



Análisis regional de frecuencia de precipitación anual para la determinación de mapas de sequías

Regional analysis of annual rainfall frequency for the determination of drought maps

JULIA ACUÑA^{1*}, OSCAR FELIPE¹, JULIO ORDOÑEZ¹ & FERNANDO ARBOLEDA¹

¹Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Casilla 11 1308, Lima 11, Perú

* jacuna@senamhi.gob.pe

RESUMEN

Determinar la probabilidad de ocurrencia y frecuencia de sequías es de relevante importancia para la gestión de los recursos hídricos sobre todo en zonas áridas como es la vertiente del Pacífico en el Perú.

Las principales características de las series hidrometeorológicas son su corto periodo, discontinua y baja densidad espacial. En este contexto, la metodología utilizada en este estudio (L-momentos) permite cuantificar y mapear el periodo de retorno de una sequía meteorológica desde una perspectiva regional adaptándose a las limitantes de información hidrometeorológica. El área estudiada abarca once unidades hidrográficas (Olmos, Motupe, La Leche, Chancay Lambayeque, Zaña, Chaman, Jequetepeque, Chicama, Moche, Virú y Huamansaña), localizadas en la región hidrográfica del Pacífico, ubicada en la zona norte del Perú, con una extensión de 32 029 km².

Entre los resultados del estudio se ha determinado 4 regiones homogéneas de precipitación clasificadas por elevación y por rango de tasa de precipitación (por ejemplo en la Región 1 las precipitaciones varían de 16 a 175 mm .año⁻¹, conformada por 10 estaciones y localizadas entre los 27 y 147 msnm y en la Región 4 varía de 609 a 1560 mm.año⁻¹, conformada por 5 estaciones y localizada entre 2744 y 3500 msnm). Cada una de estas regiones ha presentado como distribución de frecuencia regional de mejor ajuste el modelo Logístico Generalizado. Sobre la base de esta información se ha mapeado los L-momentos regionales y el periodo de retorno de una sequía teórica equivalente al 40% de la precipitación normal o histórica. De estos mapas se concluye que en el área de estudio los episodios de sequías en la zona baja (áreas emplazadas de 0 a 1500 msnm) son más recurrentes y más severos con periodos de retorno en el orden de 2 a 10 años, en la zona media (áreas entre 1500 a 3000 msnm) con periodos de retorno de 15 a 25 años y en la zona alta (áreas sobre los 3000 msnm) con periodos de retorno de 25 a 30 años.

Palabras claves: Regionalización hidrológica, análisis regional de frecuencia, L-momentos.

ABSTRACT

Determine the probability of drought occurrence and its frequency is so important for the water resources management, especially in arid areas such as the Pacific drainage basin in Peru. Hydrometeorological time series in Peru are mostly of short length, discontinuous and spatially sparse. In this context, the methodology used in this study (L-moments) allows quantifying and mapping the return period of a drought from a regional perspective, adaptable to restrictions of hydrometeorological information. The study covers eleven basins (Olmos, Motupe, La Leche, Lambayeque Chancay, Zaña, Chaman, Jequetepeque, Chicama, Moche, Viru and Huamansaña) corresponding to the Pacific drainage basin located in the northern region of Peru over a surface of 32 029 km².

This study allowed to determine 4 regions of homogeneous precipitation classified according to their altitude and rainfall rate (e.g. in the Region 1 rainfall varies from 16 to 175 mm.year⁻¹, and consists of 10 stations located between 27 and 147 masl and the region 4 varies from 609 to 1560 mm.year⁻¹, and consists of 5 stations located between 2744 and 3500 masl). Each one of these regions has presented as regional frequency distribution of best fitting, the Generalized Logistic model. Based on this information it was mapped the regional L-moments and the Return Period of a theoretical drought equivalent to 40% of the normal or historic rainfall. From these maps, it can be concluded that in the study area drought episodes in the lower area (areas located from 0 to 1500 masl) are more recurrent and more severe, with return periods in the order of 2 to 10 years; in the middle zone (areas between 1500 and 3000 masl) with return periods of 15 to 25 years and in the upper area (areas above 3000 masl) with return periods of 25 to 30 years.

Keywords: Hydrological regionalization, regional analysis of frequency, L-moments.

INTRODUCCIÓN

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

La estimación del período de retorno de un episodio de sequía por métodos convencionales de ajuste de una serie de datos a un modelo estocástico (comúnmente basados en el método de los momentos o máxima verosimilitud) presenta serios problemas en zonas áridas y semiáridas debido a la gran variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones e influencia de la variabilidad decadal de los eventos ENOS (El Niño Oscilación del Sur) y con series cortas de datos de precipitación donde los eventos extremos son complejos de modelar.

Para el caso de sequías, el análisis regional de frecuencia basadas en la estadística L-momentos ha sido aplicada con mucho éxito en la elaboración del Atlas de sequía de EE.UU. (Werick et al. 1995), análisis de sequías meteorológicas al noroeste de México (Hallack-Alegría & Watkins 2007), análisis de sequías en Turquía (Yurekli & Anli 2008), en el análisis de las sequías hidrológicas al sur de Alemania (Demuth & Kull 1997) y en Chile (Nuñez et al. 2011) y otros, debido a que ofrece ventajas respecto a los análisis en sitio y métodos convencionales. Los datos provenientes de sitios dentro de una región homogénea pueden ser agregados para mejorar la precisión en las estimaciones de la relación probabilidad cuantil en todos los sitios (Wallis et al. 2007). De esta manera se compensa la falta de información de registros cortos de cada sitio, por la abundancia de información en el espacio (Loucks & Van Beek 2005). El procedimiento asume que los sitios, dentro de una denominada “región homogénea”, presentan una distribución de frecuencias idénticas, excepto por un factor de escala específico para el sitio, representado por la media del sitio de la variable analizada (Norbiato et al. 2007, Hosking & Wallis 1997).

En este sentido en el presente estudio se aplicó la metodología denominada Análisis Regional de Frecuencia basada en la estadística de L-momentos, con el objetivo de analizar y mapear el período de retorno asociado a una sequía anual severa asumida como el 40% de la precipitación normal en once unidades hidrográficas (Olmos, Motupe, La Leche, Chancay Lambayeque, Zaña, Chaman, Jequetepeque, Chicama, Moche, Virú y Huamansaña) comprendidas en la región hidrográfica del Pacífico (zona norte del Perú). Los resultados presentados constituyen una herramienta técnica de base para la toma de decisiones en los sistemas de gestión y análisis de riesgos de origen climático muy especialmente en regiones áridas y semiáridas consideradas como las más vulnerables.

