

# Comparison of three methods in the analysis of hydrometeorological droughts in the Ilave River basin Puno - Perú

Lorenzo G. Cieza Coronel<sup>\*a</sup>, Jesús Abel Mejía Marcacuzco<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina, Escuela de Post Grado, Doctorado Recursos Hídricos, Perú, Cel: 051-969370551.

<sup>b</sup>Instituto Hidrología Aplicada y Medio Ambiente (IHAMA), Lima, Perú.

**Abstract.-** In this study, three methods were analyzed (SPI, Run, extreme values) it was observed that the meteorological and hydrological drought, are directly related, given that, if there is not enough rainfall, there is no surface runoff. The SPI, represents the number of standard deviations of the precipitation fall over a period, with respect to the average; for which historical precipitation is first standardized; all successive negative values indicate the intensity and magnitude of the drought. Run method or succession analysis, has been proposed as an objective method, to identify periods of drought. The truncation series ( $D_t$ ) was first obtained by deciding that this series would be formed by the arithmetic average of the water supply variable  $X_t$  (annual flow of the river Ilave). What we standardize and the negative values that are below the average (0) are associated as droughts, allowing us to determine the intensity and magnitude of this event. Extreme value method, the minimum flows were analyzed, being adjusted to the distribution functions Log Normal, Pearson type III and Gamma.

**Keywords:** rainfall; drought analysis; hydrometeorological droughts.

## Comparación de tres métodos en el análisis de sequías hidrometeorológicas en la cuenca del Río Ilave Puno – Perú

**Resumen.-** En este estudio, se emplearon tres métodos (SPI, Run, valores extremos) para el análisis de las sequías, observándose que las de tipo meteorológica e hidrológica, están relacionadas directamente, dado que, de no existir de manera suficiente precipitaciones pluviales, no hay escurrimiento superficial. El SPI, representa el número de desviaciones estándar de la precipitación caída a lo largo de un período, respecto a la media; para lo cual la precipitación histórica primeramente se estandariza; posteriormente, todos los valores negativos sucesivos indican la intensidad y magnitud de la sequía. El método del run o análisis de sucesiones, ha sido propuesto como un método objetivo, para identificar los períodos de la sequía. Se obtuvo primeramente la serie de truncación ( $D_t$ ), decidiendo que esta serie estaría formada por el promedio aritmético de la variable de la oferta de agua  $X_t$  (caudal anual del río Ilave). Lo cual fue estandarizado y los valores negativos que están por debajo del promedio (0) son asociados como sequías, permitiendo determinar la intensidad y magnitud de este evento. Por último, respecto al método de valores extremos, se analizaron los caudales mínimos, siendo ajustado a las funciones de distribución Log Normal, Pearson tipo III y Gamma.

**Palabras claves:** precipitación pluvial; análisis de sequías; sequías hidrometeorológicas.

Recibido: 02 febrero 2018

Aceptado: 25 febrero 2019

### 1. Introducción

Las sequías son fenómenos de relativa complejidad que afectan de manera importante el desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos en

una región, entendiéndose como sequía a períodos prolongados de escasez de recursos hídricos capaces de provocar efectos adversos sobre la sociedad o los sistemas productivos [1]. Tienen la particularidad de ser, de lento desarrollo y amplia cobertura espacial, lo que hace difícil precisar con exactitud su duración y extensión, dificultando la adopción oportuna de medidas concretas para prevenir sus efectos. La creciente demanda de agua y la pérdida de calidad del recurso, hacen que se presente especial atención a su uso óptimo, y por lo tanto que se estudien también cuidadosamente

\*Autor para correspondencia:

Correo-e:lorenzocieza@hotmail.com (Lorenzo G. Cieza Coronel)

los caudales mínimos, para garantizar en el abastecimiento de agua a poblaciones, industria y agricultura, generación de hidroelectricidad, etc.; en el establecimiento de la relación entre los usos indicados y los eventos mínimos no bastan las técnicas estadísticas tradicionales (análisis de valores mínimos y curva de duración), más bien se requiere de predicciones sobre la probabilidad de ocurrencia de los eventos extremos mínimos de diferentes duraciones, creyendo conveniente hacer un análisis profundo de estos eventos para mitigar pérdidas económicas en la región y por ende al país.

