

# AGRUPACIÓN JERÁRQUICA ASCENDENTE PARA LA DELIMITACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS APLICADA AL ANÁLISIS DE VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA MEXICANA 10

---

Hierarchical Agglomerative Clustering for delimitation of homogeneous regions and its application in the analysis of the spatial variability of precipitation in the Mexican Hydrological Region 10

R. Celic Reséndiz-Mendoza<sup>1\*</sup>, M. Alfonso Gutiérrez-López<sup>2</sup>

<sup>1</sup>División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería,  
Maestría en Ciencias en Hidrología Ambiental,  
Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas S/N,  
Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones del Agua, Universidad Autónoma de Querétaro,  
Cerro de las campanas S/N, Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

\*Autor de correspondencia:  
rosacelic@hotmail.com



## RESUMEN

El diseño de obras hidráulicas requiere de información confiable que permita al investigador estimar con precisión el evento de diseño. Sin embargo, la escasez de estaciones de aforo tanto en calidad como en representatividad es un problema común para la planeación y diseño de estas obras. Una solución viable es la aplicación de técnicas regionales, las cuales constan de tres etapas: la primera consiste en aglomerar los objetos que cumplan con un grado de similitud entre ellos, la segunda en la selección de una distribución de frecuencias regional y la última en la transferencia de información de la variable hidrológica de interés de los sitios aforados hacia el sitio no aforado. En este trabajo se realizó un análisis regional en su primera etapa en la región hidrológica número 10. El análisis consistió en la delimitación de regiones homogéneas para un conjunto de 46 estaciones climatológicas por medio de una agrupación jerárquica ascendente empleando el método de Ward. Se obtuvieron tres regiones homogéneas con 24, 8 y 14 estaciones a partir de cinco variables descriptivas de la zona como precipitación media anual, longitud, latitud, altitud de la estación de aforo y distancia al océano. El método utilizado se validó por técnicas de verificación de homogeneidad estadística regional. Los valores obtenidos de 0.169, 0.169 y 0.220 para las tres regiones, no sobrepasaron el valor límite de 0.3 necesario para delimitar factiblemente la variabilidad espacial de la precipitación. Por lo tanto, para la siguiente etapa del análisis la elección de un sitio no aforado podría ser en cualquiera de las tres regiones homogéneas, ya que la técnica utilizada es viable frente a la escasez de registros climatológicos permitiendo la transferencia de información de las estaciones intra-grupo hacia el punto de interés.

**Palabras Clave:** análisis regional, métodos jerárquicos aglomerativos, zonas no aforadas, método de Ward.

## ABSTRACT

The design of hydraulic structures requires reliable information for the researcher to accurately estimate an event design. However, a common problem in the planning and design of such hydraulic structures is the scarcity of quality and representativeness of gauging stations. A plausible solution is the application of regional techniques consisting of three stages: The first one agglomerate objects that satisfy a degree of similarity between them, the second one includes the selection of a regional frequency distribution and the last one transfer subsequent information of the analyzed hydrological variable from the gaged site to the ungaged site. In the present work, a regional analysis in its first stage was developed for the hydrological region 10. The analysis consisted in the delimitation of homogeneous regions using the Agglomerative Hierarchical Technique and the Ward's method to a set of 46 climatological stations. Three homogeneous regions with 24, 8 and 14 stations were obtained from five descriptive variables of the zone as mean annual precipitation, longitude, latitude, gaged elevation and ocean distance. The method was validated by statistical verification techniques of regional homogeneity. The resulting values of 0.169, 0.169 y 0.220 in each region did not exceeded the limit value of 0.3 required to feasibly delimit the spatial variability of precipitation. As result, in the study of the next stage of the regional analysis the choice of an ungaged site could be in any of the three homogeneous regions since the used technique is a feasible method to transfer information from gaged station to any ungaged point from scarce climatological records.

**Keywords:**

regional analysis, hierarchical ascending agglomerative, homogeneity, ungaged zones, Ward's method.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de obras hidráulicas se requiere información histórica de variables climatológicas e hidrométricas, sin embargo, un problema común en países en desarrollo y subdesarrollo es la falta de estaciones de aforo (Saf, 2009). Esta situación es visible desde la etapa de planeación, cuando el hidrólogo se enfrenta a la escasez de estaciones de aforo así como de estaciones que están parcialmente aforadas, es decir, no hay continuidad en los registros históricos en las variables de interés que permitan realizar una estimación confiable del evento de diseño.

Cuando la información histórica de la variable de interés está disponible, es aplicable un Análisis de Frecuencias en el sitio (AF) que permita al hidrólogo conocer la magnitud del evento de diseño dado un periodo de retorno. Si por el contrario, se presenta ausencia en la cantidad y calidad de los registros de las variables, es necesario aplicar un Análisis Regional de Frecuencias (ARF), proceso que además requiere de la estimación de las características descriptivas de la zona de estudio (Mishra *et al.*, 2009).

Una opción viable a este problema, es la transferencia de información por medio de la agrupación de regiones homogéneas, formadas por las estaciones aforadas y la transferencia de información hacia las zonas no aforadas, es decir, la opción viable consiste en aplicar técnicas de regionalización hidrológica.

La regionalización hidrológica consiste en la delimitación de regiones homogéneas dentro de un espacio que se supone heterogéneo debido a la gran cantidad de registros históricos y a la variabilidad de sus características tanto morfológicas como climatológicas, donde por medio de la construcción de ecuaciones regionales creadas a partir de las variables más representativas de la zona, es posible la transferencia de informa-

ción hidrológica pudiendo resultar en zonas sin continuidad geográfica, suponiendo un comportamiento hidrológico semejante.

La regionalización hidrológica es un conjunto de ecuaciones, que permite estimar eventos hidrológicos en sitios con registros escasos o nulos, a sitios que permanecen en condiciones similares, es decir, dentro de una misma región homogénea la respuesta hidrológica es similar. Para comprender qué significa la regionalización hidrológica es necesario identificar todos aquellos procedimientos y técnicas que se ven involucrados en la regionalización y que contribuyen en la estimación precisa de la variable de interés, pero que de manera aislada no cumplen con el propósito de regionalizar un espacio. Las técnicas y procesos antes mencionados constan de cartografía, ponderación espacial, análisis múltiple de frecuencias, interpolación espacial y análisis de extremos.

