

**Análisis de variabilidad espacial y temporal de los caudales del río Cauca - Colombia**



**UNIVERSIDAD  
DE LA COSTA**  
1970

VIGILADA MINEUCACIÓN

Presentado por:

**Aldair Abad Peláez Baldovino**

**Samantha del Mar Barros Núñez**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA**  
**Programa Ingeniería Ambiental**  
**Facultad de ingeniería civil y ambiental**  
**Barranquilla**  
**2020**

**Análisis de variabilidad espacial y temporal de los caudales del río cauca - Colombia**

Aldair Abad Peláez Baldovino  
Samantha del Mar Barros Núñez

Proyecto presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Ambiental

Ingenieros a cargo  
Liliana Patricia Lozano Ayarza  
Guillermo J. Acuña Robles

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA**  
**Programa Ingeniería Ambiental**  
**Facultad de ingeniería civil y ambiental**  
**Barranquilla**  
**2020**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

### Resumen

Estudiar las variaciones espaciales y temporales de los caudales en los ríos colombianos es un paso importante para garantizar la disponibilidad hídrica y realizar los planes adecuados para prevenir los posibles impactos ambientales o socioeconómicos que dichas variaciones puedan generar. Esta investigación pretende analizar las tendencias existentes en la serie de caudales máximos y mínimos anuales del río Cauca. Para esta investigación se seleccionaron ocho (8) estaciones del tramo principal del río seleccionadas de acuerdo con su ubicación y la ventana temporal de datos disponibles en las mismas (1970 – 2018). Los métodos utilizados para hallar las tendencias fueron las pruebas no paramétricas Mann-Kendall y Sen's Slope, a partir de las cuales se detectaron tendencias significativas (con un nivel de confianza del 95%) en la serie de máximos anuales de 6 estaciones y en la serie de mínimos anuales de 2 de ellas. Las estaciones Las Varas y Tres Cruces presentaron tendencias crecientes significativas para la serie de máximos y la serie de mínimos, lo cual sugiere un aumento en la variabilidad de los datos anuales. La tendencia en detectada en zona alta de la cuenca fue de carácter decreciente ( $-0.57$  a  $-2.17$  m<sup>3</sup>/año], mientras que las tendencias detectadas en la cuenca baja fueron de carácter creciente ( $0.49$  a  $8.93$  m<sup>3</sup>/año). Las tendencias podrían estar relacionadas con las intervenciones antrópicas realizadas a la cuenca y con las variaciones de fenómenos macro climáticos como el ENSO y la PDO.

**Palabras Clave:** Río Cauca, Caudales, Tendencias, Estacionaria, Mann Kendall, Sen Slope

### **Abstract**

Studying the spatial and temporal variations of flow rates in Colombian rivers is an important step to guarantee water availability and to carry out adequate plans to prevent possible environmental or socioeconomic impacts that such variations may generate. This research aims to analyze the trends in the series of annual maximum and minimum flows of the Cauca River. Eight (8) stations of the main section of the river selected according to their location and the time window of data available in them (1970 - 2018) were selected for this investigation. The methods used to find the trends were the non-parametric Mann-Kendall and Sen's Slope tests, from which significant trends (with a confidence level of 95%) were detected in the series of annual maximums of 6 stations and in the series of annual minimums of 2 of them. The stations Las Varas and Tres Cruces presented significant increasing trends for the series of maximums and the series of minimums, which suggests an increase in the variability of the annual data. The trend detected in the upper part of the basin was decreasing (-0.57 to -2.17 m<sup>3</sup> / year), while the trends detected in the lower basin were increasing (0.49 to 8.93 m<sup>3</sup> / year). be related to the anthropic interventions carried out in the basin and to the variations of macro climatic phenomena such as the ENSO and the PDO.

**KeyWords:** Cauca River, Flows, Trends, Stationary, Mann Kendall, Sen Slope

**Contenido**

Lista de figuras .....	8
Introducción .....	10
1.Descripción general del problema.....	11
2.Justificación.....	12
3. Objetivos .....	12
3.1 Objetivo general .....	12
3.2 Objetivos específicos.....	13
4.Marco Teórico .....	13
4.1 Problemática general de las cuencas Hidrográficas .....	13
4.2 Variabilidad climática y el recurso hídrico en Colombia.....	14
4.3 Prueba mann-kendall y sen´s slope. ....	15
Estado del arte .....	17
5. Metodología .....	22
5.1Area de estudio.....	22
5.2 Recopilación de información .....	24
5.3 Validación de los datos .....	24
5.4 Identificación de tendencias y magnitud de tendencias .....	25
5.4.1 Identificación de las estaciones con tendencia (Prueba Mann-Kendall).....	25
5.4.2 Identificación de la magnitud de la tendencia (Prueba Sen´s Slope) .....	25
5.5 Análisis de la variación espacial de las tendencias .....	26
5.6 Identificación de posibles causas o incidencias en las variaciones de las series de caudales máximos y mínimos anuales .....	26
6. Resultados .....	27
6.1 Validación de datos .....	27
6.2 Identificación de tendencias .....	27