En el Perú, el efecto negativo de las sequías, se deja sentir principalmente en dos regiones: la región de la costa norte, especialmente en los departamentos de Piura y Lambayeque, y la región sur, en el departamento de Puno.

La presencia de fuertes sequías en los últimos años en dichas regiones, han dado lugar a estudios y evaluaciones de este evento con el fin de prevenir estas anomalías, que tienen un impacto negativo en la economía regional y nacional.

## 2. Métodos

### 2.1. Identificación de variables

Los parámetros que se requieren en el análisis de sequías hidrometeorológicas son los siguientes:

- Caudal o volumen mínimo, mensual y anual de una serie de años.
- Precipitaciones mínimas, estación meteorológica Ilave.

Las variables seleccionadas son las precipitaciones promedio mensuales y los caudales anuales, que aplicados a modelos mencionados permiten obtener la variable dependiente.

### 2.2. Análisis de la información pluviométrica

La estación meteorológica considerada en el estudio ha sido seleccionada a partir de la información disponible por su longitud de su registro, así como su distribución espacial. El objetivo corresponde con utilizar las series de mayor longitud y abarcar la mayor área posible.

El período de análisis se definió desde el año 1957 hasta el 2015.

Se realizó el análisis exploratorio de la información pluviométrica y volumétrica, buscando la homogenización de la información histórica.

En la investigación se planteó usar tres métodos, con la finalidad de conocer, el método que mejor se ajuste a la realidad del altiplano.

### 2.3. Método del índice de precipitación estandarizada (SPI)

Para el cálculo del SPI, en la cuenca del río Ilave, se ha partido de la serie histórica acumulada de precipitaciones mensuales.

Para realizar el análisis del índice de precipitación estandarizada, se analizaron la suma de precipitaciones anuales desde 1957 hasta 2015, que hace un total de 58 años de datos; tomando como sequías de la serie de datos analizados los que se ubican por debajo del promedio de la serie original (0).

Se utilizó un ajuste de los datos de precipitación a través de la función de distribución de probabilidad tipo Gama. Este ajuste se realiza, para precipitación acumulada en diversas escalas de tiempo (3, 4 y 12 meses). Esto se realiza para cada sitio de la región de estudio. Posteriormente, la función es transformada en una distribución normal estandarizada y el valor obtenido corresponde al SPI.

Los valores positivos del SPI, indican una precipitación superior a la media y los valores negativos indican precipitaciones inferiores a la media. Dado que el SPI está normalizado, tanto los períodos húmedos como los secos se pueden representar de la misma manera, y aplicando este índice se puede hacer un seguimiento de cualquier período.

Según lo indicado, un período de sequía se establece cuando el SPI presenta una secuencia continua de valores negativos tales que estos sean iguales o menores a  $-1$ , si bien se considera que este evento no llega a su fin hasta el momento en que dicho índice vuelva a tomar su valor positivo. Esta definición permite caracterizar cada período seco de acuerdo a su duración, intensidad y magnitud. La duración del evento lo determina la longitud del

período, en el que los valores del SPI cumplen las condiciones requeridas por dicha definición. La intensidad del mismo viene determinada, de la precipitación, por el máximo valor negativo a partir de -1, que el SPI alcance dentro del período seco analizado; finalmente, su magnitud, viene dada por la suma de los valores del SPI correspondientes a todos los meses comprendidos dentro del período seco considerado.

#### 2.4. Método del Run

Para facilidad del análisis, es necesario adoptar una definición objetiva de sequía basado en los runs, lo cual permite una identificación clara de los índices de definición, una vez que las series de abastecimiento y demanda de agua son dadas.

