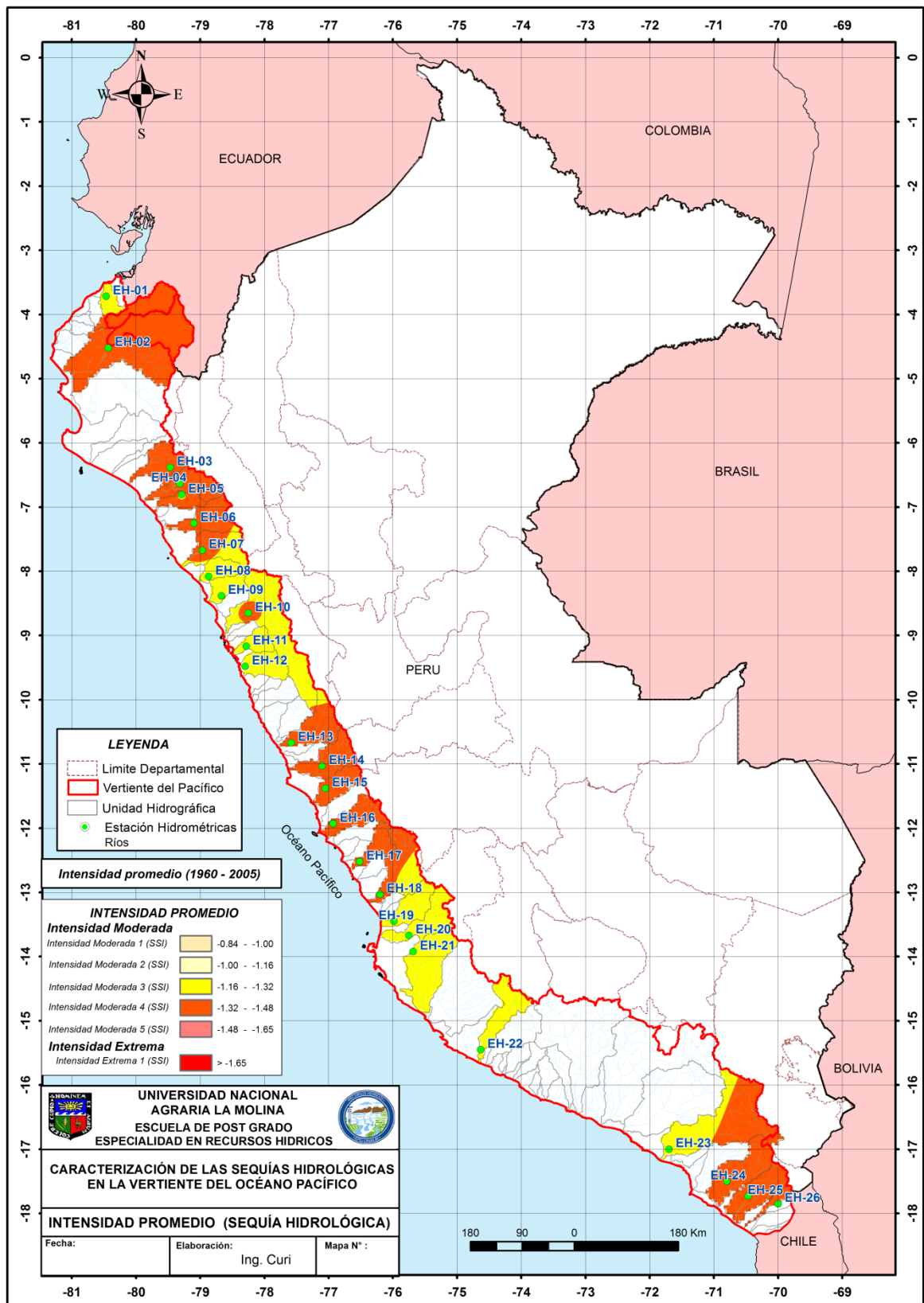
La intensidad promedio multianual de mayor recurrencia es la intensidad moderada de grado 3 (IQE entre -1.16 a -1.32) e intensidad moderada de grado 4 (IQE entre -1.16 a -1.48), visualizando espacialmente que las sequías de ambas intensidades son recurrentes y cubren la totalidad del área de estudio.

Las **Figuras 39** al **42** muestran la evolución espacio - temporal de los eventos de sequía producidos durante el año de 1997-1998 como año representativo. El mes de Enero del año de 1997 en la zona Norte de Perú, se presentó eventos extremadamente secos en la cuenca Chira, cuenca Motupe y en la cuenca Chancay-Lambayeque (color rojo).

El mes de Febrero registra indicios de una sequía moderada en la cuenca de Tumbes, cercano al Ecuador, el mes de Marzo presento condiciones de sequía hidrológica en la zona Norte y Centro del Perú, al siguiente mes, en Abril las condiciones secas se extendieron cubriendo la mayor parte de la Vertiente peruana del Pacifico, con presencia de sequía extrema en las cuencas de: (Santa, Pativilca, Huaura y chancay).

Tres meses después, en el mes de Agosto, las condiciones de sequía hidrológica van desapareciendo, el mes de octubre se incrementa su intensidad, cubriendo una vasta cantidad de cuencas ubicadas en la zona Norte y Centro del Perú.

El mes de Noviembre, hay presencia de eventos moderadamente húmedos en la costa Norte, este proceso es explicado por el fenómeno del Niño (ENOS), mientras que el mes de diciembre se ha producido eventos extremadamente húmedos y moderadamente húmedos en la mayor parte de la costa peruana con graves pérdidas en los diferentes sectores productivos.



**Figura 38:** Extensión espacial de la intensidad promedio del IQE ocurrido entre los años de 1960 a 2005.

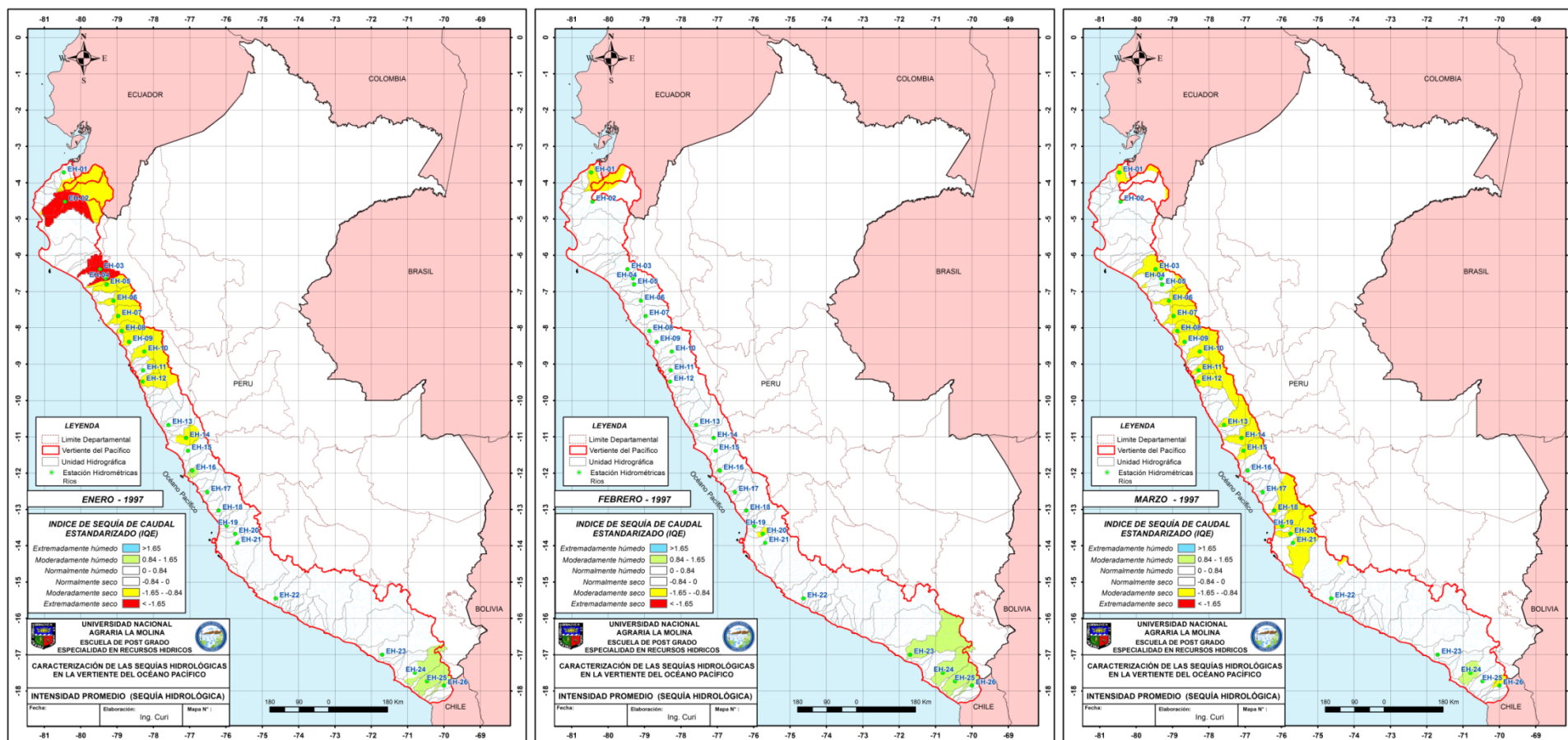


Figura 39: Caracterización espacial de la sequía hidrológica del año 1997 (Enero – Febrero - Marzo)

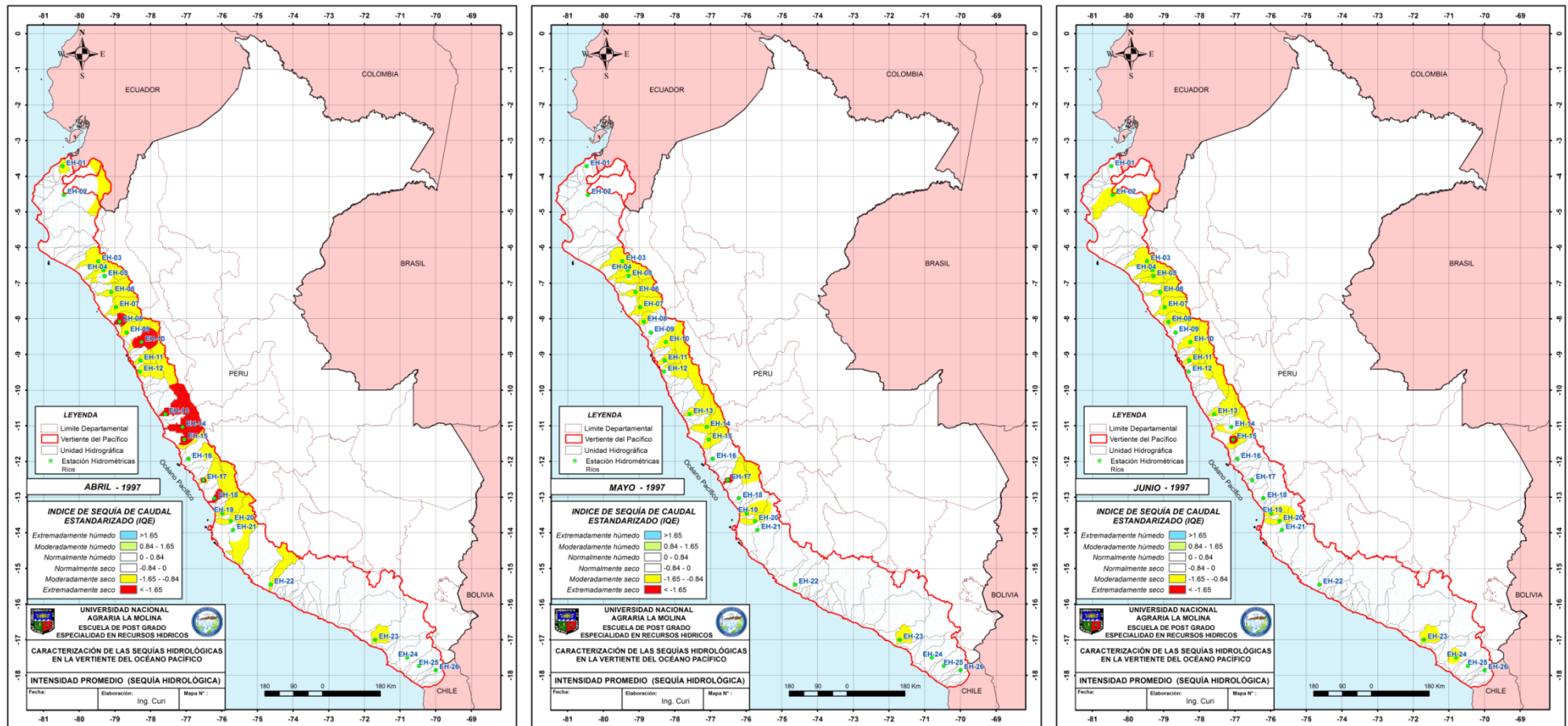


Figura 40: Caracterización espacial de la sequía hidrológica del año 1997 (Abril – Mayo - Junio)



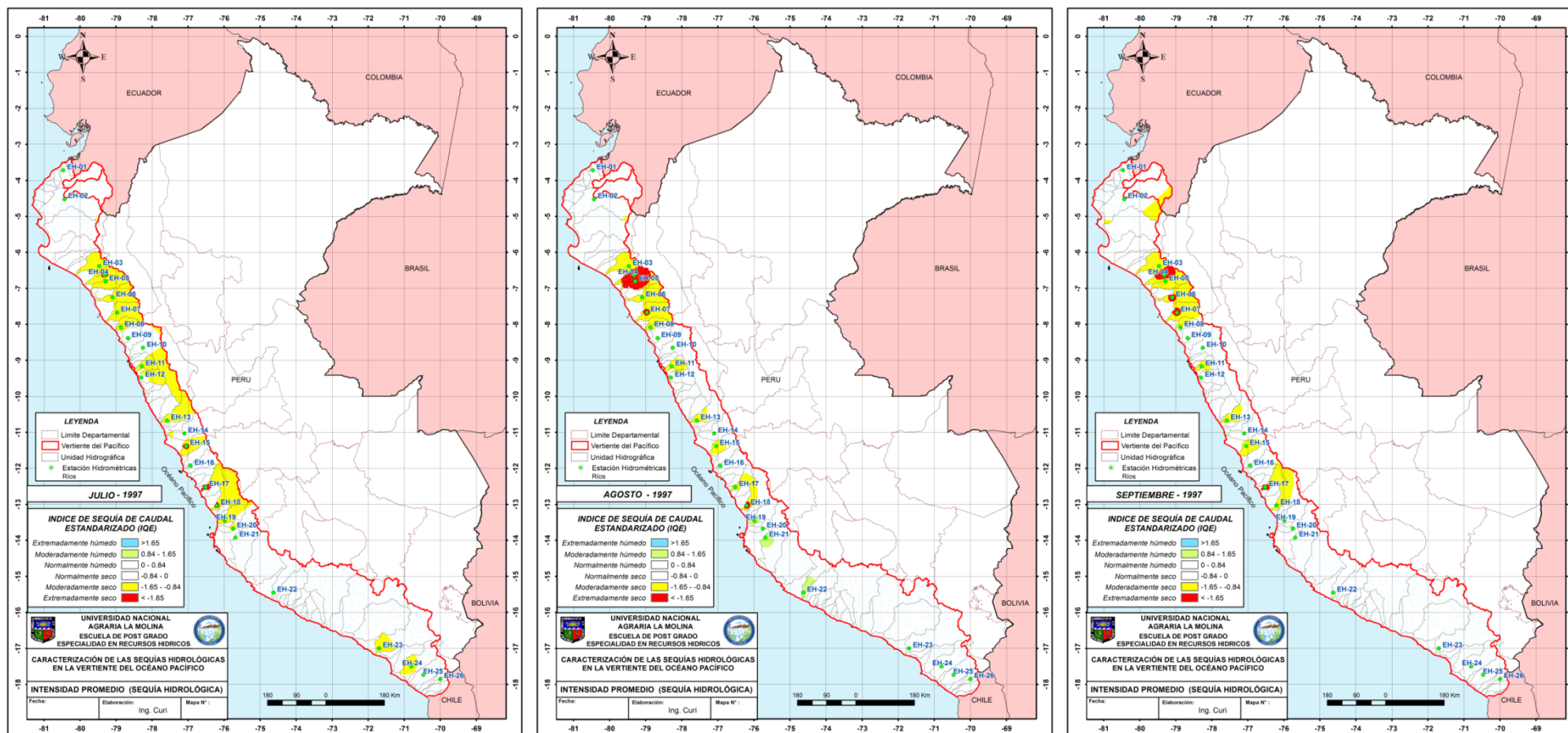


Figura 41: Caracterización espacial de la sequía hidrológica del año 1997 (Julio – Agosto - Septiembre)

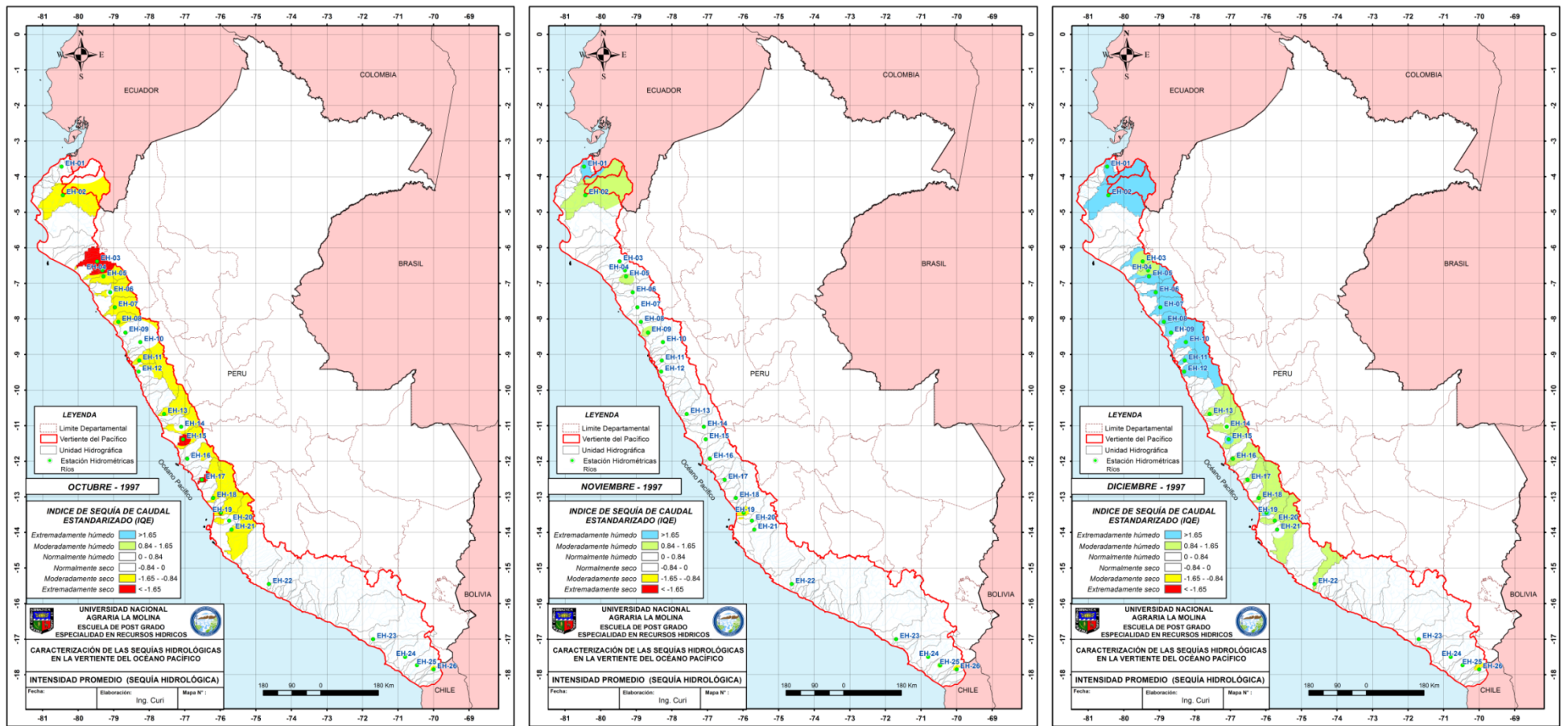


Figura 42: Caracterización espacial de la sequía hidrológica del año 1997 (Octubre – Noviembre - Diciembre)

## V. CONCLUSIONES

La caracterización de las sequías hidrológicas realizada en la presente investigación, mediante la aplicación del método de Umbrales a un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE), constituye un método alternativo para identificar el inicio, desarrollo y término de los eventos secos registrados en las principales unidades hidrográficas de Vertiente peruana del Pacífico. A partir de esta aplicación se extraen las siguientes conclusiones:

- A. Los datos hidrométricos recopilados, analizados mediante diferentes pruebas estadísticas, redujo las incertidumbres inherentes al proceso de recolección. Los supuestos básicos de toda variable hidroclimática (Homogeneidad y Estacionariedad), permitió elaborar una base hidrométrica (caudal mensual) de calidad, con una cobertura espacial y temporal lo suficientemente amplia para caracterizar los eventos de sequías hidrológica, ocurridos históricamente en la Vertiente peruana del Pacífico.
- B. El diagrama de boxplot, obtenido de los valores estandarizados de cada una de las seis distribuciones evaluadas, permitió identificar la robustez de tres Distribuciones de Probabilidad (DP), que aproximan a los valores estadísticamente esperados de toda variables estandarizada (media = 0 y desviación estándar =1), estas tres DP son: Valor Extremo Generalizado (GEV), Log Normal (LN3) y Logistic Generalizado (GLO), sin embargo las dos primeras distribuciones (GEV y LN3) tienden a subestimar y sobrestimar los valores estadísticamente esperados de la variable estandarizada (IQE).

La distribución seleccionada (Logistic Generalizado), forma un índice estandarizado capaz de caracterizar las sequías hidrológicas ocurridas en la Vertiente peruana del Pacífico. Sin embargo el comportamiento hídrico de un río o conjunto de ríos no puede ser descrito por una sola DP dada la marcada estacionalidad del recurso hídrico (avenida y estiaje), siendo estos comportamientos descritos por diferentes DP.

El método de bondad de ajuste denominado Distancia Mínima Ortogonal (DMO), evaluado mediante el diagrama de L-momentos ratios, es estadísticamente robusto al momento de elegir la mejor DP, este proporciona valores próximos a lo

estadísticamente esperados (0,1) garantizando la fiabilidad para caracterizar las sequías hidrológicas en una vasta cantidad de ríos en la Vertiente peruana del Pacífico.

- C. Finalmente el cálculo de un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE), permitió caracterizar espacial y temporalmente los eventos de sequía hidrológica ocurridos entre los años de 1960-2005 en la Vertiente peruana del Pacífico, evaluando sus tres principales características (duración, intensidad y extensión espacial), estas características se evaluó aplicando el método de Umbrales a la serie estandarizada del caudal mensual, estos Umbrales invariables en el tiempo y el espacio se fijaron en Percentil (20) o -0.84 en la escala del IQE para definir los eventos Moderadamente Secos y Percentil (5) o -1.65 en la escala del IQE para definir los eventos Extremadamente Secos.

Las sequías hidrológicas de una determinada intensidad y duración, no necesariamente tendrá el mismo impacto (severidad) en otras cuencas dentro de la Vertiente peruana del Pacífico, ya que la oferta hídrica anual varía considerablemente según la ubicación geográfica (Latitud y Longitud), de un análisis a los Umbrales invariables en el tiempo y espacio, se identificó los caudales que indican el inicio y/o termino de los eventos moderado y extremadamente secos, estos caudales limitan los periodos húmedos y secos en cada cuencas analizadas, valores inferiores indican que nos encontramos en un periodo de sequía (moderada y/o extrema).

Estos caudales identificados son elementos básicos para desarrollar una planificación operativa y apoyo a la toma de decisiones, requeridas a corto y mediano plazo para implantar medidas mitigantes ante los impactos negativos de las sequías hidrológicas en la Vertiente peruana del Pacífico.

La prueba de Mann-Kendall para detectar tendencias se aplicó a las 26 EH analizadas, detectando tendencia positiva en la EH-16 Chosica y tendencia negativa en la EH-24 Chivaya para un nivel significativo ( $\alpha = 0.05$ ), en términos de duración y severidad, los principales eventos secos se registraron en el Sur del Perú, mientras que la intensidad fue espacialmente significativa en una parte del Norte, Centro y Sur del Perú (bolsones de intensidad).

## VI. RECOMENDACIONES

- Este trabajo es una herramienta muy útil para los tomadores de decisión y planificadores, que les permita administrar el normal abastecimiento del recurso hídrico para las diferentes actividades productivas, y desarrollar la capacidad institucional sobre prevención en temas de sequía, desarrollando un sistema de alerta temprana a eventos de sequía.
- Debido a la escases de los registros hidrométricos y la dificultad que esto implica para el desarrollo de estudios detallados, se recomienda mantener la continuidad de los registros de caudales e instalar estaciones automáticas que brinden información en tiempo real en las subcuencas, a fin de contribuir con mayor precisión al conocimiento del potencial hídrico en estas subcuencas y alertar tempranamente ante eventos de sequía que se estén produciendo con el objetivo de minimizar los riesgos potenciales.
- Elaborar planes de mitigación ante posibles escenarios de sequía a nivel de cuencas
- Para estudios futuros en temas de sequías, se recomienda hacer cruces de información de otros índices estandarizados (SPI, SDI, IQE, etc), a fin de tener una idea clara de los impactos que ha ocasionado los eventos de sequía que se han producido históricamente en la Vertiente peruana del Pacífico y el resto del país.
- Instar a las instituciones y/o Ministerio encargados en temas ambientales a introducir nuevas metodologías para clasificar los rangos de vulnerabilidad de la sequía en los diferentes sectores (social, productivo, etc), a fin de contar en un futuro cercano con diversas metodologías acorde a nuestra realidad, para minimizar los riesgos que la sequía produce en la sociedad, generando como producto final un mapas nacional de zonificación de riesgo de sequías, el índice (IQE) y las características de las sequías que de él se derivan permitirán zonificar el riesgo y/o vulnerabilidad de las sequías en la Vertiente peruana del Pacífico.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramowitz, M; Stegun, I. A. 1965. Handbook of mathematical functions. U.S, New York. Dover Publications.
- Acuña A, J. 2010. Análisis regional de caudales medios mensuales para diversos niveles de persistencia de los ríos peruanos pertenecientes a la Vertiente del Océano Pacífico. Tesis M.Sc. Lima, Perú, UNALM.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua, PE) y MINAGRI (Ministerio de Agricultura, PE). 2010. Recursos Hídricos en el Perú. Lima, PE. 372 p.
- Beguería, S. 2002. Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en climatología e hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales. Información climática como herramienta de gestión ambiental. VII Reunión Nacional de Climatología 83-92p.
- Bobée, B; Ashkar, F. 1991. Gamma family and derived distributions applied in hydrology. Water Resources Publications, Littleton, CO.
- Brass, R.L. 1990. Hydrology: An introduction to hydrologic science. Reading, Mass: Addison-Wesley-Longman.
- CLD (La convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación). 2004. Compendium on method and tolos to evaluate impact of vulnerability and adaptation to clima change.
- Damberg, L. 2013. Analysis of Trends and Patterns of Droughts Using Satellite Data and Climate Model Simulations. Tesis M.Sc. Scania, Suecia, Lund University.
- Fattorelli, S; Fernandez, P. 2011. Diseño Hidrológico. FR, Paris. Edición digital.
- Fernández, B. 1997. Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile. Artículo publicado en Ingeniería del Agua. 4(4): 37-46 p.
- Fleig, A.K; Tallaksen, L.M; Hisdal, H; Demuth, S. 2006: A global evaluation of streamflow drought characteristics. Hydrology and Earth System Sciences 10: 535-552 p.

- García, A. 2008. Metodología para la generación y evaluación de políticas de operación en sistemas de recursos hídricos, Aplicación a un sistema de México. Tesis Ph.D. Valencia, España, UPV.
- Gonzalez, J. 2005. Caracterización Estocástica de la realización Espacio-Temporal de Eventos hidrológicos Extremos de sequías, Tesis Ph.D. Valencia, España, UPV.
- Greenwood, J. A; Landwehr, J. M; Matalas, N. C; Wallis, J. R., 1979. Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research* 15(5): 1049-1054 p
- Grubbs, F. E. 1969. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics* vol 11(1): 1-21p.
- Heddinghaus, T. R; Sabol, P. 1991. A review of the palmer drought severity index and where do we go from here. *applied climatology* 7: 242-246 p.
- Heim, R. 2002. A Review of Twentieth Century Drought Indices Used in the United States, *American Meteorological Society*. 1: 1149-1165p.
- Hosking, J.R.M; Wallis, J.R. 1997. *Regional Frequency Analysis: An Approach based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Hosking, J.R.M. 1990. L-moments: Analysis and estimación of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 52: 105-124 p.
- Hosking, J. R. 1986. The theory of probability weighted moments. Research Report RC12210, IBM Research Division, Yorktown Heights, N.Y.
- Hyun-Suk Shin; Salas, J. D. 2000. Regional drought analysis based on neural networks, *Journal of Hydrologic Engineering*, 145-155 p.
- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) 2009. Glosario corto de términos y conceptos importantes relacionados con el cambio climático.
- Karl, T.R; Knight, R.W. 1985. Atlas of monthly palmer hydrological drought indices (1931-1983) for the contiguous united states. *Historical climatology series*, 3-7 p.
- Kendall, M. G., 1975. *Rank Correlation Methods*, 4th ed., Charles Griffin: London. U.K 210 p.
- Keyantash, A; Dracup, A. 2004. An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*. 40: 1-13 p.

- Kroll, C.N; Vogel, R.M. 2002. Probability distribution of low streamflow series in the United States. *Journal of Hydrologic Engineering*.
- Kundzewicz, W; Rosbjerg, D; Simonovic, P; Takeuchi, K. 1993. Extreme hydrological events: Precipitation, Floods and Drought. *International Association of Hydrological Sciences*. 213: 1-7 p.
- Kundzewicz, W; Robson, A. 2000 Detecting Trend And Other Changes In Hydrological Data. *World Meteorological Organization* 45(1): 1-5 p.
- Lorenzo, J. 2012. Las sequías hidrológicas en la Península Ibérica: Análisis y caracterización espacio temporal, influencias climáticas y el efecto de la gestión hidrológica en un contexto de cambio global. Tesis Ph.D. Zaragoza, España.
- Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometría* 13(1): 245-259 p.
- McKee,T; Doesken, N; Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to times scales. *Eighth conference on applied Climatology*. 1: 1-6 p.
- Modelo digital de elevación de terreno (DEM):  
<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>.
- Nalbantis, I; Tsakiris, G. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*. 881-897 p.
- Núñez, D; Muñoz, C; Reyes, V; Velasco, I; Gadsden, H. 2007. Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en chihuahua, México. *Agrociencia*. Vol. 41: 253-262 p.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2006. Vigilancia y alerta temprana de la sequía. N° 1006.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 1966. Vocabulario Meteorológico Internacional. Nota Técnica N° 182. Ginebra, Suiza. p 91.
- Palmer W.C. 1965. Meteorological drought. *U.S. Weather Bureau Research*, 45-58p.
- Panu, U; Sharma, T. 2002. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*. 19-30 p.
- Pettit, A. N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*. 2(28): 126-135 p.
- Rahman, M; Sarkar, S; Najafi, M; Rai, R. 2013. Regional Extreme Rainfall Mapping for Bangladesh Using L-Moment Technique. *Journal of Hydrologic Engineering*. 18(5), 603-615 p.