6.3 Identificación de la magnitud de las tendencias.....	29
6.3.1 Prueba Sen's Slope para las series de caudales mínimos anuales.....	30
6.3.2 Prueba Sen's Slope para las series de caudales Máximos anuales.....	31
6.4 Variación espacial de las tendencias .....	35
6.4.1 Variación Espacial en las series de valores mínimos anuales .....	35
6.4.1 Variación Espacial en las series de caudales máximos anuales .....	37
7.Conclusión.....	42
8. Referencias .....	44

## Lista de tabla y figura

### Tablas

Tabla 1 estaciones, tipos de serie, datos faltantes, ecuación de la recta y grado de confianza de la ecuación.....	27
Tabla 2. Resultados de la prueba mann-kendall.....	28
Tabla 3. Resultados de la prueba no paramétrica senslope .....	29

### Figuras

Figura 1. Ubicación espacial de las estaciones en el recorrido del río cauca.....	22
Figura 2. Variación de niveles del río cauca. ....	23
Figura 3. Prueba de sen slope de la serie de caudales mínimos para la estación las varas. ....	31
Figura 4. Prueba de sen slope de la serie de caudales mínimos para la tres cruces. ....	31
Figura 5. Prueba sen slope de la serie de caudales máximos para la estación margento .....	32
Figura 6. Prueba sen slope de la serie de caudales máximos para la estación las varas. ....	33
Figura 7. Prueba sen slope de la serie de caudales máximos para la estación tres cruces. ....	33
Figura 8. Prueba sen slope de la serie de caudales máximos para la estación puente aragón.....	34
Figura 9. Prueba sen slope de la serie de caudales máximos para la estación julumito.....	34
Figura 10. Prueba sen slope de la serie de caudales máximos para la estación la virginia. ....	35
Figura 11. Variación espacial de las estaciones en el recorrido del río cauca y su tipo de tendencia para las series de datos mínimos anuales. ....	36
Figura 12. Serie de caudales mínimos del río cauca en el periodo comprendido desde el año 1970 hasta 2018.....	37
Figura 13. Variación espacial de las estaciones en el recorrido del río cauca y su tipo de tendencia para las series de datos máximos anuales.....	38
Figura 14. Serie de caudales máximos del río cauca en el periodo comprendido desde el año 1970 hasta 2018.....	39



Figura 15.flujograma del río cauca. Fuente: ideam. (instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales). Flujograma cuenca río cauca. Subdirección de hidrología, 2015 ..... 40

## Introducción

El Cauca es el segundo río más importante de Colombia después del Magdalena, del cual es su principal afluente. Se mueve entre las cordilleras Central y Occidental a lo largo de 1.350 km, abarcando 7 departamentos desde su nacimiento a 3.900 metros sobre el nivel del mar (msnm) en el páramo de Soltará, en el Valle del Cauca, hasta llegar al brazo de Loba cerca del municipio de Pinillos, en el departamento de Bolívar (López, 2007, p.24).

Múltiples investigaciones a nivel nacional han reconocido los impactos del cambio climático sobre los valores medios y extremos de las variables hidroclimáticas en los ríos colombianos, identificaron tendencias en comportamiento en las series de tiempo de los caudales en ríos colombianos y tendencias de comportamiento en las series de tiempo de transporte de sedimentos del río Magdalena, los autores del presente documento consideran como una inferencia estadística válida el asumir que el río Cauca como afluente del río Magdalena tiene amplias posibilidades de presentar tendencias en el comportamiento de su caudal.

En esta investigación se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas Mann-Kendall y Pendiente de Sen sobre los datos del comportamiento del caudal del río Cauca en aras de analizar su variabilidad espacial en el periodo que va de 1970 a 2018. La prueba de Mann-Kendall evalúa si una tendencia aumenta o disminuye con el tiempo (Silva, 2017, p. 46), mientras que la pendiente de Sen es la mediana de todos los valores de pendiente por pares de un conjunto de datos observados.

Se pretende que los resultados de esta investigación contribuyan al fortalecimiento del acervo nacional sobre el comportamiento de los ríos aplicando técnicas estadísticas para su análisis, lo cual puede derivar en estudios posteriores y base científica sólida para la definición de políticas de uso y conservación del recurso hídrico.

## 1. Descripción general del problema

Generalmente, la disponibilidad y el acceso a fuentes hídricas a lo largo del tiempo han tenido gran importancia. Ya que el agua es sumamente necesaria para todas las actividades de una comunidad ya sea para el consumo humano, actividades agropecuarias, generación de energía, minería, transporte, recreación y saneamiento básico, sin contar las necesidades propias del ciclo hidrológico. La ubicación geográfica de Colombia hace que su territorio tenga una gran riqueza hidrológica, ya que la presencia de las tres cordilleras ha generado que las riveras de sus ríos y redes hidrológicas sean lugares para el asentamiento de comunidades.

El río Cauca es uno de los ríos más importantes del territorio colombiano, el cual basa su sostén en un gran número de actividades, bienes y servicios. La importancia de este cauce se destaca cuando se tiene en cuenta que en su recorrido por los departamentos del Cauca, Valle, Risaralda, Caldas, Antioquia, Sucre y Bolívar se localizan actividades productivas de gran importancia para la economía regional y nacional (Pérez-Valbuena, 2015, p. 28). Existen múltiples municipios que basan su economía en la disponibilidad del recurso hídrico, por tal razón es importante estudiar cuales son las variaciones y tendencias dentro de su cuenca.