Seleccionando un valor arbitrario de demanda  $D_t$ , la serie discreta de abastecimiento es truncada y dos nuevas series de desviaciones positivas y negativas son formadas. La secuencia de desviaciones negativas consecutivas, es llamada run negativo y este es asociado con una sequía; la secuencia de desviaciones positivas consecutivas es llamada run positivo y puede ser asociado con demasías [2].

Con referencia a la sequía meteorológica e hidrológica, en la aplicación de estos tres métodos para su análisis, los parámetros que serán medidos y definidos en forma individualizada son los siguientes:

1. Magnitud: el déficit acumulado de caudal o precipitación para la duración del período seco; o lo que es lo mismo la suma del run negativo, que es la suma de déficit individual, para una duración ininterrumpida de sequía [3, 4].
2. Duración: llamado también longitud del run negativo, es definido como el número de intervalos de tiempo consecutivos (tiempo total), durante el cual la serie histórica es negativa comparada con la demanda.
3. Intensidad: llamado también severidad de la sequía, mide la relación entre el caudal promedio y el caudal mínimo en una serie de años, se determina de acuerdo con la ecuación (1).

$$I = \frac{M}{D}, \quad (1)$$

donde:

$I$ : intensidad(unidades).

$D$ : duración(tiempo).

$M$ : magnitud(unidades).

Los runs, de la secuencia de una variable estocástica, o una combinación de componentes, determinísticas y estocásticas, pueden ser definidos considerando básicamente el abastecimiento y las demandas.

El proceso de abastecimiento puede ser la precipitación, las descargas, humedad en el suelo, almacenamiento de aguas en un acuífero o reservorio y similares variables hidrológicas, los que son procesos estocásticos estacionarios dependientes o independientes en el tiempo.

El proceso de demanda o nivel de truncamiento; puede ser de propósito simple de uso de agua, tal como agua potable, industrias, agricultura, energía, etc. o puede ser de propósito múltiple que resulta combinando dos o más usos de agua. Sea  $X_t$ , una serie de abastecimiento de agua anual, con  $t = 1, 2, 3, \dots, n$ ; siendo  $n$ , el número de años de la serie [2].

#### 2.5. Nivel de truncamiento

La selección del nivel de truncación es de crucial importancia, ya que de este parámetro depende la longitud y magnitud de la sequía crítica.

En la mayoría de los casos, el nivel de truncación es tomado igual a la media del proceso histórico de análisis, lo cual tiene mucha ventaja [5]. En otros casos se utiliza la mediana, o también una proporción de la media del abastecimiento, y en otros es considerado como una función de la media y desviación estándar del abastecimiento según la ecuación (2).

$$D_t = \bar{X} + \alpha S, \quad (2)$$

donde:

$D_t$ : nivel de truncación de la serie.

$\bar{X}$ : media del abastecimiento.

$S$ : desviación estándar de  $X_t$

$\alpha = -0,2$

### 2.5.1. Análisis de la sequía crítica

El método del run, en esta oportunidad se está aplicando al caudal total anual del río Ilave, donde se analiza la serie histórica, que está por debajo del promedio, y lo asociamos como sequía, de donde identificamos la sequía crítica, en un determinado período de tiempo; para el análisis se ha seguido el siguiente orden.

1. El abastecimiento de agua ( $X_t$ ), representado por el caudal total anual ( $m^3/s$ ), se estandariza a partir de la ecuación (3).

$$Z = \frac{X_t - \bar{X}}{S}, \quad (3)$$

donde:

$Z$  = Serie del abastecimiento anual estandarizado, vale decir con media cero y desviación estándar la unidad

$X_t$ : Abastecimiento ( $m^3/s$ ).

$\bar{X}$ : Promedio del abastecimiento anual ( $m^3/s$ ).

$S$ : desviación estándar del abastecimiento ( $m^3/s$ ).

2. Se fija el nivel de demanda de agua anual, optando por la media del abastecimiento, según la ecuación (4):

$$D_t = \bar{X}_t, \quad (4)$$

donde:

$D_t$ : nivel de truncamiento de la serie.

