

## Delimitación de regiones hidrológicas en Colombia

### Delimitation of Colombia hydrologic regions

Pedro León García Reinoso\*  
Javier Fernando Méndez Monroy\*\*  
María Fernanda Zarate Jiménez\*\*\*  
*Pontificia Universidad Javeriana (Colombia)*

\* Ingeniero civil de la Universidad del Quindío, magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hídricos de la Universidad de los Andes, candidato a doctor en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Miembro del Grupo de Investigación Riesgo en sistemas naturales y antrópicos. Pontificia Universidad Javeriana -Instituto Geofísico-, Bogotá, D. C., Colombia. [pedro-garcia@javeriana.edu.co](mailto:pedro-garcia@javeriana.edu.co)

\*\* Ingeniero agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, magíster en Ingeniería Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia. Asesor del proyecto "Evaluación del Potencial Hidroenergético de Colombia". Pontificia Universidad Javeriana -Instituto Geofísico-, Bogotá, D. C., Colombia. [jfmendezm@unal.edu.co](mailto:jfmendezm@unal.edu.co)

\*\*\* Estadística de la Universidad Nacional de Colombia, candidata a magister en Ciencias - Estadística de la Universidad Nacional de Colombia. Pontificia Universidad Javeriana -Instituto Geofísico-, Bogotá, D.C., Colombia. [mfzaratej@unal.edu.co](mailto:mfzaratej@unal.edu.co)

**Correspondencia:** Pedro León García Reinoso. Pontificia Universidad Javeriana. Carrera 7 n° 42-27, piso 7. Bogotá, D.C. Telefax: 57-1-3208320 (6545).

## Resumen

Una de las aplicaciones del análisis regional es la transferencia de información hidrológica de cuencas aforadas a las no aforadas. En algunos casos, la regionalización hidrológica es un enfoque válido para estimar valores de caudal en sitios en donde no existe información. Los mejores resultados se obtienen cuando las cuencas que conforman una región exhiben un comportamiento hidrológico similar. En consideración del estudio del Potencial Hidroenergético de Colombia, el objetivo de este trabajo fue identificar regiones hidrológicas para realizar el cálculo del caudal promedio anual. El territorio continental colombiano fue dividido en 9139 cuencas, las cuales se caracterizaron con veinte atributos hidrológicos, climáticos y morfométricos directamente relacionados con la predicción del caudal. El análisis estadístico univariado y la implementación de técnicas estadísticas multivariadas permitió identificar dieciséis regiones hidrológicas, en las que se observan cuencas agrupadas alrededor de atributos relacionados con la evaporación, cuencas aglutinadas con atributos asociados con la escorrentía y cuencas asociadas con atributos descriptores del relieve. Además de satisfacer los propósitos del proyecto, los resultados representan una base técnica para formular proyectos orientados a fortalecer las redes de recolección de datos y concebir futuras investigaciones para evaluar la disponibilidad de agua superficial a escala regional.

**Palabras clave:** análisis de clúster, análisis de componentes principales, análisis estadístico, hidrología, región hidrológica.

## Abstract

One application of regional analysis is the transfer of hydrological information from gauged to ungauged basins. In some cases, hydrological regionalization is a valid approach to estimate flow values in places where information is not available, the best results being obtained when the basins that form a hydrological region exhibit similar hydrologic behavior. In consideration of the study of the hydroelectric potential of Colombia, the aim of this study was to identify hydrologic regions for calculating their annual average flow. The Colombian continental territory was divided into 9139 basins, which were characterized with twenty hydrological, climatic and morphometric attributes directly related to flow prediction. Univariate statistical analysis and implementation of multivariate statistical techniques identified sixteen hydrologic regions, in which basins clustered around attributes such as evaporation, clustered basins, with attributes associated to runoff and watershed descriptors associated with relief attribute descriptors were observed. In addition to satisfy the aims of the project, the results represent a technical basis to formulate projects to strengthen data collection networks and to design future research to assess the availability of surface water at regional level.

**Keywords:** cluster analysis, hydrological region, hydrology, principal component analysis, statistical analysis.

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2015  
Fecha de aceptación: 25 de agosto de 2016

## INTRODUCCIÓN

La Asociación Mundial de Agua (GWP) reconoce en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico a las cuencas hidrográficas como la unidad territorial más apta para la planificación y gestión de los recursos hídricos [1]. Esta selección es considerada adecuada dado que en la cuenca hidrográfica se identifican las interrelaciones e interdependencias que existen entre el sistema físico, biótico y socioeconómico [2].

La planificación ordenada de la cuenca hidrográfica requiere de datos que permita modelar cada uno de los diferentes sistemas, pero en muchos casos los datos no están disponibles.

El enfoque de regiones hidrológicas ha sido aceptado para desarrollar modelos hidrológicos en condiciones de información escasa.

Una región hidrológica se define como un sistema abierto conformado por cuencas hidrográficas vecinas con un alto grado de similitud en su respuesta hidrológica [3]; en la delineación de regiones hidrológicas han sido identificadas cuencas con áreas de drenaje entre los 0.01 [4] y 5000 km<sup>2</sup> [5].

En una región hidrológica, los procesos hidrológicos relacionados con la superficie terrestre y la gestión del recurso hídrico están fuertemente influenciados por las características de la región [6]. Por ello, para estudiar en un contexto geográfico las variables asociadas con la disponibilidad de agua, la versión 2010 del Estudio Nacional del Agua presentó 5 áreas hidrográficas, 41 zonas hidrográficas y 309 subzonas hidrográficas [5].