Diferentes estudios han relacionado la variabilidad hidrológica con fenómenos macro climáticos y con factores antrópicos como la construcción de estructuras hidráulicas para la retención y regulación (IDEAM, 2015, p. 157). Sin embargo, al entender la cuenca como un sistema dinámico sensible a las intervenciones en el cauce y la cobertura de la cuenca, es necesario un estudio monitoreo permanente de su comportamiento. La detección de variaciones espaciotemporales en la serie de caudales del río podría tener implicaciones importantes en las actividades de gestión de riesgos por erosión e inundación, planes de adaptación a al cambio climático y en la planificación de las actividades que implican extracción de caudal del río.

En función a todo lo anterior, *¿Esta el comportamiento de los caudales del río Cauca influenciado por algún tipo de tendencia? ¿Existe alguna relación espacial y temporal entre las estaciones?*

## **2. Justificación**

Para lograr una adecuada gestión integral del recurso hídrico, es necesario realizar estudios que permitan analizar el comportamiento de los cuerpos de aguas, esto con el fin de pronosticar su conducta y considerarla dentro de futuros proyectos de planificación y aprovechamiento. Esta investigación se enmarca en este tipo de proyectos, ya que pretende analizar la variabilidad espaciotemporal de los caudales del río Cauca, el cual es uno de los ríos más importantes de Colombia por debido a que de su cuenca proviene el 13,5% de la oferta hídrica nacional y se encuentran emplazado cerca de 20% de la población colombiana (Pérez-Valbuena, 2015, p. 33).

Además, las riberas del río también sustentan una gran carga demográfica, por tanto, las variaciones significativas del río tales como inundaciones o sequías impactan directamente a los habitantes siendo el estado del río un indicador de la calidad de vida de los rivereños. En ese orden de ideas, estudiar las variaciones del caudal permitirá un desarrollo más preciso de los ejercicios de gestión de riesgos y la elaboración de planes de aprovechamiento de la cuenca y el cauce.

## **3. Objetivos**

### **3.1. Objetivo general.**

Analizar la variabilidad espacio y temporal de los caudales del río Cauca mediante herramientas estadísticas con el fin de determinar su variabilidad e identificar las posibles causas de la misma.

### 3.2. Objetivos específicos

- Identificar tendencias en los caudales máximos y mínimos del Río Cauca registrados por las estaciones hidrológicas del IDEAM durante el periodo 1970 - 2018.
- Estimar tendencias en las series de los caudales máximos y mínimos del Río Cauca registrados por las estaciones hidrológicas del IDEAM durante el periodo 1970 - 2018.
- Analizar la variación espacial de las tendencias de los caudales máximos y mínimos del Río Cauca registrados por las estaciones hidrológicas del IDEAM durante el periodo 1970 - 2018.
- Identificar posibles causas o incidencias en las variaciones espaciales encontradas en las series de registros de caudales máximos y mínimos del Río Cauca obtenidos por las estaciones hidrológicas del IDEAM durante el periodo 1970 - 2018.

## 4. Marco Teórico

### 4.1. Problemática general de las cuencas Hidrográficas

De acuerdo con el informe de la Corporación Autónoma Regional del Cauca, las cuencas hidrográficas colombianas presentaban un comportamiento estable hasta el año 1992, a partir del cual han venido presentando cambios “*erráticos*”, “*no estacionales*” o “*a cíclicos*”. Si bien esto es principalmente efecto del cambio climático derivado del efecto invernadero (Benavides, 2007, p. 18) a nivel interno se han identificado dos ramales principales de causales que coadyuvan al incremento de los efectos de esta tendencia mundial. Primero se encuentran las relacionadas con las características físico-naturales. Entre las que tenemos: la alteración del régimen hidrológico, procesos de erosión acelerada, sedimentación y colmatación en obras hidráulicas con drástica disminución de su vida útil, inundaciones, daños y destrucción de obras hidráulicas y civiles, Pérdida de vidas humanas y bienes materiales (Atencio, 2018, p. 13). Segundo, se encuentran las

relacionadas con las características antropológicas. Entre las que tenemos: la remoción indiscriminada de la cobertura vegetal, la sobreutilización de los suelos, la concentración inadecuada de la población y las actividades económicas, deficientes y en algunos casos inexistente información básica ambiental (IDEAM, 2015, p. 387).

#### **4.2. Variabilidad climática y el recurso hídrico en Colombia**

La variabilidad hidroclimáticas se refiere a tendencias y fluctuaciones a diferentes escalas espaciales y temporales en las diversas variables que describen el clima. El fenómeno ENSO es uno de los forzantes con mayor influencia sobre la variabilidad interanual del clima y del recurso hídrico en Colombia. Una gran porción del territorio es sensible a sus efectos de disminución o aumento de la oferta y de amenaza de eventos, como inundaciones y sequías (Sedano Cruz, 2017, p. 46).

En el presente estudio, se lograron estimar anomalías promedio de caudales debidas al ENSO, sobre estaciones hidrológicas. Estudio nacional del agua 2018 distribuidas en el territorio nacional, operadas por el *IDEAM*, en las temporadas de mayor efecto del fenómeno. Asimismo, se cuantificó el nivel de afectación del evento de El Niño 2009-2010 sobre los niveles de los principales ríos del país.