- Rao, A. R; Hamed, K. H. 2000. Flood frequency analysis, CRC Press, Boca Raton, FL, 350 p.
- Salati, E; Nobre, A. 1991. Possible climatic impacts of tropical deforestation. *Climatic Change*, 19: 177-196 p.
- Shafer, B.A; Dezman, L.E. 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snow pack runoff areas. In: *The Western Snow Conference*. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA.
- Shukla, S; Wood, A.W. 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters* 35(2).
- Stedinger, R.J; Vogel, M.R; Georgion, F.E. 1993. Chapter 18: Frequency analysis of extreme events. *Handbook of hydrology*. U.S, New York. McGraw-Hill.
- Tallaksen, L.M; Madsen, H; Clausen, B. 1997: On the definition and modeling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal* 43: 15-33 p.
- Valiente, M. 2001. Sequía: Definiciones, topologías y Métodos de Cuantificación. *Investigaciones Geográficas*. 26: 59-80 p.
- Van Loon, A.F; Van Lanen, H.A; Hisdal, H; Tallaksen, L.M; Fendeková, M; Oosterwijk, J; Horvát, O; Machlica, A. 2010: Understanding hydrological winter drought in Europe. *IAHS Publ.* 340, Wallingford, UK.
- Vauchel, P. 2004. Derniers développements du logiciel Hydraccess, *Institut de recherche pour le développement* 1: 247-251 p.
- Velasco, I. 2013. Agua, sequía y cambio climático.   
[https://www.imta.gob.mx/conamexphi/index.php?option=com\\_content&view=article&id=435:agua-sequia-y-cambio-climatico&catid=16:noticias-conamexphi&Itemid=62](https://www.imta.gob.mx/conamexphi/index.php?option=com_content&view=article&id=435:agua-sequia-y-cambio-climatico&catid=16:noticias-conamexphi&Itemid=62)
- Vicente, S.M; López, M.J; Begueria, S; Lorenzo, J; Azorin, C; Morán, E. 2012. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering* 318-332 p.
- Villalobos, A. 2007. Análisis y seguimiento de distintos tipos de sequía en la cuenca del río Júcar. Tesis Ph.D. Valencia, España, UPV.
- Vogel, R. M; Thomas, W. O; McMahon, T. A. 1993. Flood frequency model selection in southwestern United States. *Journal Water Resour. Plann. Manage.*, 119(3): 353–366 p.

- Weghorst, K.M. 1996. The reclamation drought index: guidelines and practical applications. Bureau of Reclamation. Denver, CO. 6 p.
- Wilhite, D.A; Glantz, M.H. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* 10(3):111-120 p.
- Yue, S; Pilon, P; Phinney, B; Cavadias, G. 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes* 16(9): 1807-1829 p.
- Yevjevich V. 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Colorado State University, Hydrology Paper No. 23.

## VIII. ANEXOS

- ANEXO I: DISTRIBUCIONES Y SUS L-MOMENTOS
- ANEXO II: PRUEBAS ESTADÍSTICAS
- ANEXO III: GRAFICAS DE BOXPLOT
- ANEXO IV: GRAFICAS DEL TEST DE GRUBBS (anual)
- ANEXO V: REGIONALIZACIÓN - MVR
- ANEXO VI: GRAFICAS DEL TEST DE PETTIT (anual)
- ANEXO VII: ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS L-MOMENTOS
- ANEXO VIII: DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL
- ANEXO IX: INTENSIDAD, DURACIÓN Y MAGNITUD
- ANEXO X: MEDIA MÓVIL (72 meses)

---

## **ANEXO I: DISTRIBUCIONES Y SUS L-MOMENTOS**

## I.1.- DISTRIBUCIÓN GENERAL DE PARETO

### I.1.1.- DEFINICIÓN

Parámetros (3):  $\xi$  (localización),  $\alpha$  (escala),  $k$  (forma).

Rango de  $x$ :  $\xi \leq x \leq \xi + \alpha/k$  para  $k > 0$ ;  $\xi \leq x < \infty$  para  $k \leq 0$ .

$$f(x) = \alpha^{-1} e^{-(1-k)y}, \quad y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi) / \alpha\}, & k \neq 0 \\ (x - \xi) / \alpha, & k = 0 \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

$$F(x) = 1 - e^{-y} \quad (\text{I.2})$$

$$x(F) = \begin{cases} \xi + \alpha\{1 - (1 - F)^k\} / k, & k \neq 0 \\ \xi - \alpha \log(1 - F), & k = 0 \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

Casos especiales:  $k = 0$  es la distribución exponencial;  $k = 1$  es la distribución uniforme en el intervalo  $\xi \leq x \leq \xi + \alpha$ .

### I.1.2.- L-MOMENTOS

Los L-momentos se definen para  $k > -1$ .

$$\lambda_1 = \xi + \alpha / (1 + k) \quad (\text{I.4})$$

$$\lambda_2 = \alpha / \{(1 + k)(2 + k)\} \quad (\text{I.5})$$

$$\tau_3 = (1 - k) / (3 + k) \quad (\text{I.6})$$

$$\tau_4 = (1 - k)(2 - k) / \{(3 + k)(4 + k)\} \quad (\text{I.7})$$

La relación entre  $\tau_3$  y  $\tau_4$  viene dada por

$$\tau_4 = \frac{\tau_3(1 + 5\tau_3)}{5 + \tau_3} \quad (\text{I.8})$$

### I.1.3.- PARÁMETROS

Si  $\xi$  es conocido, los dos parámetros  $\alpha$  y  $k$  vienen dados por

$$k = (\lambda_1 - \xi) / \lambda_2 - 2, \quad \alpha = (1 + k)(\lambda_1 - \xi) \quad (\text{I.9})$$

Si  $\xi$  es desconocido, los tres parámetros vienen dados por

$$k = (1 - 3\tau_3) / (1 + \tau_3), \quad \alpha = (1 + k)(2 + k)\lambda_2, \quad \xi = \lambda_1 - (2 + k)\lambda_2 \quad (\text{I.10})$$

## I.2.- DISTRIBUCIÓN GENERAL DE VALORES EXTREMOS

### I.2.1.- DEFINICIÓN

Parámetros (3):  $\xi$  (localización),  $\alpha$  (escala),  $k$  (forma).

Rango de  $x$ :  $-\infty < x \leq \xi + \alpha/k$  para  $k > 0$ ;  $-\infty < x < \infty$  para  $k = 0$ ;  $\xi + \alpha/k \leq x < \infty$  para  $k < 0$ .

$$f(x) = \alpha^{-1} e^{-(1-k)y}, \quad y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\}, & k \neq 0 \\ (x - \xi)/\alpha, & k = 0 \end{cases} \quad (I.11)$$

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (I.12)$$

$$x(F) = \begin{cases} \xi + \alpha\{1 - (-\log F)^k\}/k, & k \neq 0 \\ \xi - \alpha \log(-\log F), & k = 0 \end{cases} \quad (I.13)$$

Casos especiales:  $k = 0$  es la distribución Gumbel;  $k = 1$  es una distribución exponencial revertida; esto es,  $1 - F(-x)$  es la función de distribución acumulada de una distribución exponencial.

Las distribuciones de Valores Extremos se dividen en tres tipos, caracterizados por las siguientes funciones de distribución acumulada:

$$\text{Tipo I: } F(x) = \exp(e^{-x}), \quad -\infty < x < \infty \quad (I.14)$$

$$\text{Tipo II: } F(x) = \exp(-x^{-\delta}), \quad 0 \leq x < \infty \quad (I.15)$$

$$\text{Tipo III: } F(x) = \exp(-|x|^\delta), \quad -\infty < x \leq 0 \quad (I.16)$$

La distribución General de Valores Extremos recoge todos estos tipos, I, II y III, que corresponden a  $k = 0$ ,  $k < 0$ , y  $k > 0$ , respectivamente. La distribución Weibull, definida por

$$F(x) = 1 - \exp[-\{(x - \zeta)/\beta\}^\delta], \quad \zeta \leq x < \infty \quad (I.17)$$

es una distribución General de Valores Extremos revertida, con parámetros

$$k = 1/\delta, \quad \alpha = \beta/\delta, \quad \xi = \zeta - \beta \quad (I.18)$$

### I.2.2.- L-MOMENTOS

Los L-momentos están definidos para  $k > -1$ .

$$\lambda_1 = \xi + \alpha\{1 - \Gamma(1+k)\}/k \quad (I.19)$$

$$\lambda_2 = \alpha(1 - 2^{-k})\Gamma(1+k)/k \quad (I.20)$$

$$\tau_3 = 2(1 - 3^{-k})/(1 - 2^{-k}) - 3 \quad (I.21)$$

$$\tau_4 = \{5(1 - 4^{-k}) - 10(1 - 3^{-k}) + 6(1 - 2^{-k})\}/(1 - 2^{-k}) \quad (I.22)$$

Aquí  $\Gamma(\cdot)$  denota la función Gamma

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (I.23)$$

### I.2.3.- PARÁMETROS

El valor de  $k$  se estima resolviendo la expresión (I.21) para  $k$ . No es posible obtener una solución explícita, pero la aproximación siguiente tiene una precisión mayor que  $9 \times 10^{-4}$  para  $-0.5 \leq \tau_3 \leq 0.5$ :

$$k \approx 7.8590c + 2.9554c^2, \quad c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\log 2}{\log 3} \quad (I.24)$$

Los otros parámetros vienen dados por

$$\alpha = \frac{\lambda_2 k}{(1 - 2^{-k})\Gamma(1+k)}, \quad \xi = \lambda_1 - \alpha \{1 - \Gamma(1+k)\} / k. \quad (I.25)$$

## I.3.- DISTRIBUCIÓN LOGÍSTICA GENERALIZADA

### I.3.1.- DEFINICIÓN

Parámetros (3):  $\xi$  (localización),  $\alpha$  (escala),  $k$  (forma).

Rango de  $x$ :  $-\infty < x \leq \xi + \alpha/k$  si  $k > 0$ ;  $-\infty < x < \infty$  si  $k = 0$ ;  $\xi + \alpha/k \leq x < \infty$  si  $k < 0$ .

$$f(x) = \frac{\alpha^{-1} e^{-(1-k)y}}{(1 + e^{-y})^2}, \quad y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\}, & k \neq 0 \\ (x - \xi)/\alpha, & k = 0 \end{cases} \quad (I.26)$$

$$F(x) = 1/(1 + e^{-y}) \quad (I.27)$$

$$x(F) = \begin{cases} \xi + \alpha[1 - \{(1-F)/F\}^k] / k, & k \neq 0 \\ \xi - \alpha \log\{(1-F)/F\}, & k = 0 \end{cases} \quad (I.28)$$

Casos especiales:  $k = 0$  es la distribución Logística.

Esta generalización de la distribución Logística difiere de otras definidas en la literatura. Se trata de una versión reparametrizada de la distribución LogLogística de Ahmad et al. (1988). Se ha adoptado este nombre para reflejar la similitud de la distribución con la General de Pareto y con la General de Valores Extremos.

### I.3.2.- L-MOMENTOS

Los L-momentos vienen definidos para  $-1 < k < 1$ .

$$\lambda_1 = \xi + \alpha(1/k - \pi / \sin k\pi) \quad (I.29)$$

$$\lambda_2 = \alpha k \pi / \sin k\pi \quad (I.30)$$

$$\tau_3 = -k \quad (I.31)$$

$$\tau_4 = (1 + 5k^2)/6 \quad (I.32)$$

### I.3.3.- PARÁMETROS

$$k = -\tau_3, \quad \alpha = \frac{\lambda_2 \sin k\pi}{k\pi}, \quad \xi = \lambda_1 - \alpha \left( \frac{1}{k} - \frac{\pi}{\sin k\pi} \right) \quad (I.33)$$

## I.4.- DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

### I.4.1.- DEFINICIÓN

Parámetros (3):  $\xi$  (localización),  $\alpha$  (escala),  $k$  (forma).

Rango de  $x$ :  $-\infty < x \leq \xi + \alpha/k$  para  $k > 0$ ;  $-\infty < x < \infty$  para  $k = 0$ ;  $\xi + \alpha/k \leq x < \infty$  para  $k < 0$ .

$$f(x) = \frac{e^{ky-y^2/2}}{\alpha\sqrt{2\pi}}, \quad y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\}, & k \neq 0 \\ (x - \xi)/\alpha, & k = 0 \end{cases} \quad (I.34)$$

$$F(x) = \Phi(y) \quad (I.35)$$

$x(F)$  no tiene forma analítica explícita

Aquí  $\Phi$  es la función de distribución acumulada de una distribución Normal estándar.

Caso especial:  $k = 0$  es la distribución Normal con parámetros  $\xi$  y  $\alpha$ .

La distribución LogNormal se define habitualmente por

$$F(x) = \Phi\left\{\frac{\log(x - \zeta) - \mu}{\sigma}\right\}, \quad \zeta \leq x < \infty \quad (I.36)$$

La reparametrización de la distribución LogNormal en términos de  $\xi$ ,  $\alpha$  y  $k$  es una pequeña modificación de la parametrización de Munro y Wixley (1970). Posee varias ventajas respecto a la parametrización habitual con  $\mu$ ,  $\sigma$  y  $\zeta$ :

- dentro de una única distribución incluye la distribución LogNormal con asimetría positiva y límite inferior ( $k < 0$ ), y la distribución LogNormal con asimetría negativa y límite superior ( $k > 0$ );
- incluye la distribución Normal como un caso especial ( $k = 0$ ) en lugar de como un límite inalcanzable.
- muestra la similitud entre la estructura de la distribución LogNormal, la General de Pareto y la General de Valores Extremos;
- sus parámetros son más significativos y más estables a la hora de estimar sus valores que los de la parametrización estándar, particularmente cuando la asimetría es próxima a cero.



En esta parametrización, la distribución LogNormal es la de una variable aleatoria  $X$  relacionada con otra variable aleatoria  $Z$  de distribución Normal estándar de media 0 varianza 1, mediante

$$X = \begin{cases} \xi + \alpha(1 - e^{-kZ})/k, & k \neq 0 \\ \xi + \alpha Z, & k = 0 \end{cases} \quad (\text{I.37})$$

La parametrización estándar (I.36) puede ser obtenida a partir de la presentada aquí mediante

$$k = -\sigma, \quad \alpha = \sigma e^\mu, \quad \xi = \zeta + e^\mu \quad (\text{I.38})$$

y se podrían obtener expresiones para ella a partir de las mostradas a continuación.

#### I.4.2.- L-MOMENTOS

Los L-momentos se definen para cualquier valor de  $k$ .

$$\lambda_1 = \xi + \alpha(1 - e^{k^2/2})/k \quad (\text{I.39})$$

$$\lambda_2 = \frac{\alpha}{k} e^{k^2/2} \left\{ 1 - 2\Phi\left(-k/\sqrt{2}\right) \right\} \quad (\text{I.40})$$

No hay expresiones simples para los ratios de  $L$ -momentos. Son función únicamente de  $k$ , y pueden ser computados por integración numérica, como en Hosking (1996). Alternativamente, se pueden usar aproximaciones basadas en funciones racionales. Las siguientes aproximaciones para  $\tau_3$  y  $\tau_4$  tienen mayor precisión que  $2 \times 10^{-7}$  y  $5 \times 10^{-7}$ , respectivamente, para  $|k| \leq 4$ , lo que corresponde a  $|\tau_3| \leq 0.99$  y  $\tau_4 \leq 0.98$ :

$$\tau_3 \approx -k \frac{A_0 + A_1 k^2 + A_2 k^4 + A_3 k^6}{1 + B_1 k^2 + B_2 k^4 + B_3 k^6} \quad (\text{I.41})$$

$$\tau_4 \approx \tau_4^0 + k^2 \frac{C_0 + C_1 k^2 + C_2 k^4 + C_3 k^6}{1 + D_1 k^2 + D_2 k^4 + D_3 k^6} \quad (\text{I.42})$$

Los coeficientes usados en las aproximaciones vienen dados en la tabla I.1.

#### I.4.3.- PARÁMETROS

El parámetro de forma,  $k$ , es función solamente de  $\tau_3$ . No hay solución explícita posible, pero la siguiente aproximación tiene una precisión relativa mayor que  $2.5 \times 10^{-6}$  para  $|\tau_3| \leq 0.94$ , lo que corresponde a  $|k| \leq 3$ :

$$k \approx -\tau_3 \frac{E_0 + E_1 \tau_3^2 + E_2 \tau_3^4 + E_3 \tau_3^6}{1 + F_1 \tau_3^2 + F_2 \tau_3^4 + F_3 \tau_3^6} \quad (\text{I.43})$$

Los coeficientes utilizados en la aproximación son los mostrados en la tabla I.1. El resto de parámetros vienen pues dados por

$$\alpha = \frac{\lambda_2 k e^{-k^2/2}}{1 - 2\Phi(-k/\sqrt{2})}, \quad \xi = \lambda_1 - \frac{\alpha}{k} (1 - e^{k^2/2}) \quad (\text{I.44})$$

Tabla I.1. Coeficientes de las aproximaciones (I.41) hasta (I.43).

$\tau_4^0 = 1.2260172 \times 10^{-1}$		
$A_0 = 4.8860251 \times 10^{-1}$	$C_0 = 1.8756590 \times 10^{-1}$	$E_0 = 2.0466534$
$A_1 = 4.4493076 \times 10^{-3}$	$C_1 = -2.5352147 \times 10^{-3}$	$E_1 = -3.6544371$
$A_2 = 8.8027039 \times 10^{-4}$	$C_2 = 2.6995102 \times 10^{-4}$	$E_2 = 1.8396733$
$A_3 = 1.1507084 \times 10^{-6}$	$C_3 = -1.8446680 \times 10^{-6}$	$E_3 = -0.20360244$
$B_1 = 6.4662924 \times 10^{-2}$	$D_1 = 8.2325617 \times 10^{-2}$	$F_1 = -2.0182173$
$B_2 = 3.3090406 \times 10^{-3}$	$D_2 = 4.2681448 \times 10^{-3}$	$F_2 = 1.2420401$
$B_3 = 7.4290680 \times 10^{-5}$	$D_3 = 1.1653690 \times 10^{-4}$	$F_3 = -0.21741801$

## I.5.- DISTRIBUCIÓN DE PEARSON TIPO III

### I.5.1.- DEFINICIÓN

Parámetros (3):  $\mu$  (localización),  $\sigma$  (escala),  $\gamma$  (forma).

Si  $\gamma \neq 0$ , sea  $\alpha = 4/\gamma^2$ ,  $\beta = 1/2 \sigma|\gamma|$ , y  $\xi = \mu - 2\sigma/\gamma$ . Si  $\gamma > 0$ , el rango de  $x$  es  $\xi \leq x < \infty$ , y

$$f(x) = \frac{(x - \xi)^{\alpha-1} e^{-(x-\xi)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (I.45)$$

$$F(x) = G\left(\alpha, \frac{x - \xi}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha) \quad (I.46)$$

Si  $\gamma = 0$ , la distribución es Normal, el rango de  $x$  es  $-\infty < x < \infty$ , y

$$f(x) = \phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right), \quad F(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \quad (I.47)$$

Si  $\gamma < 0$ , el rango de  $x$  es  $-\infty < x \leq \xi$ , y

$$f(x) = \frac{(\xi - x)^{\alpha-1} e^{-(\xi-x)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (I.48)$$

$$F(x) = 1 - G\left(\alpha, \frac{\xi - x}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha) \quad (I.49)$$

En cada caso,  $x(F)$  no tiene expresión analítica explícita.  $\Gamma$  es la función Gamma, definida en (I.23), y

$$G(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (I.50)$$

es la función Gamma incompleta;  $\phi$  y  $\Phi$  son la función de distribución Normal y su correspondiente acumulada.

Casos especiales:  $\gamma = 2$  es la distribución exponencial;  $\gamma = 0$  es la Normal;  $\gamma = -2$  es la exponencial revertida.

La distribución de Pearson tipo III se remite generalmente al caso  $\gamma > 0$ , y se suele parametrizar por medio de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\xi$ . La parametrización aquí expuesta se extiende a las distribuciones de Pearson tipo III más usuales. Esto permite usar la distribución de Pearson tipo III cuando los datos tienen una posible asimetría negativa. Los parámetros  $\mu$ ,  $\sigma$  y  $\gamma$  son los momentos convencionales de la distribución.

### I.5.2.- L-MOMENTOS

Se muestran a continuación las expresiones de los L-momentos de la distribución referidos a sus parámetros estándar, por ser más sencillas. Se asume  $\gamma > 0$ . Los resultados en el caso  $\gamma < 0$  serían los obtenidos al cambiar los signos de  $\lambda_1$ ,  $\tau_3$  y  $\xi$  en las expresiones (I.51) hasta (I.58).

Los L-momentos se definen para todos los valores de  $\alpha$  entre 0 e  $\infty$ .

$$\lambda_1 = \xi + \alpha\beta \quad (I.51)$$

$$\lambda_2 = \pi^{-1/2} \beta \Gamma(\alpha + \frac{1}{2}) / \Gamma(\alpha) \quad (I.52)$$

$$\tau_3 = 6I_{1/3}(\alpha, 2\alpha) - 3 \quad (I.53)$$

donde

$$I_x(p, q) = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)\Gamma(q)} \int_0^x t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt \quad (I.54)$$

No hay una expresión simple para  $\tau_4$ , si bien tanto  $\tau_4$  como  $\tau_3$  se pueden aproximar en función de  $\alpha$  mediante funciones racionales. Las siguientes aproximaciones tienen una precisión del orden de  $10^{-6}$ . Para  $\alpha \geq 1$ ,

$$\tau_3 \approx \alpha^{-1/2} \frac{A_0 + A_1\alpha^{-1} + A_2\alpha^{-2} + A_3\alpha^{-3}}{1 + B_1\alpha^{-1} + B_2\alpha^{-2}} \quad (I.55)$$

$$\tau_4 \approx \frac{C_0 + C_1\alpha^{-1} + C_2\alpha^{-2} + C_3\alpha^{-3}}{1 + D_1\alpha^{-1} + D_2\alpha^{-2}} \quad (I.56)$$

Para  $\alpha < 1$ ,

$$\tau_3 \approx \frac{1 + E_1\alpha + E_2\alpha^2 + E_3\alpha^3}{1 + F_1\alpha + F_2\alpha^2 + F_3\alpha^3} \quad (I.57)$$

$$\tau_4 \approx \frac{1 + G_1\alpha + G_2\alpha^2 + G_3\alpha^3}{1 + H_1\alpha + H_2\alpha^2 + H_3\alpha^3} \quad (I.58)$$

Los coeficientes de la aproximación son los recogidos en la tabla I.2.

**I.5.3.- PARÁMETROS**

Para estimar  $\alpha$  se resuelve (I.53) reemplazando  $\tau_3$  por  $|\tau_3|$  para posibilitar la resolución en caso de que  $\tau_3$  sea negativo. La siguiente aproximación tiene una precisión relativa mayor que  $5 \times 10^{-5}$  para cualquier valor de  $\alpha$ . Para  $0 < |\tau_3| < 1/3$  y definiendo  $z = 3\pi \tau_3^2$ ,

$$\alpha \approx \frac{1 + 0.2906z}{z + 0.1882z^2 + 0.0442z^3} \tag{I.59}$$

Para  $1/3 \leq |\tau_3| < 1$  y con  $z = 1 - |\tau_3|$ ,

$$\alpha \approx \frac{0.36067z + 0.59567z^2 + 0.25361z^3}{1 - 2.78861z + 2.56096z^2 + 0.77045z^3} \tag{I.60}$$

Dado  $\alpha$ , los parámetros definidos al principio de la sección se obtienen como sigue:

$$\gamma = 2\alpha^{-1/2} \text{sign}(\tau_3) , \quad \sigma = \lambda_2 \pi^{1/2} \alpha^{1/2} \Gamma(\alpha) / \Gamma(\alpha + 1/2) , \quad \mu = \lambda_1 \tag{I.61}$$

Tabla I.2. Coeficientes de las aproximaciones de  $\tau_4$  como  $\tau_3$  en función de  $\alpha$ .

$A_0 = 3.2573501 \times 10^{-1}$	$C_0 = 1.2260172 \times 10^{-1}$
$A_1 = 1.6869150 \times 10^{-1}$	$C_1 = 5.3730130 \times 10^{-1}$
$A_2 = 7.8327243 \times 10^{-2}$	$C_2 = 4.3384378 \times 10^{-2}$
$A_3 = -2.9120539 \times 10^{-3}$	$C_3 = 1.1101277 \times 10^{-3}$
$B_1 = 4.6697102 \times 10^{-1}$	$D_1 = 1.8324466 \times 10^{-1}$
$B_2 = 2.4255406 \times 10^{-1}$	$D_2 = 2.0166036 \times 10^{-1}$
$E_1 = 2.3807576$	$G_1 = 2.1235833$
$E_2 = 1.5931792$	$G_2 = 4.1670213$
$E_3 = 1.1618371 \times 10^{-1}$	$G_3 = 3.1925299$
$F_1 = 5.1533299$	$H_1 = 9.0551443$
$F_2 = 7.1425260$	$H_2 = 2.6649995 \times 10^1$
$F_3 = 1.9745056$	$H_3 = 2.6193668 \times 10^1$

---

**ANEXO II: PRUEBAS ESTADÍSTICAS IMPLEMENTADAS**

**(PRUEBA DE MANN-KENDALL)**

**(PRUEBA DE PETITT)**

**(PRUEBA DE GRUBBS)**

**a) Test de Mann-Kendall**

La prueba de Mann-Kendall (MK), también llamada prueba de tau Kendall por (Mann, 1945) y (Kendall, 1975), es una prueba no paramétrica basada en el rango para evaluar la importancia de una tendencia, y ha sido ampliamente utilizado en detección de tendencia en estudios hidrológicos.

La hipótesis nula  $H_0$ : No existe una tendencia en la serie  $(X_i, i= 1, 2, \dots, n)$ .  
 La hipótesis alternativa  $H_1$ : Hay una tendencia en la serie.

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

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

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

$$\text{Sgn } \theta = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \text{si } \theta < 0 \end{cases} \tag{II.2}$$

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

$$E( S ) = 0 \tag{II.3}$$

$$V( S ) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{m=1}^n t_m m(m-1)(2m+5)}{18} \tag{II.4}$$

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

$$Z = \begin{cases} = \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}, & \text{si } S > 0 & \text{(II.5)} \\ = 0, & \text{si } S = 0 & \text{(II.6)} \\ = \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}}, & \text{si } S < 0 & \text{(II.7)} \end{cases}$$

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

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-t^2/2} dt \quad (\text{II.8})$$

Si los datos de la muestra están correlacionados serialmente, será necesario blanquear previamente los datos y aplicar una corrección para calcular la varianza.

**Metodología de pre-blanqueo TFPW**

El procedimiento de pre-blanqueo propuesto por (Yue et al., 2002b) para eliminar el efecto de la correlación serial en la aplicación de la prueba MK es denominado pre-blanqueo libre de tendencia (trend free pre-whitening, TFPW). Esta técnica propone remover de la serie estandarizada la tendencia, estimada por algún método robusto antes de calcular el coeficiente de autocorrelación de retardo-1 ( $r_1$ ). De esta forma se resuelve el problema de la influencia de la tendencia en la estimación del coeficiente de autocorrelación, mientras que la remoción de la tendencia no afecta al proceso autorregresivo subyacente. Se asume que la tendencia es lineal y se elimina de la serie según:

$$Y_t = X_t - T_t = X_t - bt \quad (\text{II.9})$$

Se estima el coeficiente  $r_1$  de la serie  $Y_t$  y si éste no es significativamente distinto de cero, la serie se considera independiente y la prueba MK se aplica a la serie original. Si  $r_1$  es significativamente distinto de cero, la serie  $Y_t$  se pre-blanquea a fin de remover el proceso AR(1) como:

$$Y'_t = Y_t - r_1 Y_{t-1} \quad (\text{II.10})$$

La tendencia estimada y la serie  $Y'_t$ , compuesta por residuos que deben ser independientes, se combinan como:

$$Y''_t = Y'_t - T_t \quad (\text{II.11})$$

y la prueba MK se aplica a la serie  $Y''_t$ , evitando de esta forma el efecto negativo de la correlación serial (Yue et al. 2002b).

**a) Test de Pettitt**

Pettitt (1979) desarrolló una prueba no paramétrica que es capaz de localizar el periodo (mes o año) cuando se produzca una ruptura (salto). Una ruptura se define como un cambio en la ley de probabilidades  $f(x)$  de una serie cronológica en un instante dado (normalmente desconocido). Según (CERESTA, 1986). La serie estudiada es dividida en dos sub-muestras de tamaño  $m$  y  $n$  respectivamente. Los valores de las dos muestras son reagrupados y ordenados en forma creciente.

Un estadístico es definido a partir de estas dos sumas y se prueba una hipótesis nula en donde se asume que las dos sub-muestras pertenecen a la misma población. Esta prueba fue modificada por Pettitt (Pettitt, 1979), de esta forma la hipótesis nula de la prueba denota la ausencia de ruptura en la serie para datos cronológicos.

El estadístico propuesto es:

$$t = 2 - T \tag{II.12}$$

$$V_{t,T} = \sum_{j=1}^T \text{sgn}(X_t - X_j) \tag{II.13}$$

$$\text{Sgn}(x) = \begin{cases} = 1, & \text{si } x > 0 \\ = 0, & \text{si } x = 0 \\ = -1, & \text{si } x < 0 \end{cases} \tag{II.14}$$

$$\tag{II.15}$$

$$\tag{II.16}$$

La prueba calcula para  $1 \leq t \leq T$ . el estadístico de la prueba es:

$$k(t) = \text{MAX}_{1 \leq t \leq T} |U_{t,T}| \tag{II.17}$$

El valor-P es calculado por:

$$p\text{-valor} \cong 2 \exp \left\{ \frac{-6(k(t))^2}{(T^3 + T^2)} \right\} \tag{II.18}$$

Los valores críticos de “K” pueden ser calculados por la ecuación:

$$K_{\text{crítico}} = \pm \sqrt{\frac{-\ln(p/2)(T^3 + T^2)}{6}} \tag{II.19}$$

La prueba de Pettit señala un cambio brusco cuando el valor máximo ( $K_{\text{crítico}} > k$ ) es significativo al nivel crítico de la prueba para un nivel de significancia definido ( $\alpha = 0,05$ ).



### b) Test de Grubbs

Es una técnica estadística para el tratamiento de datos cuantitativos sensible a la presencia de valores atípicos en un conjunto de datos de valor  $N$  (Grubbs, F. 1969).