Mencionado lo anterior, todo proceso de regionalización requiere de seis pasos integrales: 1) caracterizar la variabilidad (espacio-temporal) de las mediciones, 2) identificar las variables que describen el fenómeno a estimar, 3) seleccionar un índice de proximidad, 4) identificar regiones hidrológicamente homogéneas, 5) construir ecuaciones regionales de transferencia de información, y 6) verificar la validez de las ecuaciones regionales.

Actualmente la investigación sobre métodos regionales de transferencia de información hidrológica ha cobrado importancia, donde a la fecha investigadores siguen buscando propuestas de mejora con el propósito de proporcionar métodos eficaces de estimación de crecientes de diseño (Wazneh *et al.*, 2015).

De forma general, el análisis regional consiste de tres aspectos principales: uno radica en la delimitación de regiones homogéneas, el segundo en la determinación de un mé-



todo de estimación regional para diferentes frecuencias de inundación y el tercero en la transferencia de la información hidrológica hacia un sitio de interés (Ouarda *et al.*, 2006; Malekinezhad *et al.*, 2011; Gado y Nguyen, 2016). En la primera etapa, se supone que toda la zona de interés tiene un comportamiento heterogéneo, por lo que en la delimitación de las regiones es necesario dividir la zona en sub-regiones hidrológicas homogéneas (Dodangeh *et al.*, 2014). El objetivo del agrupamiento de las variables hidrológicas es el análisis de la variabilidad espacial de la similitud de características hidrológicas, como las propiedades geográficas, físicas y estadísticas de las observaciones (Sarhadi y Modarres, 2011) que permitan la agrupación de regiones con la misma respuesta hidrológica de manera que la extrapolación de los registros para los efectos de cuantiles de diseño sea más precisa (Nathan y McMahon, 1990; Yu *et al.*, 2002).

Los atributos empleados para la delimitación de regiones homogéneas bajo el enfoque del ARF se clasifican en cinco tipos (Rao y Srinivas, 2006): i) características fisiográficas de la cuenca, ii) ubicación geográfica, iii) medidas de tiempo en la respuesta hidrológica, como el tiempo pico, tiempo de retraso, iv) variables meteorológicas y, v) estadísticos descriptivos en el sitio; aunque este último punto está bajo la observación al ser no recomendado por el hecho de emplear los estadísticos exclusivamente para la revisión de la homogeneidad de las regiones formadas (Hosking y Wallis, 1997; Núñez *et al.*, 2016). En el procedimiento de regiones homogéneas una actividad fundamental consiste en la selección de variables; Nathan y McMahon (1990) proponen como primer paso el análisis de las variables que se relacionen con el objeto de estudio, así como la ponderación las mismas.

En el procedimiento de la formación de regiones homogéneas no se ha desarrollado una metodología universal ya que existen

distintos métodos aplicables, que pueden ser en regiones contiguas geográficamente, regiones no contiguas geográficamente y vecinos hidrológicos (Ouarda *et al.*, 2001; Ouarda *et al.*, 2006; Wazneh *et al.*, 2015). Uno de los métodos más populares y ampliamente usados es el método del análisis de aglomerados (Wazneh *et al.*, 2015), con algoritmos de agrupamiento divisivo o jerárquico ascendente, con este último se obtienen grupos no contiguos espacialmente (Nathan y McMahon, 1990, Burn *et al.*, 1997).

El propósito del análisis de agrupamiento consiste en colocar objetos en grupos de manera que los objetos en cada grupo tengan la mayor similitud entre sí, mientras que los objetos en diferentes grupos tengan la máxima disimilitud (Soltani y Reza, 2006), es decir, cada grupo homogéneo creado en cada paso iterativo, contiene la menor varianza de variables (la disimilitud más pequeña). Se han propuesto varios métodos de ligadura para el análisis de agrupamiento jerárquico, es decir, los criterios de agrupación de los objetos que incluyen la ligadura sencilla, media y completa y el método de mínima varianza de Ward. Existen diversos estudios que involucran la comparación y análisis de los distintos métodos de agrupación, siendo el método de Ward el más empleado con resultados óptimos (Nathan y McMahon, 1990; Sarhadi y Modarres, 2011).

Este método tiene muchas ventajas en el análisis regional ya sea en estudios de caudales máximos y mínimos, análisis de variabilidad espacial de precipitación, análisis de sequías y clasificación de cuencas, por mencionar algunos (Kaufman y Rousseuw, 1990; Nathan y McMahon 1990; Nathan y McMahon, 1992; GREHYS, 1996; Baeriswyl y Rebetz, 1997; Laaha y Blöschl, 2006; Sanborn y Bledsoe, 2006; Soltani y Reza, 2006; Kahya *et al.*, 2008; Lim *et al.*, 2009; Sarhadi y Modarres, 2011; Dodangeh *et al.*, 2014).

En este trabajo se utilizó una técnica de delimitación de agrupación jerárquica ascendente de las estaciones aforadas, con el objetivo de caracterizar la distribución espacial de la precipitación en la Región Hidrológica 10 en Sinaloa, México. El estudio constó de tres partes fundamentales. Primero, la revisión de datos por medio de estadística descriptiva. Segundo, la aplicación de la técnica de agrupación para definir zonas hidrológicamente homogéneas, y tercero, la validación de la homogeneidad regional a través de una prueba estadística.

## 2. METODOLOGÍA / MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Selección de variables

El primer aspecto importante en la metodología regional es el análisis de las variables disponibles, en el análisis regional se emplean dos tipos de datos, las características de la zona de estudio o los valores estadísticos de las series de tiempo de las variables hidro-meteorológicas (Campos-Aranda, 2014), aunque este último punto está bajo observación al ser no recomendado por emplear estadísticos exclusivamente para la revisión y medición de la homogeneidad de las regiones formadas (Hosking y Wallis, 1997; Núñez et al., 2016).

The World Meteorological Organization (WMO) recomienda un periodo de 30 años de información mínima para estudios hidro-meteorológicos, sin embargo, diversos estudios enfocados en la regionalización de la precipitación indican la selección de registros que cumplen con un periodo de 10 a 20 años (GREHYS, 1996; Soltani y Reza, 2006; Ouarda et al., 2006; Campos-Aranda, 2014).