Este análisis permite inferir las zonas hidrológicas sensibles al fenómeno y tener una medida relativa de la afectación con respecto a condiciones promedio; además, proporciona señales para que las entidades nacionales, regionales y locales de Colombia formulen políticas y estrategias de gestión y adaptación acordes con esta variabilidad climática, orientadas a lograr la sostenibilidad del recurso agua en épocas críticas. Igualmente, para épocas húmedas influidas por La Niña, es de gran importancia resaltar los riesgos relacionados con avenidas torrenciales, inundaciones y deslizamientos en poblados y vías del país.

### 4.3. Prueba mann-kendall y sen's slope.

La prueba de pendiente de Mann-Kendall fue creado por Mann en 1945, y luego modificado por Kendall en 1975, esta prueba de tendencia es un método estadístico no paramétrico, ampliamente utilizado para detectar tendencias monótonas en series de tiempo hidrológicas. Una de las ventajas de utilizar esta prueba es que se adapta a los valores perdidos y se ve mínimamente afectado por datos atípicos. El procedimiento requiere comparar pares de datos, lo que significa que cada registro se compara con todos los demás registros de la serie temporal (López, 2007, p. 89).

La ausencia de una tendencia es la hipótesis nula de la prueba de Mann-Kendall, y la hipótesis alternativa es la existencia de una tendencia monótona en las series de tiempo. Es posible rechazar la hipótesis nula solo si el Valor-P  $< \alpha$ , en el nivel de significancia de la prueba  $\alpha$  (Pérez & Sierra, 2016). Para este estudio, la significancia adoptada es igual a 0.05, que, en una prueba de dos colas ( $\alpha / 2$ ), corresponde a  $|Z| = 1,96$  (Deepesh & Madan Kumar, 1993)

El valor de la prueba de Mann-Kendall se estima de la siguiente manera:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(X_j - X_k) \quad (1)$$

Donde signo es igual a:

$$\text{Sign}(x) = \begin{cases} +1 \text{ if } (X_j - X_k) > 0 \\ 0 \text{ if } (X_j - X_k) = 0 \\ -1 \text{ if } (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

En la ecuación (2), los valores  $X_j$  y  $X_k$  son mediciones correspondientes a un tiempo  $j$  y  $k$ , y  $n$  es el número de eventos. La siguiente expresión estima la varianza de  $S$ :

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}, \quad (3)$$

Donde  $n$  es el número de observaciones,  $m$  es el número de pares de datos en la serie, y  $t_i$  es el número de lazos de la muestra en el momento (Deepesh & Madan Kumar, 1993).

La probabilidad de que asocie  $S$  con su varianza es necesaria para determinar la importancia de la tendencia,  $Z$ :

$$\begin{cases} z = \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S > 0 \\ z = 0 & \text{if } S = 0 \\ z = \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

El estimador de pendiente Theil-Sen (generalmente llamado pendiente de Sen) es una prueba no paramétrica que permite estimar la magnitud de las tendencias sin verse afectado por valores atípicos y distribuciones no normales o ser estricto con respecto a la homocedasticidad (Deepesh & Madan Kumar, 1993). Esta magnitud se calcula estimando las pendientes de las líneas ( $Q_i$ ) que conectan los pares de datos ( $N$ ) a través de la siguiente ecuación.

$$Q_i = \frac{Y_j - Y_k}{j - k} \quad \text{for } i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

Donde  $Y_j$  e  $Y_k$  son valores correspondientes a los períodos  $j$  y  $k$ , respectivamente. Después de calcular la pendiente para cada par de datos, los valores  $Q$  se ordenan en orden ascendente, lo que permite calcular la mediana utilizando la siguiente expresión:

$$\begin{cases} Q_{med} = Q_{|(N+1)/2|} & \text{If } N \text{ is odd} \\ Q_{med} = \frac{Q_{|N/2|} + Q_{|(N+2)/2|}}{2} & \text{If } N \text{ is even} \end{cases} \quad (6)$$



### Estado del arte

Conocer la tendencia de los caudales de un río es indispensable, debido a que este parámetro es fundamental para el inicio de cualquier obra hidráulica o proyecto cerca de una cuenca hidrográfica, con esta investigación podrá ser base para proyectos que necesiten conocer el comportamiento del río e iniciar una alerta temprana y así mismo tener en cuenta la zona de influencia del afluente que puede favorecer a los cultivos. Así como dice uno de los artículos encontrado titulado **“tendencias de los caudales en la cuenca hidrográfica del río magdalena”** escrito por Joselin Sierra Cortes del periodo 1981-2010, donde afirma —”La capacidad hidráulica de embalses, la construcción de diques, bocatomas, muros de contención y demás obras hidráulicas dependen de la tendencia que han tomado los caudales mencionados ya que sus dimensiones varían en función de caudal registrado, además hay que tener en cuenta que estas obras de infraestructura representan un costo elevado y generan un impacto positivo en la sociedad que conlleva a una mejor calidad de vida” (Sierra, 2013).