La identificación de áreas, zonas y subzonas hidrográficas resulta adecuada para los propósitos enunciados arriba, pero puede implicar una limitación para el desarrollo de otros enfoques.

Esta investigación resulta de gran utilidad dado que el concepto de región hidrológica ha soportado la implementación de modelos hidrológicos [7], [8], el desarrollo de modelos hidrológicos integrados [9], [10], la extrapolación de datos [11], el diseño de redes de medición [12] y la estimación de caudales en sitios que carecen de información [13].

Con el propósito de identificar una línea base de discusión para la adecuada caracterización de regiones hidrológicas en áreas inferiores a la definida por la subzona hidrográfica, se presentan los resultados de la regionalización hidrológica realizada en el marco del estudio del Potencial Hidroenergético de Colombia, proyecto de investigación desarrollado con el apoyo de Colciencias, la Unidad de Planeación Minero Energética, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y la Pontificia Universidad Javeriana.

En el contexto de esta investigación los resultados son aplicables en el cálculo del caudal promedio anual bajo una metodología de análisis regional; enfoque que resulta válido siempre que la región que contenga las cuencas con registro y sin registro de caudal sean hidrológica y topográficamente homogéneas. De igual manera, las instituciones territoriales podrían emplear los resultados de esta investigación para elaborar proyectos orientados a fortalecer las redes de recolección de datos y la consolidación de evaluaciones regionales del agua.

## METODOLOGÍA

Una región hidrológica es un espacio geográfico conformado en función de sus características morfológicas e hidrológicas, en el que se considera la cuenca hidrográfica como la unidad básica para la gestión del recurso hídrico [3]. La región hidrológica es identificada con el propósito de agrupar y sistematizar la información, de modo que se pueda realizar análisis y diagnósticos, así como formular programas relacionados con la conservación y aprovechamiento del agua. Dado que una región hidrológica está integrada por una o varias cuencas hidrográficas, los límites de esta son en general distintos con relación a su división política [14].

Benson y Matalas [15] afirman que es posible la selección de un conjunto regional de parámetros que describan adecuadamente el comportamiento de la cuenca; de lo afirmado se han generado diversos enfoques para identificar adecuadamente dichos parámetros. Aquí se mencionan tres: el primero calcula estos parámetros a partir de las curvas de duración de caudal, con resultados aplicables en situaciones en las que el efecto regulador por el uso del agua o el control artificial del caudal no impacta significativamente la respuesta hidrológica de la cuenca. El segundo utiliza estadísticos de las series de caudal como: el caudal promedio mensual, los caudales máximos

y los coeficientes de variación, etc., que caracterizan adecuadamente el comportamiento estadístico; pero podrían no representar adecuadamente la naturaleza estocástica del proceso hidrológico. El tercero identifica grupos a través de las diferencias y similitudes que existen tanto en propiedades hidrológicas como topográficas.

La Unidad de Respuesta Hidrológica se representa por regiones hidrológicas desconectadas que muestran valores similares en propiedades de importancia hidrológica, como: el área de la cuenca, la elevación de la cuenca, la pendiente media de la cuenca, el uso del suelo, el tipo de suelo, entre otras.

Con la identificación de las Unidades de Respuesta Hidrológica se reconoce que algunas propiedades predominan sobre otras, por ejemplo: el *software* Soil and Water Assessment Tool (SWAT) utiliza criterios topográficos para la identificación de subcuencas, logrando mayor detalle al incorporar propiedades relacionadas con el uso del suelo y el tipo de suelo. Si bien en el caso del (SWAT) el orden de las propiedades puede explicarse por el modelo hidrológico que emplea, aquí es importante destacar la elección de propiedades hidrológicas y topográficas para la identificación de subcuencas homogéneas.

Al ser el SWAT una herramienta de uso extendido en el medio colombiano, se infiere la aceptación de las regiones hidrológicas como punto de partida para el desarrollo de modelos hidrológicos regionales. El análisis regional ha sido aplicado en Colombia para el cálculo de caudales máximos, medios y mínimos; siendo un enfoque válido siempre que la región que contenga las cuencas sea topográfica e hidrológicamente homogénea [15].

En Colombia, se recomienda utilizar el método de regionalización de parámetros porque respeta la variabilidad climática del país [16]. A razón de esto, el país tiene la oportunidad de emplear este enfoque para iniciar estudios orientados a la extrapolación de datos a la escala local y la estimación de caudales en sitios con información escasa; dos insumos básicos para la planificación adecuada del recurso hídrico.

Una de las tareas más retadoras del análisis regional es la delimitación de regiones hidrológicas. Existen dos enfoques [17]:

- Enfoque deductivo: la delimitación se realiza a partir de atributos que describen elementos ambientales estrechamente asociados con la respuesta hidrológica. La regionalización ambiental, la regionalización hidrológica y la clasificación ambiental son métodos asociados con este enfoque.
- Enfoque inductivo: la delimitación es definida utilizando atributos de la serie de tiempo de caudal que describen las múltiples facetas del régimen de flujo. El método asociado con este enfoque se conoce como “clasificación de caudales” e incluye patrones de flujo estacional, sequías, variabilidad anual, etc.