### 2.2. Estadística descriptiva

Del total de estaciones que cumplen con la calidad y representatividad de registros históricos, se deben aplicar estadísticos des-

criptivos a cada una de las estaciones climatológicas. Para cada estación climatológica con  $n$  registros los resultados estadísticos de la muestra son media  $\bar{x}$ , varianza sesgada  $S^2$ , coeficiente de asimetría  $C_s$ , curtosis  $K$ , desviación estándar  $S$  y coeficiente de variación  $C_v$  (Ecs. (1-6)) (Chow et al., 1994):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$C_s = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)S^3} \quad (3)$$

$$K = \frac{n^3}{(n-1)(n-2)(n-3)} \cdot \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^2} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (5)$$

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \quad (6)$$

### 2.3. Método de delimitación de regiones homogéneas

Ward (1963) desarrolló un método de agrupación por medio de la similitud entre los miembros que componen un grupo respecto a las características de los mismos, por medio de una agregación jerárquica de  $N$  miembros que se aglomeran debido al grado de similitud hasta formar  $J$  grupos homogéneos, el proceso concluye hasta llegar a un solo grupo. Para ello es necesario el cálculo de la distancia euclidiana, así como de la inercia entre centros de grupos.

Para la aplicación del método, se supone que se cuenta con  $P$  puntos en el espacio, los  $P$  puntos corresponden a las estaciones aforadas, de las cuales se calcula la matriz de distancia euclidiana al cuadrado, es decir con un índice de Minkowski de 2 (consultar Apéndice), de la siguiente forma:



$$(d(i, k))^2 = [\sum_{j=1}^d |x_i - \bar{x}|^2] \quad (7)$$

El método requiere una matriz inicial de inercia entre todos los P puntos del espacio, tomando en consideración el peso de las variables, así como los centros de gravedad de cada elemento

$$\Delta I_{\min} = (h, h') = \frac{m_h m_{h'}}{m_h + m_{h'}} d^2(g_h, g_{h'}) \quad (8)$$

donde m son las masas de cada elemento h y h', g son los centros de gravedad de cada elemento h y h', h y d<sup>2</sup> es el cuadrado de la distancia euclidiana entre los centros de gravedad. El centro de gravedad, g, se define de la siguiente forma:

$$g = \frac{g_h m_h + g_{h'} m_{h'}}{m_h + m_{h'}} \quad (9)$$

Después de la primera iteración, la agregación jerárquica de elementos considera la inercia adquirida en la formación de las estaciones añadidas.

$$\Delta I_{j,r} = \frac{1}{m_j + m_r} [(m_i + m_r) \Delta I_{i,r} + (m_{i'} + m_r) \Delta I_{i',r} - m_r \Delta I_{i,r}] \quad (10)$$

donde j=i+i', es la agregación del elemento, r es el elemento objetivo con respecto al cual se calcula la inercia, de la misma forma m<sub>j</sub> será el total del peso de la variable debido a la suma de las masas m<sub>i</sub>+m<sub>i'</sub> y m<sub>r</sub> es el peso del elemento r.

En cada paso iterativo se elige como nueva agrupación a aquellos elementos que tengan una menor inercia entre sí, por lo que para el nuevo elemento creado se calcula la inercia que se genera a partir de ese grupo formado respecto a los elementos restantes del análisis, el proceso termina hasta que todos los P puntos queden unidos en un solo grupo.

## 2.4. Validación de homogeneidad

Las pruebas de homogeneidad regional se fundamentan en los estadísticos de la muestra, para lo cual de cada región delimitada se estiman la media, desviación estándar y coeficiente de variación (Nobert et al., 2014) de la siguiente forma:

$$\bar{Q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} Q_{ij}}{n_j} \quad (11)$$

$$\sigma_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} (Q_{ij} - \bar{Q}_i)^2}{n_j - 1} \quad (12)$$

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\bar{Q}_i} \quad (13)$$

donde  $\bar{Q}_i$  es el caudal medio en el sitio i [m<sup>3</sup>/s], Q<sub>ij</sub> es la tasa del caudal de la estación i en la región j en [m<sup>3</sup>/s],  $\sigma_i$  es la desviación estándar y CV<sub>i</sub> es el coeficiente de variación.

La media regional y la desviación estándar se calculan de la siguiente forma (Nobert et al., 2014):

$$\bar{CV} = \sum_{i=1}^N \frac{CV_i}{N} \quad (14)$$

$$\sigma_{cv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (CV_i - \bar{CV})^2}{N}} \quad (15)$$

donde N es el número de sitios dentro de la región homogénea.

Teniendo los anteriores parámetros se estima la siguiente expresión con la cual se puede declarar si una región es homogénea o no lo es (Sine y Ayalew, 2004; Nobert et al., 2014):