Así que, es necesario conocer la tendencia de los caudales máximos, mínimos y medios, si se quiere llegar a construir una obra hidráulica o para distribuir agua a una población, no obstante se deben apreciar otros aspectos fundamentales que pudiese sufrir la cuenca como son las variaciones en el caudal por las precipitaciones, la temperatura, la evaporación, las lluvias y otros factores que tienen directa incidencia en el comportamiento normal de la corriente (Atencio et al., 2018).

La ubicación geográfica de Colombia ha contribuido a que su territorio cuente con una riqueza hídrica importante, la presencia de las tres cordilleras a su vez ha generado que las riveras de sus ríos, y diferentes fuentes hídricas sean lugares para el asentamiento de poblaciones humanas. Estos asentamientos traen consigo consecuencias e impactos ambientales, que manejado inadecuadamente pueden generar daños al ambiente, su entorno, infraestructura y a la población que allí habite.

La ubicación del país (Colombia) en la zona tropical lo hace mucho más susceptible a los impactos que acarrea el cambio climático; fenómenos climáticos como “El niño” y “La niña”, generan que el territorio nacional se vea afectado por temporadas de lluvias intensas, o por lo contrario temporadas de largas sequías, ambos fenómenos son igualmente perjudiciales, ya que la ausencia de lluvia trae consigo afectaciones en la geomorfología de los suelos; afectaciones que una vez llegan las lluvias causan desprendimientos y sus consecuentes inundaciones.

En la presente tesis, que lleva por nombre, **evaluación de las tendencias de los caudales medios, mínimos y máximos del río Guaviare, departamento del Guaviare, en Colombia**, de la Universidad la Gran Colombia, donde sus autores son: Aldebarán Antonio Atención Pachón, Nicolás Enciso Sepúlveda, Luis Eduardo Pulido Cetina (2018)<sup>1</sup> se encontraron referentes temáticos que hablan específicamente de como realizaron la evaluación de tendencias de los caudales del río Guaviare optando por una metodología del tipo de muestreo probalístico, éste tipo de muestreo se emplea cuando de un grupo pequeño de la población (subgrupo), se escoge algunos elementos para que formen parte de la muestra. El método que se usó para ello, garantizó no solo que los elementos de la muestra representen la población en general, sino que cada uno de los elementos tenga la misma probabilidad de ser elegidos. El método usado para realizar el muestreo probalístico es el muestreo por conglomerados, éste método consiste en primer lugar en seleccionar grupos o conglomerados de la población, y luego de éstos grupos escoger mediante otro método de muestreo probalístico (muestreo aleatorio simple o muestreo sistemático simple)

---

sujetos individuales, aunque también se podía optar por escoger el conglomerado en vez del subconjunto.

Las técnicas e instrumentos que utilizaron para obtención de datos fue por la entidad pública IDEAM, como resultado de la exhaustiva recopilación de datos y análisis obtuvieron gráficas a partir de los caudales máximos del río Guaviare muestran que la tendencia de estos es creciente, esto implica que la cuenca tiene un comportamiento desfavorable para las poblaciones que se encuentren aledañas a la misma, debido a que hay riesgo de posibles inundaciones que ponen en riesgo las vidas de los pobladores y puede afectar las actividades que se desarrollan en esta zona.

Como resultados de los caudales medios arrojados por las gráficas les da a entender que la cuenca no se ve muy afectada, ya que presenta pendientes ascendentes y estables a lo largo del río, son muy pocas las que descienden. Y los caudales mínimos que se presentan en el río Guaviare son bastante estables, en algunos puntos estos tienden a subir, lo que indica que la cuenca se encuentra en un buen estado. Cuando se presentan periodos de pocas precipitaciones o sequías, fenómenos como El Niño, las actividades como la pesca y la navegación no se verán tan perjudicadas.

Por otro lado un artículo a nivel Internacional que lleva por nombre “tendencias en los caudales en ríos de michoacán, México”, artículo redactado por Humberto Hernandez-Rodriguez y José de Jesús Návar-Cháidez. En el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Instituto Politécnico Nacional, Unidad Durango, México.

En este trabajo se analizaron las tendencias y sus magnitudes de cambio en los caudales de 12 estaciones hidrométricas del estado de Michoacán, México. Se utilizaron registros diarios del caudal y se usó el programa RORA para la separación del flujo base y directo. Se utilizó la regresión lineal simple y la prueba de Mann-Kendall para evaluar tendencias, así como la prueba del Seno para evaluar magnitudes de cambio.

Cuentan con un área de estudio para la cuenca del río Patía, localizada en el sector suroccidental de Colombia. Cubre parcialmente los departamentos de Cauca y Nariño, en un área aproximada de 22000 km<sup>2</sup>. Para llevar a cabo esta investigación se empleó información de dos tipos: gráfica, mapas y planos de localización general y para caracterización geológica; Hidrológica, de series de tiempo de caudales.