ÁREA DE ESTUDIO

Está ubicada en la Región hidrográfica del Pacífico (zona norte del Perú); comprende 11 unidades hidrográficas, según sistema de codificación PFafstetter (ANA 2008), de norte a sur: Olmos, Motupe, La Leche, Chancay Lambayeque, Zaña, Chaman, Jequetepeque, Chicama, Moche, Virú y Huamansaña, localizadas en una superficie total de 32 029 km². Políticamente pertenece a los departamentos de La Libertad, Lambayeque y Cajamarca. Su cobertura espacial se extiende entre las coordenadas 80°29'24''W y 78°13'48''W; 5° 52'12''S y 8°43'48''S.

Climatología

Según el Mapa de clasificación climática del Perú (SENAMHI PERÚ 1988) el área de estudio presenta dos regiones: costa y sierra. En la costa el clima es seco con escasas precipitaciones durante el año, a excepción de la zona norte del país, donde en los años de ocurrencia del ENOS (Fenómeno el Niño Oscilación del Sur) sobrepasa los 500 mm.año⁻¹. La región de la sierra presenta una diversidad de climas, desde templado hasta polar. Las precipitaciones en esta región ocurren en verano y son fundamentalmente de origen orográfico; es decir, las masas de aire procedentes de la hoya amazónica llegan a los Andes orientales y ascienden por efecto orográfico, produciéndose un rápido enfriamiento de la masa de aire con la cual se reduce en gran parte su capacidad de sostener la humedad inicial,

produciéndose precipitación (Gomez 1978), especialmente en las vertientes orientales de la cadena de altas montañas y en los valles interandinos. En la región de estudio se distinguen dos tipos climáticos:

- Zona desértica cálida, con deficiencia de lluvias en todas las estaciones del año y con humedad relativa calificada como húmeda. Corresponden a este tipo de clima las localidades de: Tejedores, El Tablazo, Morropón, Olmos y Motupe.
- Zona desértica semicálida, con deficiencia de lluvias en todas las estaciones del año y humedad relativa calificada como húmeda. Corresponden a este tipo de clima: Jayanca, Ferreñafe, Tinajones, Lambayeque, Chiclayo, Pimentel, Cayaltí, Casa Grande, Cartavio, Jequetepeque, Laredo y Trujillo.
- Zona semiseca, templada, con deficiencia de lluvias en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda. Corresponden a este tipo climático Santa Cruz y Contumaza.

Las cuencas Olmos, Motupe, La Leche, Chancay Lambayeque, Zaña, Chaman, Jequetepeque, Chicama, Moche, Virú y Huamansaña presentan una precipitación media anual de 325 mm.año^{-1} , concentrándose el 85% en el período estacional de lluvias, o sea de octubre a abril del siguiente año (Felipe 2009). Durante los eventos ENOS 1982/83 y 1997/98 toda esta región, en promedio, presentó un comportamiento pluviométrico anual extremadamente húmedo en sus cuencas medias y bajas, y de moderado húmedo a severamente húmedo en sus cuencas altas. Las sequías también son fenómenos recurrentes en esta región, se presentan con diferentes características en intensidad y extensión espacial y no necesariamente están asociadas a los eventos ENOS. Otros mecanismos climáticos regionales o locales tienen una marcada influencia en el comportamiento de las lluvias de esta región. La Figura 1a muestra la variación espacial de la precipitación media anual en el área de estudio, estas fluctúan de 0 a 1250 mm.año^{-1} desde el litoral hacia la divisoria de cuencas, respectivamente.

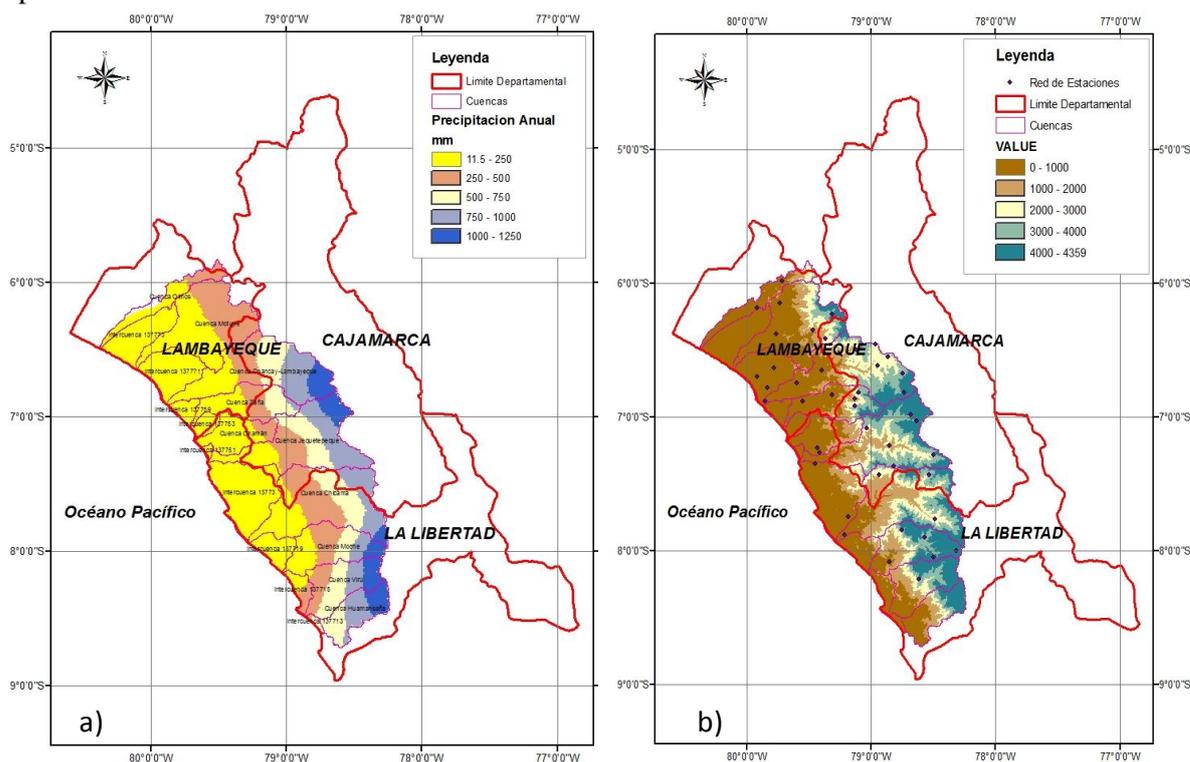


Fig. 1. a) Mapa de la precipitación media anual del área de estudio, b) Ubicación espacial de las estaciones utilizadas y el relieve del área de estudio. Modelo de elevación extraído del SRTM (resolución de 90 m, www2.jpl.nasa.gov/srtm/).