$$CC = \frac{\sigma_{cv}}{\bar{CV}} \leq 0.3 \quad (16)$$



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caso de estudio

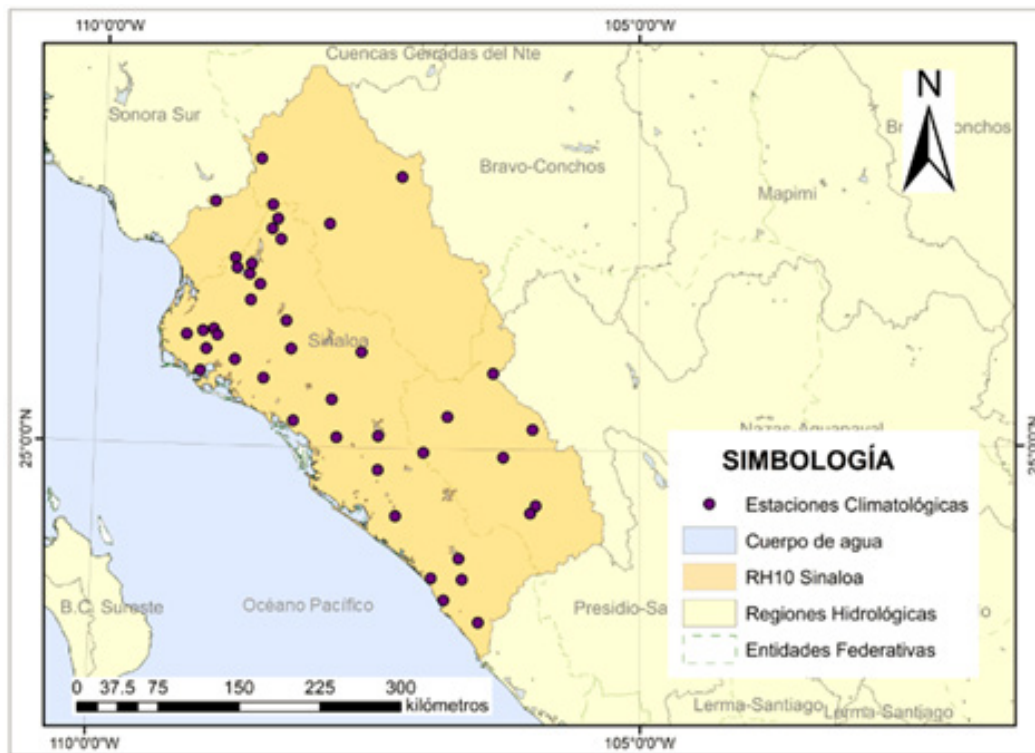
La República Mexicana está dividida en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas y en 37 regiones hidrológicas. La zona de estudio seleccionada corresponde a la Región Hidrológica número 10 (RH10) y pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa III, denominada Sinaloa y Pacífico Norte, respectivamente.

La RH10 (ver Fig. 1) se encuentra localizada al noroeste de México, tiene una superficie de 103055.56 km<sup>2</sup>, pertenecen a esta zona la totalidad del estado de Sinaloa y parte de los estados de Durango, Chihuahua y Sonora. Las principales corrientes superficiales las representan los ríos: Fuerte, Sinaloa, Mocorito, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quelite, Presidio, Baluarte, Cañas, Acaponeta y San Pedro.

Mediante la metodología expuesta anteriormente se realizó la extracción de datos de precipitación mensual y anual por medio del extractor rápido de información climatológica, ERIC, creado por la Comisión Nacional del Agua (IMTA, 1998; Ouarda *et al.*, 2008). Se consideraron todas las estaciones que cumplieran con un periodo de registro mínimo de 10 años, además de que se eliminaron todas aquellas estaciones que contenían datos faltantes, por lo que un total de 46 estaciones climatológicas cumplieron con el periodo de información definido como aceptable. Para la caracterización fisiográfica de la zona de estudio se extrajeron datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. En la Tabla 1 se muestran las variables empleadas y sus principales características.

**Tabla 1.** Variables empleadas en la delimitación de regiones homogéneas.

Variable	Características de la variable				
	Descripción	Mínimo	Máximo	Unidades	Fuente
Precipitación media anual (PMA)		298.57	1458.78	mm	SMN*
Latitud		23.03	27.40	m	INEGI
Longitud		-105.75	-109.18	m	INEGI
Altitud de la estación de aforo		2.00	2700.00	m	INEGI
Distancia al océano		1.00	224.00	km	INEGI*



**Figura 1.** Mapa de ubicación de la Región Hidrológica 10, Sinaloa, México.

### 3.2. Datos estadísticos descriptivos por cada estación

Para cada una de las estaciones climatológicas se aplicaron las ecuaciones descritas en la metodología, en la Tabla 2 se muestra el nombre y clave de las estaciones, así como sus características descriptivas: latitud, longitud, altitud de la estación de aforo, distancia de la estación climatológica al océano y la precipitación media anual (PMA).

### 3.3. Delimitación de regiones homogéneas

Por medio del método de Ward, se realizó una clasificación jerárquica ascendente, donde las estaciones fueron agrupadas en tres regiones distintas. En la

Figura 2 se puede observar la agrupación espacial de las estaciones, mientras que en la Figura 3 se muestra el procedimiento iterativo, en el que se puede ver cómo las estaciones se fueron aglomerando hasta la formación de un solo grupo.

Se definieron tres agrupaciones homogéneas para la región hidrológica (

Tabla 3), la característica de este método es que permite al investigador definir qué cantidad de grupos requiere en función de la distancia de ligadura, para lo cual en este desarrollo se definió una distancia de 30 km, donde el grupo con mayor cantidad de elementos fue el formado para la región 1, que se localiza a una altitud intermedia con respecto a las demás regiones (Figura 4), además, las estaciones cumplen con el criterio de homogeneidad que establece que la relación regional entre la desviación estándar con el coeficiente de variación medio no deben exceder un valor de 0.3, por lo que se verifica la homogeneidad en cada zona (Tabla 3).

En el resultado de las tres regiones homogéneas, al graficar las variables correspondientes a altitud y precipitación media anual, es posible observar que pese a que se incluyeron en el análisis variables de proximidad