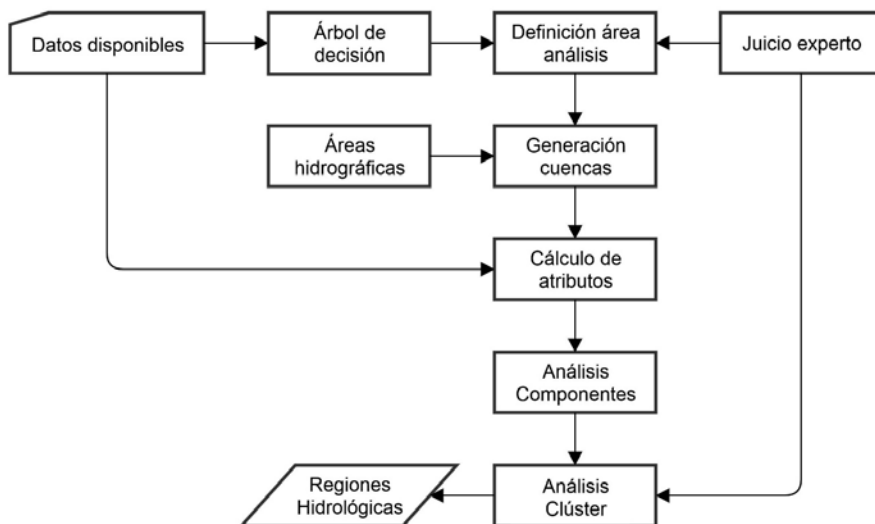
En esta investigación, la delimitación de regiones hidrológicas se hizo a través de la implementación de técnicas de clasificación estadísticas que permiten identificar diferencias y similitudes entre los atributos considerados para crear los grupos que contienen cuencas hidrográficas homogéneas.

La identificación de regiones hidrológicas requiere de información hidrológica y topográfica a escala nacional. La información topográfica permite delinear las cuencas hidrográficas que posteriormente se convierten en los individuos que serán objeto de clasificación. Las fuentes de información utilizadas son: El Instituto Geográfico Agustín Codazzi, que suministra el Modelo Digital de Terreno SRTM30, El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales que aporta la información disponible en la Base de datos del Estudio Nacional del Agua, La base de datos del Hidrosig 3.1 desarrollado por el Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín), y El Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial (SIG-OT).

La definición de las regiones hidrológicas también consideró la intervención de técnicos, académicos y consultores expertos, quienes participaron en dos talleres de socialización del proyecto, tres talleres de expertos y varias reuniones con instituciones relacionadas con el sector hidroeléctrico del país.

La información recopilada y procesada se analizó sin recurrir a una técnica valorativa sino de mejor posicionamiento: Método de comparación por pares. Este método permite detectar la importancia que tienen los diferentes

factores evaluados al seleccionar el factor que los expertos consideren de mayor importancia en cada comparación.



Fuente: los autores.

**Figura 1.** Metodología utilizada en la delimitación de regiones hidrológicas

La figura 1 presenta el resumen ilustrado de la metodología. En primer lugar se construye un árbol de decisión, el cual está conformado por cuatro nodos: Nodo 1: información hidrológica; Nodo 2: pendiente; Nodo 3: rendimiento hídrico, y Nodo 4: área.

Con la intención de ilustrar la estructura del árbol, en la figura 2 se presenta la rama correspondiente al rendimiento hídrico.

Para definir el tamaño de la cuenca hidrográfica, las probabilidades obtenidas del árbol de decisión son contrastadas con criterio de expertos, que involucran aspectos como el desnivel de la cuenca y la potencia generada por las pequeñas centrales hidroeléctricas.

El modelo digital del terreno SRTM-30 permite simular la red de drenaje oficial del país (escala 1:100 000) y obtener los atributos necesarios para describir las cuencas hidrográficas. En consideración de los atributos asig-

nados, las cuencas hidrográficas se clasifican y reagrupan empleando las siguientes técnicas:

- **Análisis de Componentes Principales:** este análisis permite encontrar nuevas variables denominadas  $Y_k$  que son combinaciones lineales de las variables originales  $X_j$ , en el estudio de un conjunto de (n) individuos. Esto implica encontrar constantes tales que [18]

$$Y_k = \sum_{(j=1)}^p L_{jk} X_j \text{ para } k = 1, 2, \dots, p \quad (1)$$

Donde  $L_{jk}$  es cada una de esas constantes. Debido a la sumatoria, en cada variable  $Y_k$  intervienen todos los valores de las variables originales  $X_j$ . El valor numérico de  $L_{jk}$  indica el grado de contribución que cada variable original aporta a la nueva variable definida por la transformación lineal.

Olivares [19] afirma que en los dos primeros componentes principales resultantes van a estar contenidos la mayor cantidad de criterios de clasificación debido a las variables originales, dado que representan el mayor porcentaje de la varianza total.

Los individuos se pueden clasificar utilizando el Scree Test [20]; procedimiento gráfico que sigue un criterio estándar que consiste en graficar los componentes principales contra su valor propio, ubicando el punto de extracción en el sector donde la curva se aplanan.

Este análisis se aplica en esta investigación con el propósito de eliminar las variables que presentan una alta correlación pero considerando una pérdida razonable de información, así se orienta la definición de un modelo hidrológico regional para el cálculo de caudal.

- **Análisis de clúster:** es un método estándar del análisis multivariado que puede reducir una gran cantidad de información en clústeres, en el que los miembros de cada clúster comparten características similares. Este análisis se considera una técnica exploratoria, dado que la clasificación no se fundamenta en un modelo estadístico y, por ello, se estima que es una técnica de aprendizaje no supervisado [21].



- En esta investigación, el análisis de clúster se hace mediante el método de k-medias, dado que permite asignar a priori el número de grupos por formar, lo cual facilita la participación de diversos actores en la definición del número de clústeres que define las Regiones Hidrológicas. Esta técnica permite encontrar una solución óptima mediante un proceso iterativo que se desarrolla alrededor de las características que definen la similitud o diferencia, de acuerdo con la siguiente expresión

$$C = \sum_{(j=1)}^k \sum_{n \in C_j} |X_n - M_j|^2 \quad (2)$$

Donde  $C$  es el clúster,  $k$  es el número de grupos,  $n$  el número de datos y  $M_j$  el centroide geométrico del  $C_j$ .