La prueba se basa en el criterio de “distancia del valor sospechado respecto a la media del conjunto de datos en comparación con la desviación estándar”.

La prueba estadística calcula “ $G$ ” de Grubbs.

$$G = \frac{|X_{atipico} - \bar{X}|}{S} \quad (II.20)$$

Dónde:

- $\bar{X}$  = media de los valores de  $N$
- $X_{atipico}$  = valor anómalo sospechoso
- $S$  = desviación estándar de los valores de  $N$

La prueba de Grubbs define la siguiente Hipótesis.

$H_0$ : No hay valores atípicos en los datos

$H_a$ : El valor mínimo o máximo es un valor atípico en los datos.

El estadístico  $G$ , es comparado con un valor crítico de  $G$  según el tamaño de la muestra y el nivel de significación seleccionado. Si el estadístico  $G$  es más grande que el  $G$  crítico, la hipótesis nula es rechazada y la conclusión es que el dato bajo consideración es un outlier.

En el **Cuadro 1** se muestra los valores críticos para diferentes niveles de confianza (95% y 99%) y diferentes valores de  $N$ .

**Cuadro 1** Valores críticos del Test de Grubbs

<b>N</b>	<b>G<sub>critical</sub></b> <b>(95%)**</b>	<b>G<sub>critical</sub></b> <b>(99%)**</b>	<b>N</b>	<b>G<sub>critical</sub></b> <b>(95%)**</b>	<b>G<sub>critical</sub></b> <b>(99%)**</b>
<b>3</b>	1.15	1.15	<b>19</b>	2.53	2.85
<b>4</b>	1.46	1.49	<b>20</b>	2.56	2.88
<b>5</b>	1.67	1.75	<b>21</b>	2.58	2.91
<b>6</b>	1.82	1.94	<b>22</b>	2.6	2.94
<b>7</b>	1.94	2.1	<b>23</b>	2.62	2.96
<b>8</b>	2.03	2.22	<b>24</b>	2.64	2.99
<b>9</b>	2.11	2.32	<b>25</b>	2.66	3.01
<b>10</b>	2.18	2.41	<b>30</b>	2.75	
<b>11</b>	2.23	2.48	<b>35</b>	2.82	
<b>12</b>	2.29	2.55	<b>40</b>	2.87	
<b>13</b>	2.33	2.61	<b>45</b>	2.92	
<b>14</b>	2.37	2.66	<b>50</b>	2.96	
<b>15</b>	2.41	2.71	<b>60</b>	3.03	
<b>16</b>	2.44	2.75	<b>70</b>	3.09	
<b>17</b>	2.47	2.79	<b>80</b>	3.14	
<b>18</b>	2.5	2.82	<b>90</b>	3.18	
<b>19</b>	2.53	2.85	<b>100</b>	3.21	

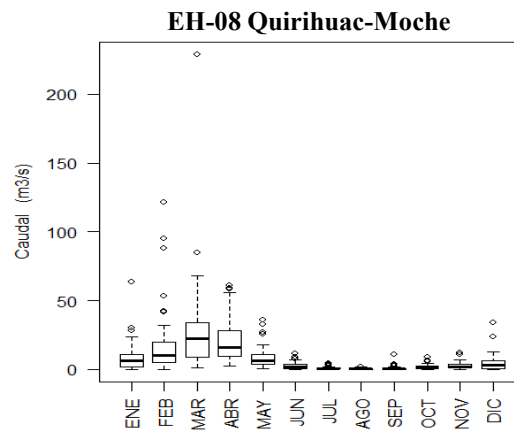
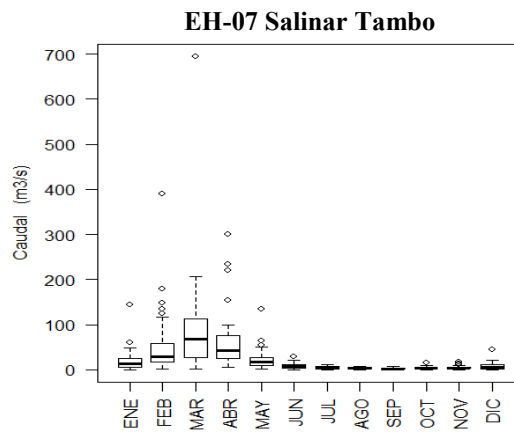
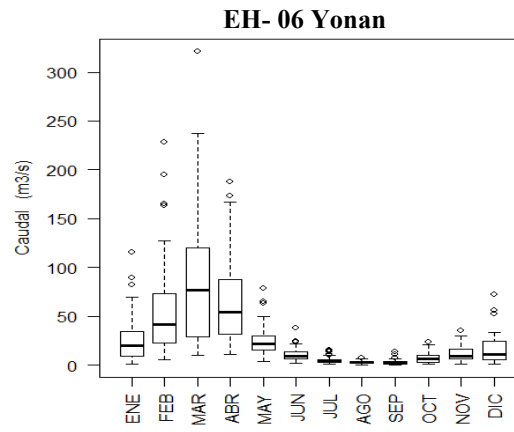
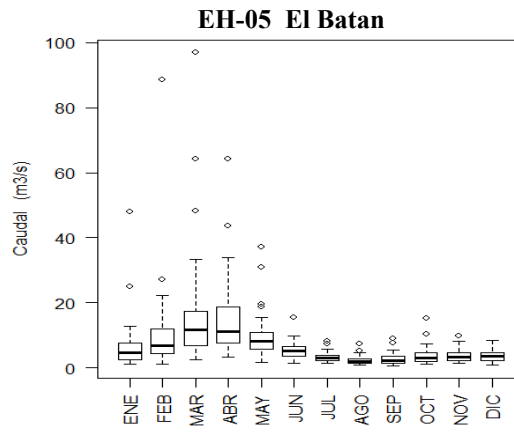
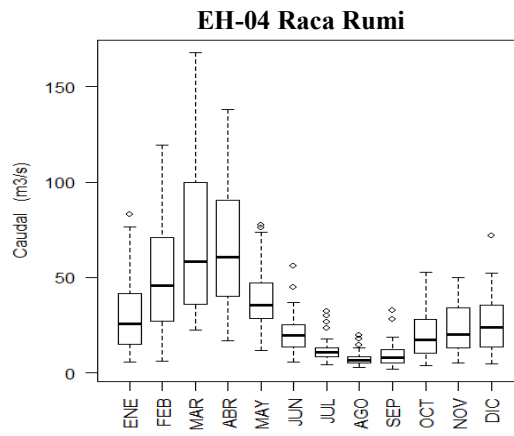
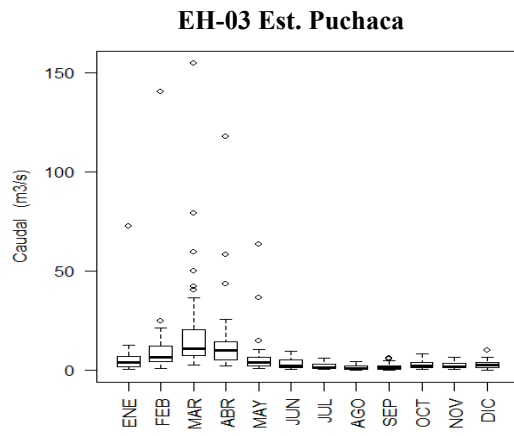
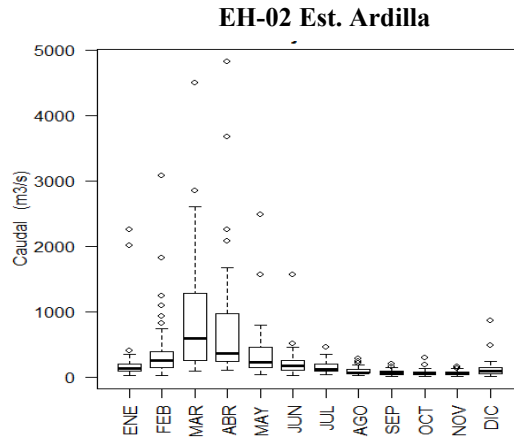
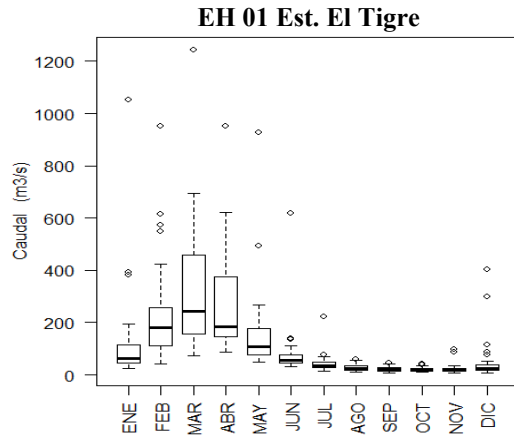
El porcentaje expresa el nivel de confianza.

Fuente: Grubbs, 1969.

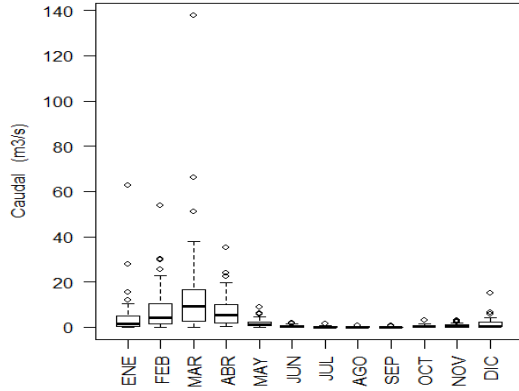
---

**ANEXO III: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS MENSUALES**

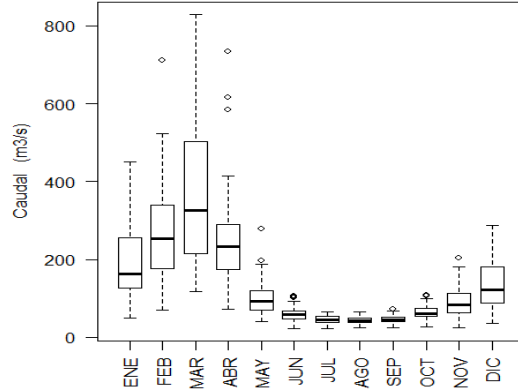
**(GRÁFICA DE BOXPLOT)**



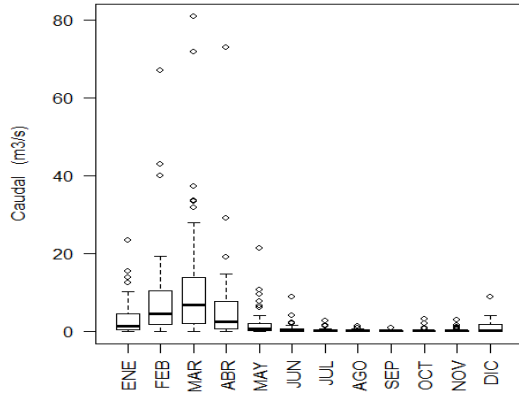
**EH-09 Huacapongo**



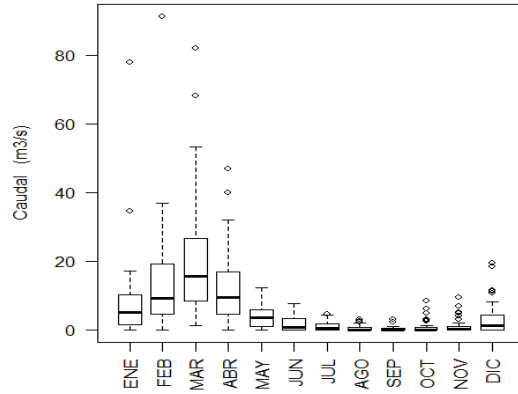
**EH-10 Condorcerro**



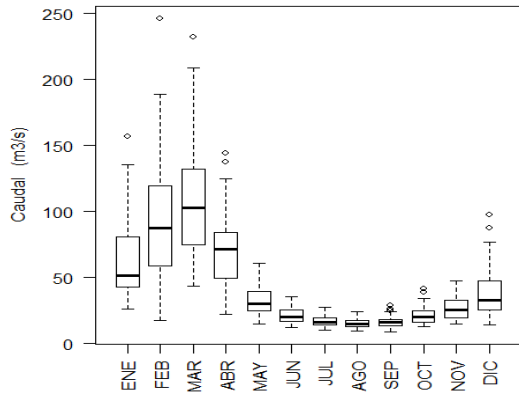
**EH-11 San Jacinto**



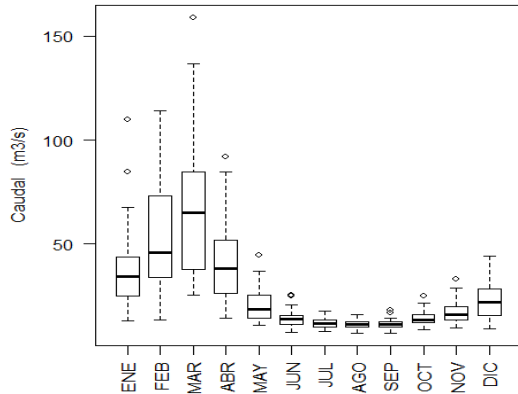
**EH-12 Sector Tutuma**



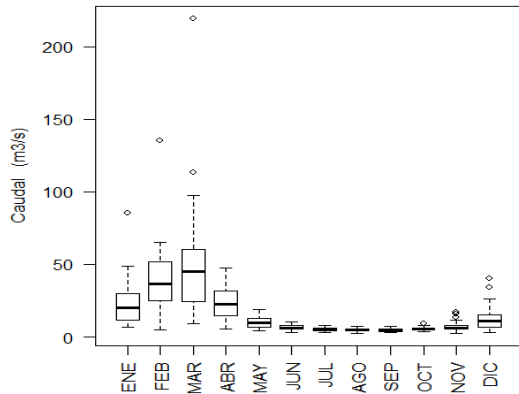
**EH-13 Yanapampa**



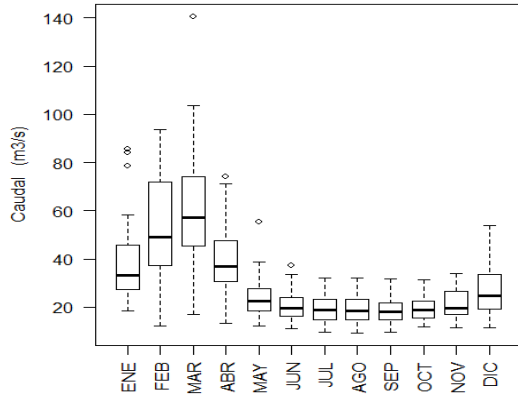
**EH-14 Puente Alco**



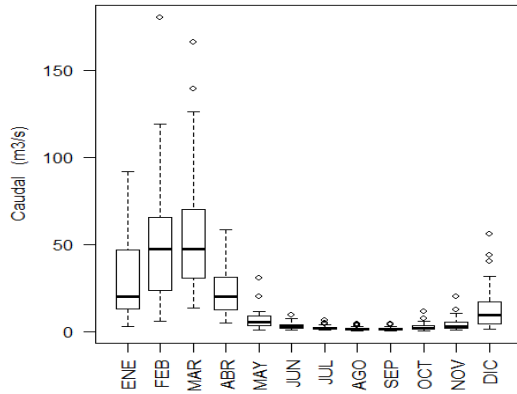
**EH-15 Santo Domingo**



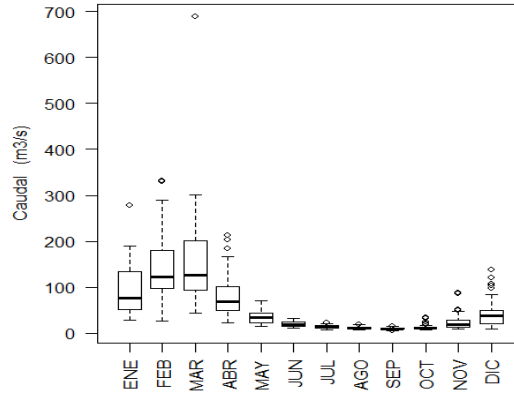
**EH-16 Chosica**



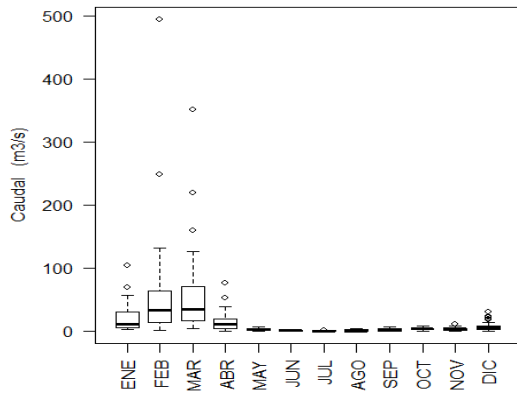
**EH-17 La Capilla**



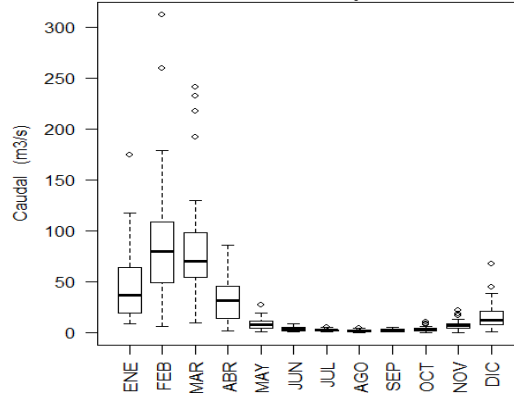
**EH-18 Socsi-S Y Toma Imperial**



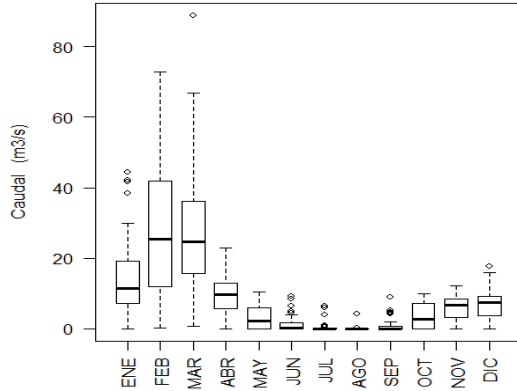
**EH-19 Conta**



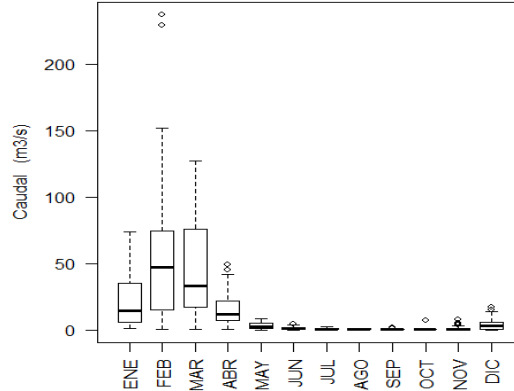
**EH-20 Letrayoc**



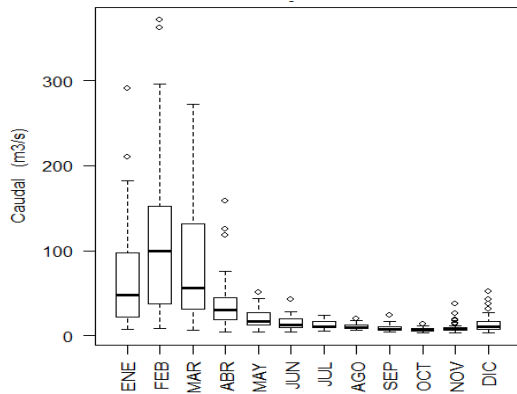
**EH-21 La Achirana**



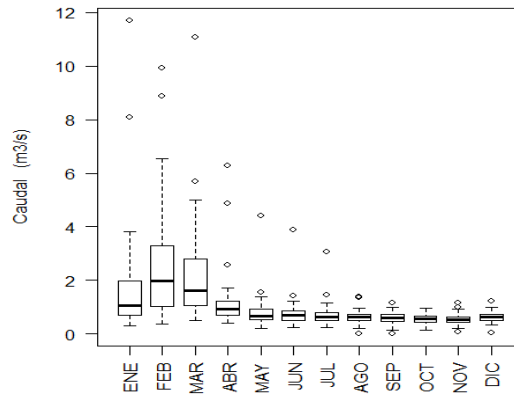
**EH-22 Bella Unión**

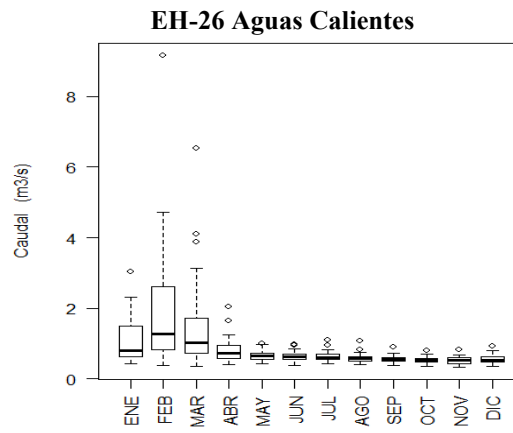
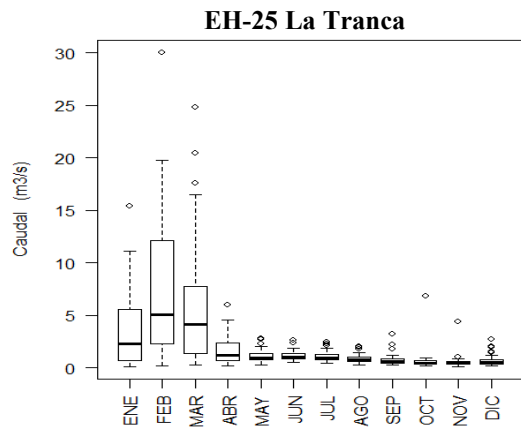


**EH-23 Chucarapi**



**EH-24 Chivaya**

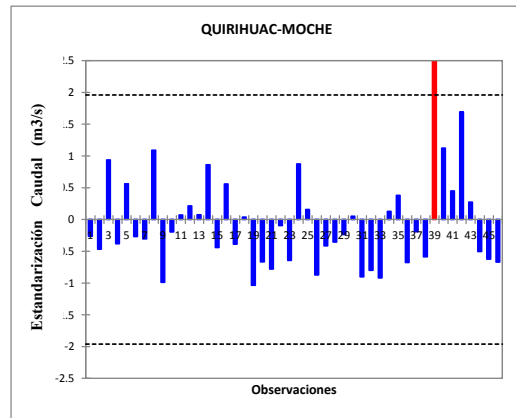
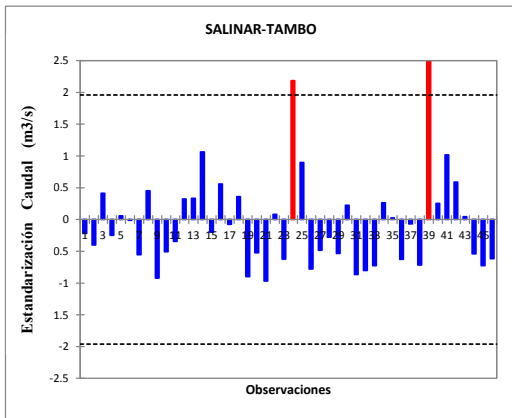
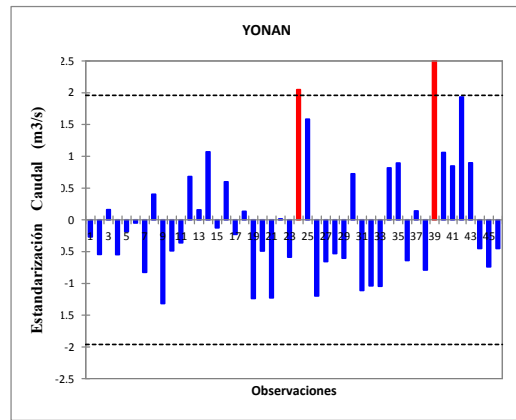
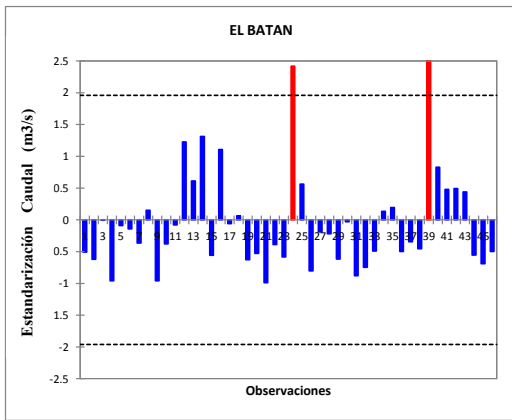
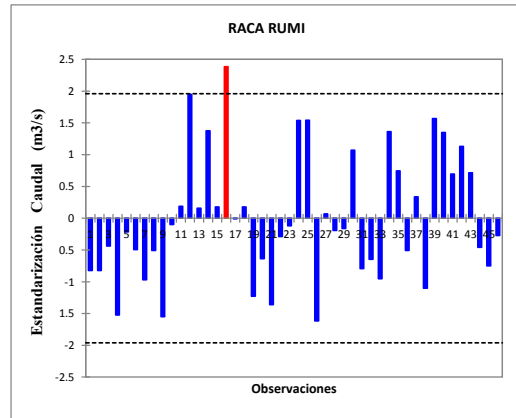
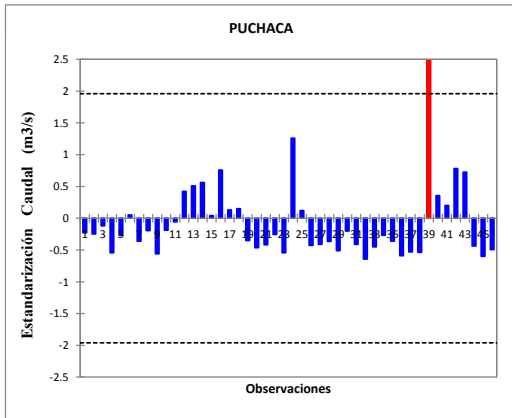
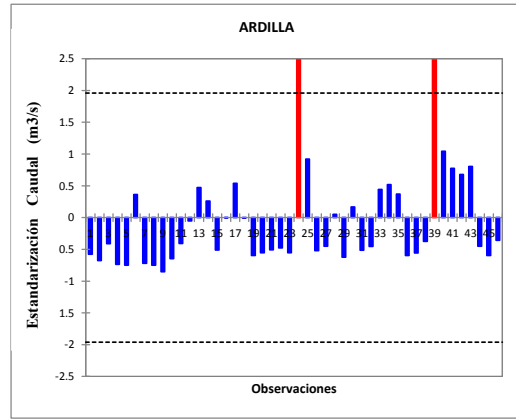
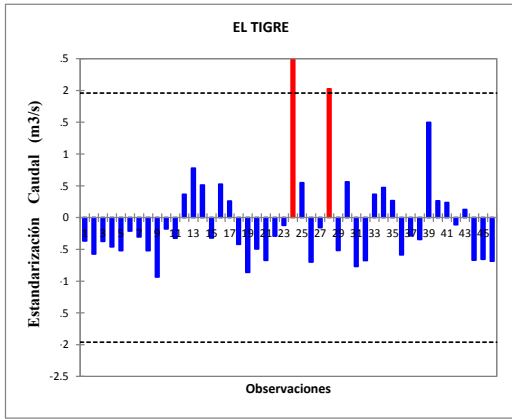


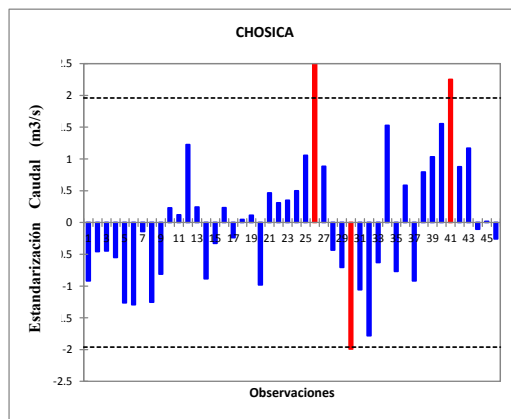
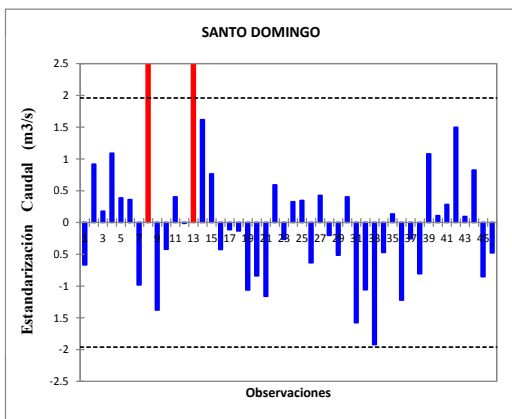
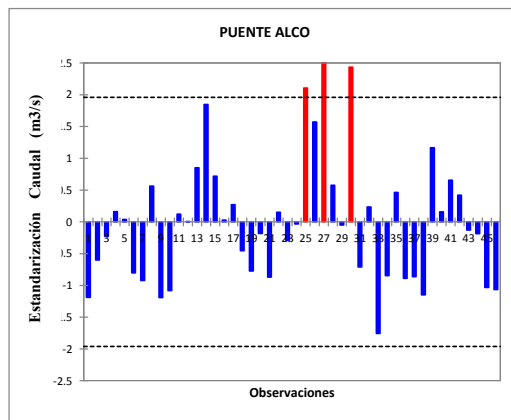
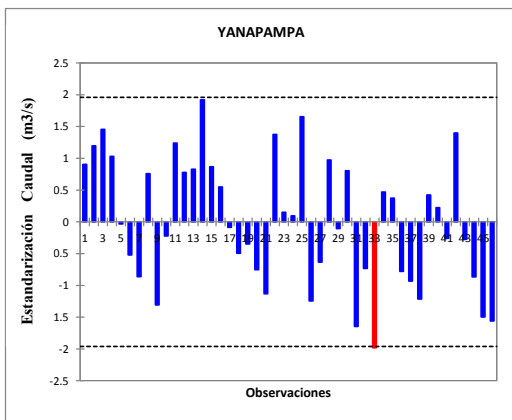
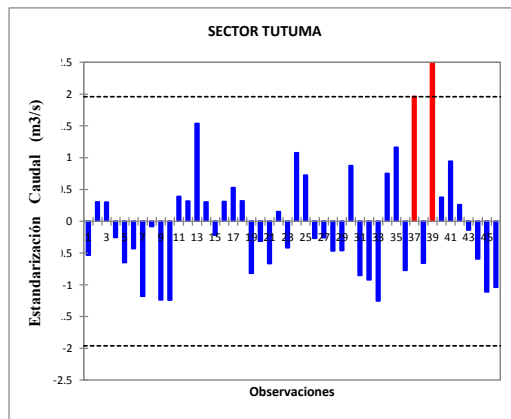
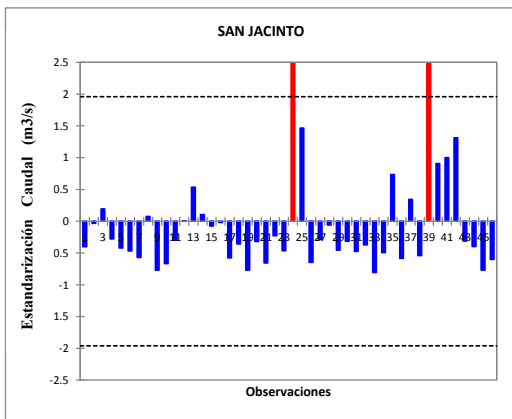
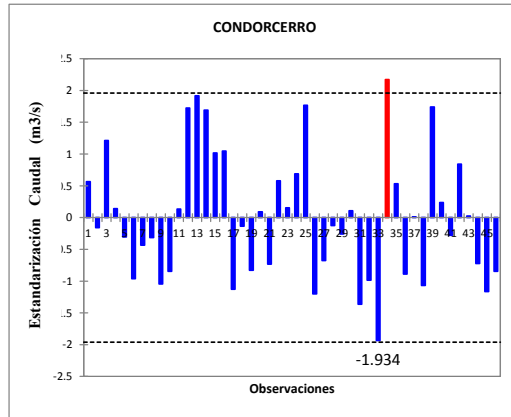
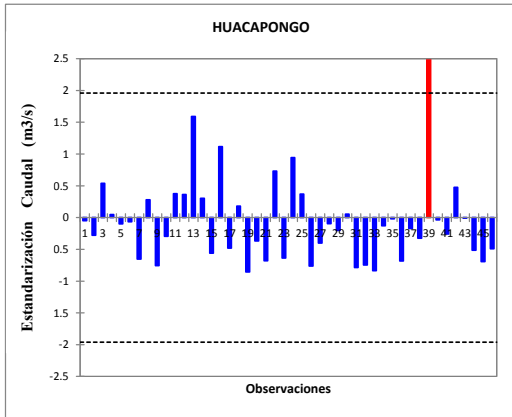