Clave	Nombre de la estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	n	D(km)	$\bar{x}$ (mm)	S(-)	$\sigma_s(-)$	K(-)	$\sigma_v(-)$
25001	Acatitán. San Ignacio	24.08	-106.65	130.00	24	30.00	796.77	205.86	0.772	3.882	0.258
25003	Ahome. Ahome	25.92	-109.18	33.00	22	25.00	342.42	119.50	0.552	3.762	0.349
26002	Alamos. Alamos	27.03	-108.95	389.00	20	64.00	683.32	176.68	1.225	7.476	0.259
25007	Bamícori. El Fuerte	26.35	-108.52	152.00	25	76.00	714.08	171.69	0.469	3.337	0.240
25002	Agua caliente. Choix	26.82	-108.42	180.00	16	90.00	734.81	213.33	-0.429	8.992	0.290
10018	El Cantil. Papasquiario	24.93	-106.25	2100.00	32	133.00	1458.78	292.33	0.618	4.234	0.200
26017	Casanate. Álamos	26.57	-108.75	137.00	15	52.00	658.32	145.53	-0.487	4.222	0.221
8167	Chínipas. Chínipas	27.40	-108.53	480.00	18	121.00	979.93	297.23	0.154	3.443	0.303
25017	Choix pueblo. Choix	26.73	-108.33	270.00	13	95.00	814.96	236.65	1.121	7.951	0.290
25011	Concordia	23.27	-106.05	138.00	26	37.00	832.31	201.93	0.601	4.168	0.243
25080	Ruíz Cortines. Guasave	25.72	-108.73	35.00	19	36.00	390.01	130.59	1.955	8.067	0.335
25050	La Cruz. Eloba	23.92	-106.90	23.00	17	4.00	499.05	239.78	1.234	5.876	0.481
25015	Culiacán. Culiacán	24.82	-107.40	40.00	24	52.00	677.65	170.13	1.288	5.112	0.251
25021	Dimas. San Ignacio	23.73	-106.78	12.00	19	4.00	672.73	298.81	0.756	4.874	0.444
25023	El Fuerte. El Fuerte	26.43	-108.67	84.00	23	64.00	638.67	185.54	0.890	5.598	0.291
25038	Guasave. Guasave	25.57	-108.47	20.00	13	30.00	492.74	176.70	1.183	6.086	0.359
25058	Las Habitas. Rosario	23.03	-105.75	80.00	16	35.00	1159.96	224.29	0.907	5.015	0.193
10031	Huahuapan. San Dimas	24.53	-105.95	1150.00	18	122.00	781.94	180.76	0.674	3.650	0.231
25044	Huites. Choix	26.90	-108.37	268.00	26	103.00	828.39	230.66	1.194	5.199	0.278
25045	Ixpalino. San Ignacio	23.91	-106.62	80.00	25	33.00	774.77	184.25	0.751	3.042	0.238
10071	San Miguel de Lobos	25.17	-105.98	2410.00	22	167.00	875.19	208.43	0.799	4.467	0.238
25025	El Mahome. El Fuerte	26.52	-108.60	120.00	25	65.00	617.62	159.96	-0.127	3.443	0.259
25065	Mochicahui. El Fuerte	25.97	-108.93	22.00	19	47.00	298.57	81.01	-0.477	3.937	0.271
25116	Los Mochis. Ahome	25.80	-109.00	14.00	18	21.00	379.02	140.36	0.781	7.074	0.370
8124	San Ignacio. Batopilas	26.87	-107.88	355.00	19	144.00	636.86	144.92	0.702	3.275	0.228
25070	Pánuco. Sinaloa	23.42	-105.93	450.00	18	51.00	1402.99	342.56	-0.284	5.687	0.244
25068	Palo dulce. Choix	27.02	-108.47	237.00	24	105.00	960.99	244.98	0.771	3.366	0.255
25071	Pericos. Mocorito	25.08	-107.78	35.00	24	50.00	655.23	178.64	0.797	3.669	0.273
25030	El Playón. Sinaloa	25.22	-108.18	2.00	18	7.00	611.78	145.50	0.312	4.786	0.238
25031	El Quelite. Mazatlán	23.55	-106.47	60.00	25	13.00	709.17	155.96	0.691	5.236	0.220
25076	Quila. Culiacán	24.43	-107.23	45.00	15	27.00	557.05	150.99	2.262	9.079	0.271
25077	Rosa Morada. Moco rito	25.40	-107.83	300.00	14	55.00	750.89	177.35	1.317	7.982	0.236
25032	El Sabino(El Sabinito)	26.48	-108.73	123.00	17	56.00	555.50	185.77	0.110	3.242	0.334
10079	Sianori. Topia	25.27	-106.78	850.00	18	129.00	1131.53	258.87	0.943	5.250	0.229
25090	Sinaloa de Leyva. Sin.	25.82	-108.22	80.00	12	68.00	554.60	215.51	1.166	9.650	0.389
8138	Siquirichic. Guachoic	27.27	-107.22	2120.00	19	224.00	493.19	154.29	1.235	8.404	0.313
25086	San Miguel Zapotitlán	25.95	-109.03	38.00	19	35.00	436.58	129.69	1.405	8.548	0.297
25088	Santa Rosa. El Fuerte	25.92	-108.90	28.00	19	52.00	415.93	134.77	1.736	11.204	0.324
25093	Surutato. Badiraguato	25.80	-107.57	1400.00	23	110.00	1263.09	231.47	0.819	4.017	0.183
10082	Tamazula. Tamazula	24.97	-106.98	250.00	38	90.00	989.43	248.95	0.237	2.965	0.252
10026	El Tarahumar. Tepehuanes	25.63	-106.35	2560.00	20	188.00	895.82	219.94	0.925	4.770	0.245
25053	La Tina. El Fuerte	26.22	-108.60	180.00	23	68.00	636.27	210.32	0.952	3.525	0.331
25098	Topolobampo. Ahome	25.62	-109.05	34.00	14	1.00	310.47	137.26	0.895	10.005	0.442
10042	Las Truchas. San Dimas	24.47	-106.00	2700.00	24	116.00	1197.76	226.13	0.637	2.991	0.189
25054	La Vainilla. Sinaloa	26.05	-108.27	185.00	23	90.00	793.18	152.01	0.212	2.985	0.192
25033	El Varejonal. Badiraguato	25.10	-107.40	160.00	25	78.00	908.89	250.47	0.459	3.662	0.278

Donde n: Longitud de registro, D: distancia al océano.

Tabla 2. Características de las estaciones climatológicas de la Región Hidrológica 10.



espacial así como físicas, la correspondencia entre la variabilidad espacial de la precipitación y la altitud están considerablemente ligadas (Figura 4).

En la Tabla 4 se muestra el resumen de los valores regionales, donde el incremento del valor de la precipitación se presentó en la región donde las estaciones climatológicas se encontraban a una mayor distancia al océano (149.00 km) y a una mayor altitud (1911.00 msnm), mientras que en las zonas más cercanas a la costa (28.00 km) el valor de la precipitación fue menor, es decir, con valores de PMA de 1012.00 y 481.00 mm, respectivamente, mientras que el grupo 1 se situó a una altitud intermedia de los dos grupos anteriores (204.00 km) con una PMA de 797.00 mm.

#### 4. CONCLUSIONES

En el diseño de obras hidráulicas se requiere de información confiable y precisa, sin embargo, la escasez de estaciones de aforo es un reto común para el hidrólogo, una opción viable es la delimitación de regiones homogéneas, que permite agrupar las estaciones que cumplen con calidad, cantidad y representatividad de datos específicos.