El análisis de los resultados de la investigación descubrió, que en los ríos analizados se encontró que el 66% de las estaciones tiene tendencias a disminuir sus caudales y el 40% presenta tendencias estadísticamente significativas. Para el 34% de las estaciones se encontraron aumentos notorios en los caudales, pero sólo para el 16% este incremento es estadísticamente significativo. Destacan las estaciones hidrométricas de Corrales y Salida de Malpaís, cuyos caudales base están disminuyendo y los caudales directos, aumentando. Ante la creciente necesidad de un manejo sustentable de los recursos hidrológicos, es necesario impulsar políticas que apoyen el desarrollo de mecanismos para la protección y restauración de cuencas hidrológicas, y así poder asegurar la calidad de perenne en los caudales, para la satisfacción de los usos y usuarios del agua desde el municipio, la industria, la agricultura y el medio ambiente, en pro del bienestar de la sociedad presente y futura.

Consecuente en este proyecto, que lleva por nombre, Análisis regional de caudales medios mensuales de la cuenca del río Patía, de la Universidad Nacional de Colombia, donde sus autores son: Mario Erik Castro Gama, Luis Eduardo Machado Hernández.

Este proyecto tiene como fin adentrarse a una cuenca hidrográfica que no proceda o corresponda a los afluentes de los ríos Magdalena, Cauca, Orinoco y Amazonas. En cierta medida a esas cuencas autónomas de estos grandes sistemas hídricos no se les presta atención, más aún por estar ubicadas en zonas aisladas del país, por fuera de la Región Andina. La cuenca del Patía es una de ellas,

ubicada en el Pacífico colombiano, y, sin embargo, dada su magnitud (área aproximada = 22000 km<sup>2</sup>), muy poco se conoce acerca del comportamiento de los caudales de sus afluentes.

Como metodología para la base de la estimación de las características de los caudales de la cuenca obtuvieron los valores a través de la entidad pública IDEAM la cual utilizaron 27 estaciones para la realización del estudio en un período de 1996 a 2006, luego de filtrar y organizar las series de datos utilizaron graficas con curvas de duración para el análisis de los resultados de la investigación descubrió que la variación interanual de las series de caudales medios mensuales muestra que estas presentan un comportamiento unimodal, hecho que ratifica lo expuesto por (van Rijn, 1993). Los periodos que obtuvieron mayor magnitud de caudal medio mensual a lo largo de toda la cuenca se ubican en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero. Los correspondientes periodos de estiaje se observan durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre. La perspectiva posterior de esta investigación estuvo centrada en dos aspectos; el primero de ellos fue elaborar la caracterización morfológica de la cuenca y el segundo, en relación con la estimación y análisis del comportamiento de los caudales de estiaje y de creciente para la región.

## 5. Metodología

### 5.1 Área de estudio

La cuenca del río Cauca es uno de los ríos más importantes del pueblo colombiano, presenta potencialidades a nivel agrario, forestal, pesquero, minero, energético e hidrográfico, principalmente en el departamento del cauca. De acuerdo con lo expresado por representantes de la comunidad en general, la actividad agrícola genera mayor impacto sobre la calidad de las fuentes superficiales y suelos (IDEAM, 2018).



Figura 1 Ubicación espacial de las estaciones en el recorrido del río Cauca. Fuente: Elaboración propia.

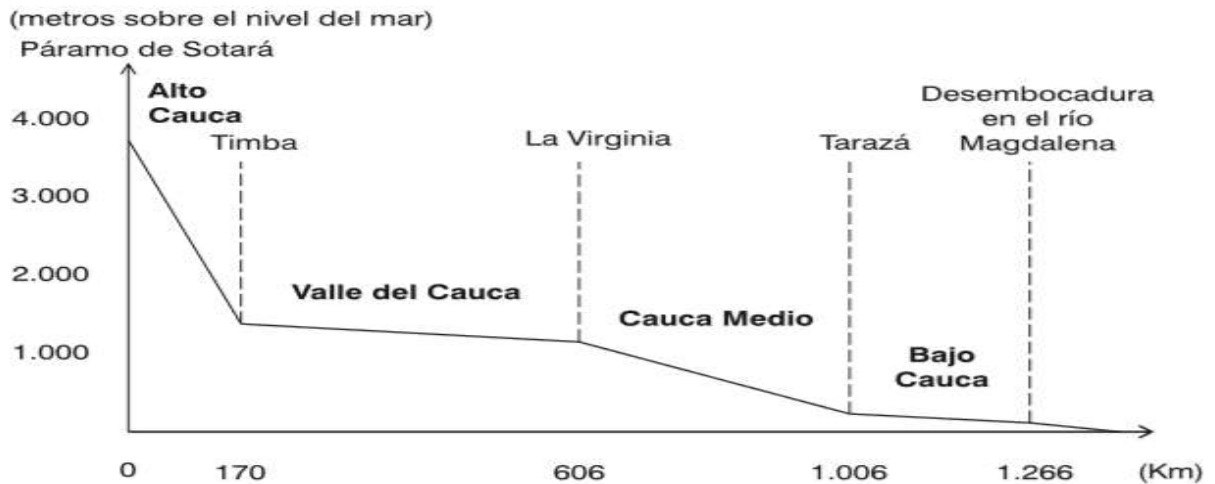


Figura 2 Variación de niveles del río Cauca. Fuente: Corporación autónoma regional del valle del cauca- CVC. (2008).