3. El abastecimiento estandarizado, así como la demanda se grafican, ubicando en el eje de las ordenadas al abastecimiento y la demanda y el tiempo en años, se ubica en el eje de las abscisas, obteniendo los runs positivos y negativos (sequías)
4. De la figura se determina las características de la sequía crítica que son:

- Duración de la sequía crítica ( $D_C$ ), lo cual es igual a la longitud máxima del run negativo en años.
- Magnitud o severidad de la sequía crítica ( $M_C$ ) que es igual a la suma total del run negativo en la longitud máxima determinada.
- Intensidad de la sequía crítica ( $I_C$ ) que viene a ser la relación existente entre la magnitud crítica y la duración crítica.

### 2.5.2. Modelamiento matemático

El desarrollo de modelos matemáticos para la descripción de series hidrológicas y la estimación de parámetros de estos modelos, según la primera hipótesis de Yevjevich [6] que dice: “una serie hidrológica continua en el tiempo está conformada por componentes determinísticos en la forma de parámetros periódicos o constantes y de una componente estocástica”, se representa a través de la ecuación (5):

$$X_t = m_x + S_x \cdot Z_t, \quad (5)$$

donde:

$X_t$ : serie hidrológica anual sin saltos ni tendencias en el año  $t$ .

$m_x$ : promedio general de la serie.

$S_x$ : desviación estándar de la serie.

$Z_t$ : componente estocástica dependiente o independiente.

$t = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  es el número total de años del registro.

La componente estocástica ( $Z_t$ ), es la estandarización de la serie hidrológica, puede ser dependiente o independiente; se dice que el proceso  $Z_t$  es linealmente dependiente si sus valores sucesivos están relacionados por cualquier modelo matemático lineal [6].

### 2.5.3. Cálculo de la componente estocástica ( $Z_t$ )

La componente estocástica o residual  $Z_t$  es obtenida restando el promedio y dividiendo por la desviación estándar, obteniendo la expresión en la ecuación (6):

$$Z_t = \frac{X_t - m_t}{S_t}. \quad (6)$$

Este proceso estandarizado (media cero y desviación estándar la unidad) puede o no ser independiente.

### 2.5.4. Prueba de independencia de $Z_t$

Para probar la independencia de  $Z_t$ , se utiliza el análisis de correlograma. El correlograma se define como una función entre los coeficientes de correlación serial  $\rho_k$  como ordenadas y el retardo o desfase  $k$  como abscisas. La función

de auto correlación es definida como la expresión matemática que describe analíticamente a las secuencias de valores continuos o de valores discretos y es usada para determinar la dependencia entre los valores sucesivos de la serie [6].

El coeficiente de auto correlación se define como la razón de la covarianza poblacional y la raíz cuadrada del producto de dos varianzas poblacionales, según la ecuación (7) [6].

$$\rho_k = \frac{COV(Z_t Z_{t\pm k})}{VAR(Z_t)VAR(Z_{t\pm k})^{1/2}}, \quad (7)$$

donde:

$Z_{tk}$  = significa un desfase de k periodos, hacia adelante (+) o hacia atrás (-)

En este caso es necesario representar la dependencia de la componente estocástica  $Z_t$ , para lo cual utilizaremos los modelos auto regresivo o Markovianos de un orden adecuado [2].

### 2.5.5. Generación de descargas

La aplicación del modelo, según la ecuación (5), permite generar series de descargas anuales, siendo necesario utilizar parámetros de la serie de datos históricos: media y desviación estándar y valores de la variable estocástica independiente: números aleatorios normales (0,1)

### 2.6. Método de valores extremos

Si se puede demostrar que una muestra de sequías se distribuye normalmente, entonces sería posible extrapolar para obtener estimaciones de frecuencia de sequías en el extremo inferior del rango. Este método no es tan confiable para calcular valores exactos.