DATOS

Se recopilieron 44 estaciones con registros de precipitación total mensual disponibles del sistema estadístico meteorológico del SENAMHI PERÚ. Cabe mencionar que no se realizó ningún procedimiento para el relleno de datos faltantes, por requerimiento del análisis regional. La Figura

1b) muestra la red de estaciones meteorológicas analizadas, distribuidas entre los niveles altitudinales que varían de 0 a 4359 msnm.

MÉTODOS

El análisis regional de frecuencia con L-momentos está constituido por cinco etapas, se formuló tomando como referencia los trabajos de Wallis et al. (2007) & Schaefer et al. (2007), documentados por UNESCO (2010). Las etapas son:

Etapla 1. Revisión y preparación de datos

Para la detección y la comprobación de la calidad de los datos se eliminaron los valores falsos asociados a su medición y errores de transcripción. Se confirmaron los supuestos básicos de la homogeneidad, con los métodos de vector regional-MVR (Vauchel 2005) y la prueba de discordancia, propuesta por Hosking & Wallis (1997), esta última prueba permitió identificar las estaciones cuyos L-momentos muestrales son marcadamente diferentes de las otras estaciones que corresponden a una misma región.

Asimismo, se evaluó que las series de precipitación no presenten tendencia a disminuir o aumentar en el tiempo, y que los datos sean independientes entre sí en el tiempo; es decir, no estén autocorrelacionados.

Etapla 2. Identificación de regiones homogéneas

Este es un proceso iterativo (Schaefer et al. 2007) para lo cual se utilizaron dos procedimientos para la formación de las regiones homogéneas: a) propuesta a priori de regiones homogéneas basadas en los atributos geográficos y climáticos del área de estudio verificado con el método de MVR y b) aceptación de las regiones homogéneas propuestas y basadas en la prueba de heterogeneidad (H_1) definido por Hosking & Wallis (1997) que se utiliza para evaluar cuando un grupo de estaciones pueden ser tratadas en su conjunto como una región homogénea. En particular, la prueba de heterogeneidad compara la variabilidad de los L-momentos muestrales del grupo de estaciones que conforman la región con la esperada, obtenida a partir del empleo de técnicas de simulación. Este análisis permite evaluar cuando la variabilidad observada en las relaciones de los L-momentos del grupo de estaciones que conforman la región es atribuible a variaciones fortuitas o por el contrario muestra la existencia de heterogeneidad. La prueba de heterogeneidad empleada está basada en el coeficiente de L-Variación (L-CV). Existen dos medidas adicionales de heterogeneidad, denominadas H_2 y H_3 , no se recomienda su utilización debido a que se ha comprobado que presentan una notable falta de potencia estadística (Viglioni et al. 2007). Los citados autores han propuesto que una región compuesta por n estaciones puede ser considerada como aceptablemente homogénea cuando $H_1 < 1$, posiblemente heterogénea si $1 \leq H_1 < 2$ y definitivamente heterogénea $H_1 \geq 2$.

Etapla 3. Selección de la distribución de frecuencia regional

Una vez que una región homogénea ha satisfecho la condición de homogeneidad es posible, entonces, determinar la función de distribución de probabilidad de mejor ajuste, basado en dos herramientas: el diagrama de los L-momento-ratios regionales, o con el uso de la prueba de bondad de ajuste $|Z^{DIST}| < 1,64$; de cumplirse ello, entonces se acepta la hipótesis de buen ajuste de la distribución, caso contrario, se rechaza (Wallis et al. 2007). Las distribuciones más comunes que pueden ser utilizadas para el ARF basado en L-momentos, e implementadas en el Programa Linear Regional Analysis of Precipitation L-RAP (Schaefer 2006) son la generalizada Pareto, valor generalizado extremo, generalizada Normal, Pearson Tipo III, logística generalizada, Kappa y Gaucho. Estos modelos de distribución están basados en 3 o más parámetros, y son mucho más generales y flexibles respecto a los modelos convencionales utilizados en la hidrología probabilística.

Etapla 4. Determinación de cuantiles

Una vez determinada la o las distribuciones de densidad de probabilidad, el analista está en condiciones de determinar los cuantiles o la función de cuantiles para un sitio específico. Los cuantiles son valores asociados a un determinado valor de probabilidad, dependiente de una función de distribución acumulada de probabilidad especificada en sus parámetros. Los cuantiles para cada sitio pueden ser estimados según la siguiente ecuación:

$$Q_i(F) = \mu_i q(F)$$

donde:

- μ_i : Es la media de los datos observados en el sitio
 $q(F)$: Es la curva de crecimiento regional estimada para $0 < F < 1$. Es una función adimensional común a todos los sitios dentro de la región homogénea y representa la función cuantílica de la distribución regional de frecuencia.

Para nuestro caso, el cuantil de interés es teórico y corresponde 40% de la precipitación normal o histórica, es decir 0,40.