En el presente estudio se delimitó a las zonas homogéneas dentro de la región hidrológica 10, denominada Sinaloa, para un conjunto de 46 estaciones climatológicas que cumplieron con el requisito de calidad de datos. Se obtuvieron tres regiones homogéneas, en las cuales al graficarlas sobre el espacio es factible visualizar la distribución espacial

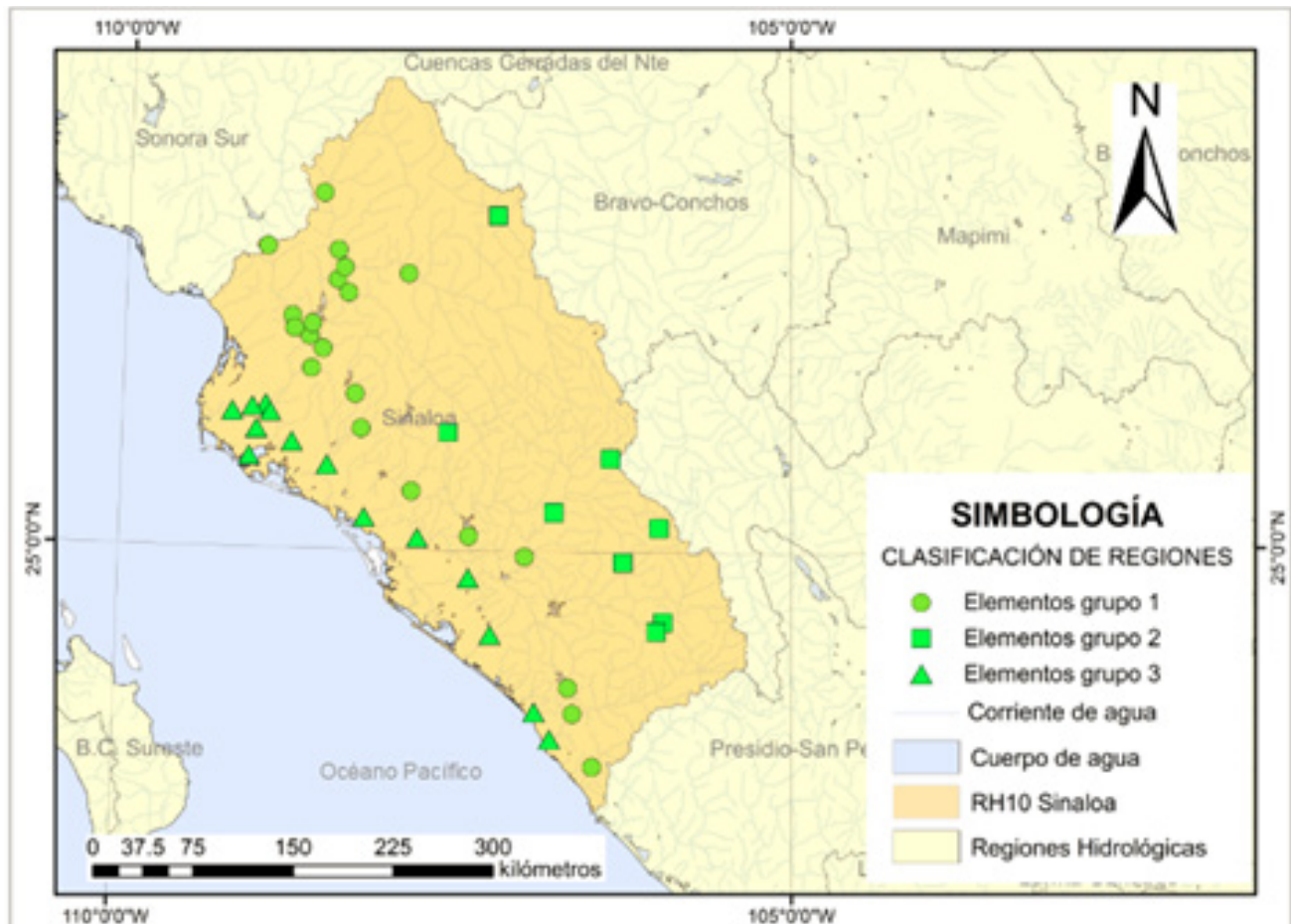


Figura 2. Agrupación de regiones homogéneas en la Región Hidrológica 10, Sinaloa

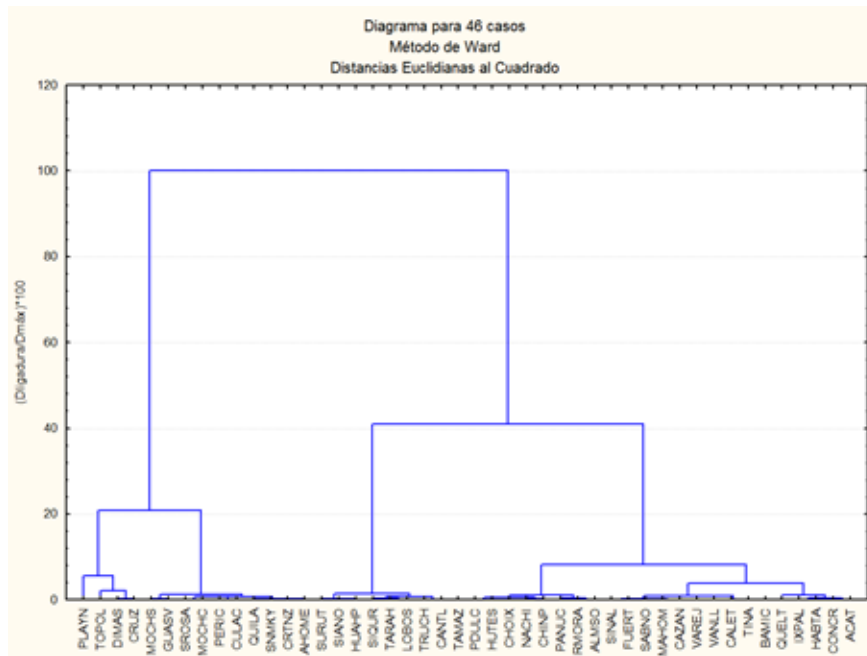


Figura 3. Agrupación jerárquica de las estaciones climatológicas mediante el método de Ward.