Esta técnica asume que la serie de caudales mínimos disponibles constituye una muestra de una población desconocida formada por todos los valores extremos pasados y futuros. Por lo tanto, parte del criterio que dicha muestra, siempre que sea de una longitud suficiente, posee la misma función de distribución de frecuencia que la población a la que se supone pertenece. De este modo se adapta una distribución teórica a la empírica de la serie observada, la misma que se usa a posteriori para extrapolaciones a eventos de probabilidades deseadas, de excedencia o no

excedencia. Otra condición básica para el uso de este tipo de modelos viene a ser la independencia de los valores observados, lo cual se cumple normalmente en series anuales o bianuales [7].

Cuando se usa la serie anual en el modelo de probabilidades existen una relación directa entre la probabilidad de excedencia y el período de retorno, quedando expresado a través de las ecuaciones (8) y (9).

$$P = 1 - P_e = \frac{1}{T}, \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{P} = \frac{1}{1 - P_e}, \quad (9)$$

donde:

$P$ : probabilidad de no excedencia

$P_e$ : probabilidad de excedencia

$T$ : periodo de retorno.

#### 2.6.1. Selección de la variable aleatoria

En este caso se toma como variable aleatoria a los valores de caudal más pequeños dentro de un intervalo determinado (año, semestre, mes). Otras veces se escoge como eventos extremos al promedio mínimo de períodos mayores que un día (períodos secos de diferentes duraciones)

El procedimiento más indicado para construir la variable, consiste en tomar durante la estación seca de cada año los promedios móviles para el período deseado y extraer el más pequeño de ellos, el mismo que será la variable aleatoria (X).

#### 2.6.2. Funciones de distribución de frecuencia

Las funciones de distribución de probabilidades que se usan en el análisis de frecuencia de los caudales mínimos, son en gran parte las mismas que se utilizan para el caso de los caudales máximos. Sin embargo, se recomienda elegir aquellas que solo toman valores iguales o mayores que cero, porque caudales negativos no tienen sentido físico. Lo que más interesa es la rama izquierda de la función [7].

#### 2.6.3. Distribución empírica

Para el caso de eventos mínimos, como es el caso de sequías la más comúnmente usada es la función

de Weibull, dado por las ecuaciones (10) y (11):

$$P_e = \frac{m}{n + 1}, \quad (10)$$

$$P = \frac{n - m + 1}{n + 1}, \quad (11)$$

donde:

*m*: número de orden de la serie ordenada en forma creciente.

*n*: tamaño de la muestra (número de datos de la serie).

*P*: probabilidad de no excedencia.

*P<sub>e</sub>*: probabilidad de excedencia.

#### 2.6.4. Funciones teóricas de distribución de frecuencias

Las distribuciones más usadas en el análisis de frecuencia de los caudales mínimos son: Log – Normal, Pearson tipo III, Gamma, y de valores extremos tipo III.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología (Precipitación estandarizada, método del run, y método de valores extremos) descrita en el desarrollo del trabajo consisten en:

#### 3.1. Índice de precipitación estandarizada (SPI)

Para el análisis de esta metodología se utilizó como variables independientes las precipitaciones de 1,3, 6, 9 y 12 meses. Para lo cual se siguió el siguiente procedimiento:

- Primeramente, se homogeneizó la información, haciendo el respectivo análisis de consistencia, tanto en la media como en la desviación estándar
- Los datos históricos se ajustaron a una distribución teórica:

Este índice se calculó restando a la precipitación total de un determinado período, la media aritmética de ese período y dividiendo el resultado por la desviación típica. La estandarización de los valores, permite que los resultados presenten una distribución normal. Aunque este método permite

establecer comparaciones entre todo tipo de climas, se presentan problemas en aquellas regiones con una elevada variabilidad pluviométrica de tal forma que, si la media aritmética es inferior a la desviación típica, el índice nunca podrá alcanzar el valor -1. Tal es el caso en los valores anuales de regiones desérticas.

En la Figura 1, se aprecian las desviaciones estándar de la cantidad de precipitaciones pluviales de la estación Ilave desde 1 mes hasta 12 meses.