Etapas 5. Mapeo del período de retorno de una sequía

Los procesos necesarios para realizar el mapeo de cuantiles, probabilidades o períodos de retorno son iguales y se desarrollan considerando:

- a) Ajuste de la función L-momentos y precipitación media anual (PMA), el objetivo es la búsqueda de una función de mejor ajuste que describa la relación entre los L- momentos y PMA. Schaefer et al. 2006 y Wallis et al. 2007 consideran la siguiente ecuación como la más recomendada para realizar el ajuste:

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

donde:

- α, β y δ : Parámetros que se obtienen por optimización
 L-momentos: Momentos lineales correspondiente al coeficiente de variancia (L-Cv), coeficiente de asimetría (L-Skewness) y coeficiente de Kurtosis (L-Kurtosis)

El buen ajuste depende del número de pares de puntos disponibles para su gráfico y análisis, a medida que se obtengan más puntos, se espera un mejor ajuste. Sin embargo, un mayor número de puntos, para una misma cantidad de estaciones disponibles, implica mayor número de regiones con menos estaciones por región homogénea. De este modo se debe alcanzar un equilibrio entre estos factores. El aspecto fundamental en el procedimiento de ajuste, consiste en la determinación de los coeficientes de ajuste, los cuales son específicos para cada L-momentos. La importancia de esta etapa es poder estimar posteriormente los valores de los L-momentos en cada punto o sitio de interés donde no se tengan mediciones. Para ello, se recurre al conocimiento de la distribución espacial de una variable altamente disponible en muchos sitios, como es la precipitación media anual. De esta forma, obtenidos los L-momentos en cualquier punto, son utilizados en la determinación de los parámetros de las funciones de densidad de probabilidad y, por tanto, de las probabilidades o cuantiles asociados.

- b) Mapeo del período de retorno representa el periodo de recurrencia medio de un evento con determinada magnitud.

Cabe resaltar que la calidad del mapa del periodo de retorno está directamente relacionada con la calidad del mapa de precipitación media anual del cual deriva. Por tanto, mientras mejores sean los procedimientos para la obtención de este último, mejor será la calidad del mapa del período de retorno.

HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

En este estudio se aplicaron principalmente dos herramientas de análisis:

- a) Programa Hydraccess (Vauchel 2005) que posee el MVR dentro de sus funciones avanzadas, es un método de cálculo orientado a tres tareas definidas: la crítica de datos, la homogenización y la extensión-completación de datos de precipitación (Espinoza et al. 2005).
 b) El Programa Linear Regional Analysis of Precipitation, L-RAP (Schaefer et al. 2007) se utilizó como herramienta básica para la aplicación de la metodología de ARFLM. Por lo tanto, en adelante, se hará referencia en las cuatro primeras etapas metodológicas anteriormente descritas. A continuación se presentan los procesos desarrollados con L-RAP: La preparación de datos en L-RAP implica tres pasos: i) Deben alimentarse las planillas de trabajo en formato Excel; cada estación requiere completar una planilla, la cual consiste en dos hojas; ii) tras la importación de datos, que puede durar algunos minutos dependiendo del número de estaciones a importar, es posible realizar un control de calidad básico; y iii) una vez superado el control básico de calidad de los archivos de entrada, L-

RAP permite verificar los supuestos básicos de tendencia e independencia serial (autocorrelación) basados en el Test T incorporado en el programa. Para ello debe definirse previamente las restricciones sobre los datos con los cuales se va a realizar el análisis. Esto incluye definir el mes de inicio de análisis y la duración.

RESULTADOS

Preparación de datos y comprobación de supuestos

La Tabla 1 presenta las estadísticas descriptivas de las 44 estaciones analizadas. En promedio la precipitación media anual en el área de estudio es de 498 mm.año⁻¹ con una alta variación de 40,2%. La longitud del período de registro medio fue de 30 años, con un mínimo de 10 años y un máximo de 48 años. Respecto al método de recolección de los datos fue manual y la totalidad de la información proviene de pluviómetros.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de los registros de precipitación utilizados en el análisis.

Variables	Estadísticas
Precipitación media anual promedio (mm)	498
Precipitación media mínimo anual (mm)	0
Precipitación media máximo anual (mm)	3716
Rango de la precipitación media anual (mm)	3716
Desviación estándar de la precipitación media anual (mm)	200
Coefficiente de variación de la precipitación media anual (%)	40
Porcentaje de estaciones que pasan el Test de estacionalidad (%)	83
Porcentaje de estaciones que pasan el Test de independencia serial (%)	97
Récords total de años	1320

La evaluación de tendencia e independencia, basados en el Test T implementados en el L-RAP, mostró que la mayoría de las estaciones (83%) pasaron la prueba de tendencia y la de independencia serial (97%). Se ha observado tendencia en algunas series, pero basados en las recomendaciones de Wallis et al. 2007 queda a criterio del autor considerar la variabilidad climática del sitio y no evaluar netamente la variabilidad estadística. Como tal, los datos de precipitación anual cumplieron con los supuestos para iniciar el análisis regional de frecuencia.

Formación y aceptación de regiones homogéneas

Con el fin de establecer las series definitivas se seleccionaron las estaciones que tenían una longitud de registro mínima de 15 años, porque longitudes menores influyen en el número de estaciones para el análisis, así como el total de años de registro, ya que afectan la fiabilidad de las estimaciones por cuantiles (Hosking & Wallis 1997, Nuñez et al. 2011). A partir de ello después de un proceso iterativo (reformulación de la conformación de regiones, excluyendo las estaciones discordantes) con el MVR se logró identificar 4 regiones, cada una de ellas representadas por un vector regional que caracteriza la variabilidad espacio temporal de lluvias de cada región. Se filtraron las estaciones discordantes con el vector regional, seleccionándose las mejores salidas conformadas por estaciones de muy buena correlación con el vector regional. En la Tabla 2 se muestra las características de las estaciones que conforman cada una de las cuatro regiones propuestas; asimismo, se observa que la Región 1 presenta precipitación promedio de 54 mm.año⁻¹, la cual destaca por su alta variabilidad y corresponden a estaciones emplazadas entre altitudes de 27 a 1400 msnm; la Región 2 presenta precipitación promedio de 442 mm.año⁻¹, la cual destaca por su moderada variabilidad y corresponden a estaciones emplazadas entre altitudes de 352 a 1400 msnm; las regiones 3 y 4 presentan una precipitación promedio de 884 y 1160 mm.año⁻¹, las cuales indican baja variabilidad y corresponden a estaciones emplazadas entre altitudes de 1800 a 2300 msnm y 2744 a 3500 msnm, respectivamente.

La Tabla 3 presenta los resultados de la medida de heterogeneidad, con módulos menores a 1, esta condición permite la aceptación de las cuatro regiones propuestas por el MVR, condición que verifica la formación de cuatro regiones aceptablemente homogéneas.