N	Región homogénea 1		Región homogénea 2	Región homogénea 3
1	MAHOM	ACAT	CANTL	AHOME
2	NACHI	ALMSO	HUAHP	CRTNZ
3	PANUC	BAMIC	LOBOS	CRUZ
4	PDULC	CALET	SIANO	CULAC
5	QUELT	CAZAN	SIQUR	DIMAS
6	RMORA	CHINP	SURUT	GUASV
7	SABNO	CHOIX	TARAH	MOCHC
8	SINAL	CONCR	TRUCH	MOCHS
9	TAMAZ	FUERT		PERIC
10	TINA	HABTA		PLAYN
11	VANLL	HUTES		QUILA
12	VAREJ	IXPAL		SNMKY
13				SROSA
14				TOPOL
N	24		8	14
CV	0.263		0.229	0.336
$\sigma_{cv}$	0.044		0.039	0.074
CC	0.169		0.169	0.220

Tabla 3. Resumen de las estaciones climatológicas

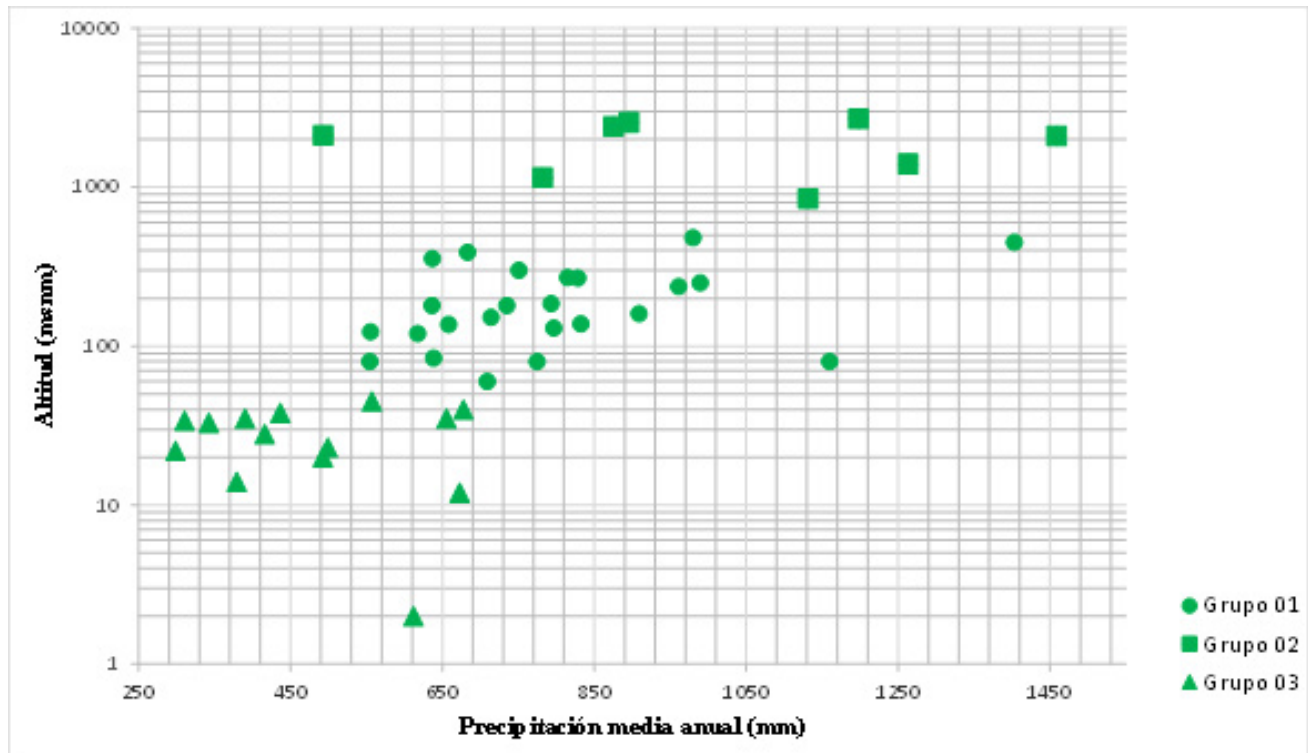


Figura 4. Gráfico de agrupación de regiones de altitud respecto a la precipitación media anual.

Región homogénea	PMA en la región (mm)	Distancia al océano en la región (km)	Altitud media en la región (msnm)
1	797.00	70.00	204.00
2	1012.00	149.00	1911.00
3	481.00	28.00	35.00

Tabla 4. Resumen de valores regionales.

de la precipitación media anual, empleando para ello la técnica de clasificación jerárquica ascendente con método de ligadura de Ward, el cual permite la aglomeración de las estaciones a través de un algoritmo de inercia por medio de una ponderación de variables, donde las variables empleadas se normalizaron para evitar efectos de agrupación con diferentes escalas de medición.

El resultado final, mostró tres regiones que fueron agrupadas por proximidad espacial y por similitud física debido a las características de las estaciones de aforo, así como del valor de la precipitación. La técnica empleada se verificó a través de un método de validación, el cual permitió identificar si las regiones cumplen con la homogeneidad a través de estadísticos descriptivos regionales.

La presente metodología muestra un resultado satisfactorio, un paso consecutivo permitiría la transferencia de información hidrológica de la variable de interés hacia un punto espacial donde no se cuente con registro de información histórica, por lo que la presente metodología se recomienda en estudios tanto de análisis de distribución espacial de precipitación y en estudios relacionados a la transferencia de información hidrológica.

## APÉNDICE

El índice métrico de Minkowsky  $r$  es de la siguiente forma (Jain y Dubes, 1988):

$$d(i, k) = \left[ \sum_{j=1}^d |x_{i,j} - x_{k,j}|^2 \right]^{1/r} \quad (\text{A.1})$$

donde  $x_{i,j}$  y  $x_{k,j}$  es la  $j$ -ésima característica de la  $i$ -ésima y  $k$ -ésima configuración y  $r \geq 1$ . Hay tres principales índices que comúnmente son empleados y se mencionan a continuación:

La distancia euclidiana, con un índice de

Minkowski de 2, es decir,  $r=2$  es de la siguiente forma:

$$d(i, k) = \left[ \sum_{j=1}^d |x_{i,j} - x_{k,j}|^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

Esta distancia tiene también la variante de la distancia Euclidiana al cuadrado:

$$(d(i, k))^2 = \left[ \sum_{j=1}^d |x_i - \bar{x}|^2 \right] \quad (\text{A.3})$$

## REFERENCIAS

Baeriswyl, P. A., y M. Rebetez. 1997. Regionalization of precipitation in Switzerland by means of principal component analysis. *Theor. Appl. Climatol.* 58:31–41.