Las coberturas de la parte alta de la cuenca tales como los bosques densos y zonas glaciares y herbazales se mantuvieron de manera constante a través del tiempo, mientras que hacia la parte baja y media de la cuenca si se presentaron cambios de tipo cobertura clasificada, Según la clasificación de cobertura y usos de suelo demostraron que en 1987 el incremento de tejido urbano continuó contaba con 880.3 hectáreas para esa época en cambio para el 2012 pasó a 1811.8 ha (IDEAM, 2017). Es decir, los pastos limpios con 475,7 has, son el tipo de cobertura que más aportó a este cambio, es decir, que 475 ha, que antes eran destinados a pastos fueron transformados a tejidos urbanos, el río Cauca se divide en la zona alta corresponde a climas cálidos húmedos y semihúmedos se localizan en las franjas occidental (Urabá y límites con Chocó), oriental (Caucasia, Magdalena medio) y central (valle del río Cauca). Los climas templados y fríos se distribuyen en las vertientes de las cordilleras central y occidental y ocupan el centro del departamento. Es variado debido a que el departamento es atravesado por la cordillera oriental, por lo tanto se cuenta hacia el norte y zonas costeras con clima caliente de entre 22 y 35 grados centígrados. Y baja corresponde a clima tropical con temperaturas que oscilan de 30 y 32 °C (Castaño et al., 2010).

## 5.2 Recopilación de información

Para la obtención de datos se procedió a solicitar en la plataforma web oficial del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), arrojando un promedio de 40 estaciones hidrológicas las cuales debían pasar por una serie de filtros ya que la mayoría no contaba con los requisitos necesarios para utilizar su información, es decir, no se encontraba en funcionamiento, la serie de datos que arrojaban era muy escuálida, y podían tener de 2 a 4 años sin información.

Luego de escoger las estaciones hidrológicas que contaban con aspectos fundamentales, se obtuvo información relacionada con dieciséis (16) series de datos para ocho (8) estaciones ubicadas dentro de la cuenca del río Cauca. Esta información solicitada consta con las magnitudes de los caudales y niveles máximos y mínimos anuales en un periodo de tiempo comprendido desde el año 1970 hasta el año 2018 de las ocho (8) estaciones ubicadas en la cuenca alta, media y baja de este.

## 5.3 Validación de los datos

Se filtraron los datos, eliminando los datos erróneos y completando los datos faltantes a partir de relaciones con los niveles. Todo con el fin de verificar que la serie de datos sea continua y tengan por lo menos más de 30 datos. Para todo el conjunto de datos de flujo, los vacíos correspondieron al 5% del total. Sin embargo, la mayor parte del período analizado, los niveles de superficie del agua fueron principalmente disponibles. El método utilizado para completar las brechas en las series temporales fue la curva de clasificación.

El método Curva de clasificación utiliza una correlación entre los valores de descarga ( $Q$ ) y los niveles de agua ( $H$ ) para cada estación de medición. Para este estudio, los datos de descarga faltantes estimados como una función del nivel de agua. El Cuadro presenta las ecuaciones utilizadas para completar los datos faltantes en cada serie de datos y el coeficiente de determinación



( $R^2$ ) correspondiente el cual debe ser mayor a 0.9, que es una medida estadística de la bondad del ajuste de la regresión.

#### **5.4 Identificación de tendencias y magnitud de tendencias**

Las series de caudales máximos y mínimos se sometieron a análisis estadísticos no paramétricos con lo cual se busca comprobar su estacionariedad. Se aplicaron las pruebas de Mann Kendall y Sen's Slope a cada serie de caudales anuales máximos y mínimos, con el propósito de identificar tendencias y cuantificar las mismas. Las pruebas se realizaron utilizando el programa de análisis estadístico de Minitab.

##### **5.4.1 Identificación de las estaciones con tendencia (Prueba Mann-Kendall)**

Los datos obtenidos correspondieron a registros anuales entre 1970 a 2018. Para detectar las estaciones con tendencias se empleó la prueba no paramétrica Mann-Kendall en las dieciséis (16) series de datos de los caudales, dando como resultado el valor P el cual es comparado con el valor alfa que da a conocer si la serie estudiada contiene o no tendencias en función del tiempo. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las pruebas ejecutadas en cada una de las estaciones con la herramienta estadística MiniTab.

##### **5.4.2 Identificación de la magnitud de la tendencia (Prueba Sen's Slope)**

Seguidamente de identificar las series con tendencia, se procedió a realizar en cada una de estas la prueba de la Pendiente de Sen (Senslope) con la herramienta estadística MiniTab, con el fin de conocer las magnitudes de las tendencias identificadas, Este enfoque implica el cálculo de pendientes para todos los pares de puntos de tiempo ordinales y luego utilizar la mediana de estas pendientes como una estimación de la pendiente general. Este procedimiento se llevó a cabo

seleccionando los valores de la serie de datos, introduciéndolos en este software, el cual funciona para detectar si tiene una tendencia ascendente o descendente.

### **5.5 Análisis de la variación espacial de las tendencias**

. Con el análisis de la variación espacial de las tendencias se requiere comprender la conducta de las tendencias en los diferentes tramos del río ya sea en su cuenca alta media o baja. Es decir, analizar cómo varían las tendencias en cada una de las estaciones para cada serie de datos en el recorrido del río y si estas tendencias tienen alguna similitud en magnitud y en tipología entre ellas.