Tabla 2. Estaciones más óptimas por región. Donde: Lat.: Latitud, Long.: Longitud, Alt.: Altitud, Coefi. Varia.: Coeficiente de variancia, Med. Calc.: Media calcula y Reg.: Región.

Estación	Unidad Hidrográfica	Lat. (°S)	Long. (°W)	Alt. msnm	Coefi. Varia.	Med. Calc.	Reg.
Pucala	Chancay Lamba	6°45'	79°36'	85	1,98	95,9	
Talla	Jequetepeque	7°16'	79°25'	90	1,65	40,6	
Reque	Chancay Lamba	6°53'	79°51'	27	2,14	30,7	
Jayanca	Motupe	6°23'	79°46'	76	2,18	170,7	
Motupe	Motupe	6°09'	79°44'	147	1,01	175,3	1
Chepen	Jequetepeque	7°14'	79°26'	114	1,32	48,3	
San José	Jequetepeque	7°21'	79°27'	96	0,83	19,1	
Casagrande	Chicama	7°45'	79°11'	140	0,48	16,2	
Laredo	Moche	8°05'	78°51'	100	1,26	15,6	
Chiclayo	Chancay Lamb	6°47'	79°50'	27	1,82	38,0	
Espinal	Zaña	6°52'	79°08'	850	0,92	209,8	
Oyotun	Zaña	6°50'	79°19'	352	1,10	461,1	
Contumaza	Jequetepeque	7°22'	78°49'	1317	0,50	613,6	
Callancas	Chicama	7°46'	78°29'	1400	0,40	359,2	2
Tocmoche	La Leche	6°25'	79°22'	1250	0,82	818,5	
San Benito	Chicama	7°26'	78°56'	1200	1,11	469,9	
Chilete	Jequetepeque	7°13'	78°51'	850	0,50	158,0	
Sinsicap	Moche	7°51'	78°45'	1300	0,71	342,3	
Chancay Baños	Chancay Lamba	6°33'	78°52'	1800	0,51	1015,1	
Llama	Chancay Lamba	6°30'	79°07'	2150	0,49	796,7	
Sta. Cruz	Chancay Lamba	6°37'	78°57'	2140	0,59	758,9	
San Juan	Jequetepeque	7°17'	78°30'	2224	0,31	876,7	3
Cospan	Chicama	7°26'	78°32'	2280	0,46	963,8	
Udima	Zaña	6°49'	79°06'	2300	0,48	979,9	
Lives	Jequetepeque	7°05'	79°02'	2000	0,62	478,1	
Granja Porcón	Jequetepeque	7°02'	78°38'	3000	0,32	1404,2	
Llapa	Jequetepeque	6°59'	78°41'	2798	0,23	963,9	
Salpo	Moche	8°13'	78°37'	3400	0,42	609,5	4
Chugur	Chancay Lamba	6°40'	78°44'	2744	0,42	1560,9	
Julcan	Moche	8°03'	78°30'	3500	0,34	1012,2	

Tabla 3. Estadístico de heterogeneidad por región homogénea. PMA: Precipitación media anual, L Cv: Momento lineal de coeficiente de variancia, LSkewness; Momento de coeficiente de asimetría, Lkurtosis: Momento lineal de coeficiente de Kurtosis, H₁: Medida de heterogeneidad.

Región	PMA	N° de Estaciones	N° de Datos	L Cv	LSkewness	LKurtosis	H ₁
1	54,3	10	277	0,654	0,642	0,497	-1,14
2	442,7	8	199	0,362	0,331	0,276	0,13
3	884,2	7	221	0,240	0,192	0,202	0,42
4	1160,0	5	175	0,186	0,082	0,188	0,97

Selección de la distribución de probabilidad regional

La selección de la distribución de probabilidad regional se basó en la comparación de los ajustes obtenidos por la curva L-momentos ratios y el estadístico de bondad $|Z^{\text{DIST}}| < 1,64$.

La Figura 3 muestra el análisis de bondad de ajuste para cada región homogénea. Este análisis se obtuvo mediante el uso de los diagramas L-momentos ratio que relaciona el L-Skewness & L-

Kurtosis; se puede observar que para cada región homogénea el valor medio se ajusta a una distribución logística generalizada (rombo color morado equivalente al L-momentos regional).

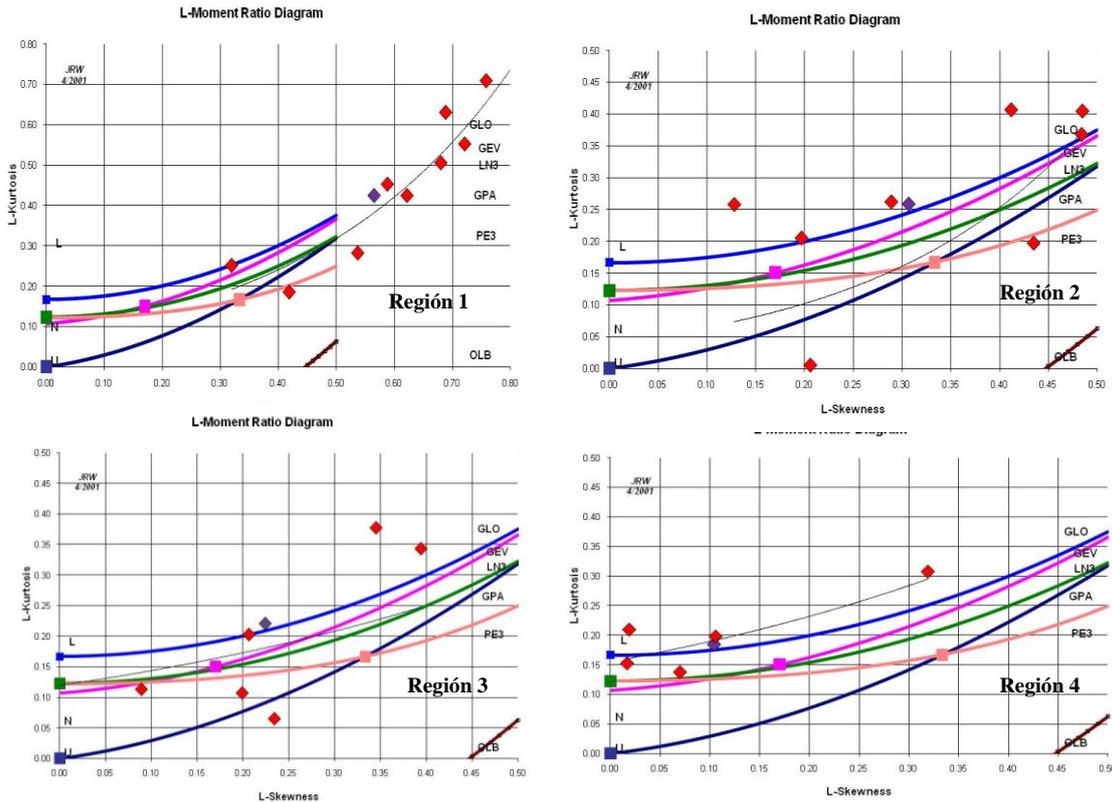


Fig. 3. Diagrama de L-Momentos ratio de Skewness & L-Kurtosis por cada región homogénea.