El proceso iterativo considera cuatro pasos: el primero es la selección aleatoria de las k-medias; el segundo es la conformación de  $C$  clústeres asociando cada observación a la media más cercana; en el tercero, el centroide de cada clúster se convierte en la nueva media y, finalmente, se repiten los pasos 2 y 3 hasta que no se observen cambios en la media.

Como se mencionó en los párrafos anteriores, la identificación de regiones se hace en espacios geográficos; por ello, la mejor forma de presentar los resultados es haciendo uso de un mapa<sup>1</sup> en el que la delimitación de las regiones hidrológicas se resume por áreas hidrográficas IDEAM, las cuales han sido codificadas como [5]: Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacífico. Dado que el área Caribe está conformada por tres zonas no colindantes, estas se identificarán más adelante como Caribe - Urabá, Caribe - Guajira y Caribe - Catatumbo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, a partir del modelo digital de terreno es posible construir el mapa de pendientes y cuencas hidrográficas para diferentes umbrales.

---

<sup>1</sup> Los datos y mapas presentados en este artículo fueron procesados usando "software" ArcGIS® by Esri. ArcGIS® es propiedad intelectual de Esri y aquí fue usado bajo licencia. Copyright © Esri. Todos los derechos reservados. Para más información, visitar [www.esri.com](http://www.esri.com)

Esta actividad permite que el árbol de decisión sea poblado con la siguiente información:

- Nodo 1: integrado por la densidad de las estaciones del IDEAM para el registro de caudal, considera dos ramas: alta y baja densidad.
- Nodo 2: definido por la pendiente del terreno en el territorio continental colombiano, genera tres ramas: pendiente moderada, abrupta y escarpada.
- Nodo 3: conformado por el rendimiento hídrico, permite producir tres ramas: menor a  $50 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ , entre  $50 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$  y  $100 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ , y mayor a  $100 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ .
- Nodo 4: constituido por cuatro ramas que representan tamaños de cuenca hidrográfica de 50, 100, 150 y  $200 \text{ km}^2$ .

Una vez realizado el cálculo de la probabilidad total es posible identificar la mayor representatividad para un tamaño de cuenca de  $50 \text{ km}^2$ . Sin embargo, la probabilidad total no fue considerada como criterio suficiente para definir un tamaño de área adecuada para el propósito final de esta investigación. Por ello, al emplear criterio de expertos, las probabilidades del árbol de decisión son analizadas conjuntamente con las definiciones del Ministerio de Minas y Energía para la identificación de pequeñas centrales hidroeléctricas, como la caída y potencia hidráulica [22].

En el área hidrográfica Magdalena-Cauca se presenta un caso particular, para el cual domina la pendiente del terreno, por lo que se eligen cuencas hidrográficas generadas con un umbral mínimo de  $50 \text{ km}^2$ . En las áreas hidrográficas Caribe, Pacífico, Orinoco y Amazonas, la disponibilidad de información y la caída hidráulica orientan la elección de cuencas hidrográficas generadas con un umbral superior a  $100 \text{ km}^2$ .

Para el tamaño de cuenca elegido se generaron 9139 cuencas hidrográficas, las cuales fueron descritas por los atributos que se relacionan en la tabla 1. Estos atributos son variables continuas que admiten el cálculo de un valor particular para cada cuenca; esto da paso a la delimitación de regiones hidrológicas, ya que la agrupación se hace alrededor de características hi-

drológicas, morfométricas y climáticas. Para cada área hidrográfica se realiza un análisis descriptivo univariado. Los métodos de análisis multivariado: Análisis de Componentes Principales y Análisis de Clúster, se utilizan como un conjunto de criterios para clasificar las cuencas en el interior de cada área hidrográfica.

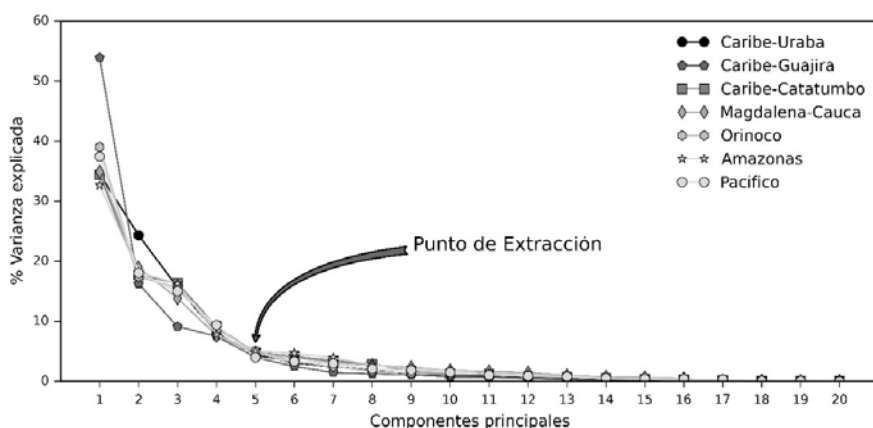
**Tabla 1.** Atributos empleados para la delimitación de regiones hidrológicas