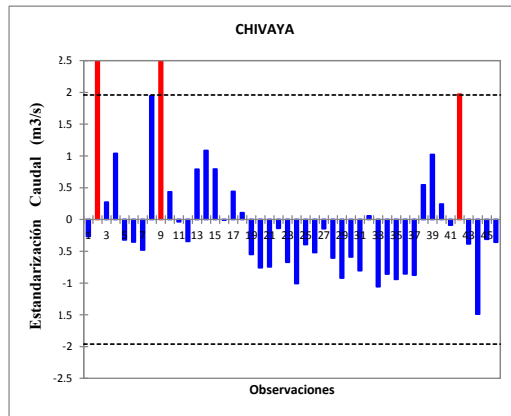
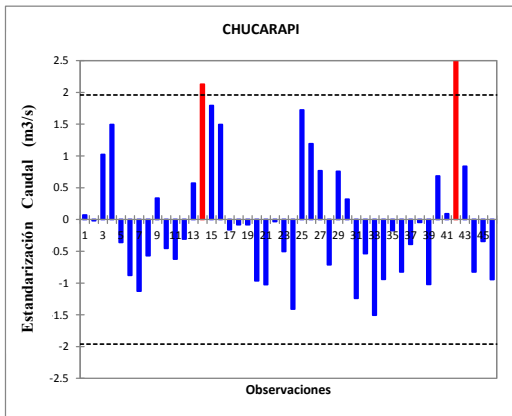
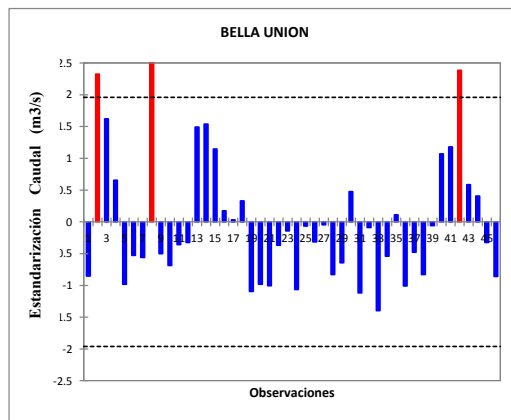
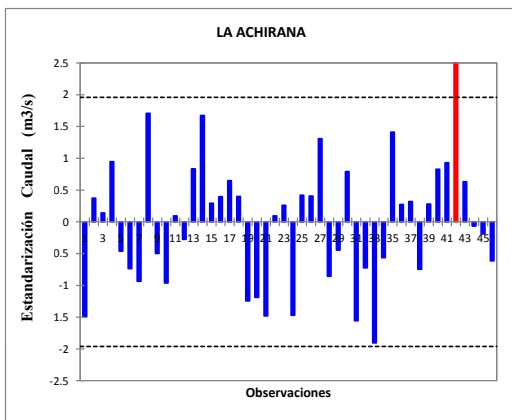
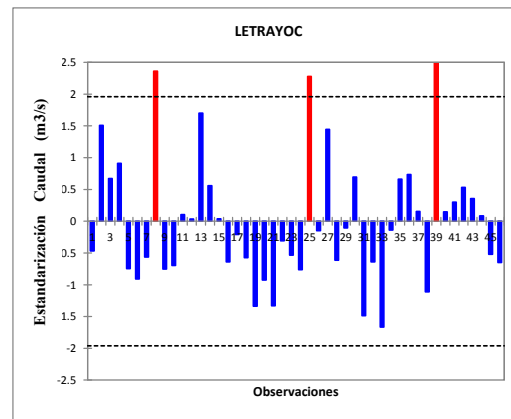
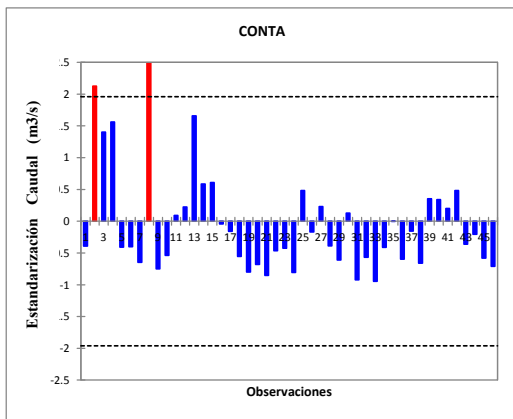
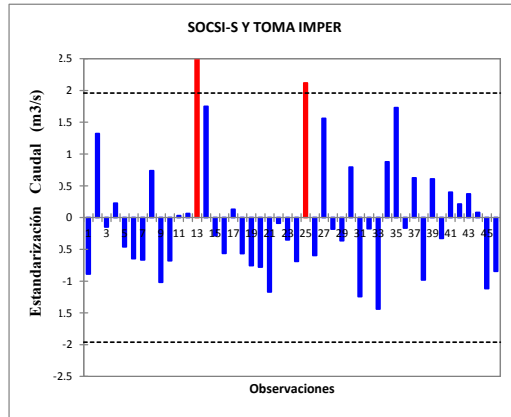
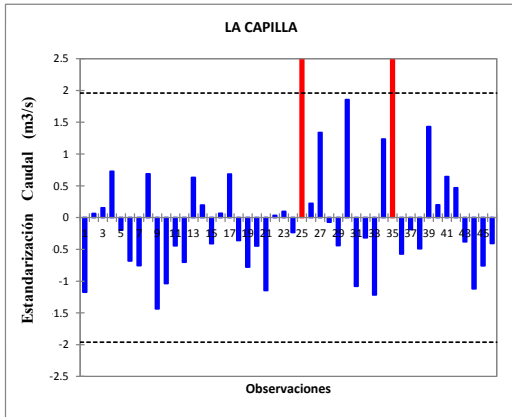
---

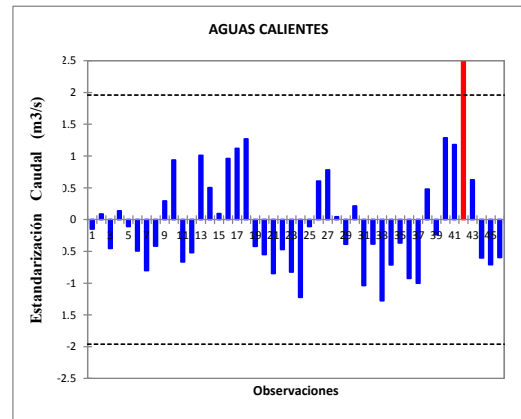
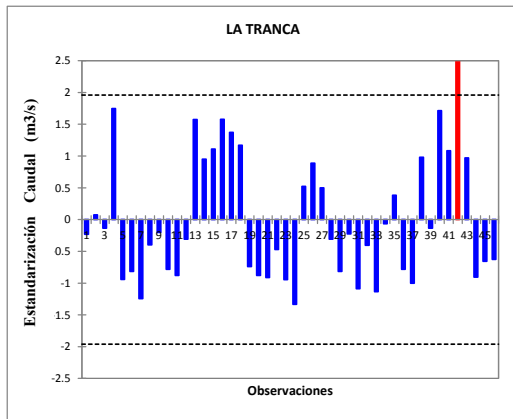
**ANEXO IV: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ANUAL**  
**(TEST DE GRUBBS)**











---

**ANEXO V: REGIONES ESTADÍSTICAMENTE HOMOGÉNEAS**  
**(MÉTODO DEL VECTOR REGIONAL)**

### 1) ESTACIONES PERTENECIENTES A LA REGIÓN 1

Cuadro N° 1 Indicadores estadísticos de la región 1

Estación	Río	No Años	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector	Calidad(/10)
EL TIGRE	Tumbes	15	0.399	0.147	0.951	8.5
ARDILLA	Chira	21	0.632	0.306	0.857	6.4
PUCHACA	La Leche	21	0.464	0.155	0.96	8.8
RACA RUMI	Chancay-Lambayeque	19	0.385	0.206	0.869	6.8
EL BATAN	Zaña	21	0.479	0.18	0.922	6.7

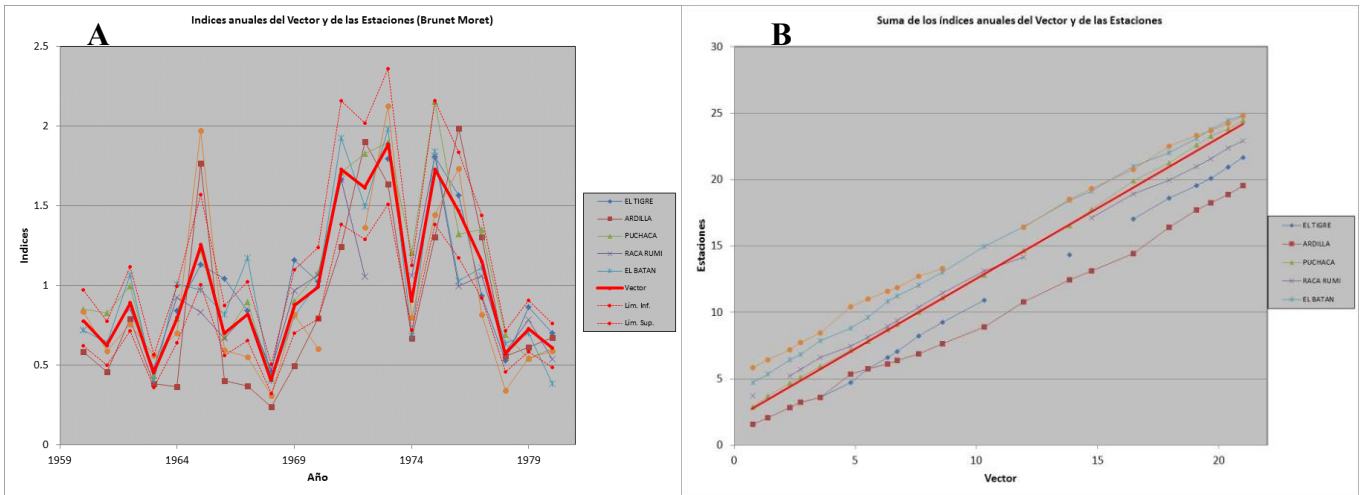


Figura 1 Gráfico de índices (A) y gráfico de índices acumulados (B) de las estaciones y el Vector R-1

### 2) ESTACIONES PERTENECIENTES A LA REGIÓN 2

Cuadro N° 2 Indicadores estadísticos de la región 2

Estación	Río	No Años	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector	Calidad(/10)
SALINAR-TAMBO	Chicama	21	0.533	0.204	0.923	7.5
SAN JACINTO	Nepeña	21	0.653	0.38	0.923	6.8
YONAN	Jequetepeque	21	0.415	0.182	0.911	8.3
HUACAPONGO	Viru	21	0.685	0.33	0.886	3.4
CONDORCERRO	Santa	21	0.268	0.284	0.824	3.1
SECTOR TUTUMA	Casma	21	0.562	0.327	0.815	4
QUIRIHUAC-MOCHE	Moche	21	0.532	0.296	0.812	4.5

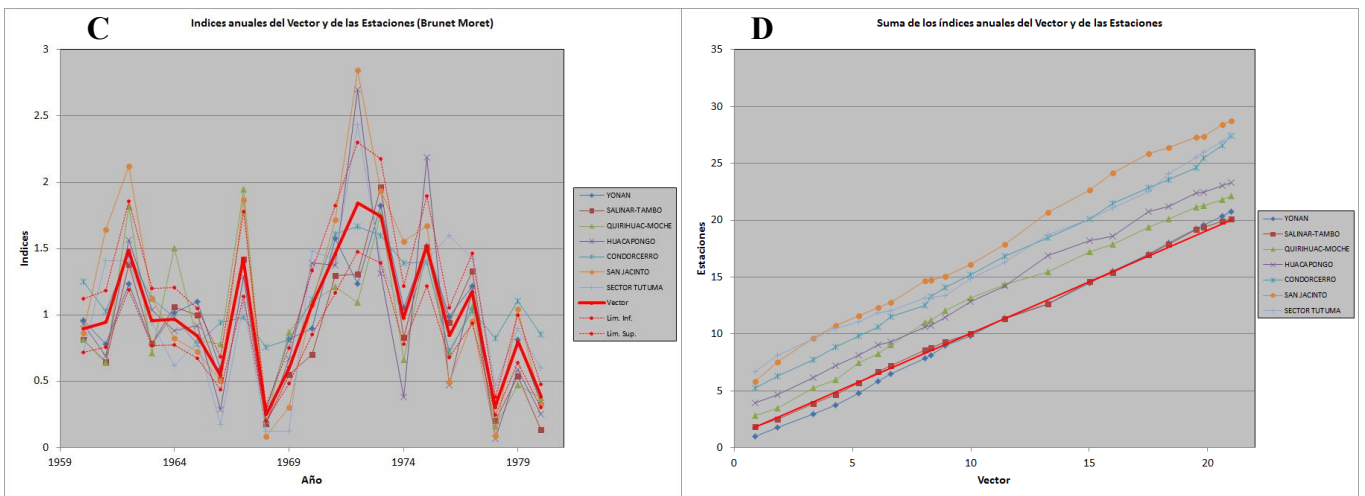


Figura 2 Gráfico de índices (C) y gráfico de índices acumulados (D) de las estaciones y el Vector R-2

### 3) ESTACIONES PERTENECIENTES A LA REGIÓN 3

Cuadro Nº 3 Indicadores estadísticos de la región 3

Estación	Río	No Años	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector	Calidad(/10)
LETRAYOC	Pisco	21	0.518	0.215	0.945	8
SANTO DOMINGO	Chancay-Huaral	21	0.387	0.165	0.927	9.1
SOCSI-S Y TOMA IMP	Cañete	17	0.306	0.135	0.906	9.1
CONTA	San Juan	21	0.993	0.516	0.900	5.6
LA CAPILLA	Mala	21	0.396	0.236	0.860	7.8
YANAPAMPA	Pativilca	20	0.22	0.216	0.737	6.9
PUENTE ALCO	Huaura	21	0.24	0.214	0.736	7.9
CHOSICA	Rimac	18	0.161	0.284	0.495	8.9

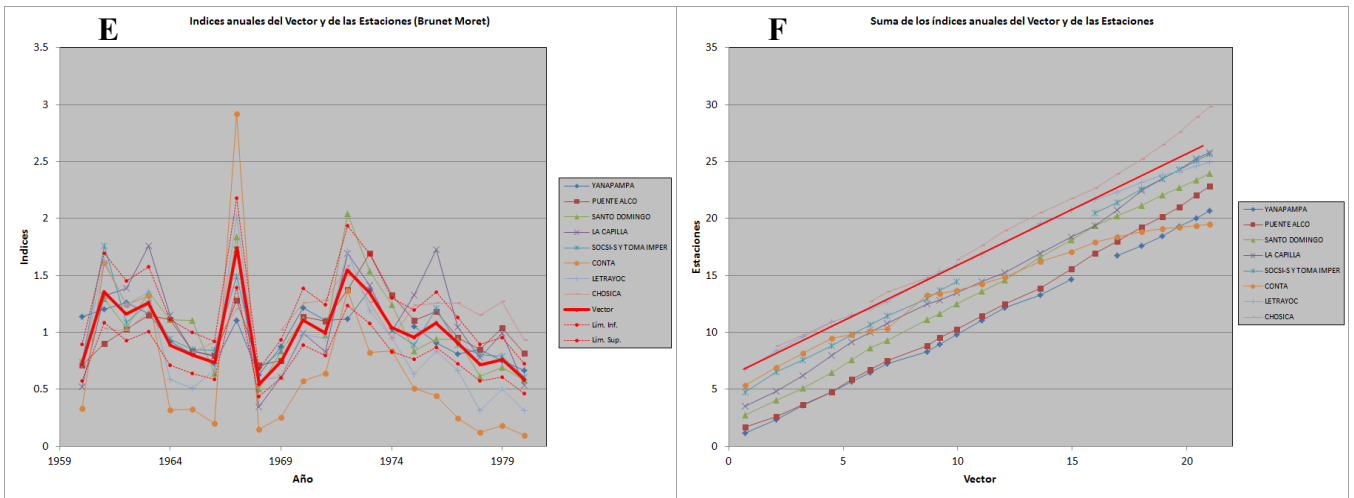


Figura 3 Gráfico de índices (E) y grafico de índices acumulados (F) de las estaciones y el Vector R-3

### 4) ESTACIONES PERTENECIENTES A LA REGIÓN 4

Estación	Río	No Años	Coef. Variación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector	Calidad(/10)
LA TRANCA	Sama	18	0.663	0.256	0.955	5.7
CHUCARAPI	Tambo	21	0.494	0.265	0.843	5.4
LA ACHIRANA	Ica	21	0.46	0.257	0.809	6.5
BELLA UNIÓN	Acarí	20	0.725	0.431	0.729	1.4
AGUAS CALIENTES	Caplina	21	0.252	0.422	0.681	5.5

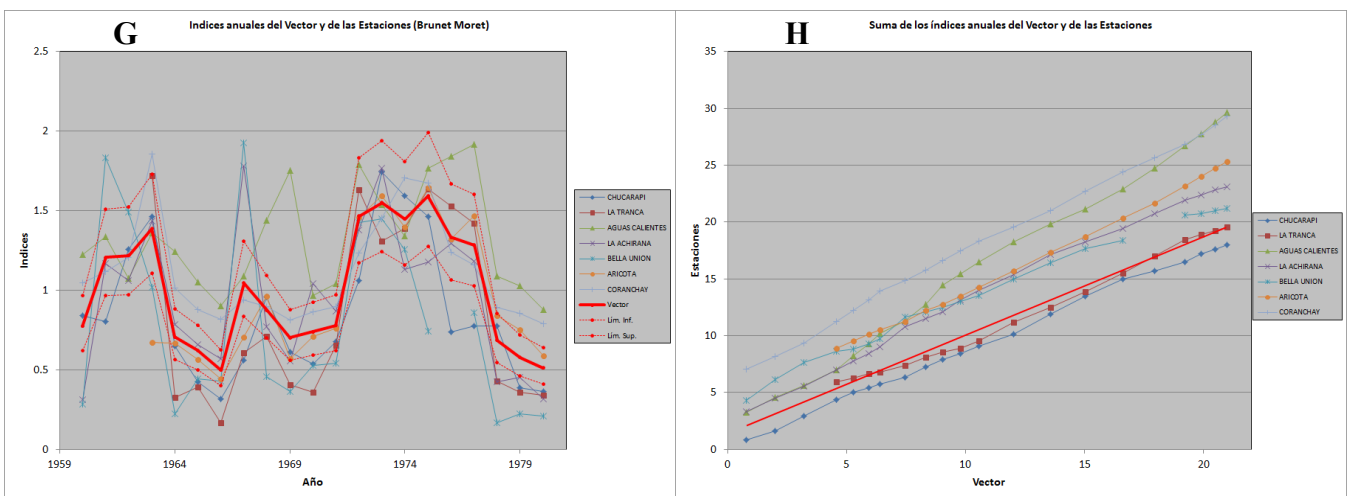


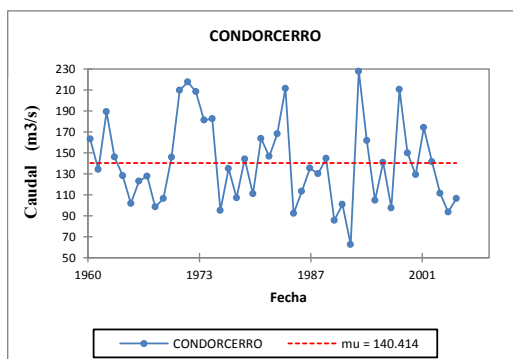
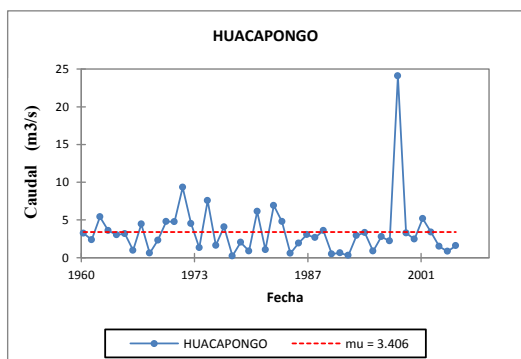
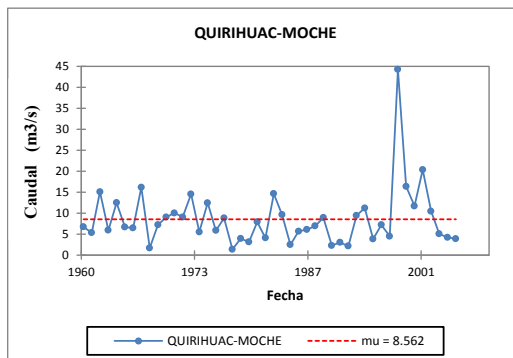
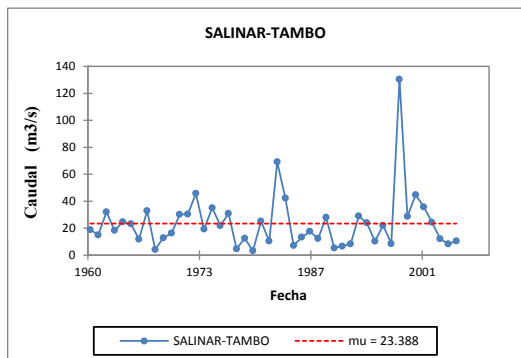
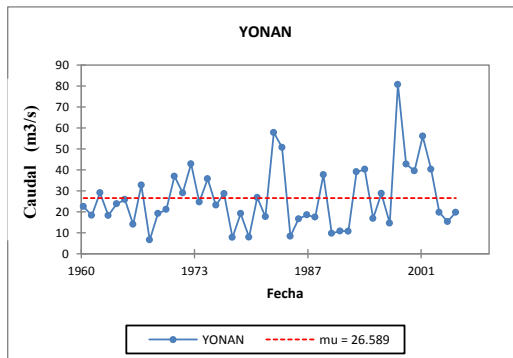
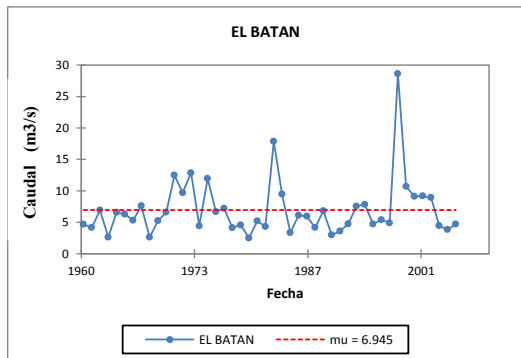
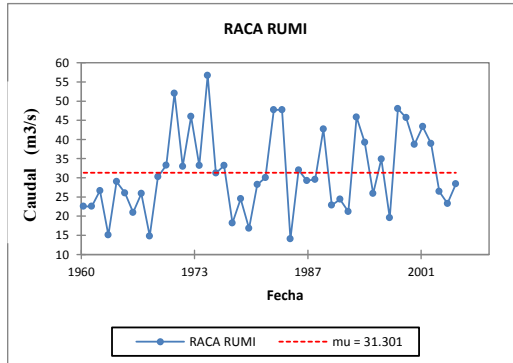
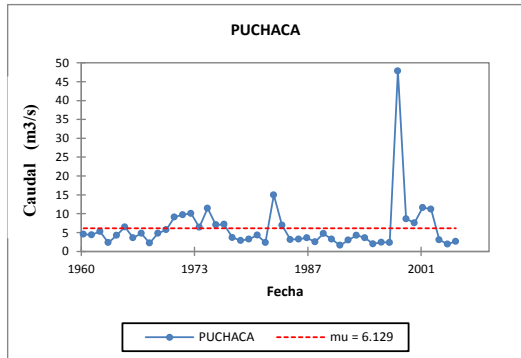
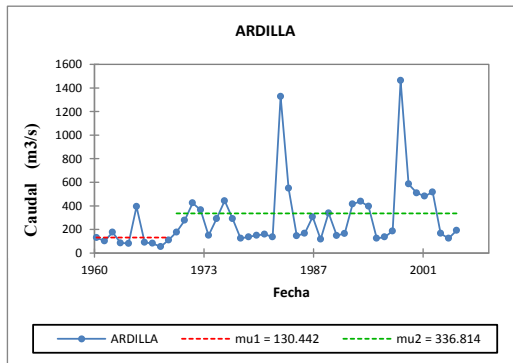
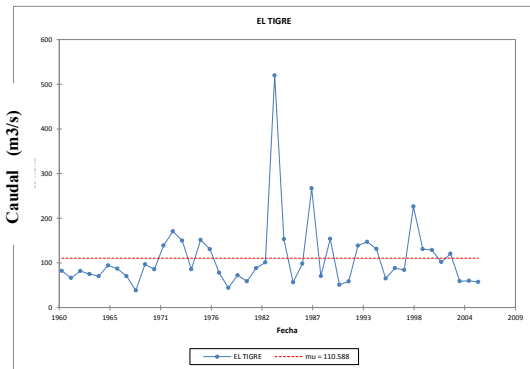
Figura 4 Gráfico de índices (G) y grafico de índices acumulados (H) de las estaciones y el Vector R-4

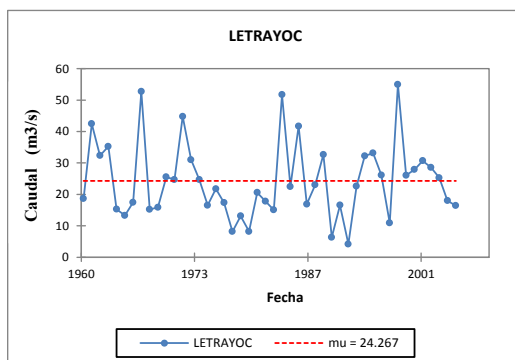
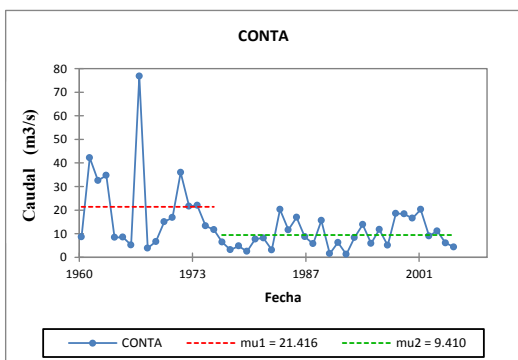
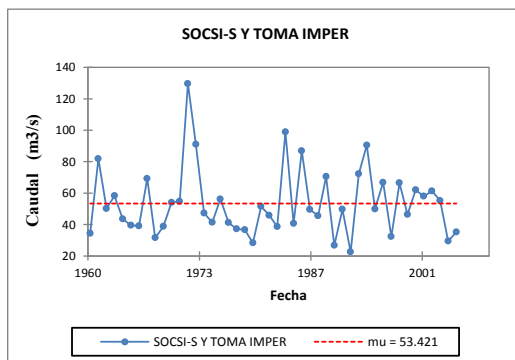
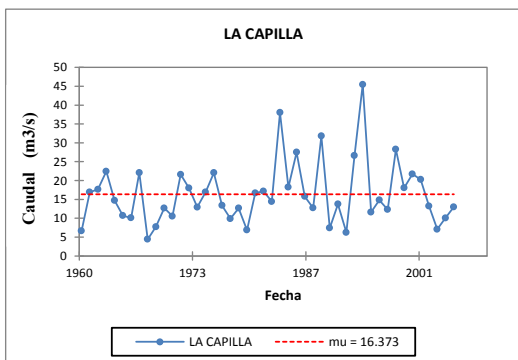
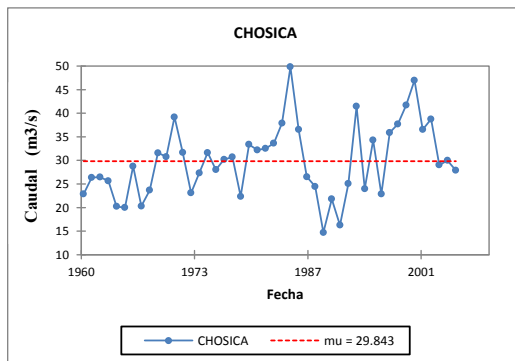
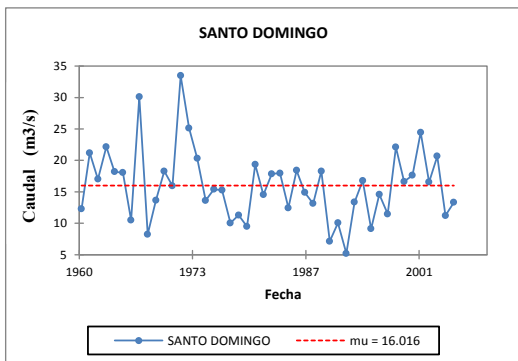
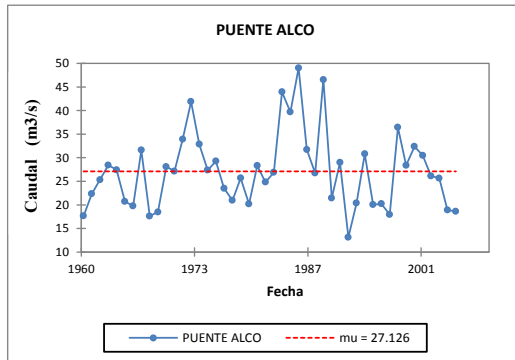
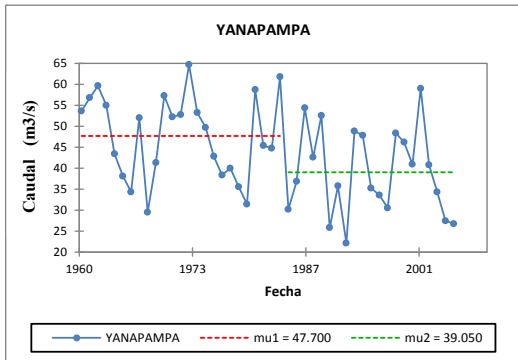
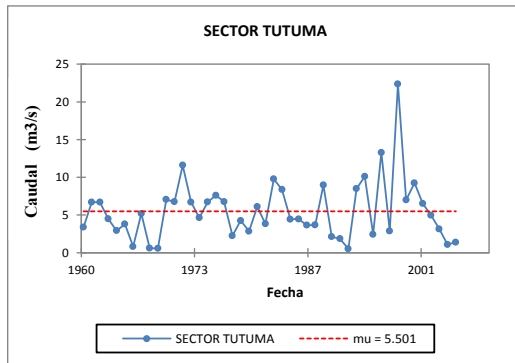
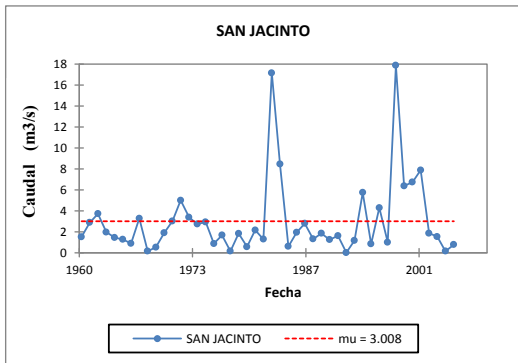
---