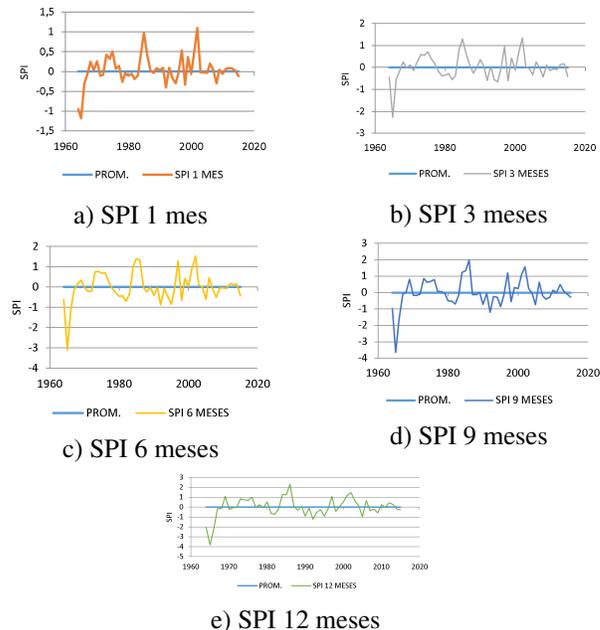


Figura 1: Variación del SPI, estación Ilave.

Los autores que diseñaron este índice, establecieron también el criterio para definir un período de sequía, según el cual, se dice que tiene lugar un período seco siempre y cuando el SPI presente una secuencia continua de valores negativos, tales que estos sean iguales o inferiores a -1, si bien se considera que este evento no llega a su fin hasta el momento en que dicho índice vuelva a tomar un valor positivo. Esta definición nos permite caracterizar cada período seco en la cuenca en estudio de acuerdo a su duración, intensidad y magnitud.

Las características de la sequía aplicando el método SPI, se aprecia en las Tablas 1, 2, 3 y 4.

En el método de índice de precipitación estandarizada (SPI) se analizaron las precipitaciones para 1 mes, 3 meses, 9 meses y 12 meses, la intensidad

Tabla 1: Características de la sequía, Método SPI 1 mes, estación Ilave.

	Años			
	1964	1978	1994	2003
	-	-	-	-
	1967	1983	1996	2005
Duración (años)	4	6	3	3
Magnitud (uni)	-2,47	-0,77	-0,49	-0,09
Intensidad (uni)	-1,18	-0,26	-0,17	-0,04
Int. Media (uni)	-0,61	-0,13	-0,60	-0,03

Tabla 4: Características de la sequía, Método SPI 12 meses, estación Ilave.

	Años				
	1964	1970	1981	1990	2007
	-	-	-	-	-
	1968	1972	1983	1996	2009
Duración (años)	5	3	3	7	3
Magnitud (uni)	8,31	0,29	1,53	4,06	1,30
Intensidad (uni)	3,81	0,22	0,72	1,21	0,57
Int. Media (uni)	1,66	0,096	0,51	0,58	0,37

Tabla 2: Características de la sequía, Método SPI 3 mes, estación Ilave.

	Años			
	1964	1998	1994	2010
	-	-	-	-
	1967	1983	1996	2012
Duración (años)	4	6	3	3
Magnitud (uni)	-3,42	-2,11	-1,10	0,30
Intensidad (uni)	-0,54	-0,56	-0,65	-0,14
Int. Media (uni)	-0,85	-0,35	-0,41	-0,10

Tabla 5: Intensidad de la sequía y categoría según el índice (SPI) para precipitaciones con 1 mes, 9 meses y 12 meses.

Años	Meses			Sequía
	1	9	12	
1964 - 1967	-1,18			moderada
1964 - 1967		-3,66		extrema
1990 - 1996		-1,21		moderada
1964 - 1968			-3,81	extrema
1990 - 1996			-1,21	moderada

Tabla 3: Características de la sequía, Método SPI 9 meses, estación Ilave.