ID	Variable	Und.	Fuente	Valor		
				Mínimo	Medio	Máximo
01	Área de la cuenca	km <sup>2</sup>	STRM 30 m	38,8	122,4	864,0
02	Desnivel de la cuenca	m	STRM 30 m	18,0	638,3	5388,0
03	Perímetro de la cuenca	km	STRM 30 m	40,7	97,4	406,6
04	Coefficiente de compacidad	-	STRM 30 m	1,3	2,5	6,1
05	Pendiente media de la cuenca	m/m	STRM 30 m	2,2	15,9	97,3
06	Elevación media de la cuenca	m	STRM 30 m	5,2	442,7	4144,4
07	Bosque	km <sup>2</sup>	SIG-OT	0,0	65,4	638,4
08	Pendiente media del cauce	m/m	STRM 30 m	0,000	0,009	1,720
09	Desnivel del cauce	m	STRM 30 m	0,0	113,0	2735,0
10	Longitud del cauce	m	STRM 30m	65,7	15410,1	126235,8
11	Densidad de drenaje	m/m <sup>2</sup>	STRM 30 m	0,000	1,032	6,575
12	Densidad de corrientes	m-2	STRM 30 m	0,000	0,450	4,272
13	Déficit agua en suelo - Penman	mm	HidroSIG 3.1	49,7	540,5	1841,6
14	Escorrentía basada en Penman	mm	HidroSIG 3.1	0,0	1666,3	9097,0
15	Evaporación real Penman	mm	HidroSIG 3.1	648,0	1362,3	2003,0
16	Evaporación potencial Turc	mm	HidroSIG 3.1	350,0	1658,3	2281,0
17	Precipitación media anual	mm	HidroSIG 3.1	407,0	2932,1	10000,0
18	Rendimiento (Balances 1999)	mm	HidroSIG 3.1	100,0	1697,9	9316,0
19	Temperatura aire en superficie	°C	HidroSIG 3.2	2,7	24,5	29,2
20	Rendimiento hídrico - ENA 2010	mm	IDEAM	0,2	62,6	313,1

**Fuente:** los autores.

El primer paso del Análisis de Componentes Principales es identificar el número de componentes. Las curvas ilustradas en la figura 2 (Scree Test) sugieren la retención de los primeros cinco componentes, los cuales explican más del 80 % de la varianza. Esta selección guarda coherencia con el criterio

expuesto por Cliff [23], que propone la retención de componentes que expliquen más del 70 % de la varianza. El siguiente paso del Análisis de Componentes Principales es la descripción de los componentes retenidos en términos de las variables originales. En la tabla 2 se presenta la matriz de correlación entre las variables originales y los componentes retenidos para el área hidrográfica Magdalena-Cauca, ya que es el territorio de mayor complejidad en cuanto a presión antrópica, intervención cultural y amenaza ambiental [24].



Fuente: los autores.

**Figura 2.** Proporción de la varianza explicada por cada componente principal en la delimitación de regiones hidrográficas

**Tabla 2.** Matriz de correlación entre variables originales y componentes retenidos para el área hidrográfica Magdalena - Cauca

ID	Variable	Componentes retenidos				
		1	2	3	4	5
01	Área de la cuenca	-0,07	0,17	0,81	0,01	-0,20
02	Desnivel de la cuenca	-0,86	-0,23	0,26	-0,05	-0,07
03	Perímetro de la cuenca	0,35	0,31	0,84	0,07	0,14
04	Coefficiente de compacidad	0,57	0,28	0,43	0,09	0,37
05	Pendiente media de la cuenca	-0,89	-0,11	0,04	-0,03	-0,12
06	Elevación media de la cuenca	-0,86	-0,23	0,26	-0,05	-0,07
07	Bosque	-0,31	0,39	0,21	-0,27	-0,64

ID	Variable	Componentes retenidos				
		1	2	3	4	5
08	Pendiente media del cauce	-0,70	-0,28	0,04	-0,25	0,10
09	Desnivel del cauce	-0,66	-0,17	0,46	-0,15	0,04
10	Longitud del cauce	0,14	0,24	0,85	0,12	0,08
11	Densidad de drenaje	-0,51	-0,11	0,00	0,80	-0,07
12	Densidad de corrientes	-0,50	-0,04	-0,05	0,80	-0,06
13	Déficit agua en suelo - Penman	0,69	-0,30	0,06	0,03	-0,30
14	Escorrentía basada en Penman	-0,43	0,83	-0,16	-0,03	0,14
15	Evaporación real Penman	0,67	-0,27	0,09	-0,04	0,07
16	Evaporación potencial Turc	0,79	0,37	-0,05	0,13	-0,24
17	Precipitación media anual	-0,26	0,88	-0,15	-0,02	-0,09
18	Rendimiento (Balances 1999)	-0,45	0,78	-0,15	-0,06	0,19
19	Temperatura aire en superficie	0,75	0,38	-0,06	0,16	-0,26
20	Rendimiento hídrico - ENA 2010	-0,39	0,78	-0,16	0,02	0,05

Fuente: los autores.

El primer componente explica el 34.91 % de la varianza, en el cual las variables que más contribuyen en forma positiva al componente citado son la evaporación potencial de Turc (79 %), la temperatura del aire en superficie (75 %) y el déficit de agua en el suelo (69 %). Por el contrario, la pendiente media de la cuenca (89 %), la elevación media de la cuenca (86 %) y el desnivel de la cuenca (86 %) son las variables que más contribuyen en forma negativa. Se colige que el primer componente principal es un eje que evalúa variables estrechamente asociadas con el fenómeno de evapotranspiración.