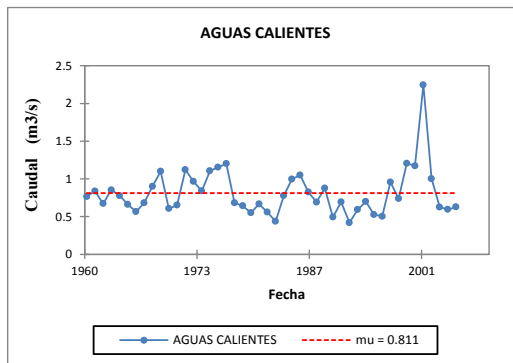
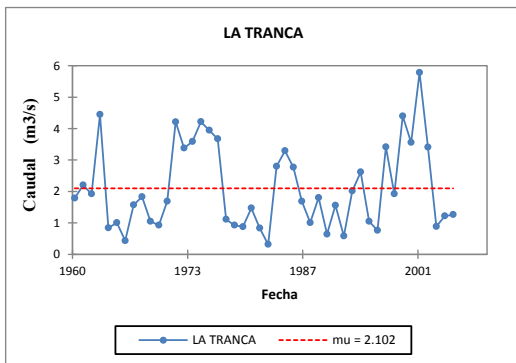
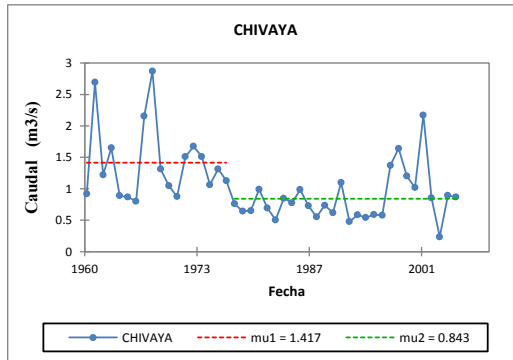
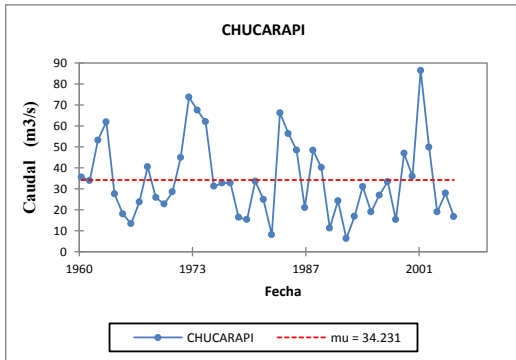
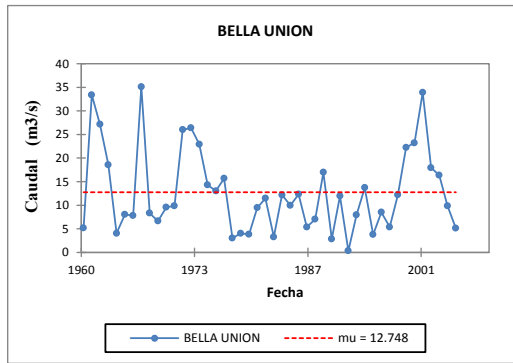
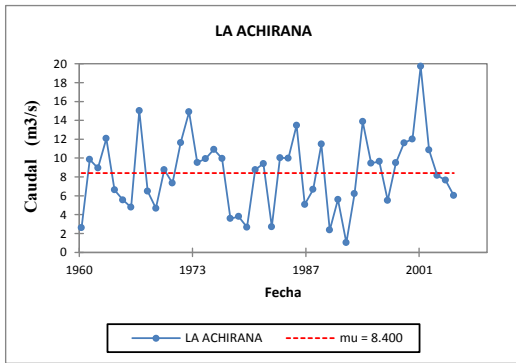
**ANEXO VI: ANÁLISIS HOMOGENEIDAD**

**(TEST DE PETITT)**









---

**ANEXO VII: ESTIMACIÓN DE PARÁMETRO, MÉTODO DE L-MOMENTOS**

**(*L1, L2, L3, T, T Y T4*)**

**EH-01 EST. EL TIGRE**

N°	name	n	L_1	L_2	L_3	L_4	t	t_3	t_4	t_5
1	ENE	46	111.52804	54.27274	31.992156	25.4052249	0.4866286	0.5894701	0.46810287	0.39859657
2	FEB	46	223.04392	85.16063	29.424333	21.8672402	0.381811	0.3455157	0.2567764	0.15573492
3	MAR	46	315.78478	113.12657	30.49968	13.1873056	0.3582395	0.2696067	0.11657125	0.09671891
4	ABR	46	270.69261	90.483517	29.779291	10.6125944	0.3342667	0.3291129	0.1172876	0.07264534
5	MAY	46	151.7763	54.611715	26.792729	19.8997598	0.3598171	0.4906041	0.36438628	0.29846307
6	JUN	46	75.4987	24.852309	14.781742	12.9046236	0.3291753	0.5947834	0.51925249	0.45664359
7	JUL	46	42.63957	11.087237	4.639446	4.0863312	0.2600223	0.4184492	0.36856172	0.32348605
8	AGO	46	27.53646	5.676722	1.131929	0.6079176	0.206153	0.1993984	0.10708956	0.07241772
9	SEP	46	21.68907	4.581659	1.089839	0.5380069	0.2112428	0.2378698	0.11742621	0.01619966
10	OCT	46	20.4037	4.623435	1.264253	0.4394501	0.2265979	0.2734445	0.09504841	0.02250418
11	NOV	46	22.14941	6.905943	3.331707	2.6106356	0.311789	0.4824406	0.37802741	0.24782854
12	DIC	46	44.32891	22.713801	15.1997	12.6687994	0.5123925	0.6691835	0.55775779	0.44872804

**EH-02 EST. ARDILLA**

N°	name	n	L_1	L_2	L_3	L_4	t	t_3	t_4	t_5
1	ENE	46	234.11217	125.28694	83.946988	73.200829	0.5351577	0.6700378	0.5842655	0.49679196
2	FEB	46	422.89239	215.88604	116.103334	83.693589	0.5104988	0.5377992	0.3876749	0.26226609
3	MAR	46	931.52783	463.83942	181.79606	67.867046	0.497934	0.3919375	0.1463158	0.07927121
4	ABR	46	773.35587	410.14906	210.868782	117.92431	0.5303497	0.5141272	0.2875157	0.18522087
5	MAY	46	362.58217	169.50667	85.88722	60.371098	0.4674986	0.5066893	0.3561577	0.25723708
6	JUN	46	224.62891	97.0805	39.741179	28.700287	0.4321817	0.4093632	0.2956339	0.23902566
7	JUL	46	144.13891	47.60598	12.623897	7.081658	0.3302784	0.2651746	0.1487557	0.06322503
8	AGO	46	93.48826	30.26461	8.453065	5.365551	0.3237263	0.2793053	0.177288	0.03557315
9	SEP	46	66.10783	21.08265	5.170162	3.222148	0.318913	0.2452331	0.1528341	0.07439348
10	OCT	46	67.95413	23.05075	7.49429	5.508627	0.3392104	0.3251213	0.2389782	0.18805795
11	NOV	46	62.64891	19.36594	3.625395	2.605704	0.3091185	0.1872048	0.1345509	0.03568542
12	DIC	46	119.91044	55.89869	24.390674	20.441833	0.4661703	0.4363372	0.3656943	0.30199869

**EH-03 EST. PUCHACA**

N°	name	n	L_1	L_2	L_3	L_4	t	t_3	t_4	t_5
1	ENE	46	6.060109	3.2369936	1.8012735	1.46328874	0.5341478	0.5564649	0.45205178	0.40396355
2	FEB	46	11.181478	5.8940562	3.3893784	2.95644807	0.5271267	0.5750502	0.50159822	0.43742316
3	MAR	46	19.577348	10.4164406	5.7391814	4.0295807	0.532066	0.5509734	0.38684814	0.25574285
4	ABR	46	13.701848	6.9467859	3.7261728	2.98375501	0.5069963	0.536388	0.4295159	0.37328953
5	MAY	46	6.538913	3.3801972	1.9915806	1.66613704	0.5169356	0.5891906	0.4929112	0.43921649
6	JUN	46	3.275326	1.3687821	0.2651445	0.02038475	0.4179071	0.1937084	0.01489262	0.00344476
7	JUL	46	2.049826	0.8351816	0.1983005	0.05460723	0.4074402	0.237434	0.06538366	0.02582241
8	AGO	46	1.373478	0.5910097	0.1251718	0.03056552	0.4303014	0.2117932	0.05171746	0.05595967
9	SEP	46	1.736391	0.846885	0.2385146	0.08483253	0.4877271	0.2816376	0.10017007	0.07759591
10	OCT	46	2.776087	1.2124048	0.3419375	0.10195657	0.4367316	0.2820325	0.08409449	-0.0302039
11	NOV	46	2.386978	0.9358469	0.2019797	0.10264289	0.3920634	0.2158256	0.10967915	0.01887892
12	DIC	46	2.8855	1.102956	0.1707275	0.1079164	0.3822409	0.1547909	0.09784288	0.10899651

**EH-04 EST. RACA RUMI**

N°	name	n	L_1	L_2	L_3	L_4	t	t_3	t_4	t_5
1	ENE	46	30.932304	10.881889	2.2852348	1.2226521	0.3517969	0.2100035	0.11235661	0.04105746
2	FEB	46	49.893152	16.210056	1.9015896	0.9940798	0.3248954	0.1173093	0.06132489	0.04793118
3	MAR	46	71.053043	23.633266	4.8012542	0.16355	0.3326144	0.2031566	0.00692033	0.00735425
4	ABR	46	66.038043	17.294381	2.4592463	1.1880286	0.2618851	0.1421991	0.06869448	-0.0034068
5	MAY	46	38.816087	9.441256	1.5809289	1.5086959	0.2432305	0.167449	0.15979822	0.00245722
6	JUN	46	20.609609	5.249112	1.0107298	0.9852434	0.2546925	0.1925525	0.18769715	0.10076754
7	JUL	46	11.933174	2.999335	0.8639911	0.8837696	0.2513443	0.2880609	0.29465516	0.15543036
8	AGO	46	7.723304	1.923092	0.5492708	0.3948406	0.2489986	0.2856186	0.20531552	0.06382147
9	SEP	46	9.534978	3.182741	0.9294589	0.607482	0.3337963	0.292031	0.19086759	0.12233599
10	OCT	46	20.001456	7.050664	1.3942068	0.5286747	0.3525075	0.1977412	0.07498226	0.02350684
11	NOV	46	23.542109	7.042974	0.7154666	0.217117	0.299165	0.1015859	0.03082746	0.00024799
12	DIC	46	25.541131	8.512216	1.2407723	0.6683782	0.3332748	0.1457637	0.07851988	0.07571727

EH- 05 EST. EL BATAN

N°	name	n	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	t	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
1	ENE	46	6.480174	2.8576473	1.4204876	1.1584067	0.4409831	0.4970829	0.4053708	0.33111757
2	FEB	46	10.471761	4.8947811	2.3794156	1.7988217	0.4674267	0.4861128	0.3674979	0.29562283
3	MAR	46	16.453261	7.4758213	3.5671268	2.4448945	0.4543672	0.4771552	0.3270403	0.2288137
4	ABR	46	14.997804	5.6325638	2.1304738	1.281608	0.3755592	0.3782423	0.2275355	0.13184506
5	MAY	46	9.737978	3.1258101	1.1283897	0.95227	0.3209917	0.3609911	0.3046474	0.16895128
6	JUN	46	5.39287	1.3043739	0.2185601	0.2410616	0.2418701	0.1675594	0.1848102	0.11724019
7	JUL	46	3.452174	0.882657	0.2793646	0.2033258	0.2556815	0.3165041	0.2303565	0.08501909
8	AGO	46	2.335804	0.6291715	0.1592088	0.1386846	0.2693597	0.2530452	0.2204242	0.1494691
9	SEP	46	2.725022	0.9094285	0.2556635	0.1689896	0.3337326	0.2811255	0.1858196	0.12259271
10	OCT	46	3.706674	1.1985309	0.4122433	0.2742622	0.323344	0.3439572	0.228832	0.19822598
11	NOV	46	3.733761	1.0487928	0.2593739	0.1347542	0.2808945	0.2473071	0.1284851	0.08374064
12	DIC	46	3.855696	1.0565488	0.1757248	0.1142141	0.2740229	0.1663196	0.1081011	0.0537436

EH-06 EST. YONAN

N°	name	n	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	t	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
1	ENE	46	27.035479	12.4183412	3.8782199	2.34669253	0.459335	0.3122977	0.18896989	0.14969437
2	FEB	46	56.07074	26.3740669	9.162947	5.23340171	0.4703713	0.3474226	0.19842983	0.11470191
3	MAR	46	86.954283	35.3506836	7.5882972	3.64992846	0.4065433	0.2146577	0.10324916	0.12296938
4	ABR	46	65.191304	24.7729081	5.7837154	2.78250311	0.3800033	0.2334694	0.11232041	0.05779372
5	MAY	46	26.298435	8.6416978	2.5544364	1.92226644	0.3286012	0.2955943	0.22244083	0.066963
6	JUN	46	10.978391	3.5560262	1.0842202	0.76262893	0.3239114	0.3048966	0.214461	0.0887259
7	JUL	46	5.263022	1.9593715	0.6501426	0.36934625	0.3722902	0.3318118	0.18850241	0.05286694
8	AGO	46	2.610761	0.9846652	0.1616049	0.09508207	0.3771564	0.1641216	0.09656285	0.02112824
9	SEP	46	2.916848	1.2664942	0.4887382	0.32932277	0.4341996	0.3858985	0.26002707	0.14051444
10	OCT	46	7.544957	3.2620038	0.9549959	0.34606565	0.4323423	0.2927636	0.1060899	0.05150586
11	NOV	46	11.447761	4.5745165	0.9918168	0.40299968	0.3995992	0.2168135	0.08809667	0.03431675
12	DIC	46	16.742543	7.9395048	2.6476189	1.22465128	0.4742114	0.3334741	0.15424782	0.09626465

EH-07 EST. SALINAR TAMBO

N°	name	n	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	t	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
1	ENE	46	19.885457	10.364653	4.26001589	2.77938255	0.5212177	0.41101385	0.26815974	0.2172976
2	FEB	46	51.431804	27.607464	13.3146795	9.35462479	0.5367781	0.4822855	0.33884405	0.23369634
3	MAR	46	88.017217	44.120125	17.813859	12.2892546	0.501267	0.40375812	0.27854079	0.25459781
4	ABR	46	61.547152	28.573813	11.4952431	7.65493382	0.4642589	0.40229993	0.26790033	0.18448082
5	MAY	46	22.673217	9.37345	3.6847732	3.10356915	0.4134151	0.39310746	0.33110211	0.25159178
6	JUN	46	9.01587	3.142752	0.70109342	0.49744895	0.34858	0.22308266	0.15828452	0.09625448
7	JUL	46	5.201761	1.785201	0.26633109	0.14542969	0.3431918	0.14918826	0.08146402	0.05613711
8	AGO	46	3.297848	1.206603	0.09992635	0.04210252	0.365876	0.08281624	0.03489342	0.03620457
9	SEP	46	2.79113	1.141386	0.18317536	0.07220787	0.4089331	0.1604851	0.06326335	0.02000039
10	OCT	46	3.875022	1.507398	0.34565625	0.20462791	0.3890036	0.22930662	0.13574913	0.11049177
11	NOV	46	4.769348	1.755769	0.4801452	0.38238779	0.3681361	0.27346716	0.21778934	0.08711476
12	DIC	46	8.138826	3.792489	1.28251691	0.71560146	0.4659749	0.33817288	0.18868913	0.14430335

EH-08 EST. QUIRIHUAC-MOCHE

N°	name	n	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	t	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
1	ENE	46	9.404913	5.3528667	2.16171504	1.17147845	0.5691564	0.4038425	0.2188507	0.17594826
2	FEB	46	19.3034346	11.1683921	5.61364782	3.71506635	0.5785702	0.5026371	0.3326411	0.20504186
3	MAR	46	28.9679564	14.2193245	6.16869753	4.76130213	0.4908639	0.4338249	0.3348473	0.29114952
4	ABR	46	21.889674	8.8740527	2.34017613	1.04292951	0.405399	0.26371	0.1175257	0.03133954
5	MAY	46	8.6948696	3.8646116	1.53478393	1.08717516	0.4444703	0.397138	0.2813155	0.12254999
6	JUN	46	2.5894348	1.2742812	0.478522	0.23397264	0.4921078	0.3755231	0.1836115	0.0790944
7	JUL	46	1.0554783	0.5426	0.21826614	0.10845753	0.5140798	0.4022598	0.1998849	0.07093998
8	AGO	46	0.5441522	0.2617213	0.09136153	0.03392725	0.4809707	0.3490795	0.1296312	0.0273792
9	SEP	46	0.8640217	0.5877077	0.38111963	0.27401452	0.6802002	0.648485	0.4662428	0.35083784
10	OCT	46	1.8197609	0.9709425	0.32746246	0.14207362	0.533555	0.3372625	0.1463255	0.12987979
11	NOV	46	2.8725	1.4263744	0.44650383	0.21432583	0.496562	0.3130341	0.1502592	0.08694624
12	DIC	46	4.7307608	2.7935087	1.27102013	0.71893619	0.5904988	0.4549906	0.2573596	0.21406508

EH-09 EST. HUACAPONGO

N°	name	n	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	t	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
1	ENE	46	5.00195649	3.5712821	2.2423001	1.60169486	0.713977	0.6278698	0.448493	0.36961004
2	FEB	46	8.30856516	5.00326564	2.23674303	1.1406629	0.6021817	0.4470566	0.2279837	0.14260624
3	MAR	46	14.7592173	8.9155922	4.62703761	3.40812332	0.6040694	0.5189826	0.3822655	0.32604555
4	ABR	46	7.46997829	3.83005075	1.28639555	0.67294101	0.5127258	0.3358691	0.1757003	0.12005793
5	MAY	46	1.7752174	0.88294107	0.34063479	0.22007056	0.4973707	0.3857956	0.2492472	0.13457245
6	JUN	46	0.48734783	0.25302222	0.10050699	0.04205716	0.519182	0.3972259	0.1662193	0.03535667
7	JUL	46	0.21	0.11275845	0.04540646	0.02446715	0.536945	0.4026878	0.2169873	0.13338292
8	AGO	46	0.11941304	0.06785072	0.029122	0.01546624	0.568202	0.4292069	0.2279451	0.12778872
9	SEP	46	0.09321739	0.05726763	0.02676416	0.01394002	0.6143449	0.4673524	0.2434188	0.11936353
10	OCT	46	0.3772826	0.24676763	0.1135473	0.05381161	0.6540657	0.4601385	0.2180659	0.16696365
11	NOV	46	0.6691087	0.40908744	0.17024466	0.06616252	0.6113916	0.4161572	0.161732	0.05417786
12	DIC	46	1.59984782	1.08504686	0.57493913	0.30704057	0.6782188	0.5298749	0.2829745	0.1894519

EH-10 EST. CONDORCERRO

N°	name	n	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	t	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
1	ENE	46	200.03804	55.763686	15.5661317	6.0057537	0.2787654	0.2791446	0.1077001	-0.0235194
2	FEB	46	277.13565	73.650415	15.3017971	9.0775428	0.2657558	0.20776254	0.1232518	0.03156872
3	MAR	46	357.57609	101.359759	19.2660867	10.5290161	0.2834635	0.19007629	0.1038777	0.04738235
4	ABR	46	252.69891	66.165705	16.1053795	17.1239094	0.2618361	0.24340978	0.2588034	0.1651281
5	MAY	46	102.64435	24.59572	6.42762303	4.6523946	0.2396208	0.26133096	0.1891546	0.09847745
6	JUN	46	60.32544	10.749435	1.47393675	2.0341222	0.1781908	0.1371176	0.1892306	0.03301739
7	JUL	46	46.12261	6.297246	-0.0149144	0.7305184	0.1365327	-0.0023684	0.116006	-0.0446455
8	AGO	46	42.70217	5.295063	0.12099477	0.8525044	0.1239998	0.02285049	0.1609999	0.03133239
9	SEP	46	46.25174	6.386183	-0.0087195	0.9803204	0.1380745	-0.0013654	0.1535065	0.03115489
10	OCT	46	65.85456	10.66185	1.86386423	1.5817164	0.1618999	0.17481621	0.1483529	-0.0297956
11	NOV	46	95.59957	23.037575	4.89491279	2.5080134	0.2409799	0.21247518	0.1088662	-0.0048066
12	DIC	46	138.0137	37.193608	6.68846762	3.8190416	0.2694922	0.17982841	0.10268	-0.0054422

EH-11 EST. SAN JACINTO

N°	name	n	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	t	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
1	ENE	46	3.4846522	2.32457009	1.15861834	0.53400006	0.6670881	0.4984226	0.2297199	0.11788846
2	FEB	46	8.5956957	5.37436137	2.72120635	1.76903387	0.6252387	0.5063311	0.3291617	0.25100232
3	MAR	46	12.4460652	7.57731834	3.69549602	2.22702263	0.6088124	0.487705	0.2939064	0.19761692
4	ABR	46	6.229652	4.18582307	2.43701308	1.70253387	0.6719192	0.5822064	0.4067381	0.33047137
5	MAY	46	2.217913	1.60791013	0.95863846	0.56313249	0.7249654	0.5962015	0.3502263	0.20538647
6	JUN	46	0.7558478	0.52879468	0.31634795	0.22181206	0.6996047	0.5982434	0.4194673	0.33331133
7	JUL	46	0.367913	0.23218357	0.10667062	0.06066719	0.6310827	0.4594236	0.2612897	0.21928375
8	AGO	46	0.2432174	0.14608309	0.05657839	0.02348253	0.6006277	0.3873028	0.1607477	0.11789452
9	SEP	46	0.1531522	0.08653285	0.02834229	0.01016159	0.5650122	0.3275322	0.1174304	0.08951212
10	OCT	46	0.267913	0.19262319	0.1235332	0.09284338	0.7189765	0.6413205	0.4819948	0.39632225
11	NOV	46	0.2972609	0.19672078	0.11486021	0.08217433	0.6617782	0.5838743	0.4177207	0.30136593
12	DIC	46	1.0411956	0.71277632	0.35437233	0.14796614	0.6845748	0.4971719	0.2075913	0.13050369

EH-12 EST. SECTOR TUTUNA

N°	name	n	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	t	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
1	ENE	46	7.9214783	4.6887933	2.2185993	1.69865944	0.5919089	0.4731706	0.36228072	0.33775213
2	FEB	46	13.6308478	7.0802382	2.549526	1.72883035	0.5194276	0.3600904	0.24417686	0.17297301
3	MAR	46	19.737739	8.5973835	2.6184742	1.69298982	0.435581	0.3045664	0.19691919	0.14004529
4	ABR	46	12.1362391	5.5883812	1.3738785	0.79349024	0.4604706	0.2458455	0.14198928	0.12391167
5	MAY	46	3.8419565	1.950257	0.4573871	0.14055127	0.5076208	0.2345266	0.07206808	0.04478844
6	JUN	46	1.769587	1.1157802	0.3891287	0.03907457	0.6305314	0.3487503	0.03501995	0.00212393
7	JUL	46	1.0155217	0.699686	0.3099661	0.07007196	0.6889916	0.4430075	0.10014773	-0.0040182
8	AGO	46	0.5514348	0.4078754	0.2132701	0.06922025	0.739662	0.5228805	0.16970931	0.02039882
9	SEP	46	0.3127826	0.2419739	0.1435684	0.06971571	0.7736169	0.5933217	0.2881125	0.17893405
10	OCT	46	0.8403478	0.6889121	0.4696598	0.28060324	0.819794	0.6817413	0.40731357	0.23881195
11	NOV	46	1.1625652	0.8977691	0.5446739	0.27571286	0.7722312	0.6066971	0.30710888	0.14193872
12	DIC	46	3.0889348	2.1295589	1.0734037	0.51750918	0.6894153	0.5040498	0.24301238	0.14623657

EH-13 EST. YANAPAMPA

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	62.97652	16.174705	4.2911647	2.06657	0.2568371	0.26530095	0.12776554	0.02898524
2	FEB	46	95.17761	26.561416	5.2259156	4.1735688	0.2790721	0.19674838	0.157129	0.0546129
3	MAR	46	107.77913	22.724435	3.1744269	2.949821	0.2108426	0.13969223	0.12980833	0.10693042
4	ABR	46	69.50826	15.335874	1.938967	2.0781536	0.2206338	0.12643342	0.1355093	0.09648375
5	MAY	46	32.3887	6.287836	0.7646205	0.5133436	0.1941367	0.12160314	0.08164074	0.00740474
6	JUN	46	20.90239	3.358865	0.3962082	0.3745749	0.1606928	0.11795896	0.11151831	0.05052551
7	JUL	46	16.93978	2.452304	0.2906943	0.2942074	0.144766	0.11853924	0.11997183	0.06642422
8	AGO	46	15.30389	2.022898	0.1751859	0.2126558	0.1321819	0.08660145	0.10512435	0.05983809
9	SEP	46	16.28617	2.385156	0.379263	0.4689019	0.1464528	0.15900968	0.19659167	0.07482755
10	OCT	46	21.65935	3.837541	0.9419118	0.6447772	0.1771771	0.2454467	0.16801831	0.10438325
11	NOV	46	27.30152	5.346227	1.0676324	0.4184097	0.1958216	0.19969829	0.07826262	0.00279583
12	DIC	46	38.78522	9.855894	2.9241541	1.7650045	0.2541147	0.29669091	0.17908113	0.0759932

EH-14 EST. PUENTE ALCO

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	37.87674	9.247222	2.77829788	2.1079022	0.2441399	0.30044675	0.22794978	0.11895785
2	FEB	46	54.21391	14.420242	2.93735587	1.4073644	0.2659878	0.20369672	0.09759645	-0.0067134
3	MAR	46	67.08978	18.776324	4.23062586	1.6137165	0.2798686	0.22531705	0.08594422	0.06748051
4	ABR	46	41.71761	11.08929	2.21141231	1.1270036	0.265818	0.19941875	0.10162992	0.03230631
5	MAY	46	20.82283	4.326217	1.02906316	0.4153264	0.2077632	0.23786673	0.09600219	0.03845036
6	JUN	46	14.04774	1.949228	0.39433744	0.3890071	0.1387574	0.20230442	0.19956982	0.09348897
7	JUL	46	12.11526	1.395636	0.12381253	0.1558941	0.1151965	0.08871407	0.11170114	0.04639363
8	AGO	46	11.28591	1.133681	-0.0193292	0.1538703	0.100451	-0.01705	0.13572628	0.02324332
9	SEP	46	11.60122	1.190591	0.11039764	0.2156913	0.1026264	0.09272506	0.18116317	0.04234376
10	OCT	46	14.44063	1.88347	0.38065838	0.3101424	0.1304285	0.20210483	0.16466544	0.03241594
11	NOV	46	17.11202	2.667022	0.4656884	0.3256446	0.1558566	0.1746099	0.12210048	0.07633989
12	DIC	46	23.18435	5.167145	0.84172992	0.4593858	0.2228721	0.16290039	0.08890515	0.01955027

EH-15 EST. SANTO DOMINGO

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	22.81137	7.6355859	2.15058511	1.09296729	0.3347272	0.28165292	0.14314125	0.11596434
2	FEB	46	38.509348	11.7248579	1.07169148	1.76617648	0.3044678	0.09140337	0.15063521	0.14572775
3	MAR	46	49.198217	16.5490286	5.09076659	4.22047066	0.3363746	0.30761725	0.2550283	0.20397997
4	ABR	46	24.033022	6.2195009	0.56624042	0.56147018	0.2587898	0.09104274	0.09027576	0.00094934
5	MAY	46	10.146196	2.179757	0.19416866	0.19832382	0.2148349	0.08907812	0.09098437	0.04684788
6	JUN	46	6.643087	1.0824106	0.09596271	0.10085184	0.1629379	0.08865648	0.09317336	-0.0280595
7	JUL	46	5.354283	0.6409725	0.00140605	0.07280637	0.1197121	0.00219362	0.11358736	0.01589623
8	AGO	46	4.881652	0.5865981	-0.0286362	0.08302815	0.1201638	-0.0488175	0.1415418	0.05003743
9	SEP	46	4.81837	0.5691889	0.02555876	0.06041111	0.1181289	0.04490382	0.10613543	0.06925847
10	OCT	46	5.483783	0.6397517	0.10944969	0.15470486	0.1166625	0.17108151	0.24182016	0.07856705
11	NOV	46	7.461109	1.7529425	0.57461144	0.41809253	0.234944	0.32779823	0.23850898	0.03579384
12	DIC	46	12.858174	4.3652049	1.4891251	0.84180294	0.3394887	0.34113522	0.19284386	0.08605993