La Tabla 4 muestra el análisis de bondad de ajuste de las distribuciones de probabilidad por región homogénea según el reporte de LRAP; para la Región 1 resultaron dos distribuciones de mejor ajuste la Logística Generaliza (GLN) y la de Valores Extremos (GVE), mientras que para las regiones 2, 3 y 4 resultó una, la GLN; finalmente, se seleccionó como distribución regional, la GLN porque se ajusta en las cuatro regiones homogéneas.

Tabla 4. Estadístico de bondad de ajuste Z^{DIST} . Donde: GLN distribución logística generalizada. GEV es distribución de valores extremos. PMA: precipitación media anual.

Región	PMA	# Estaciones	Récord de datos	Z^{DIST}	
				GLN	GEV
1	54,3	10	277	-1,50	-1,50
2	442,7	8	199	-1,55	--
3	884,2	7	221	-0,61	--
4	1160,0	5	175	-1,35	--

Mapeo del período de retorno de una sequía

Para el mapeo del periodo, primero se definió las funciones regionales de los L-momentos en función de la precipitación media anual.

La Figura 4 muestra las curvas de crecimiento regional obtenidas en base a los L-momentos regionales, así como sus respectivas funciones del tipo exponencial que relacionan la PMA y los L-momentos; en cambio, para su optimización se utilizó el complemento Solver de la planilla de cálculo Excel basados en el método de mínimos cuadrados, estas funciones regionales y el álgebra de mapas permitió el espacializado del L-Cv y L- Skewness a nivel del área de estudio.

En la Figura 5 se muestran los mapas de los L-momentos, L-Cv y L-Skewness. Éstos representan un cambio en las propiedades de lluvia, variabilidad e intensidad, respectivamente (Fowler 2003).

La Tabla 5 muestra los parámetros de la distribución de probabilidad logística generalizada seleccionada, por ser común en las cuatro regiones homogéneas.

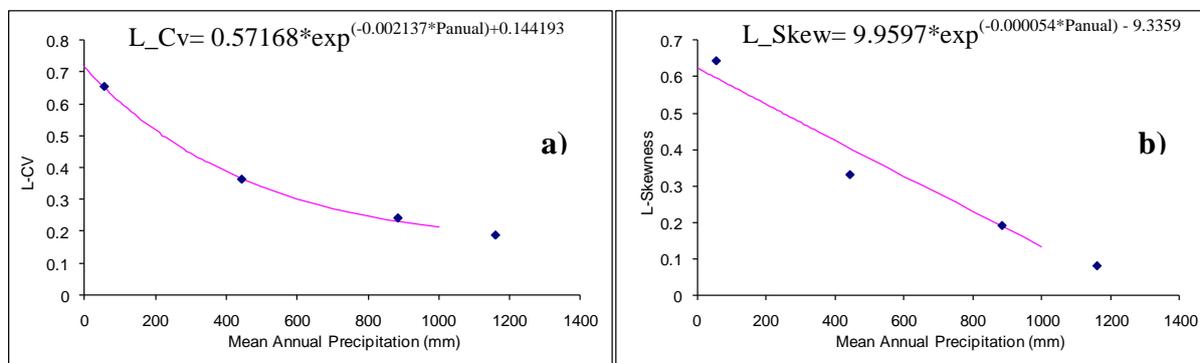


Fig. 4. Curvas regionales de los L-momentos de mejor ajuste. a) L-Cv (izquierda) y b) L-Skewness (derecha).

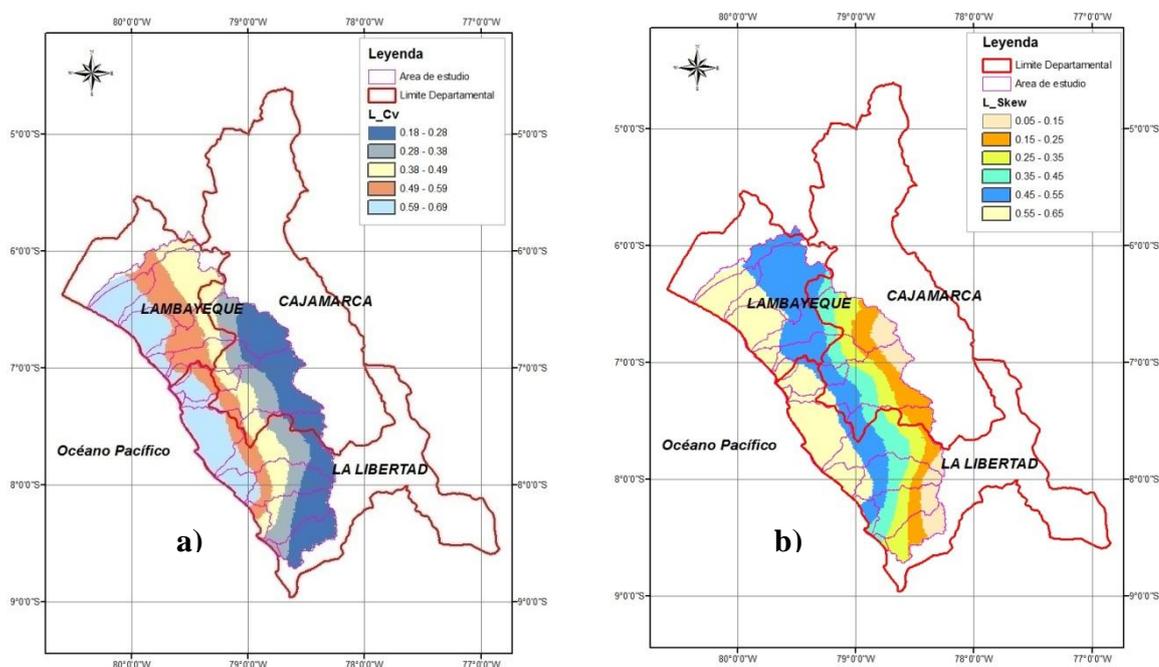


Fig. 5. Variación regional de los L-momentos. a) L Cv (izquierda) y b) L Skewness (derecha).