Burn, D. H., Z. Zolt, y M. Kowalchuk. 1997. REGIONALIZATION OF CATCHMENTS FOR REGIONAL FLOOD FREQUENCY ANALYSIS. *J. Hydrol. Eng.* 2:76–82.

Campos-Aranda, D. F. 2014. Análisis Regional de Frecuencia de Crecientes en la región hidrológica no. 10 (Sinaloa), México. 2. Contraste de predicciones locales y regionales. *Agrociencia* 10:147–158.

Chow, V. Te, D. R. Maidment, y L. Mays. 1994. *Hidrología Aplicada*. Ed. McGraw-Hill. ISBN: 958-600-171-7

Gado, T. A., y V. Nguyen. 2016. Comparison of Homogenous Region Delineation Approaches for Regional Flood Frequency Analysis at Ungauged Sites. *J. Hydrol. Eng.* 21:1–10.

GREHYS. 1996. Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.* 186:63–84.

Hosking, J. R. M., y J. R. Wallis. 1997. *Regional Frequency Analysis: An approach based on L-moments*. Available from: <https://books.google.com.pe/>





books?hl=es&lr=&id=gurAnfB4nvUC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Regional+frequency+analysis+an+approach+based+on+l-moments&ots=7Re17uu4PZ&sig=cQlo-BXfu6O-1BS3wGAj\_pUvSJYI#v=onepage&q&f=false

IMTA, 1998. Extractor rápido de información climatológica (ERIC II), CD, Mexico.

Jain, A.K., y Dubes, R.C., 1988. Algorithms for Clustering Data. Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ.

Kahya, E., S. Kalaycı, y T. C. Piechota. 2008. Streamflow Regionalization: Case Study of Turkey. *J. Hydrol. Eng.* 13:205–214.

Laaha, G., y G. Blöschl. 2006. A comparison of low flow regionalization methods-catchment grouping. *J. Hydrol.* 323:193–214.

Lim, Y. H., M. Asce, y D. L. Voeller. 2009. Regional Flood Estimations in Red River Using L -Moment-Based Index-Flood and Bulletin 17B Procedures. *J. Hydrol. Eng.* 14:1002–1016.

Malekinezhad, H., H. P. Nachtnebel, y A. Klik. 2011. Comparing the index-flood and multiple-regression methods using L-moments.

*Phys. Chem. Earth* 36:54–60. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.013>

Mishra, B. K., K. Takara, y Y. Tachikawa. 2009.

Integrating the NRCS Runoff Curve Number in Delineation of Hydrologic Homogeneous Regions. *J. Hydrol. Eng.* 14:1091–1097.

Nathan, R. J., y T. A. McMahon. 1990. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *J. Hydrol.* 121:217–238.

Nathan, R. J., y T. A. McMahon. 1992. Estimating Low Flow Characteristics in Un-

gauged Catchments. *Water Resour. Manag.* 6:85–100.

Nobert, J., M. Mugo, y H. Gadain. 2014. Estimation of design floods in ungauged catchments using a regional index flood method. A case study of Lake Victoria Basin in Kenya. *Phys. Chem. Earth* 67–69:4–11.

Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2014.02.001>

Núñez, J., M. Hallack-Alegría, y M. Cadena. 2016. Resolving regional frequency analysis of precipitation at large and complex scales using a bottom-up approach: The Latin America and the Caribbean Drought Atlas. *J. Hydrol.* 538:515–538.

Ouarda, T. B. M. J., C. Girard, G. S. Cavadas, y B. Bobée. 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *J. Hydrol.* 254:157–173.

Ouarda, T. B. M. J., J. M. Cunderlik, A. St-Hilaire, M. Barbet, P. Bruneau, y B. Bobée. 2006. Data-based comparison of seasonality-based regional flood frequency methods. *J. Hydrol.* 330:329–339.

Ouarda, T. B. M. J., K. M. Bâ, C. Diaz-Delgado, A. Cârsteanu, K. Chokmani, H. Ginguas, E. Quentin, E. Trujillo, and B. Bobée. 2008.

Intercomparison of regional flood frequency estimation methods at ungauged sites for a Mexican case study. *J. Hydrol.* 348:40–58.

Rao, R., y V. V. Srinivas. 2006. Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. *J. Hydrol.* 318:37–56.

Saf, B. 2009. Regional Flood Frequency Analysis Using L Moments for the Buyuk and Kucuk Menderes River Basins of Turkey. *J. Hydrol. Eng.* 14:783–794.

Sanborn, S. C., y B. P. Bledsoe. 2006. Predicting streamflow regime metrics for ungauged streams in Colorado, Washing-

ton, and Oregon. *J. Hydrol.* 325:241–261.

Sarhadi, A., y R. Modarres. 2011. Flood seasonality-based regionalization methods: A data-based comparison. *Hydrol. Process.* 25:3613–3624.

Sine, A., y S. Ayalew. 2004. Identification and Delineation of Hydrological Homogeneous Regions-The case study of Blue Nile River Basin, In: *Proceedings, Lake Abaya Research Symposium.*

Soltani, S. M., y Reza. 2006. *Journal of Spatial Hydrology* *Journal of Spatial Hydrology.* *J. Spat. Hydrol.* 6:1–14. Available from: [http://www.spatialhydrology.com/journal/paper/2006/small\\_hydel/paper\\_josh.rar](http://www.spatialhydrology.com/journal/paper/2006/small_hydel/paper_josh.rar)

Ward, J. H. 1963. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *J. Am. Stat. Assoc.* 58:236. Available from: <http://www.jstor.org/stable/2282967?origin=crossref>

Wazneh, H., F. Chebana, y T. B. M. J. Ouarda. 2015. Delineation of homogeneous regions for regional frequency analysis using statistical depth function. *J. Hydrol.* 521:232–244. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.068>

Yu, P.-S., T.-C. Yang, y C.-W. Liu. 2002. A regional model of low flow for southern Taiwan. *Hydrol. Process.* 16:2017–2034. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.399>