EH-16 EST. CHOSICA

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	37.725	8.648971	2.2634149	1.49928	0.2292636	0.2616976	0.17334779	0.0913379
2	FEB	46	52.63	12.208628	0.2914913	0.8912309	0.2319709	0.02387584	0.07300009	-0.0251928
3	MAR	46	59.65391	13.141875	1.9151966	2.4715732	0.220302	0.14573238	0.18806854	0.04502935
4	ABR	46	39.74891	8.022749	1.1702885	1.2802622	0.2018357	0.14587126	0.15957899	-0.0326274
5	MAY	46	24.03739	4.082367	1.0053124	0.9688229	0.169834	0.24625721	0.23731889	0.08795114
6	JUN	46	20.62978	3.536382	0.5376417	0.4040775	0.1714212	0.15203158	0.11426297	0.0354812
7	JUL	46	19.26028	3.1565	0.3318294	0.2251438	0.1638865	0.10512573	0.07132705	-0.0139513
8	AGO	46	19.23422	3.243744	0.3471093	0.2441187	0.1686444	0.10700886	0.0752583	0.01077219
9	SEP	46	18.60965	2.891952	0.2738643	0.2039685	0.1554006	0.09469879	0.0705297	0.01393005
10	OCT	46	19.27783	2.786541	0.3457366	0.2454791	0.1445464	0.12407373	0.08809457	0.03530281
11	NOV	46	21.07804	3.357676	0.3423175	0.1644069	0.1592973	0.10195071	0.0489645	-0.0280275
12	DIC	46	26.22935	5.27328	0.7149895	0.6442595	0.201045	0.13558724	0.12217433	0.03294058



EH-17 EST. LA CAPILLA

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	29.927587	12.77961	3.8376634	1.42873612	0.4270177	0.3002958	0.1117981	-0.0009704
2	FEB	46	52.825783	20.8791914	5.5506304	4.3125006	0.3952462	0.2658451	0.20654538	0.13389056
3	MAR	46	55.951087	18.9346716	4.885564	2.96623874	0.3384147	0.2580221	0.15665647	0.07994817
4	ABR	46	22.7425	7.743755	1.2626683	0.28318308	0.3404971	0.1630563	0.03656922	0.02581994
5	MAY	46	6.691	2.4839923	0.7810194	0.52382961	0.3712438	0.314421	0.21088214	0.17914179
6	JUN	46	3.310043	1.0776174	0.283944	0.1309181	0.3255599	0.2634924	0.12148849	0.06315415
7	JUL	46	2.145391	0.6188155	0.1852544	0.11915459	0.2884394	0.2993694	0.1925527	0.09692125
8	AGO	46	1.64787	0.4217082	0.1288161	0.10672383	0.2559112	0.3054626	0.25307505	0.1307251
9	SEP	46	1.562848	0.433444	0.1341292	0.09032073	0.2773424	0.30945	0.20837925	0.09381288
10	OCT	46	2.572891	1.0112024	0.4005354	0.2371439	0.3930218	0.3960982	0.23451674	0.12719883
11	NOV	46	4.264152	1.7973695	0.7542279	0.4783487	0.4215069	0.4196287	0.2661382	0.14098855
12	DIC	46	12.842587	5.7495338	2.1234928	1.23870917	0.4476928	0.369333	0.21544515	0.14938704

EH-18 EST. SOCCI-S Y TOMA IMPERIAL

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	94.05261	30.76916	6.59944309	1.352384	0.3271484	0.21448239	0.04395258	0.03672678
2	FEB	46	136.4713	41.023604	6.58253906	6.659634	0.3006024	0.16045736	0.16233664	0.05726104
3	MAR	46	155.72609	48.059845	14.7510153	10.9348078	0.3086178	0.30693015	0.22752482	0.17687267
4	ABR	46	80.31674	24.063329	5.78122003	3.86525	0.2996054	0.24025022	0.16062824	0.0877403
5	MAY	46	34.30109	7.617812	1.36806864	0.6392454	0.2220866	0.17958814	0.08391457	0.06133056
6	JUN	46	20.08565	3.191304	0.15683796	0.1336968	0.1588848	0.04914541	0.04189409	0.0510795
7	JUL	46	14.54887	2.000048	0.18827791	0.321723	0.137471	0.09413668	0.16085763	0.03756241
8	AGO	46	12.10661	1.552399	0.1674705	0.2674405	0.1282274	0.10787851	0.17227564	-0.0049471
9	SEP	46	10.75085	1.339331	0.04783914	0.2048687	0.1245791	0.03571869	0.1529635	-0.0363728
10	OCT	46	13.48089	2.634981	0.99957177	0.8049466	0.1954605	0.37934684	0.30548478	0.17932062
11	NOV	46	24.16617	8.366588	3.38798962	2.062208	0.3462107	0.40494283	0.24648137	0.16176358
12	DIC	46	45.07	16.342966	4.78128184	2.8090677	0.362613	0.292559	0.17188237	0.06867255

EH-19 EST. CONTA

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	19.9033262	10.4552856	4.30665627	1.71727133	0.5253034	0.41191187	0.16424911	0.08196347
2	FEB	46	56.0449354	32.0319654	15.3586813	11.2053196	0.5715408	0.47947983	0.3498168	0.3132267
3	MAR	46	53.9376089	27.8996079	12.8820983	8.66864443	0.517257	0.46173044	0.31070847	0.2098762
4	ABR	46	15.1017827	7.3441547	2.53784547	1.60103205	0.4863104	0.34555992	0.21800086	0.1515585
5	MAY	46	2.3968913	1.1544343	0.28929144	0.0836994	0.4816382	0.25059151	0.07250253	0.04014168
6	JUN	46	0.6733478	0.3382232	0.04184651	-0.0199765	0.5023009	0.12372453	-0.0590632	0.0322262
7	JUL	46	0.4016304	0.2556121	0.09010316	0.01278269	0.636436	0.35249963	0.05000817	0.05154575
8	AGO	46	1.0702391	0.7177647	0.28588787	0.03752362	0.6706583	0.39830304	0.05227843	-6.842E-05
9	SEP	46	2.7231087	1.1428546	0.01923636	0.02484859	0.4196875	0.01683186	0.02174256	0.1045932
10	OCT	46	3.4819565	1.1022145	0.03829907	0.15171459	0.3165503	0.03474738	0.13764525	0.01852739
11	NOV	46	3.6094348	1.2684445	0.19128987	0.18924194	0.3514247	0.15080666	0.14919214	0.1249952
12	DIC	46	6.8241956	3.1460584	1.34342503	0.90978115	0.4610153	0.42701846	0.28918126	0.1109814

EH-20 EST. LETRAYOCC

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	47.986326	20.0930564	5.57521419	1.80959668	0.4187246	0.2774697	0.0900608	0.06764029
2	FEB	46	84.924869	32.1601194	7.11391451	6.80349442	0.3786891	0.221203	0.21155066	0.15903171
3	MAR	46	81.620522	26.2403383	6.81238224	7.48273784	0.3214919	0.2596149	0.28516164	0.12749961
4	ABR	46	31.248131	11.0200609	1.15290406	0.86844268	0.352663	0.1046187	0.07880562	0.09507957
5	MAY	46	8.2085	2.9032884	0.50003322	0.3437412	0.3536929	0.17223	0.11839719	0.10923941
6	JUN	46	3.844109	1.2721754	0.18300816	0.06833561	0.3309416	0.1438545	0.05371556	0.03442385
7	JUL	46	2.33013	0.6613845	0.08246455	0.0724738	0.2838401	0.1246847	0.10957891	0.07906046
8	AGO	46	1.896391	0.5513256	0.08070592	0.06493428	0.2907235	0.1463852	0.11777847	0.07760183
9	SEP	46	2.194196	0.6998217	0.12019197	0.04551574	0.3189423	0.1717465	0.06503905	0.02624722
10	OCT	46	3.445913	1.1295295	0.19946693	0.20056867	0.3277881	0.1765929	0.17756834	0.10564689
11	NOV	46	7.468587	2.3764981	0.48694942	0.59495744	0.3181992	0.2049021	0.25035048	0.07151753
12	DIC	46	16.033	6.3908841	2.2627825	1.31478349	0.3986081	0.3540641	0.20572795	0.08571747

**EH-21 EST. LA ACHIRANA**

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	14.4027391	5.945941	1.51948387	1.11837846	0.412834	0.25554977	0.18809108	0.05027993
2	FEB	46	27.4854565	11.044901	1.95447694	0.79931592	0.4018453	0.1769574	0.07236968	0.00494928
3	MAR	46	26.918087	9.4645884	1.96784749	1.6701154	0.351607	0.20791686	0.17645938	0.10110122
4	ABR	46	9.6222826	3.2678091	0.01416546	0.35015102	0.3396085	0.00433485	0.10715161	0.04243785
5	MAY	46	3.0919348	1.8014613	0.45816745	-0.0518489	0.5826324	0.25433099	-0.0287816	0.00434807
6	JUN	46	1.234913	0.9597362	0.58391106	0.28656386	0.7771691	0.60840786	0.29858606	0.12859206
7	JUL	46	0.5772826	0.5210102	0.42763453	0.3209297	0.9025218	0.82077964	0.61597591	0.41241605
8	AGO	46	0.1218478	0.1138478	0.10187681	0.09146127	0.9343443	0.89485074	0.80336422	0.75793818
9	SEP	46	0.9639348	0.7955126	0.5324751	0.27466167	0.8252763	0.66934845	0.34526377	0.11661558
10	OCT	46	3.5957391	1.9284357	0.2338021	-0.2731373	0.5363114	0.12123925	-0.1416367	0.01761985
11	NOV	46	5.8737174	2.0944874	-0.1985833	0.11759198	0.3565863	-0.0948123	0.05614356	0.102941
12	DIC	46	6.9066305	2.4913812	0.15178896	0.38809556	0.3607231	0.06092562	0.15577526	0.10984937

**EH-22 EST. BELLA UNIÓN**

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	23.0096958	11.4295314	3.16414205	0.52655345	0.4967268	0.2768392	0.04606956	-0.0071573
2	FEB	46	54.841174	27.5441431	8.9938768	5.14406839	0.502253	0.3265259	0.18675725	0.14455161
3	MAR	46	46.2649563	19.520537	4.32563833	0.88993921	0.4219292	0.2215942	0.04558989	-0.0295642
4	ABR	46	16.075674	6.9790102	1.72084978	0.88716979	0.4341348	0.246575	0.12711972	0.01439309
5	MAY	46	3.1506304	1.3201097	0.17016376	-0.0132166	0.4189986	0.1289012	-0.0100118	0.02798963
6	JUN	46	1.3183261	0.546272	0.13640962	0.0650077	0.4143679	0.2497101	0.11900244	0.05811927
7	JUL	46	0.8813913	0.3500502	0.07440329	0.02509817	0.3971564	0.2125503	0.07169876	-0.0235444
8	AGO	46	0.6357174	0.2427483	0.03873254	0.01139668	0.3818494	0.1595584	0.04694855	-0.0303911
9	SEP	46	0.5766087	0.2099884	0.04240013	0.0354703	0.3641784	0.2019165	0.16891549	0.1149504
10	OCT	46	0.6890217	0.36127	0.17333017	0.13967017	0.5243231	0.4797801	0.38660877	0.32938443
11	NOV	46	1.2613913	0.769287	0.37635981	0.20991101	0.6098718	0.489232	0.27286439	0.15850712
12	DIC	46	4.2618043	2.3125734	0.7788203	0.26339329	0.5426278	0.3367765	0.11389618	0.06092897

**EH-23 EST. CHUCARAPI**

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	69.207935	32.757291	11.0186444	4.56167398	0.473317	0.33637227	0.13925675	0.05941677
2	FEB	46	120.715478	53.213894	13.5080475	6.29450498	0.4408208	0.25384437	0.11828687	0.05034714
3	MAR	46	83.734522	35.827565	10.767225	3.85434312	0.4278709	0.30052908	0.10758038	0.03426726
4	ABR	46	38.123022	14.514178	5.8215206	4.18255856	0.3807195	0.40109198	0.28817054	0.16459798
5	MAY	46	19.890848	5.488895	1.0395544	0.39911842	0.2759508	0.18939229	0.0727138	0.05133377
6	JUN	46	15.408217	3.821117	0.9543604	0.38386954	0.2479921	0.24975954	0.10046003	0.04666822
7	JUL	46	12.937478	2.509887	0.4814098	0.02495558	0.1940012	0.19180539	0.00994291	-0.053513
8	AGO	46	10.931	1.903563	0.4144401	0.16298035	0.1741436	0.21771803	0.08561856	0.01286999
9	SEP	46	9.215109	1.944933	0.593482	0.33508324	0.2110591	0.30514264	0.17228525	0.07422565
10	OCT	46	7.4465	1.233681	0.1033114	0.1729408	0.1656726	0.08374238	0.14018279	0.0180014
11	NOV	46	8.82963	2.522038	1.2767208	1.00712057	0.2856335	0.50622581	0.39932806	0.23253027
12	DIC	46	14.320283	5.069011	2.1494561	1.19692292	0.3539742	0.42403855	0.23612553	0.08611321

**EH-24 EST. CHIVAYA**

N°	name	n	L1	L2	L3	L4	t	t3	t4	t5
1	ENE	46	1.6915217	0.79870917	0.42905744	0.30675407	0.4721838	0.53718857	0.3840623	0.27836556
2	FEB	46	2.5182609	1.05850242	0.32775008	0.20910338	0.4203307	0.30963565	0.1975464	0.13616501
3	MAR	46	2.1926956	0.86589757	0.34227258	0.20208806	0.3949009	0.39528069	0.2333856	0.1631751
4	ABR	46	1.1686522	0.40708696	0.20926496	0.17349403	0.3483389	0.51405468	0.4261842	0.32243539
5	MAY	46	0.8260217	0.23099951	0.09482608	0.08521722	0.2796531	0.41050338	0.3689065	0.27090648
6	JUN	46	0.7625	0.2146459	0.0828668	0.07581992	0.2815028	0.38606282	0.3532326	0.27770849
7	JUL	46	0.7076956	0.17637874	0.06515929	0.06028179	0.2492297	0.36942824	0.3417747	0.25717485
8	AGO	46	0.6273696	0.13069324	0.01322095	0.03335621	0.2083194	0.10116016	0.2552252	0.05002978
9	SEP	46	0.5990435	0.11478454	-0.0041088	0.02195984	0.191613	-0.035796	0.1913136	0.00329976
10	OCT	46	0.5589565	0.09853913	0.0014805	0.01469397	0.1762912	0.0150245	0.1491181	0.01598886
11	NOV	46	0.5347609	0.09987874	0.00655415	0.02419188	0.1867727	0.06562106	0.2422125	0.08142343
12	DIC	46	0.6241957	0.12347971	0.00783136	0.02571697	0.1978221	0.06342223	0.2082688	0.06150651

EH-25 EST. LA TRANCA

N°	name	n	L_1	L_2	L_3	L_4	t	t_3	t_4	t_5
1	ENE	46	3.6243696	1.9637348	0.70785087	0.22099011	0.5418142	0.3604615	0.11253562	0.02861071
2	FEB	46	7.2616956	3.6689874	0.9705436	0.27206141	0.5052522	0.2645263	0.07415163	0.04016569
3	MAR	46	5.8451739	3.0669372	1.13257073	0.4448196	0.5246956	0.369284	0.14503708	0.07428583
4	ABR	46	1.7312391	0.712043	0.2291415	0.09206052	0.411291	0.3218085	0.12929068	0.02569886
5	MAY	46	1.0906957	0.2875159	0.07330685	0.05558478	0.2636079	0.2549662	0.19332763	0.08909729
6	JUN	46	1.1328478	0.2675087	0.06182833	0.04270295	0.2361382	0.2311264	0.15963202	0.07574073
7	JUL	46	1.0450652	0.2467338	0.06692161	0.04921288	0.2360942	0.27123	0.19945739	0.09067261
8	AGO	46	0.8513043	0.2059159	0.05120567	0.04493244	0.2418829	0.2486727	0.2182077	0.10480244
9	SEP	46	0.7319565	0.2197855	0.10201371	0.08053883	0.3002713	0.4641512	0.36644283	0.24690741
10	OCT	46	0.6521087	0.2367522	0.14288656	0.13700802	0.3630563	0.603528	0.57869803	0.53807338
11	NOV	46	0.5511957	0.1852681	0.09204993	0.08866365	0.3361204	0.4968471	0.47856939	0.42346489
12	DIC	46	0.7078261	0.2704184	0.1087938	0.0690762	0.3820407	0.4023166	0.25544198	0.11634045

EH-26 EST. AGUAS CALIENTES

N°	name	n	L_1	L_2	L_3	L_4	t	t_3	t_4	t_5
1	ENE	46	1.0459348	0.30837246	0.0919718	0.03134104	0.2948295	0.29824908	0.10163372	0.04630481
2	FEB	46	1.8350435	0.75282512	0.2714992	0.14840191	0.4102492	0.36064047	0.19712667	0.12271753
3	MAR	46	1.4402609	0.55305894	0.24479341	0.14104131	0.3839991	0.44261722	0.25502039	0.13365281
4	ABR	46	0.7872391	0.15564106	0.04503083	0.0324324	0.1977049	0.28932488	0.20837945	0.13391002
5	MAY	46	0.6486522	0.08091691	0.01198722	0.00754626	0.1247462	0.14814235	0.09325938	0.04353256
6	JUN	46	0.6327174	0.06949614	0.00858024	0.0114077	0.1098376	0.12346355	0.16414873	0.04037733
7	JUL	46	0.6212609	0.06885024	0.0148278	0.01419559	0.1108234	0.21536307	0.20618074	0.10799145
8	AGO	46	0.5885	0.06281111	0.01272859	0.01415922	0.1067309	0.20264871	0.22542539	0.09950914
9	SEP	46	0.5531957	0.0595058	0.00420672	0.0106579	0.1075674	0.07069429	0.17910683	0.08201563
10	OCT	46	0.5222174	0.05560966	0.00325982	0.00949944	0.1064876	0.05861959	0.17082357	0.0530196
11	NOV	46	0.5139565	0.05957971	0.00287339	0.00478747	0.1159236	0.04822758	0.08035396	0.06766711
12	DIC	46	0.5465217	0.06659517	0.00831502	0.00776526	0.1218527	0.12485919	0.1166039	0.031173

A37 EST. PUENTE TUMBES

N°	name	n	L_1	L_2	L_3	L_4	t	t_3	t_4	t_5
1	ENE	46	120.46739	61.612977	33.838487	26.174533	0.5114494	0.5492104	0.42482176	0.31465314
2	FEB	46	269.40456	110.02469	45.358117	29.67356	0.4083995	0.412254	0.2696991	0.10649873
3	MAR	46	380.83913	143.49718	30.944118	7.604313	0.3767921	0.2156427	0.05299277	-0.0085432
4	ABR	46	336.80739	135.381439	47.824189	21.521552	0.4019551	0.3532551	0.15896974	0.05109791
5	MAY	46	168.20217	65.4574	24.252717	14.71791	0.3891591	0.3705115	0.22484715	0.10215761
6	JUN	46	72.36278	24.34514	6.881651	5.248843	0.3364318	0.2826704	0.21560126	0.14117937
7	JUL	46	42.69715	13.772761	3.494707	2.008186	0.3225686	0.2537405	0.1458085	0.03241983
8	AGO	46	25.7902	8.434329	2.695502	1.583559	0.3270363	0.319587	0.18775161	0.08874806
9	SEP	46	19.07035	5.775769	2.007754	1.575971	0.3028665	0.3476167	0.27285911	0.16533692
10	OCT	46	17.21343	5.007072	1.312885	1.191392	0.2908817	0.2622061	0.23794178	0.09761182
11	NOV	46	20.20009	8.661519	5.117726	4.270985	0.4287862	0.5908579	0.4930988	0.34607011
12	DIC	46	50.11113	30.922659	23.188217	20.683765	0.6170817	0.7498778	0.668887	0.58326925

---

**ANEXO VIII: AJUSTE DE LAS DISTRIBUCIONES MEDIANTE LA PRUEBA:  
DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL (DMO)**

El ajuste de la distribución es aquella que posea la menor distancia entre la distribución empírica y las distribuciones teóricas evaluadas.

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - ENERO								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
ENE_A1	0.011871529	GLO	ENE_A13	0.018548136	PE3	ENE_A28	0.016496219	GEV
ENE_A2	0.043263784	GEV	ENE_A14	0.009036119	GLO	ENE_A31	0.063963166	PE3
ENE_A5	0.027338491	GLO	ENE_A16	0.010220973	GPA	ENE_A32	0.038917347	GPA
ENE_A6	0.009427897	WEI	ENE_A17	0.012876253	GEV	ENE_A35	0.001539263	GEV
ENE_A7	0.032792096	GLO	ENE_A18	0.001553144	WEI	ENE_A36	0.079331757	GPA
ENE_A8	0.010505054	LN3	ENE_A21	0.030239824	GPA	ENE_A37	0.006792713	GLO
ENE_A9	0.011447408	LN3	ENE_A22	0.04159503	GPA	ENE_A38	0.010148493	LN3
ENE_A10	0.006995108	GPA	ENE_A23	0.034182768	PE3	ENE_A39	0.003095517	LN3
ENE_A11	0.006608142	LN3	ENE_A24	0.035776082	GPA	ENE_A40	0.002775584	LN3
ENE_A12	0.019296992	GPA	ENE_A27	0.028682253	PE3	ENE_A42	0.000311644	LN3

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - FEBRERO								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
FEB_A1	0.009377440	GLO	FEB_A13	0.001344304	LN3	FEB_A28	0.000611438	LN3
FEB_A2	0.013470531	GEV	FEB_A14	0.009581232	GEV	FEB_A31	0.042873176	GPA
FEB_A5	0.059360340	GLO	FEB_A16	0.004031476	GEV	FEB_A32	0.008270643	GPA
FEB_A6	0.024749295	GPA	FEB_A17	0.018285305	GPA	FEB_A35	0.007667543	GPA
FEB_A7	0.003907315	GLO	FEB_A18	0.021330418	LN3	FEB_A36	0.019957033	LN3
FEB_A8	0.019529545	LN3	FEB_A21	0.011362340	GEV	FEB_A37	0.012162624	LN3
FEB_A9	0.011185091	GEV	FEB_A22	0.015964635	GEV	FEB_A38	0.063924485	GPA
FEB_A10	0.007875070	LN3	FEB_A23	0.002250064	GEV	FEB_A39	0.031846613	WEI
FEB_A11	0.006241620	WEI	FEB_A24	0.004105187	GLO	FEB_A40	0.008368666	GPA
FEB_A12	0.002034096	WEI	FEB_A27	0.008328425	GPA	FEB_A42	0.052545123	GLO

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - MARZO								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
MAR_A1	0.003879866	GPA	MAR_A13	0.011737053	GPA	MAR_A28	0.013098997	LN3
MAR_A2	0.042978669	PE3	MAR_A14	0.001236841	LN3	MAR_A31	0.034858162	PE3
MAR_A5	0.014245555	GPA	MAR_A16	0.001171114	PE3	MAR_A32	0.006428045	GPA
MAR_A6	0.072083676	GPA	MAR_A17	0.006065176	GPA	MAR_A35	0.010318538	GEV
MAR_A7	0.018495126	GEV	MAR_A18	0.009501664	GLO	MAR_A36	0.044177027	GPA
MAR_A8	0.017598569	GPA	MAR_A21	0.010126455	PE3	MAR_A37	0.033237427	GPA
MAR_A9	0.007021995	GEV	MAR_A22	0.008514875	GEV	MAR_A38	0.000406123	WEI
MAR_A10	0.011341204	GLO	MAR_A23	0.018129630	LN3	MAR_A39	0.003700334	GLO
MAR_A11	0.001044920	GEV	MAR_A24	0.062325284	GLO	MAR_A40	0.006932648	PE3
MAR_A12	0.013181583	WEI	MAR_A27	0.034627454	GPA	MAR_A42	0.029182415	GLO

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - ABRIL								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
ABR_A1	0.046393025	GPA	ABR_A13	0.000999464	GPA	ABR_A28	0.039304892	GLO
ABR_A2	0.001607210	WEI	ABR_A14	0.001987903	PE3	ABR_A31	0.028779554	GPA
ABR_A5	0.023086760	GLO	ABR_A16	0.000266903	LN3	ABR_A32	0.000094947	GEV
ABR_A6	0.021140759	GPA	ABR_A17	0.017556265	WEI	ABR_A35	0.000355061	GEV
ABR_A7	0.008348933	LN3	ABR_A18	0.013720636	WEI	ABR_A36	0.005193539	WEI
ABR_A8	0.015319480	GPA	ABR_A21	0.021022799	GPA	ABR_A37	0.014860561	PE3
ABR_A9	0.016553400	GEV	ABR_A22	0.007319405	LN3	ABR_A38	0.012759415	GEV
ABR_A10	0.001047527	GPA	ABR_A23	0.001073552	LN3	ABR_A39	0.018546527	GEV
ABR_A11	0.006755534	GPA	ABR_A24	0.025965364	WEI	ABR_A40	0.043251910	PE3
ABR_A12	0.042759997	GLO	ABR_A27	0.004633103	GEV	ABR_A42	0.011007821	LN3

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - MAYO								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
MAY_A1	0.002859879	GLO	MAY_A13	0.011936360	WEI	MAY_A28	0.061809511	GLO
MAY_A2	0.015782060	GEV	MAY_A14	0.025588256	GPA	MAY_A31	0.004006995	GEV
MAY_A5	0.036954339	GLO	MAY_A16	0.024551143	WEI	MAY_A32	0.016163264	WEI
MAY_A6	0.010743628	GEV	MAY_A17	0.003737091	GPA	MAY_A35	0.139057838	GPA
MAY_A7	0.029382390	GLO	MAY_A18	0.012926437	WEI	MAY_A36	0.051563734	GPA
MAY_A8	0.010270430	GEV	MAY_A21	0.010348232	LN3	MAY_A37	0.006390172	LN3
MAY_A9	0.035654729	GLO	MAY_A22	0.017829367	GPA	MAY_A38	0.027809617	GLO
MAY_A10	0.000761861	GEV	MAY_A23	0.035341266	GPA	MAY_A39	0.020113581	GLO
MAY_A11	0.008724460	LN3	MAY_A24	0.004968804	WEI	MAY_A40	0.014132095	GPA
MAY_A12	0.003573022	GEV	MAY_A27	0.001369683	GPA	MAY_A42	0.017818432	GLO

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - JUNIO								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
JUN_A1	0.057777552	GLO	JUN_A13	0.006835838	GPA	JUN_A28	0.062359306	GLO
JUN_A2	0.005777936	GEV	JUN_A14	0.137189578	PE3	JUN_A31	0.004928185	LN3
JUN_A5	0.058818713	GPA	JUN_A16	0.005673711	WEI	JUN_A32	0.015223926	GLO
JUN_A6	0.009869790	GLO	JUN_A17	0.001205942	GLO	JUN_A35	0.041049603	PE3
JUN_A7	0.005256467	GLO	JUN_A18	0.010719950	WEI	JUN_A36	0.011728660	GPA
JUN_A8	0.003307182	GEV	JUN_A21	0.005155789	GPA	JUN_A37	0.010982189	GEV
JUN_A9	0.003400985	LN3	JUN_A22	0.029675475	GPA	JUN_A38	0.001210938	GEV
JUN_A10	0.001226354	PE3	JUN_A23	0.098363320	GPA	JUN_A39	0.004262895	WEI
JUN_A11	0.025414971	PE3	JUN_A24	0.005392931	GPA	JUN_A40	0.029313060	GLO
JUN_A12	0.006892986	GLO	JUN_A27	0.006845708	GPA	JUN_A42	0.095732211	GLO

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - JULIO								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
JUL_A1	0.055975853	GLO	JUL_A13	0.016284288	GPA	JUL_A28	0.061374139	GLO
JUL_A2	0.000637175	PE3	JUL_A14	0.114199883	PE3	JUL_A31	0.001303099	GEV
JUL_A5	0.034084732	GPA	JUL_A16	0.006847386	PE3	JUL_A32	0.000859854	GLO
JUL_A6	0.058836211	GLO	JUL_A17	0.007805453	WEI	JUL_A35	0.008296536	PE3
JUL_A7	0.005413234	GEV	JUL_A18	0.006330010	GEV	JUL_A36	0.012717267	GPA
JUL_A8	0.020987311	LN3	JUL_A21	0.000635935	LN3	JUL_A37	0.000197572	PE3
JUL_A9	0.028111287	WEI	JUL_A22	0.013197104	GLO	JUL_A38	0.074763421	GLO
JUL_A10	0.004885373	WEI	JUL_A23	0.123547787	PE3	JUL_A39	0.033479072	WEI
JUL_A11	0.007832847	GPA	JUL_A24	0.003075244	WEI	JUL_A40	0.063608751	GLO
JUL_A12	0.006395677	PE3	JUL_A27	0.062720792	GPA	JUL_A42	0.068789942	GLO

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - AGOSTO								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
AGO_A1	0.012091830	WEI	AGO_A13	0.026542286	PE3	AGO_A28	0.080027409	GLO
AGO_A2	0.006691659	LN3	AGO_A14	0.095979851	PE3	AGO_A31	0.000006159	GLO
AGO_A5	0.032256822	GPA	AGO_A16	0.001311906	WEI	AGO_A32	0.024533444	GLO
AGO_A6	0.001003002	GEV	AGO_A17	0.012680924	LN3	AGO_A35	0.004363364	LN3
AGO_A7	0.000394489	GLO	AGO_A18	0.016873738	LN3	AGO_A36	0.008907054	GPA
AGO_A8	0.015402631	WEI	AGO_A21	0.008649210	GLO	AGO_A37	0.015390061	LN3
AGO_A9	0.011701111	GPA	AGO_A22	0.004092465	GLO	AGO_A38	0.008927811	GLO
AGO_A10	0.042695490	PE3	AGO_A23	0.139839268	PE3	AGO_A39	0.029682237	WEI
AGO_A11	0.005933091	WEI	AGO_A24	0.008607970	WEI	AGO_A40	0.074574674	GLO
AGO_A12	0.006105259	GLO	AGO_A27	0.001838165	GPA	AGO_A42	0.038224654	GLO

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - SEPTIEMBRE								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
SEP_A1	0.012161716	WEI	SEP_A13	0.045028941	GPA	SEP_A28	0.023575800	GLO
SEP_A2	0.008980418	PE3	SEP_A14	0.036934391	PE3	SEP_A31	0.020243278	GLO
SEP_A5	0.028562266	GPA	SEP_A16	0.008851690	GLO	SEP_A32	0.008272111	GLO
SEP_A6	0.001124133	LN3	SEP_A17	0.007328252	GLO	SEP_A35	0.060491422	PE3
SEP_A7	0.001031900	LN3	SEP_A18	0.002388561	WEI	SEP_A36	0.005475405	GEV
SEP_A8	0.012175247	GEV	SEP_A21	0.010312775	LN3	SEP_A37	0.005491717	GLO
SEP_A9	0.006949810	GPA	SEP_A22	0.014769683	GLO	SEP_A38	0.007764373	WEI
SEP_A10	0.002306379	LN3	SEP_A23	0.018072390	GPA	SEP_A39	0.033643798	WEI
SEP_A11	0.005471874	WEI	SEP_A24	0.003041260	GPA	SEP_A40	0.049532740	GLO
SEP_A12	0.013165094	GLO	SEP_A27	0.013987316	PE3	SEP_A42	0.104658947	GLO