	Años				
	1964	1970	1979	1990	2007
	-	-	-	-	-
	1967	1972	1983	1996	2009
Duración (años)	4	3	5	7	3
Magnitud (uni)	-6,38	-0,44	-1,93	-3,49	-0,88
Intensidad (uni)	-3,66	-0,17	-0,52	-1,21	-0,57
Int. Media (uni)	-1,59	-0,14	-0,38	-0,50	-0,29

de la sequía y la categoría según el índice (SPI), se aprecia en el Tabla 5.

### 3.2. Método del run

Después de un análisis de las series históricas de caudales totales anuales del río Ilave, primeramente, la serie se homogeneizó y estandarizó, dando como resultado nuevas series de datos asociados como run negativo y run positivo; en este trabajo nos interesa analizar los runes negativos, que son los asociados a las sequías. Se analizó la serie histórica desde 1957 hasta el 2015, donde se ha podido apreciar seis eventos de sequías con características diferentes (Tabla 6), lo que se refleja en la Figura 2.

Con la aplicación del modelo, ecuación (5), se genera series de caudales futuros, se aprecia en la Tabla 7 y Figura 3.

#### 3.2.1. Modelamiento matemático sequía crítica

La sequía es crítica cuando tiene mayor longitud; aplicando el modelo matemático, ecuación (5), para la serie de caudales anuales del río Ilave, se obtiene la ecuación (12):

Tabla 6: Características de las sequías históricas, método del run.

	Años					
	1957	1964	1975	1989	2003	2007
	-	-	-	-	-	-
	1961	1967	1983	2000	2005	2010
Duración (años)	5	4	5	8	3	4
Magnitud (unidades)	2,45	3,68	4,18	3,37	1,54	1,57
Intensidad (unidades)	0,49	0,92	0,83	0,67	0,51	0,39

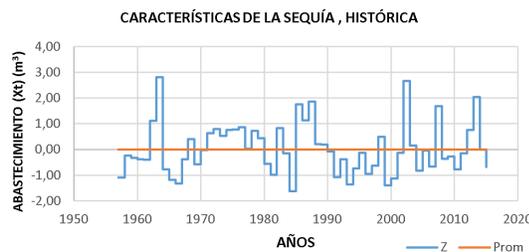


Figura 2: Determinación de la sequía, método del run.

Tabla 7: Característica de la sequía, en caudales generados, método del run.

	Años			
	1957	1966	1981	2010
	-	-	-	-
	1960	1969	1986	2014
Duración (años)	4	4	6	5
Magnitud (unidades)	2,52	2,83	3,61	4,75
Intensidad (unidades)	0,63	0,71	0,60	0,95

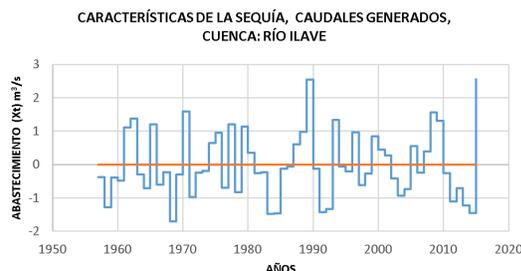


Figura 3: Determinación de la sequía, caudales generados, método del run.

$$X_t = 414,54 + 217,23Z_t \quad (12)$$

De acuerdo a la prueba de independencia de la variable estocástica  $Z_t$ , es independiente, por lo tanto, se generó una serie de caudales sin necesidad del modelo de Markov. Los parámetros, para el caudal generado son:

$$\text{Media anual} = 402,88 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Desviación estándar anual} = 223,37 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Coeficiente de variación} = 0,5544$$

### 3.3. Método de valores extremos

Los resultados de implementar el método de valores extremos se muestran en la Tabla 8, y han sido obtenidos de la aplicación de las ecuaciones (8),(9) y (10).