El segundo componente aporta el 18.92 % de la varianza total explicada. De acuerdo con los valores de correlación, solo hay contribución significativa en forma positiva de las variables precipitación media (88 %), escorrentía basada en Penman (83 %) y rendimiento de balances 1999 (78 %). En conclusión, con el segundo componente principal es posible identificar aspectos asociados con la aceptada relación hidrológica que existe entre Precipitación y Escorrentía. De esta forma, los dos primeros componentes principales están asociados directamente al balance hídrico de largo plazo y explicarían el 53.83 % de la varianza total. El tercer componente contribuye con el 13.84 % de la varianza total explicada, es un eje asociado; con

características morfológicas de la cuenca que describen su capacidad para concentrar caudales, lo cual incluye variables como la longitud del cauce (85 %), el perímetro de la cuenca (84 %) y el área de la cuenca (81 %). El cuarto componente aporta el 7.65 % de la varianza explicada; es un eje que mide la magnitud de la red de drenaje, ya que dentro de los valores de correlación solo hay una contribución positiva significativa de las variables densidad de drenaje (80 %) y densidad de corrientes (80 %). Finalmente, el quinto componente explica el 4.71 % de la varianza y está asociado en forma negativa con el área de bosque (64 %).

Para la delimitación de regiones hidrológicas que faciliten la implementación de un modelo hidrológico que permita calcular el caudal en zonas no aforadas se conformaron grupos de 2, 3 y 4 clústeres. La selección del número de clúster óptimo por área hidrográfica se realiza mediante la consulta a expertos de la Unidad de Planeación Minero Energética, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y la Pontificia Universidad Javeriana, que consideran la información resumida en salidas como: el plano factorial, la caracterización de variables, el histograma de índices de nivel, la distribución espacial de estaciones para el registro de caudal y el análisis de los mapas con la distribución espacial de las variables.

En la tabla 3 se presenta la información generada en la consulta a expertos que complementa la descripción técnica del Análisis de Clúster así los resultados obtenidos por cada área hidrográfica permite agrupar las 9139 cuencas hidrográficas en 16 regiones hidrológicas, como se muestra en el mapa 1.

En el área hidrográfica Caribe, el subsector Caribe - Urabá se dividió en tres clústeres. El primer clúster agrupa variables como el déficit de agua en el suelo, la evaporación potencial y la temperatura del aire en la superficie. El segundo reúne variables hidrológicas relacionadas con la escorrentía, el rendimiento y la precipitación. El tercero agrupa variables asociadas con la topografía de la cuenca, como la elevación media y la pendiente media.

Desde el punto de vista hidrográfico, el subsector queda representado por la cuenca de los ríos Atrato y Sinú y áreas de escurrimiento directo que desembocan en el océano Atlántico.

**Tabla 3.** Clústeres seleccionados por área hidrográfica

Área Hidrográfica	Clúster	Criterio de selección
<b>Caribe</b>		
Caribe - Urabá	3	Divide la zona montañosa de la zona de pendiente baja, también discrimina entre cuencas que drenan al río Atrato y cuencas con descarga al río Sinú.
Caribe - Guajira	2	Discrimina entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la zona seca de La Guajira. El número de clústeres está limitado por la disponibilidad de información de caudal.
Caribe-Catatumbo	2	Separa la zona de alta montaña de la zona de baja montaña, además resalta las marcadas diferencias que existen entre precipitación y evaporación.
<b>Magdalena-Cauca</b>		
	3	Describe adecuadamente las características de la cuenca alta, media y baja. Suficientes estaciones de caudal para soportar la selección realizada.
<b>Orinoco</b>		
	2	Divide adecuadamente el piedemonte llanero de la altillanura. La disponibilidad de información de caudal limita la consideración de clústeres adicionales.
<b>Amazonas</b>		
	2	Resalta la diferencia que existe entre cuencas de alta y baja pendiente. La cantidad de estaciones de caudal impide considerar clústeres adicionales.
<b>Pacífico</b>		
	2	Separa las cuencas localizadas en elevaciones altas de aquellas ubicadas en zonas bajas. La información de caudal no permite considerar nuevas clases.

**Fuente:** los autores.

Para el subsector Caribe - Guajira se definieron dos clústeres: mientras que el primero agrupa variables asociadas con la evaporación, el segundo reúne variables relacionadas con la escorrentía, separando, de esta forma, la Sierra Nevada de Santa Marta del desierto de La Guajira.