Tabla 5. Parámetros de la distribución Logística Generalizada por región homogénea.

Región	Distribución	Parámetros		
		Localización	Escala	Shape
1	Logística generalizada	0,424	0,269	-0,667
2	Logística generalizada	0,799	0,289	-0,359
3	Logística generalizada	0,920	0,224	-0,204
4	Logística generalizada	0,971	0,183	-0,029

La Figura 6 muestra la distribución espacial del período de retorno de una sequía meteorológica teórica equivalente al 40% de la precipitación normal, en el área de estudio los episodios de sequía, particularmente en la zona baja (áreas entre 0 a 1500 msnm) se caracterizan por ser más frecuentes y severos, su recurrencia es de 2 a 5 años; de ello se puede inferir que a mayor aridez, mayor recurrencia de la sequía. La zona media (áreas entre 1500 a 3000 msnm) presenta episodios de sequía moderadamente distantes, con períodos de retorno de 15 a 25 años; y en la zona alta (áreas sobre los 3000 msnm) su recurrencia es significativamente distante, con períodos de retorno de 25 a 30 años. Este patrón de recurrencia refleja una relación inversa con las características de distribución espacial de la precipitación anual, es decir menor altitud mayor recurrencia, y mayor altitud menor recurrencia, debido a la gran influencia del factor orográfico.

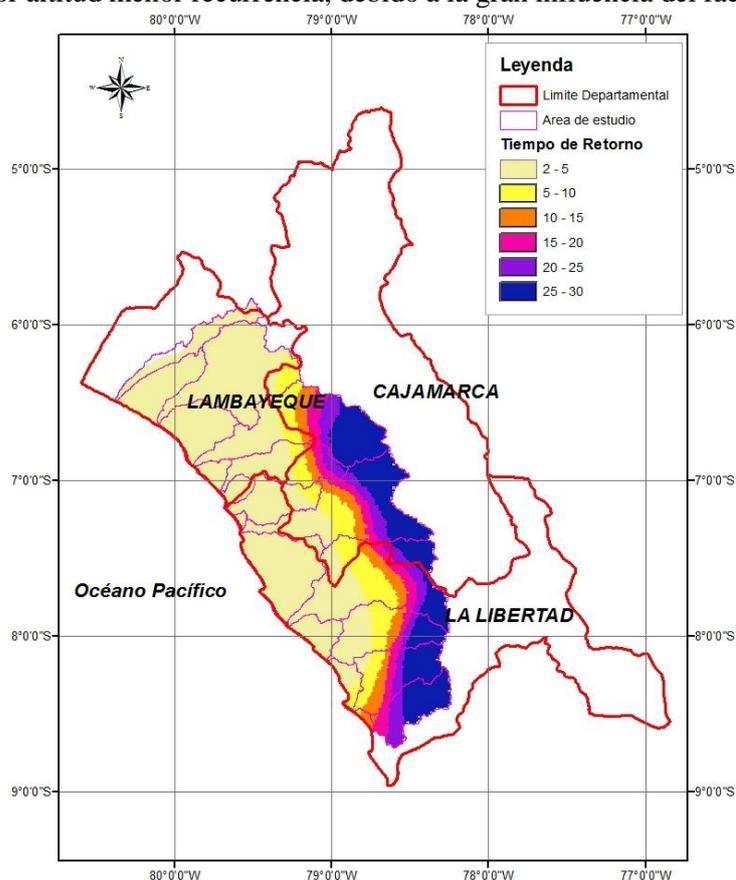


Fig. 6. Mapa del período de retorno de una sequía equivalente al 40% de la precipitación normal.

CONCLUSIONES

La metodología presentada se sustenta en la aplicación del análisis regional de frecuencia basado en la estadística de L-momentos, desde una perspectiva de análisis probabilístico espacial, lo cual le confiere al método la capacidad de poder determinar en cualquier punto del área de estudio el periodo de retorno de una sequía meteorológica; su ventaja respecto al análisis por sitio o estación es que incorpora información proveniente de sitios o estaciones dentro de una región homogénea, para mejorar la precisión compensando de esta manera la falta de información de registros cortos.

Se ha identificado cuatro regiones hidrológicamente homogéneas, cuyos rangos de precipitación anual en la Región 1 varían de 16 a 175 mm.año⁻¹, y está conformada por 10 estaciones emplazadas entre los 27 a 147 msnm; en la Región 2 varían de 158 a 818 mm.año⁻¹, y está conformada por 8 estaciones ubicadas entre los 352 a 1400 msnm; en la Región 3 varían de 478 a 1015 mm.año⁻¹, y está conformada por 7 estaciones ubicadas entre 1800 a 2300 msnm; y en la Región 4 varían de 609 a 1560 mm.año⁻¹, y está conformada por 5 estaciones emplazadas entre 2744 a 3500 msnm. Las regiones localizadas en la parte baja (Regiones 1 y 2) presentan alta y baja variabilidad respectivamente en los regímenes de las lluvias, mientras las regiones localizadas en las zonas altas (3 y 4) presentan baja variabilidad en los regímenes de las lluvias

La calidad de la información espacial de los mapas del período de retorno depende en gran medida de la calidad del mapa de precipitación media anual que se disponga, dado que el proceso de álgebra de mapas se ejecuta a nivel de píxeles, por lo cual no es necesario ningún proceso de interpolación.

La distribución de probabilidad logística generalizada es común para las cuatro regiones pluviométricas identificadas. Si el mapeo correspondiera a diferentes distribuciones de probabilidad regional se tendría que trabajar el mapeo por cada región y luego integrar en un solo mapa estos resultados parciales.