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - OCTUBRE								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
OCT_A1	0.028018884	GPA	OCT_A13	0.004083600	GPA	OCT_A28	0.017739982	GLO
OCT_A2	0.008572199	GEV	OCT_A14	0.013346497	PE3	OCT_A31	0.108490892	GLO
OCT_A5	0.044913663	GPA	OCT_A16	0.001919024	LN3	OCT_A32	0.001290035	GLO
OCT_A6	0.000969623	GPA	OCT_A17	0.001141485	GEV	OCT_A35	0.179872661	GPA
OCT_A7	0.012788024	LN3	OCT_A18	0.050759522	GLO	OCT_A36	0.028115441	GLO
OCT_A8	0.030509239	GPA	OCT_A21	0.012488904	LN3	OCT_A37	0.013978648	GLO
OCT_A9	0.005052729	PE3	OCT_A22	0.018895239	GLO	OCT_A38	0.028628552	GLO
OCT_A10	0.021911837	PE3	OCT_A23	0.013889134	LN3	OCT_A39	0.018345959	WEI
OCT_A11	0.005980022	PE3	OCT_A24	0.015089111	GLO	OCT_A40	0.059944255	GLO
OCT_A12	0.001731964	LN3	OCT_A27	0.011920626	LN3	OCT_A42	0.001610463	GEV

DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - NOVIEMBRE								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
NOV_A1	0.017400710	GLO	NOV_A13	0.008068684	GPA	NOV_A28	0.071954108	GLO
NOV_A2	0.000444586	PE3	NOV_A14	0.030837849	PE3	NOV_A31	0.106185971	GLO
NOV_A5	0.013620183	WEI	NOV_A16	0.001213461	GPA	NOV_A32	0.023288371	WEI
NOV_A6	0.000618472	GPA	NOV_A17	0.008220586	WEI	NOV_A35	0.048035810	GEV
NOV_A7	0.004063626	WEI	NOV_A18	0.006382398	GEV	NOV_A36	0.007222854	WEI
NOV_A8	0.001175433	GPA	NOV_A21	0.003646064	LN3	NOV_A37	0.035502455	GLO
NOV_A9	0.011200650	GLO	NOV_A22	0.006234200	LN3	NOV_A38	0.003694068	LN3
NOV_A10	0.001183088	GPA	NOV_A23	0.006391910	GEV	NOV_A39	0.018612809	GPA
NOV_A11	0.038748907	PE3	NOV_A24	0.048693231	GLO	NOV_A40	0.075465322	GLO
NOV_A12	0.013553958	WEI	NOV_A27	0.019105105	GLO	NOV_A42	0.007342354	GLO

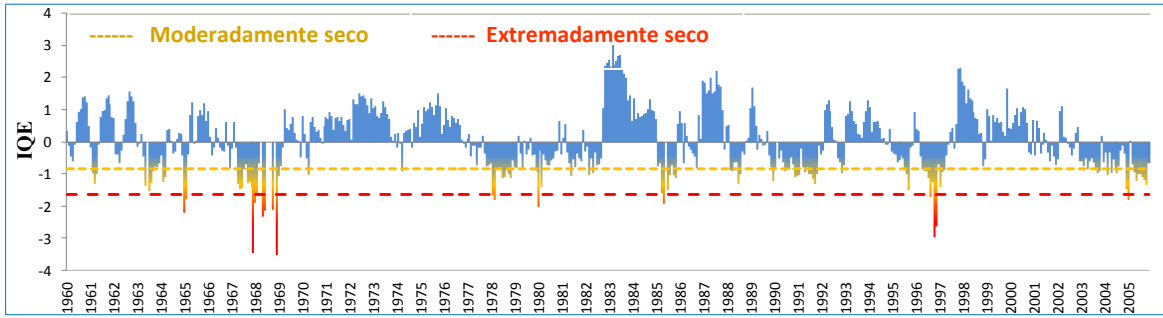
DISTANCIA MÍNIMA ORTOGONAL - DICIEMBRE								
Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.	Estación	Dist. Min	Dist. Prob.
DIC_A1	0.017740539	GEV	DIC_A13	0.039827672	PE3	DIC_A28	0.038246851	GLO
DIC_A2	0.040366551	GLO	DIC_A14	0.009125591	PE3	DIC_A31	0.004435772	LN3
DIC_A5	0.012583035	WEI	DIC_A16	0.012839716	LN3	DIC_A32	0.010082083	WEI
DIC_A6	0.029304458	GPA	DIC_A17	0.022850075	WEI	DIC_A35	0.013988004	GLO
DIC_A7	0.004249446	WEI	DIC_A18	0.019746277	GPA	DIC_A36	0.054178097	PE3
DIC_A8	0.012729236	PE3	DIC_A21	0.015092686	LN3	DIC_A37	0.031272335	GEV
DIC_A9	0.017932952	GPA	DIC_A22	0.017037793	PE3	DIC_A38	0.008182465	GLO
DIC_A10	0.015920612	GPA	DIC_A23	0.014509162	GEV	DIC_A39	0.006082245	PE3
DIC_A11	0.012011738	PE3	DIC_A24	0.015958774	LN3	DIC_A40	0.011190677	GEV
DIC_A12	0.012225050	WEI	DIC_A27	0.007983594	GPA	DIC_A42	0.016207153	WEI

---

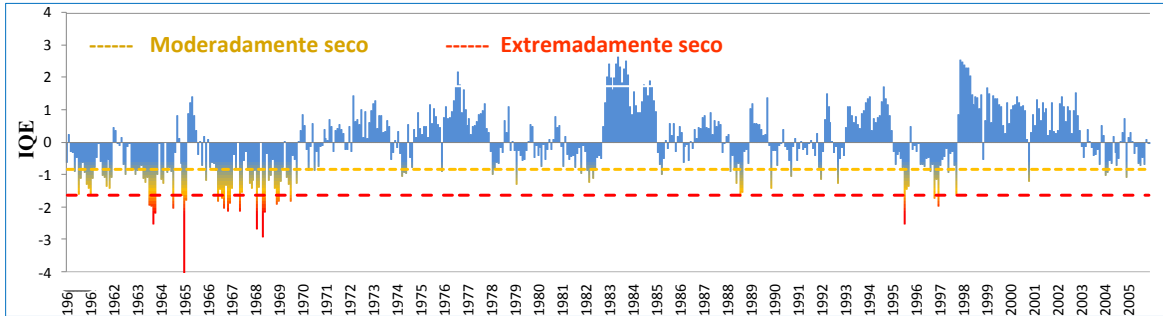
**ANEXO IX: CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS  
(INTENSIDAD, DURACIÓN Y MAGNITUD)**