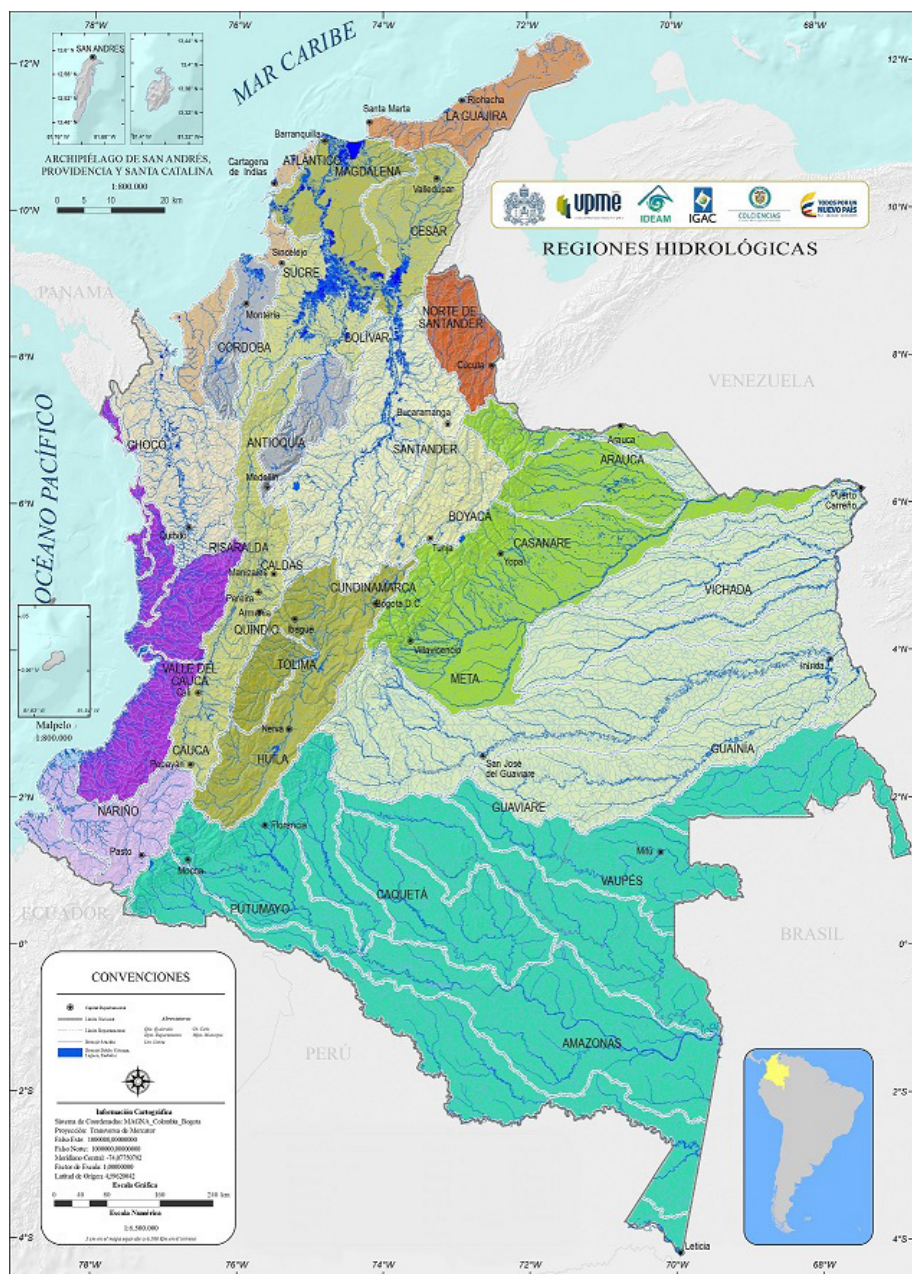
El subsector Caribe - Catatumbo agrupa en el primer clúster variables morfológicas y en el segundo reúne variables climáticas.

En el área hidrográfica Magdalena - Cauca se identificaron tres clústeres. La forma en que estos se diferencian guarda coherencia con lo descrito en el análisis de componentes principales: el primer clúster agrupa variables relacionadas con la evaporación, fenómeno dominante en el Bajo Cauca, el río San Jorge, el Bajo Magdalena y el río Cesar; el segundo aglutina variables asociadas con la escorrentía y contiene el río Nechí, el río Sogamoso y el Medio Magdalena; el tercero reúne variables descriptoras del relieve que son características propias de la cuenca alta en donde se localiza el río Cauca, el Alto Magdalena, el río La Vieja, el río Saldaña, el río Bogotá y el río Chicamocha.

Las áreas hidrográficas Orinoco, Amazonas y Pacífico se caracterizan por la baja densidad de estaciones para el registro de caudal; situación que impide la generación de múltiples grupos, dado que no existirían suficientes estaciones para validar el modelo hidrológico regional. Al analizar la salida para dos clústeres se identifica con claridad la distinción entre zonas de alta pendiente y baja pendiente. Tres clústeres aportan una subdivisión del relieve en alta, media y baja pendiente. En consideración de estos resultados, la clasificación obedeció principalmente a diferencias en la topografía de las cuencas, las cuales condicionan el valor de las variables climáticas. Finalmente, estas áreas se dividen en dos clústeres, el primero agrupa variables climáticas y el segundo reúne variables morfométricas; así es posible disponer de un número adecuado de estaciones de caudal para proponer un modelo hidrológico regional.

La delimitación mostrada en el mapa de la página siguiente presenta una perspectiva interesante como punto de partida para la extrapolación de información a cuencas hidrográficas que carecen de registros, con especial aplicación en el cálculo de caudales, desarrollo de modelos ambientales a escala regional y descripción de las evaluaciones regionales de agua. La diferencia entre los 16 grupos no se explica exclusivamente por parámetros hidroclimatológicos como la evapotranspiración, la precipitación y la escorrentía. También resultan importantes parámetros topográficos como la pendiente, el desnivel o la elevación de la cuenca, aunque estos tienden a dominar la división de las áreas hidrográficas Orinoco, Amazonas y Pacífico.





Regiones hidrológicas de Colombia

## CONCLUSIONES

En el territorio continental colombiano se generaron cuencas hidrográficas con un umbral entre 50 y 100 km<sup>2</sup>, rango que variaba en función de la información disponible y las características morfométricas de las cinco áreas hidrográficas definidas por el IDEAM.

Haciendo uso del Modelo Digital de Terreno de 30 x 30 m, se generaron 9139 cuencas hidrográficas en el interior del territorio continental colombiano. En primer lugar se realizó la normalización de las variables y posteriormente un análisis de clúster, que permitió identificar 16 regiones hidrológicas en el territorio continental colombiano.

La clasificación que se realizó en el análisis de clúster obedeció a las necesidades planteadas en el proyecto “Evaluación del Potencial Hidroenergético de Colombia”, en el que se pretende maximizar el uso de la información hidroclimatológica disponible en el IDEAM. Sin embargo, los resultados mostrados en el mapa de la página anterior podrían servir de insumo para diseñar la captura de información hidroclimatológica, de modo que se satisfaga las necesidades de planificación que se derivan de escalas de análisis más refinadas, lo cual genera un insumo de interés para la planificación local.