La sequía analizada corresponde a una sequía teórica equivalente al 40% de precipitación normal o histórica, por lo que se concluye que en el área de estudio los episodios de sequías en la zona baja (áreas emplazadas de 0 a 1500 msnm) son más recurrentes y más severos con periodos de retorno en el orden de 2 a 10 años; en la zona media (áreas entre 1500 a 3000 msnm) se presenta con periodos de retorno de 15 a 25 años y en la zona alta (áreas sobre los 3000 msnm) su recurrencia es más distante, con periodos de retorno de 25 a 30 años.

AGRADECIMIENTOS

A los profesionales de la Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú y a los revisores del presente artículo, por sus valiosos aportes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (2008). Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú, Resumen Ejecutivo aprobado con Resolución Ministerial N°033-2008-AG del 5 de enero de 2008. <http://www.ana.gob.pe/media/327118/resumen%20ejecutivo%20uh.pdf>.
- Demuth, S. & Kulls, C. (1997). Probability analysis and regional aspects of droughts in southern Germany. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (Proceedings of Rabat Symposium SI. IAHS Publ. N°. 240
- Espinoza, J.C. (2005). El Método del vector regional de índices pluviométricos, aplicación con el uso de Hydraccess. <http://sites.google.com/site/jhancarloespinoza/sitios-de-interés>.
- Felipe, O. (2009). Impacto hidrológico de los Eventos El Niño-La Niña en las cuencas de los ríos Olmos, Motupe, La Leche, Chancay Lambayeque, Zaña, Chaman, Jequetepeque, Chicama, Moche, Virú y Huamansaña. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Lima, Perú.
- Fowler, H.J. & Kilsby, C.G. (2003). A Regional Frequency Analysis of United Kingdom Extreme Rainfall from 1961 to 2000. *International Journal of Climatology*, 23: 1313-1334.
- Gibbs, W.J. & Maher, J.V. (1967). Rainfall deciles as drought indicators. Bureau of Meteorology Bulletin, 48. Commonwealth of Australia, Melbourne.
- Gomez, D. (1978). Análisis físico de la distribución de la precipitación sobre Sudamérica. Tesis para optar el grado de ingeniero meteorólogo, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Hallack-Alegria, M. & Watkins, JR. (2007). Annual and warm season drought Intensity-Duration-Frequency Analysis for Sonora, Mexico. *Journal of Climate*, 20 (9):1897-1909.
- Hosking, J.R.M. (1990). L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 52 (1): 105-124.
- Hosking, J.R.M. & Wallis, J.R. (1993). Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research*, 29: 271-281.
- Hosking, J.R.M. & Wallis, J.R. (1997). Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, 224: 105-124.
- Hosking, J.R.M. (2005). Fortran routines for use with the method of L-moments. V3 Report. IBM Research Division. <http://lib.stat.cmu.edu/general/lmoments.pdf>.
- Loucks, D., Van Beek E.c Stedinger J., Dijkman, J. & Willars, M. (2005). Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications. Paris, France
- Nathan, R.J. & E, McMahon, T.A. (1990). Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalization. *Journal of Hydrology*, 121: 217-238.
- Norbiato, D., Borga, M., Sangati, M. & Zanon, F. (2007). Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *Journal of Hydrology*, 345: 149-166.
- Núñez, J., Verbist, K., Soto, G., Naranjo, R. & Morales, L. (2011). Análisis regional de frecuencia de sequías en la región semiárida de Chile. <http://www.aquaknow.net>.
- Núñez, J. & Verbist, K. (2008). Preparación de datos para el análisis regional de frecuencias: área piloto IV Región de Coquimbo, Chile. Informe Final. CAZALAC.
- Núñez, J., Wallis, J. & Giovannetone, J. (2008). L-Moment and Frequency Distribution Curve FORTRAN Code QuickStart Guide. USACE IWR-Yale University-CAZALAC.
- OMM (2006). Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros. Tiempo, clima y agua N° 1006.

- Salas, J. (2000). Hidrología de zonas áridas y semiáridas. *Ingeniería del Agua*, 7(4): 409-429.
- Schaefer, M., Barker, B. Taylor, G. & Wallis, J. (2006). Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations in Eastern Washington. Prepared for Washington State Department of Transportation. MGS Engineering Consultants, Inc and Oregon Climate Service.
- SENAMHI PERÚ (1988). Mapa de clasificación climática del Perú. Método de Thornthwaite. Eds. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima. 9 pp.
- SENAMHI PERÚ (2004). Atlas hidrológico de las cuencas Chao, Virú, Moche, Chancay-Lambayeque, Chaman, Chicama, Jequetepeque. Eds. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Lima-Perú.
- SENAMHI PERÚ (2005). Atlas hidrológico de las cuencas Olmos, Motupe y La Leche. Eds. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima, Perú.
- Suarez, W. (2010). Informe sobre el Proyecto de adaptación al cambio climático en las regiones de Cusco y Apurímac clima presente y futuro, impacto en cultivos prioritarios y en la disponibilidad hídrica-componente hidrológica. Eds. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú, Lima, Perú.
- UNESCO-ROSTLAC (1982). Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. <http://www.unesco.org/uy/phi/libros/guiametodolbalhidAS.pdf>.
- UNESCO (2006). Balance hídrico superficial del Perú a nivel multianual. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 1.
- UNESCO (2010). Guía metodológica para la aplicación del análisis regional de frecuencia de sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 27.
- Vauchel, P. (2005). Hydraccess 4.4 Software para manejo y procesamiento de información hidrometeorológica. www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.
- Viglione, A., Laio, F. & Claps, P. (2007). A comparison of homogeneity tests for regional frequency analysis. *Water Resources Research*, 43 (W03428). Doi:10.1029/2006WR005095
- Wallis, J., Schaefer M., B. Barker B. & Taylor G. (2007). Regional precipitation frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington States. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 415-442.
- Werick, W., Willeke, G., Guttman, N., Hosking, J. & Wallis, J. (1994). National Drought Atlas Developed. EOS, Transactions American Geophysical Union, Washington, D.C. 75: 8-89 pp.
- Wilhite, D. & Buchanan-Smith M. (2005). Drought as Hazard: Understanding the Natural and Social Context. D. Editor: Drought and Water Crises Science, Technology, and Management Issues.
- Yurekli, K. & Anli A. (2008). Analyzing Drought Based on Annual Total Rainfalls over Tokat 629 Province. *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 2(2): 21-26.