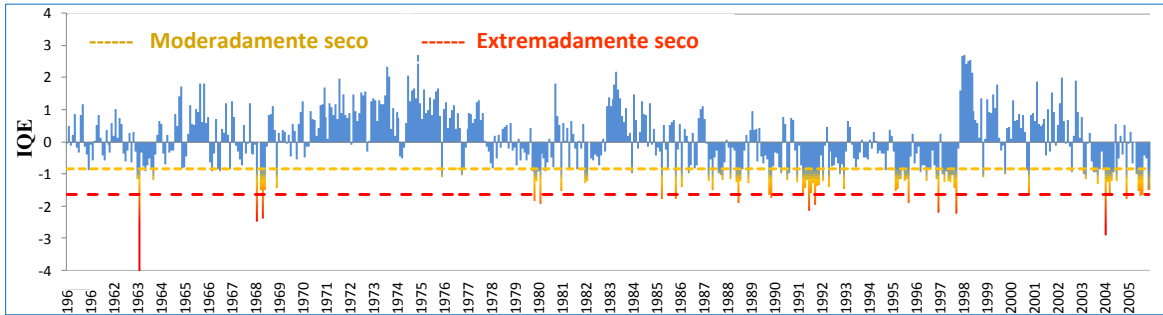
EH-01 EL TIGRE



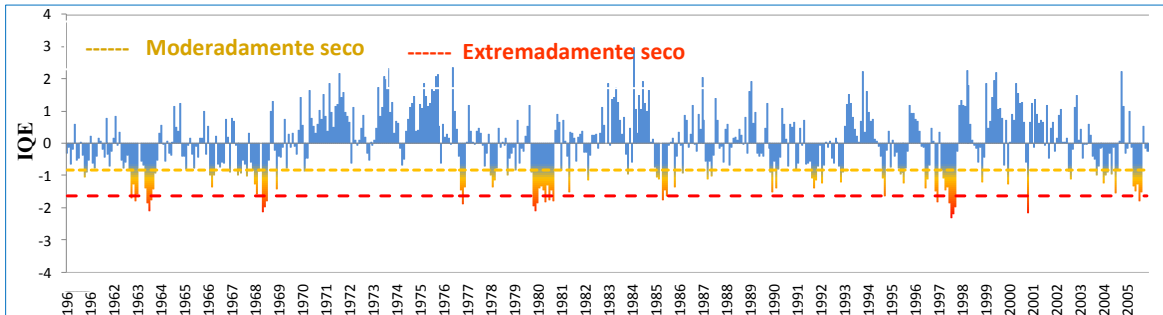
EH-02 ARDILLA



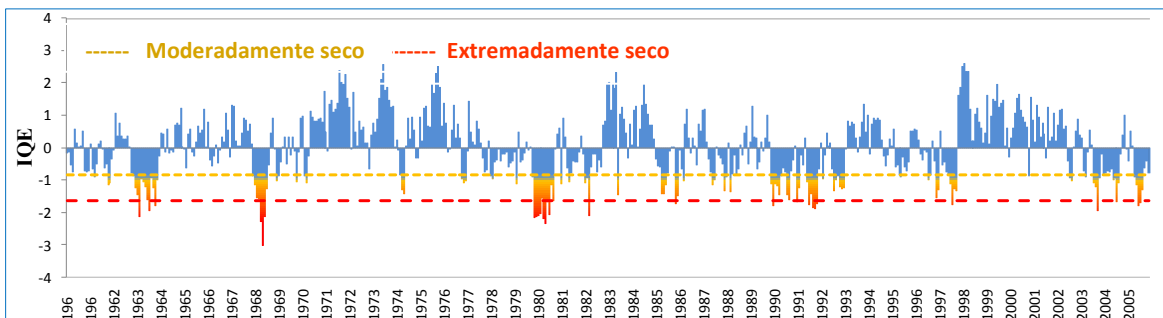
EH-03 PUCHACA



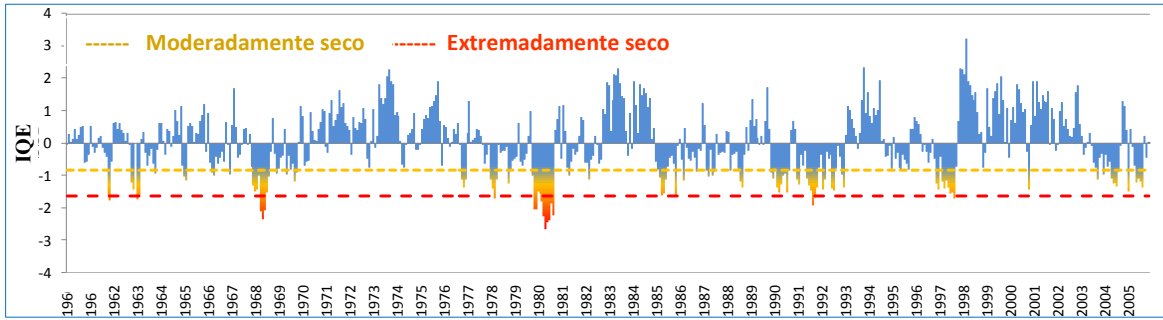
EH-04 RACA RUMI



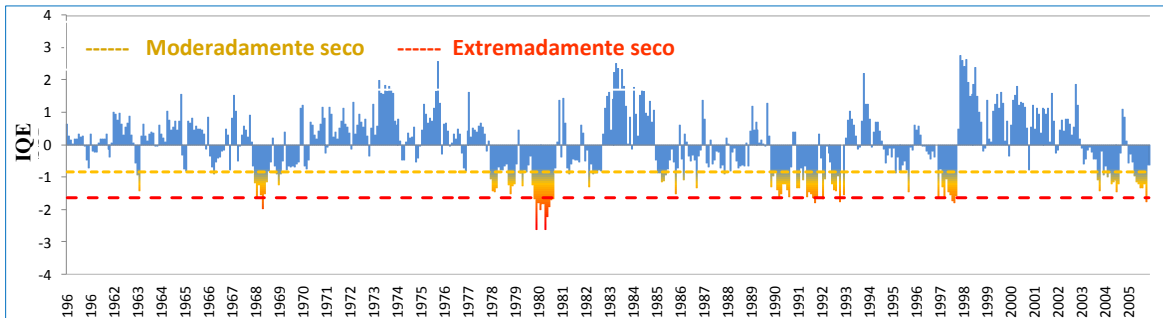
EH-05 EL BATAN



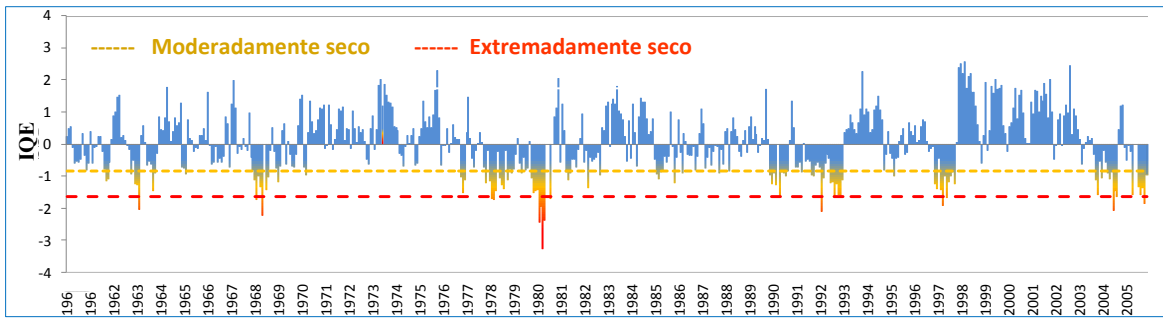
EH-06 YONAN



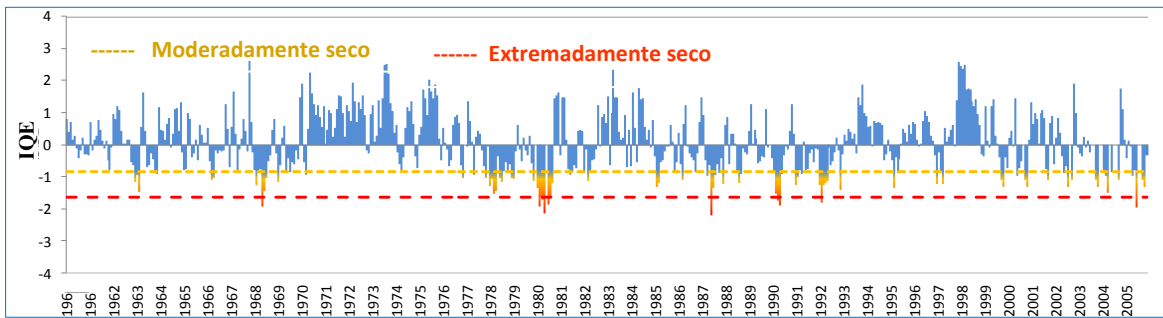
EH-07 SALINAR TAMBO



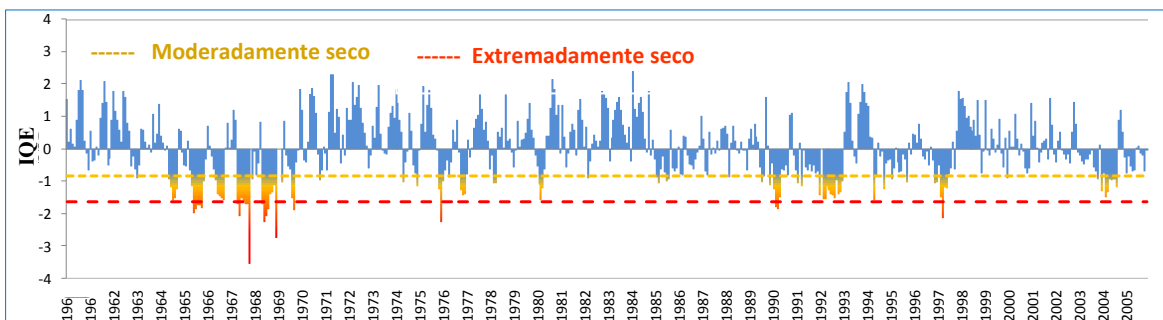
EH-08 QUIRIHUAC-MOCHE



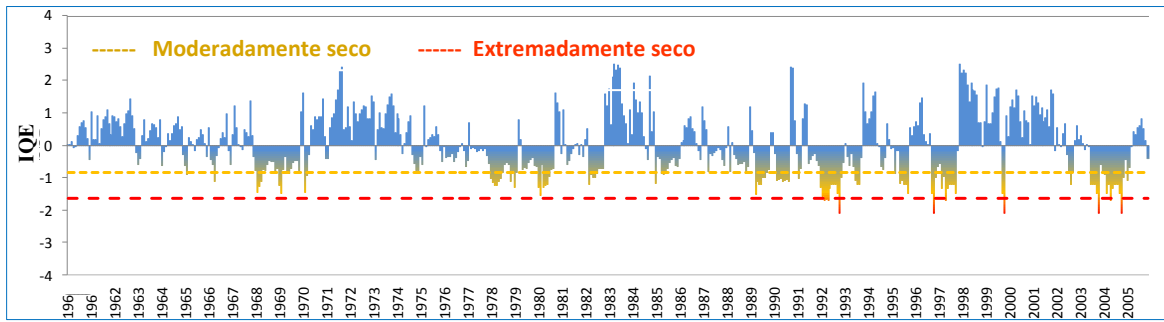
EH-09 HUACAPONGO



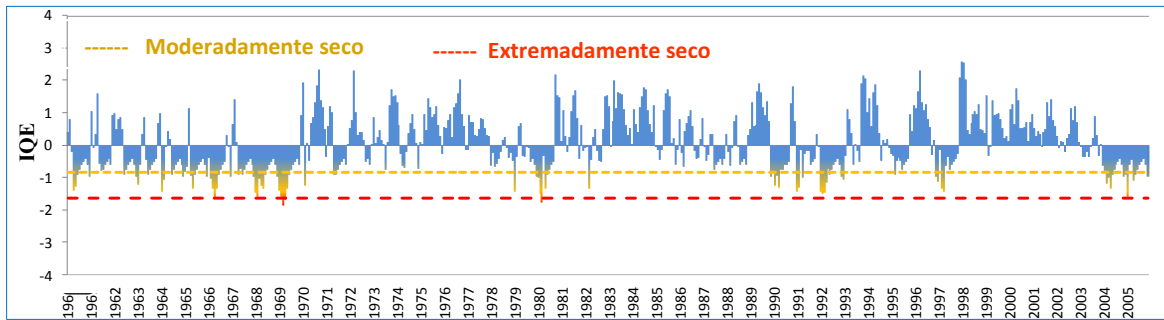
EH-10 CONDORCERRO



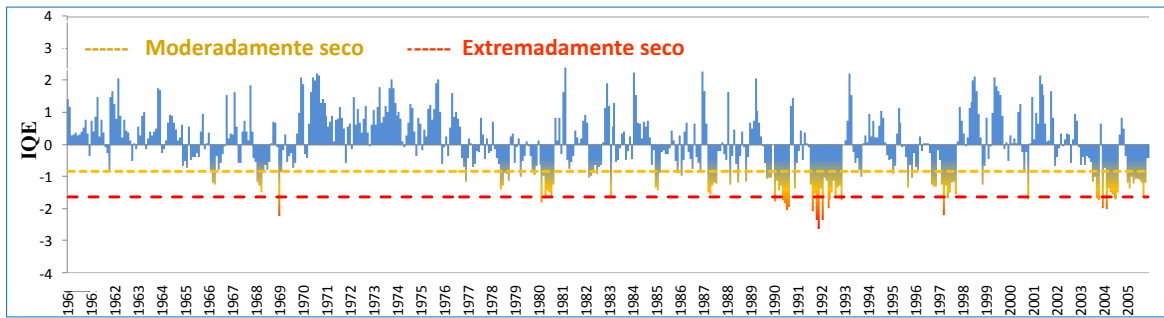
EH-11 SAN JACINTO



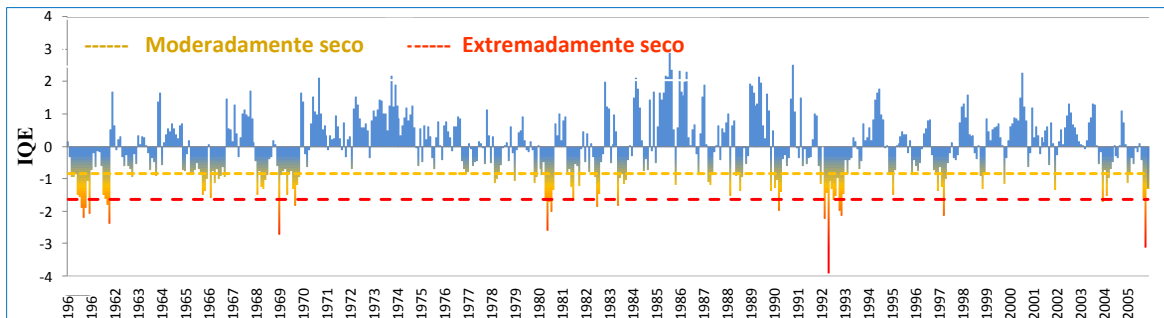
EH-12 SECTOR TUTUMA



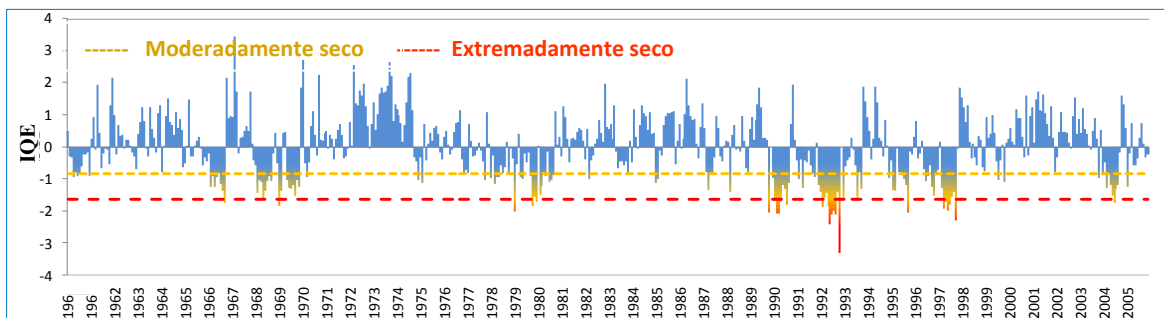
EH-13 YANAPAMPA



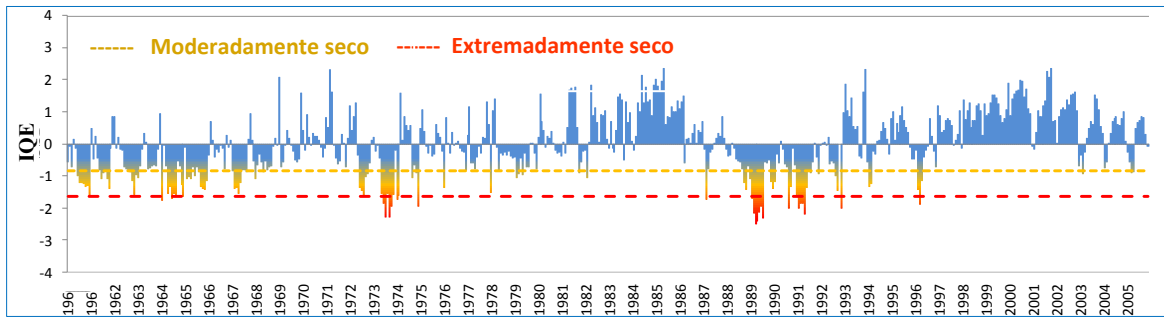
EH-14 PUENTE ALCO



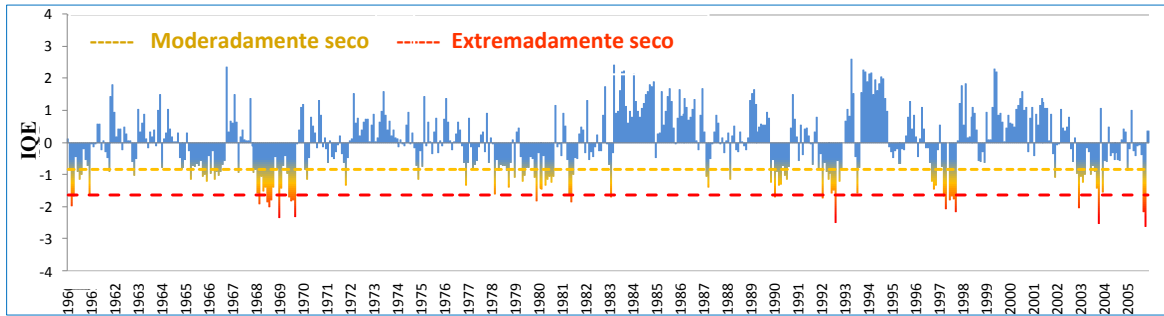
EH-15 SANTO DOMINGO



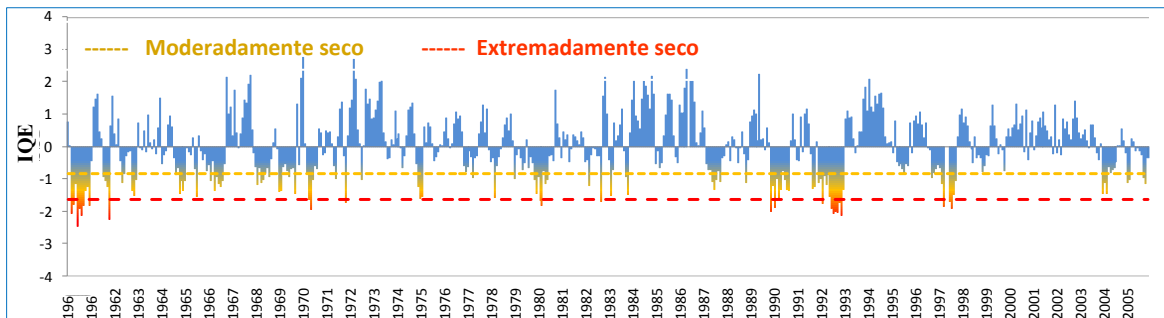
EH-16 CHOSICA



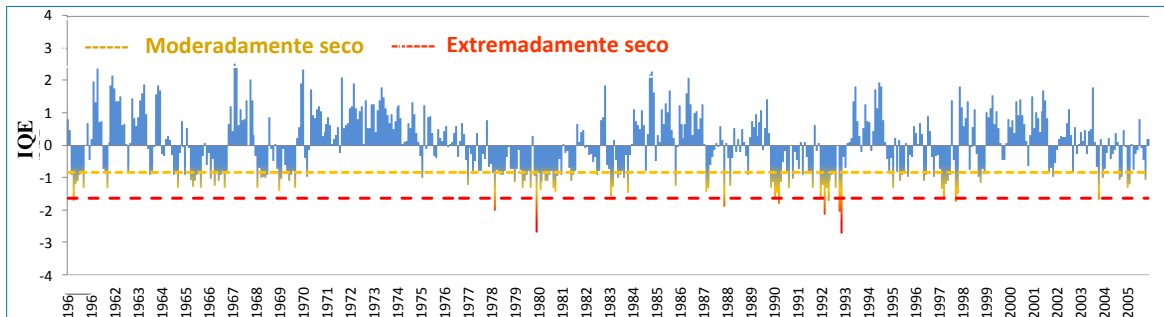
EH-17 LA CAPILLA



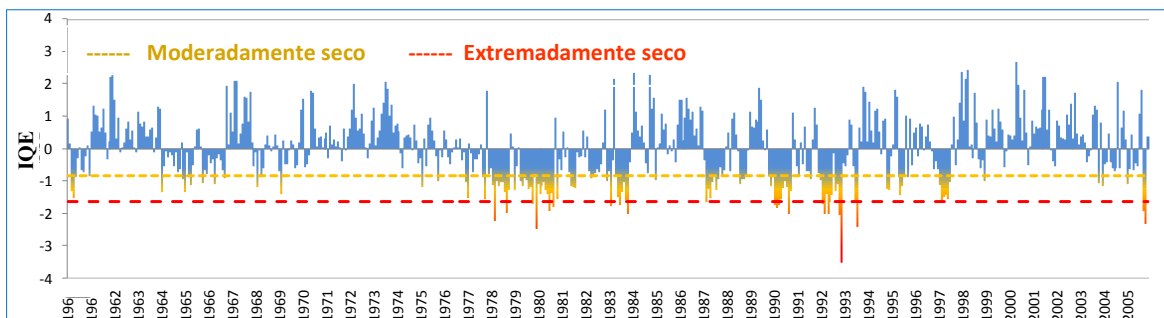
EH-18 SOCSI-S Y TOMA IMPERIAL



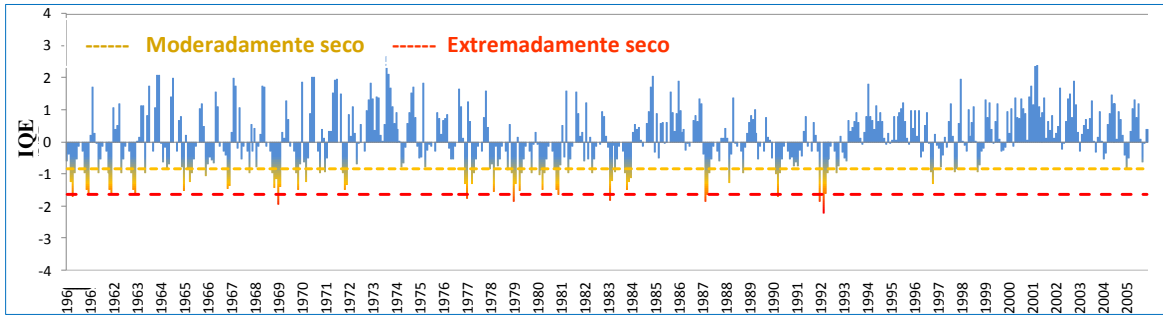
EH-19 CONTA



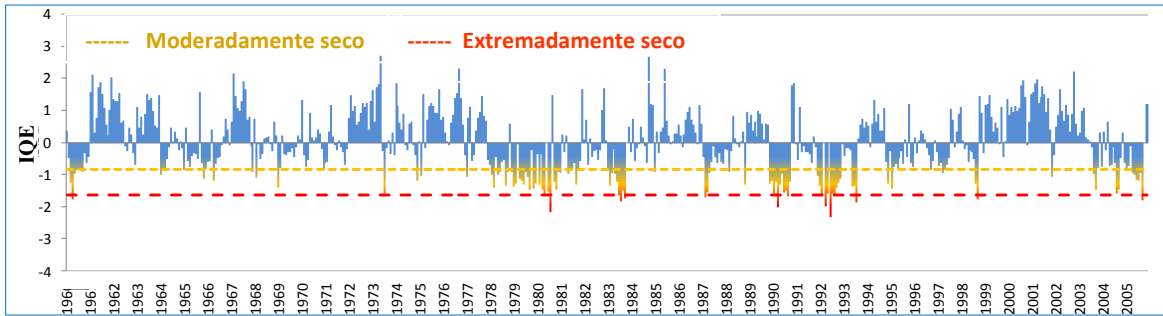
EH-20 LETRAYOC



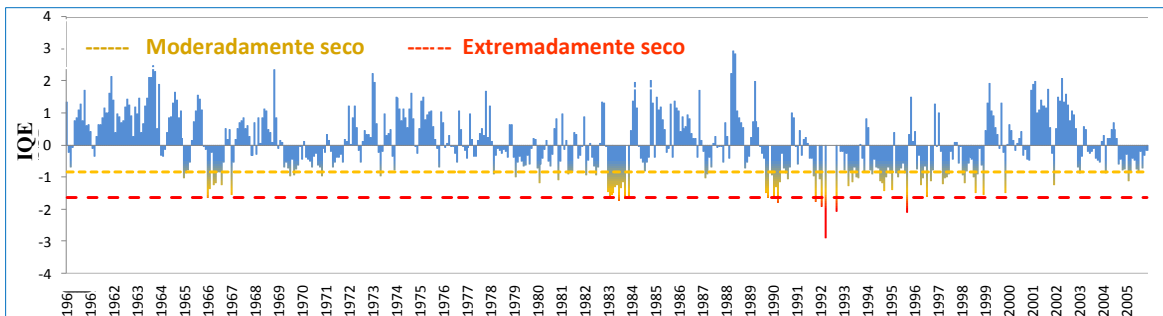
EH-21 LA ACHIRANA



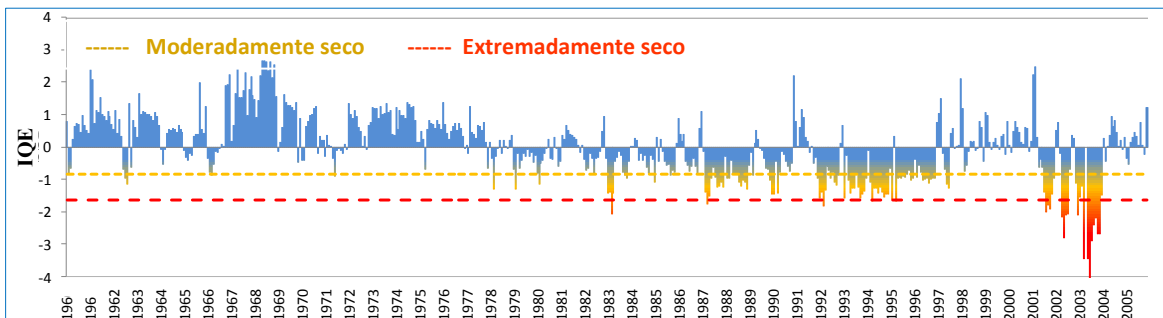
EH-22 BELLA UNIÓN



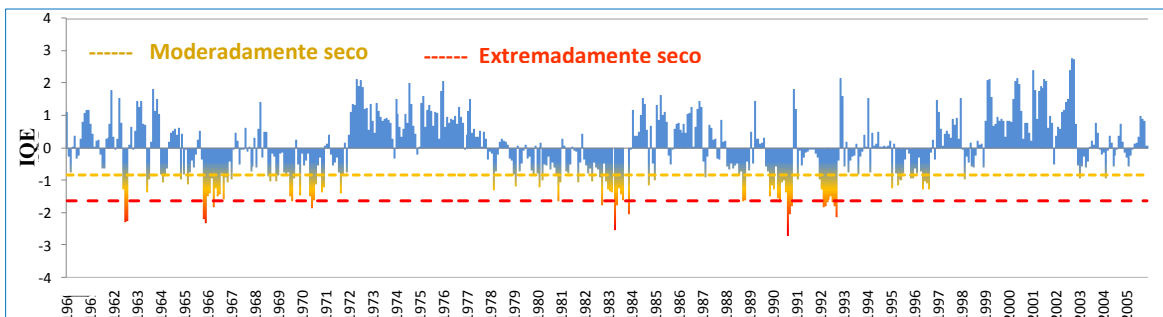
EH-23 CHUCARAPI



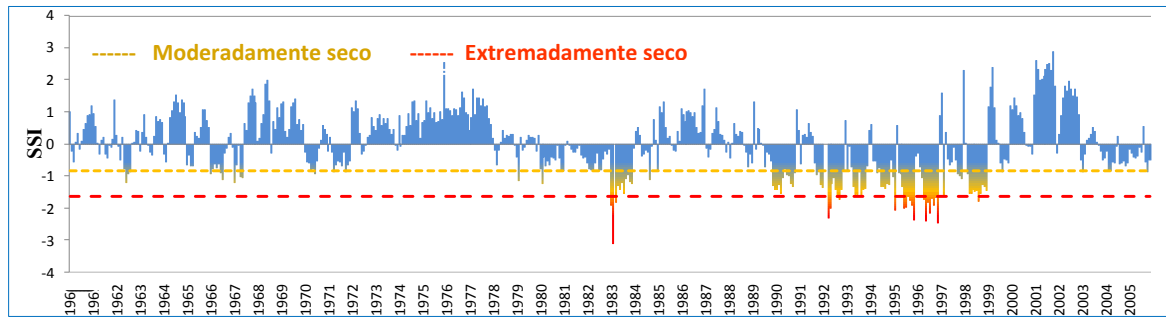
EH-24 CHIVAYA



EH-25 LA TRANCA



### EH-26 AGUAS CALIENTES

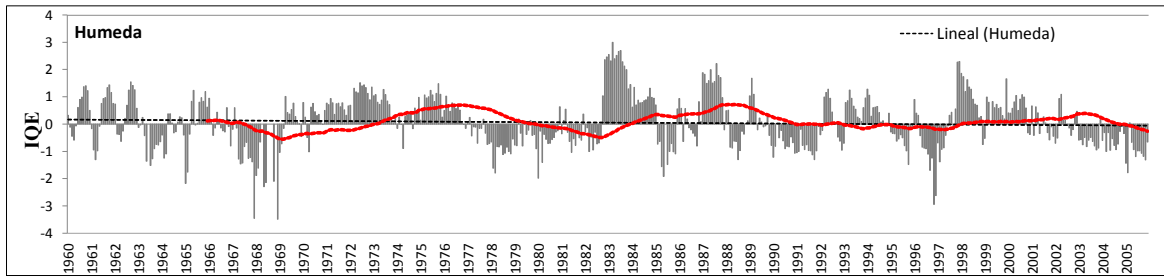


---

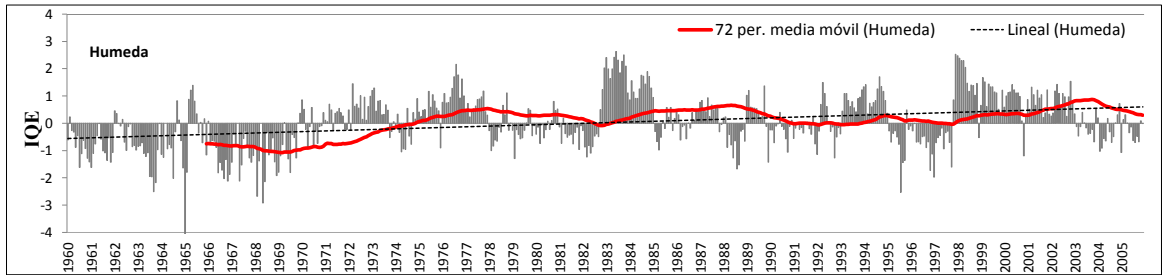
**ANEXO X: MEDIA MÓVIL DEL ÍNDICE DE SEQUÍAS HIDROLÓGICO**

**(Media Móvil de 72 meses)**

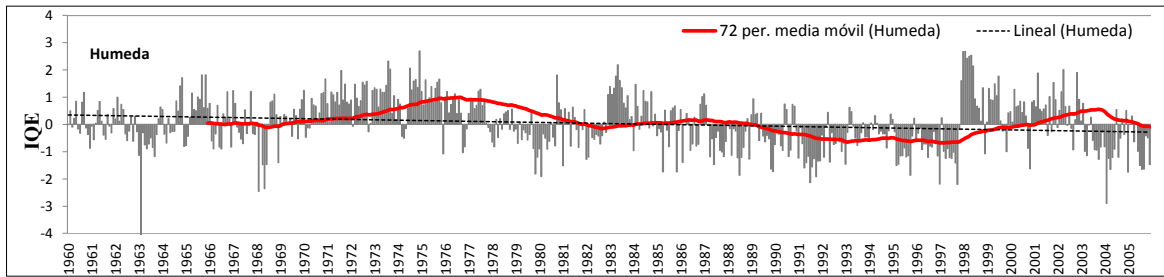
EH-01 EL TIGRE



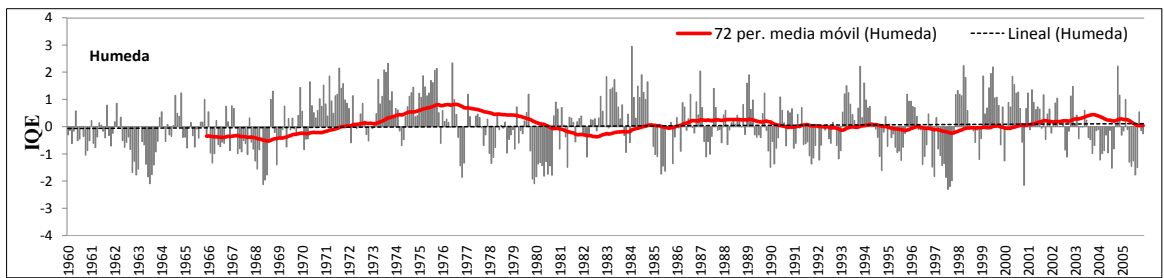
EH-02 ARDILLA



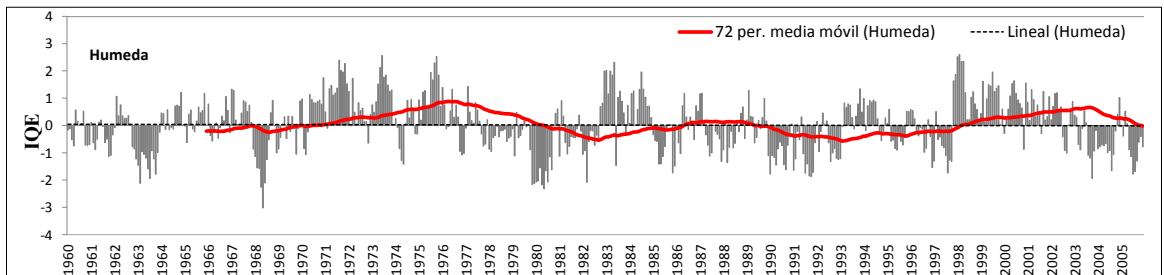
EH-03 PUCHACA



EH-04 RACA RUMI

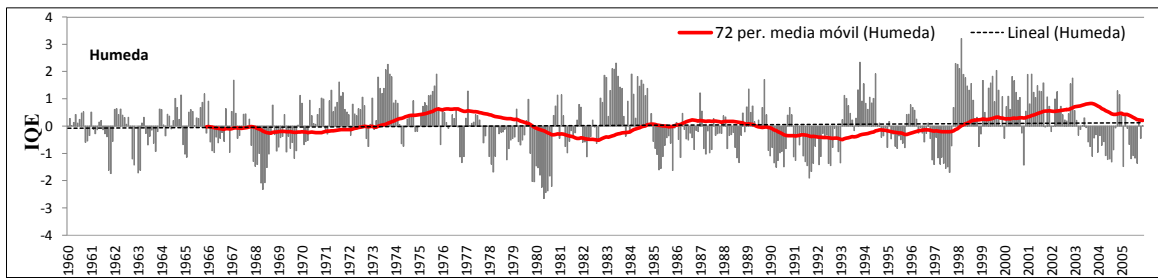


EH-05 EL BATAN

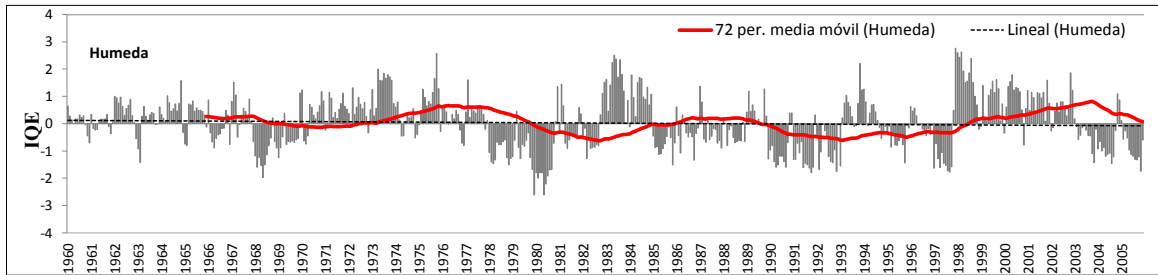




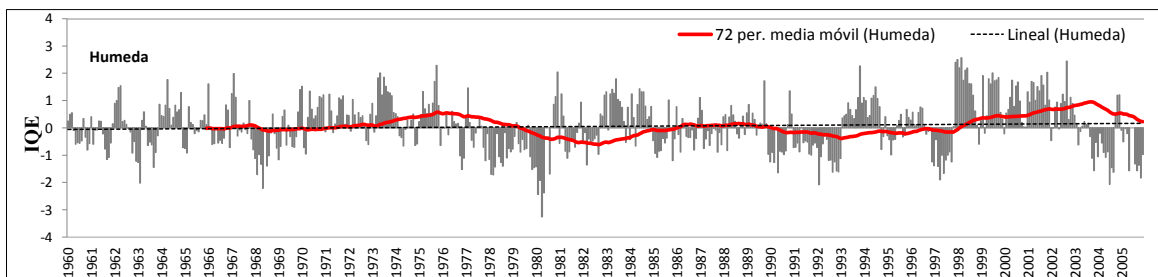
EH-06 YONAN



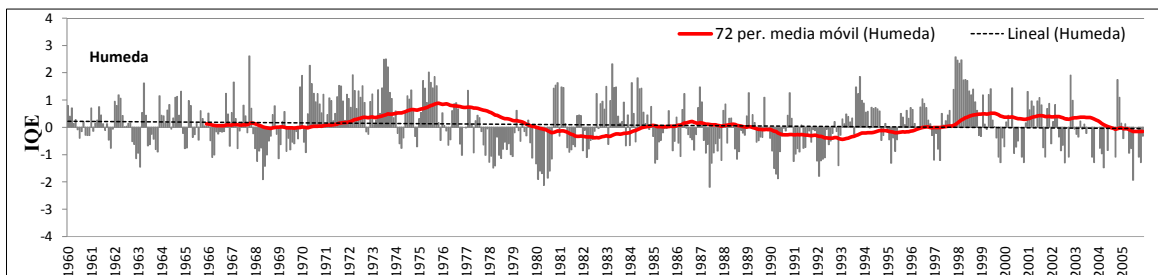
EH-07 SALINAR TAMBO



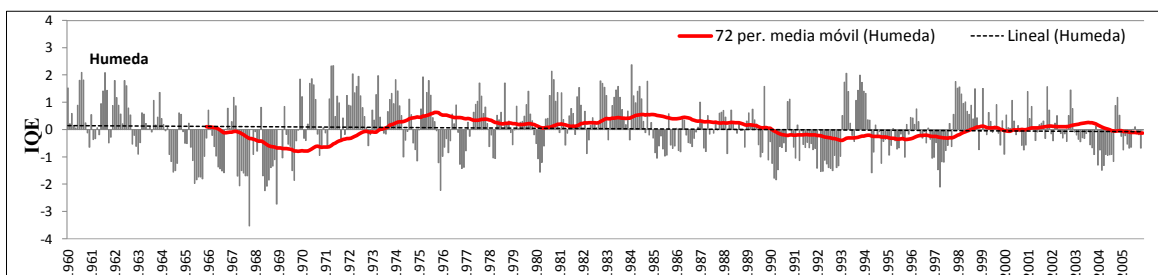
EH-08 QUIRIHUAC MOCHE



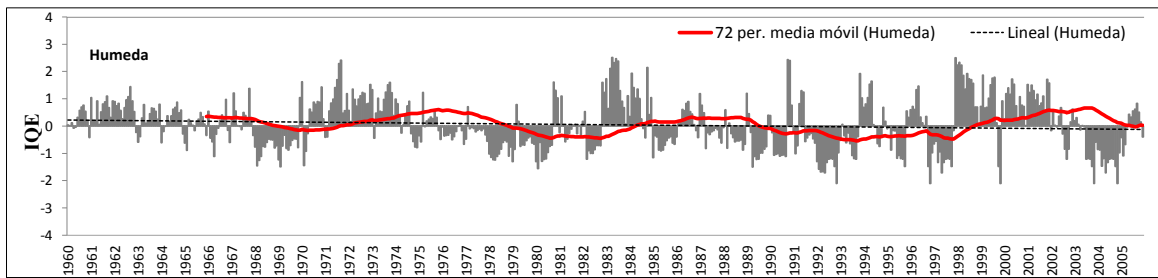
EH-09 HUACAPONGO



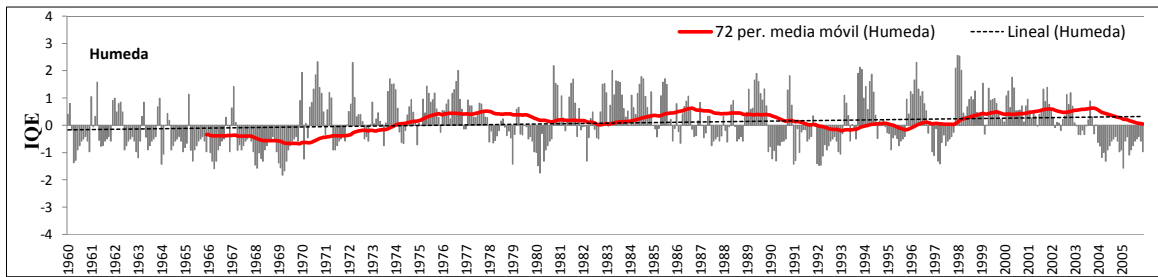
EH-10 CONDORCERRO



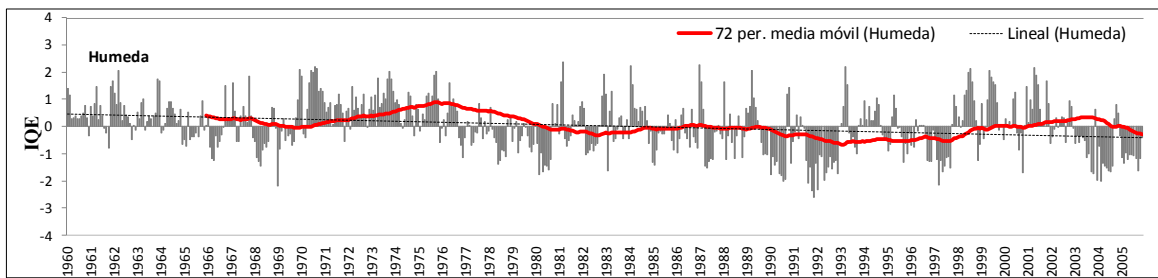
EH-11 SAN JACINTO



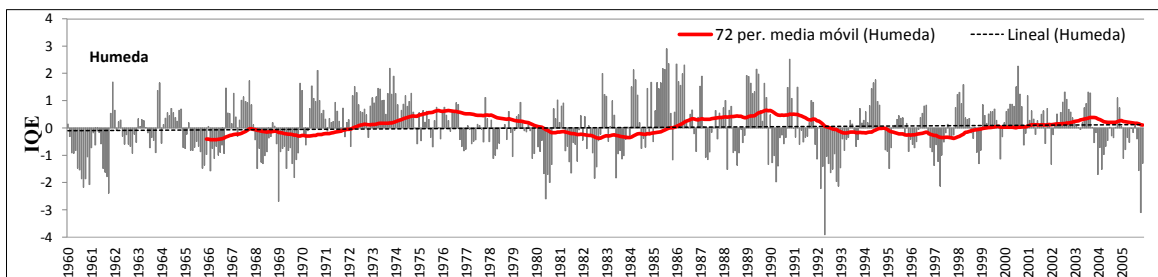
EH-12 SECTOR TUTUNA



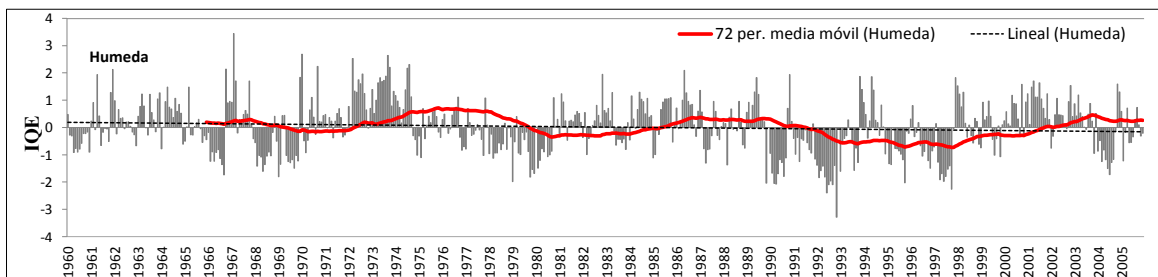
EH-13 YANAPAMPA



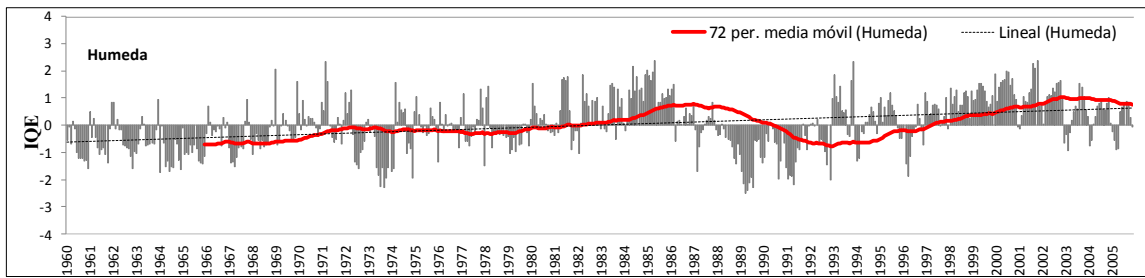
EH-14 PUENTE ALCO



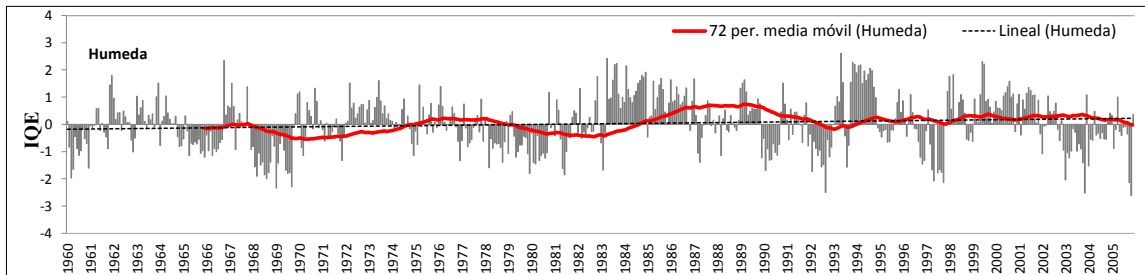
EH-15 SANTO DOMINGO



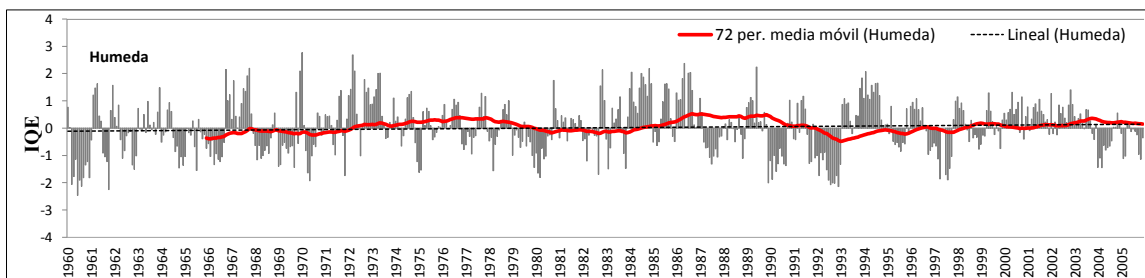
EH-16 CHOSICA



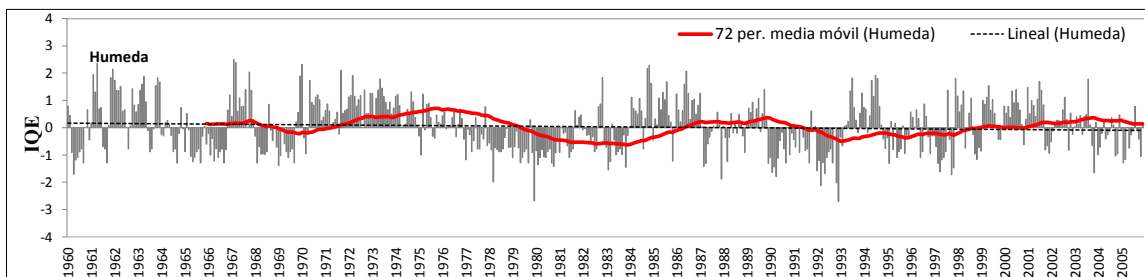
EH-17 LA CAPILLA



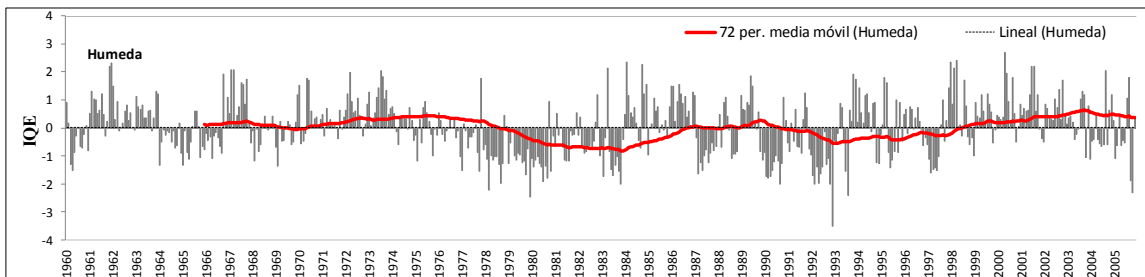
EH-18 SOCCI Y TOMA IMPERIAL



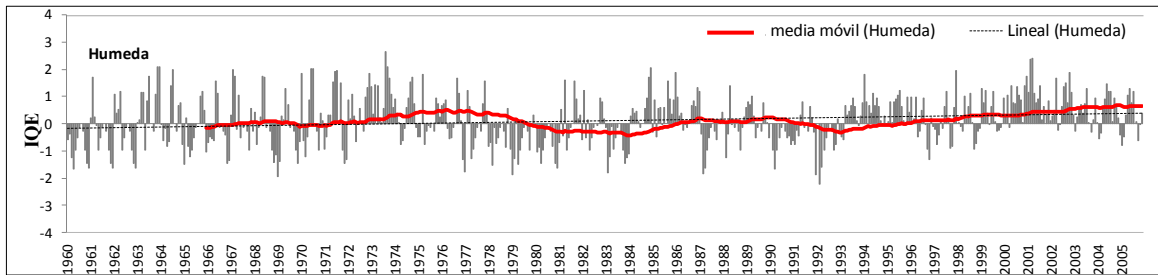
EH-19 CONTA



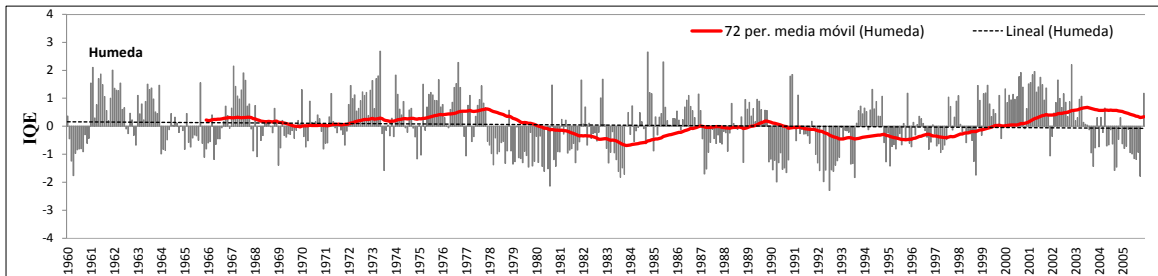
EH-20 LETRAYOCC



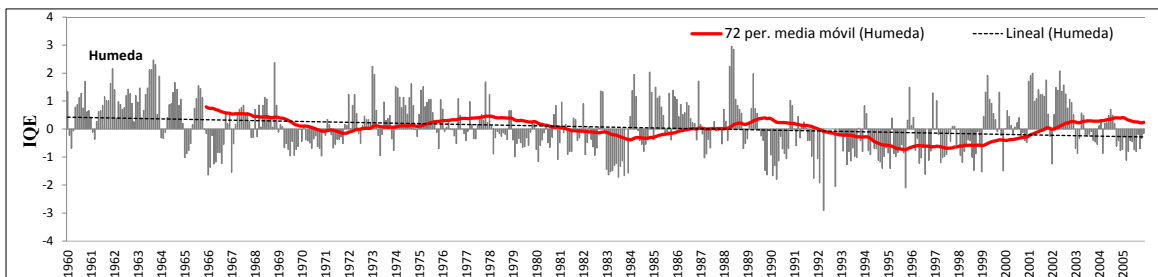
EH-21 LA ACHIRANA



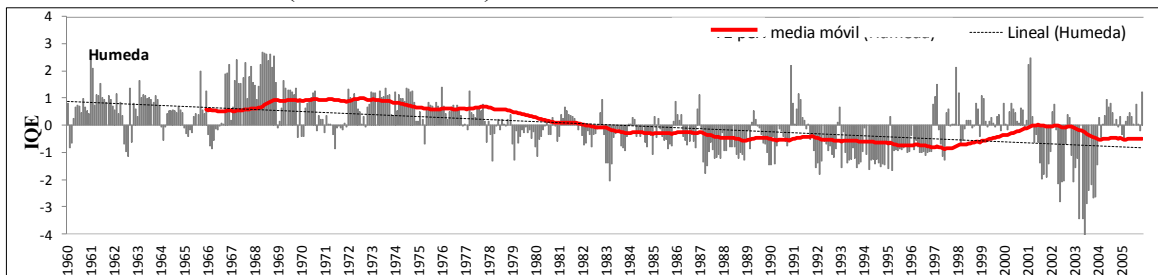
EH-22 BELLA UNIÓN



EH-23 CHUCARAPI



EH-24 CHIVAYA (Periodos secos)



EH-25 LA TRANCA