**Agradecimientos:** Este trabajo fue realizado con el apoyo técnico y logístico del Instituto Geofísico de la Pontificia Universidad Javeriana y el Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua, en el marco del proyecto “Evaluación del Potencial Hidroenergético de Colombia”, que fue financiado por la Convocatoria 558 de Colciencias. El grupo de trabajo de la Pontificia Universidad Javeriana agradece la colaboración de la Unidad de Planeación Minero Energética, la contribución del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y la cooperación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

## REFERENCIAS

- [1] Asociación Mundial para el Agua (GWP), “Principios de gestión integrada de los recursos hídricos. Bases para el desarrollo de planes nacionales”, Argentina: GWP, 2008.
- [2] A. Dourojeanni, A. Jouravlev y G. Chávez, *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*. Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2002.

- [3] International Association of Hydrological Sciences, *FRIEND: flow regimes from international experimental and network data*. USA: IAHS Press, 1994. Doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199606)21:6<585::AID-ESP553>3.0.CO;2-1
- [4] A.Y., Alfian, R., Maimun, and S. Bachtiar, "Hydrological Response Unit Analysis Using AVSWAT 2000 for Keuliling Reservoir Watershed, Aceh Province, Indonesia", *Aceh International Journal of Science and Technology*, vol. 4, n° 1, pp. 32-40, 2015. Doi: 10.13170/aijst.4.1.2317.
- [5] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, *Estudio Nacional del Agua 2010*. Colombia: IDEAM, 2010.
- [6] A. Kondoh, A.B. Harto, R. Eleonora, and T. Kojiri, "Hydrological regions in monsoon Asia", *Hydrological Processes*, 18, pp. 3147-3158, 2004. Doi: 10.1002/hyp.5754.
- [7] S. M. Ghoraba, "Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, n° 3, pp. 583-594, 2015. Doi: 10.1016/j.aej.2015.05.018.
- [8] L. Fang, C. Liu, G. Qin, B. Zhang, and T. Liu, "Application of the PRMS model in the Zhenjiangguan watershed in the Upper Minjiang River basin", *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources*, IAHS Publication, 368, pp. 209-214, 2015. Doi: 10.5194/piahs-368-209-2015.
- [9] J. S. Lessels, D. Tetzlaff, S. K. Carey, P. Smith, and C. Soulsby, "A coupled hydrology-biogeochemistry model to simulate dissolved organic carbon exports from a permafrost-influenced catchment", *Hydrological Processes*, 29, pp. 5383-5396, 2015. Doi: 10.1002/hyp.10566.
- [10] U. Bende, "Regional hydrochemical modelling by delineation of chemical hydrological response units (CHRUs) within a GIS: An approach of observing man-made impacts in the Broel River catchment (Germany)", *Mathematics and Computers in Simulation*, 43, pp. 305-312, 1997. Doi: 10.1016/S0378-4754(97)00014-1.
- [11] H. Lee and K. Kang, "Interpolation of Missing Precipitation Data Using Kernel Estimations for Hydrologic Modeling", *Advances in Meteorology*, pp. 1-12, 2015. Doi: 10.1155/2015/935868
- [12] U. Huber, H. Bugmann, and M. Reasoner, *Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge*. The Netherlands: Springer Science & Business Media, 2006.
- [13] J. Kult, L. Fry, A. Gronewoldy, and W. Choi, "Regionalization of hydrologic response in the Great Lakes basin: Considerations of temporal scales of analysis", *Journal of Hydrology*, 519, pp. 2224-2237, 2014.

- [14] Comisión Nacional del Agua, *Estadísticas del Agua en México 2006*. México: CONAGUA, 2006.
- [15] M. A. Benson and N. C. Matalas, "Synthetic Hydrology Based on Regional Statistical Parameters", *Water Resources Research*, vol. 3, n° 4, pp. 931-935, 1967. Doi: 10.1029/wr003i004p00931
- [16] O. Mesa, J. I. Vélez, J. D. Giraldo, and D. Quevedo, "Regionalización de características medias de la cuenca con aplicación en la estimación de caudales máximos", *Meteorología Colombiana*, 7, pp. 141-147, 2003.
- [17] J. D. Olden, M.J. Kennard, and B. J. Pusey, "A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology", *Ecohydrology*, 5, pp. 503-518, 2012. Doi: 10.1002/eco.251
- [18] L. Pla, *Análisis multivariado: método de componentes principales*. Washington: Departamento de Asuntos Científicos y Tecnológicos - Organización de Estados Americanos, 1986.
- [19] B. Olivares, "Aplicación del Análisis de Componentes Principales (ACP) en el diagnóstico socioambiental. Caso: sector Campo Alegre, municipio Simón Rodríguez de Anzoátegui", *Multiciencias*, vol. 14, n° 4, pp. 364-374, 2014.
- [20] R. B. Cattell, "The Scree Test For The Number Of Factors", *Multivariate Behavioral Research*, 1, pp. 245-276, 1966. Doi: 10.1207/s15327906mbr0102\_10
- [21] L. M. Castro, Y. Carvajal y A. J. Ávila, "Análisis clúster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos", *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 11, pp. 11-20, 2012.
- [22] Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas. *Guía de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Colombia: INEA, Ministerio de Minas y Energía, 1997.
- [23] N. Cliff, *Analyzing multivariate data*. USA: Harcourt, Brace, Jovanovich, 1987.
- [24] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena, *Estudio ambiental de la Cuenca Magdalena - Cauca y elementos para su ordenamiento territorial*. Colombia: IDEAM, Cormagdalena, 2001.