## 4. Conclusiones

De la aplicación de los tres métodos para determinar las características de las sequías hidrometeorológicas en la cuenca del río Ilave – Puno, se obtiene lo siguiente:

En cuanto a la relación que existe entre sequía meteorológica y sequía hidrológica; esta última depende directamente de la primera; al disminuir las precipitaciones pluviales, también disminuye el escurrimiento superficial y la recarga subterránea, disminuyendo el caudal del río en estudio.

En lo relativo a la relación que existe entre sequía meteorológica y sequía hidrológica; esta última depende directamente de la primera; al disminuir las precipitaciones pluviales, también disminuye el escurrimiento superficial y la recarga subterránea, disminuyendo el caudal del río en estudio.

Comparando los resultados de los métodos utilizados en el presente trabajo, los indicadores de sequías del método de Precipitación estandarizada (SPI), el método del run y el método de valores extremos, indican presencia de sequías en el tiempo y espacio obtenidos en los resultados; cada uno de los métodos reflejan presencia de eventos mínimos (sequías)

En el método del run luego de analizar los caudales totales del río Ilave; se encontró que los caudales tuvieron una tendencia de disminución por debajo de la demanda, en

Tabla 8: Caudales mínimos río Ilave.

Años	Datos Históricos (m <sup>3</sup> /s)	Datos Generados (m <sup>3</sup> /s)	Probabilidad (%)	Periodo de retorno (años)
1	60,55	80,81	2,7	5
2	110,36	107,45	5,4	4
3	116,22	127,15	0,8	4
4	124,77	143,44	10	3
5	156,20	157,64	13	3
6	166,95	170,40	16	3
7	177,81	182,12	18	3
8	182,43	193,03	21	2
9	200,49	203,31	24	2
10	202,00	213,06	27	2
11	208,26	22,39	29	2
12	233,84	231,37	32	2
13	245,53	240,05	35	2
14	245,88	248,48	37	2
15	252,71	256,69	40	2
16	267,63	264,73	43	2
17	271,81	272,61	45	2
18	276,98	280,37	48	1
19	288,89	288,03	51	1
20	289,82	29,62	54	1
21	327,31	303,17	56	1
22	328,93	310,69	59	1
23	329,38	318,21	20	1
24	312,37	325,32	64	1
25	337,00	33,32	67	1
26	343,53	340,97	70	1
27	354,92	348,72	72	1
28	362,18	356,61	75	1
29	378,78	364,67	78	1
30	379,44	372,97	81	1
31	384,01	381,58	83	1
32	384,57	390,60	86	1
33	397,40	400,18	89	1
34	402,93	410,57	91	1
35	407,50	422,23	94	1
36	412,18	436,24	97	1

el mismo periodo de escasas de precipitación, demostrándonos con ello, la relación de ambas sequías (meteorológica e hidrológica), entonces existe una relación directa entre la precipitación pluvial y el caudal de los ríos. Con este método, se determinaron las características objetivas de la sequía: magnitud, duración e intensidad (ver Tablas 1, 2, 3 y 4).

## 5. Referencias

[1] M. Bais. Caracterización de sequías hidrológicas en cuencas de la Patagonia de la República Argentina.

In *Congreso Nacional del Agua CONAGUA*, Córdoba, Argentina, 2017.

- [2] A. Aliaga. Análisis de las características de Sequías por el Método Experimental “Teoría del Run”. Tesis para optar el grado de magister scientiae, Universidad Agraria La Molina, Lima – Perú, 1980.
- [3] J. Keyantash and J. A. Dracup. The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices . *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), August 2002.
- [4] L. Vicario. Evaluación de Sequías Hidro – Meteorológicas, en la Estación San Roque. Informe Interno INA - CIRSA, Córdoba, 2018.
- [5] J. Salas. *Modelamiento Estocástico de Series Hidrológicas*. Publicación N° 67. PUBLI DRAT. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú, 1979.
- [6] V. Yevjevich. *Probability and Statistics in Hydrology*. Fort Collins, Colorado U.S.A., 1972.
- [7] E. Guevara-Pérez. Métodos hidrológicos para el análisis de sequías. *Revista Ingeniería UC*, 1(1), 1992.