### **5.6 Identificación de posibles causas o incidencias en las variaciones de las series de caudales máximos y mínimos anuales**

En este proceso se quiere identificar las posibles causales o incidencias espaciales en el comportamiento del río Cauca en sus diferentes tramos y posteriormente, asociar estas a los resultados obtenidos en el estudio.

Para identificar las posibles causas o incidencias espaciales en las variaciones de las series, se realiza un análisis geográfico para tratar de comprender la conducta de los diferentes tramos del río donde con el fin de una generar respuesta válida a las variaciones en los caudales, es decir, asociar las variaciones con los distintos escenarios que se aprecian en el recorrido de la cuenca.

## 6. Resultados

### 6.1 Validación de datos

Para todo el conjunto de datos de flujo, los vacíos correspondieron al 5% del total. Sin embargo, la mayor parte del período analizado, los niveles de superficie del agua fueron principalmente disponibles. El método utilizado para completar las brechas en las series temporales fue la curva de clasificación (Alfaro & Soley, 2009).

Tabla 1

*Estaciones, tipos de serie, datos faltantes, ecuación de la recta y grado de confianza de la ecuación.*

N	Q-H	TIPO DE SERIE	DATOS FALTANTES (%)	ECUACIÓN	R <sup>2</sup> (%)
1	Puente Aragón	Mínimos	4	$Q = 0,6506 * h^{1,981}$	99
		Máximos	2	$Q = 1,4356 * h^{3,53}$	98
2	Julumito	Mínimos	6	$Q = 2,0021 * h^{0,1756}$	98
		Máximos	13	$Q = 2,978 * h^{2,89}$	96
3	La Virginia	Mínimos	6	$Q = 3,7533 * h^{3,339}$	99
		Máximos	8	$Q = 97,189 * h^{4,98}$	99
4	La Pintada	Mínimos	4	$Q = 4,193 * h^{1,7364}$	98
		Máximos	4	$Q = 54,3 * h^{3,4}$	98
5	La Coquera	Mínimos	2	$Q = 12,324 * h^{5,78}$	97
		Máximos	6	$Q = 10,86 * h^{4,641}$	97
6	Margento	Mínimos	2	$Q = 8,127 * h^{2,34}$	96
		Máximos	2	$Q = 67,9 * h^{2,3}$	96
7	Las Varas	Mínimos	4	$Q = 12,2 * h^{3,567}$	95
		Máximos	6	$Q = 56,74 * h^{3,87}$	95
8	Tres Cruces	Mínimos	4	$Q = 3,78 * h^{5,42}$	94
		Máximos	2	$Q = 43,9574 * h^{2,795}$	94

*Fuente:* propia de los autores

### 6.2 Identificación de tendencias

Tal como se estableció en la metodología las estaciones de monitoreo del río Cauca seleccionadas para el desarrollo de este río, monitorean el comportamiento de este, en su cuenca alta y en su cuenca baja a razón de 4 por cada una de estas divisiones. Como resultado de la aplicación de la

técnica de identificación de tendencias de Mann-Kendall de identificó en las series de caudales mínimos anuales que en la cuenca alta de río Cauca no hay estaciones que presenten tendencia en su comportamiento y solamente dos (2) estaciones (Las Varas y Tres Cruces<sup>2</sup>) muestran una tendencia claramente identificable. De igual forma, en las series de caudales máximos anuales se identificaron en la cuenca alta tres (3) estaciones (Puente Aragón, Julumito y La Virginia) con tendencia y en la cuenca baja otras tres (3) estaciones (Margento, Las Varas y Tres Cruces) con tendencia.

Como se puede observar frente a la variable caudales mínimos anuales en la cuenca alta del río Cauca la prueba de Mann-Kendall establece que no se presenta una tendencia, por arrojar resultados del P-valor superiores al grado de significancia (0,05) establecido por esta técnica. A continuación (*Tabla 2*) se muestran los resultados generados por la técnica de Mann-Kendall en cada una de las series de datos reportados por las estaciones hidrológicas consideradas en el estudio (Poveda et al., 2002).

Tabla 2

*Resultados de la prueba Mann-Kendall.*

ESTACIÓN.	CUENCA	TIPO DE SERIE	TENDENCIA	P-VALOR
Puente Aragón	Alta	Mínimo	No	0,697
		Máximo	Si	0,0142
Julumito	Alta	Mínimo	No	0,979
		Máximo	Si	0,0205
La Virginia	Alta	Mínimo	No	0,548
		Máximo	Si	0,0016
La pintada	Alta	Mínimo	No	0,788
		Máximo	No	0,9970
La coquera	Baja	Mínimo	No	0,735
		Máximo	No	0,7876
Margento	Baja	Mínimo	No	0,608
		Máximo	Si	0,0019

<sup>2</sup> Ubicadas en la cuenca baja del río. Fuente: Elaboración propia

ESTACIÓN.	CUENCA	TIPO DE SERIE	TENDENCIA	P-VALOR
Las Varas	Baja	Mínimo	Si	0,0268
		Máximo	Si	0,01000
Tres Cruces	Baja	Mínimo	Si	0,0206
		Máximo	Si	0,0035

### 6.3 Identificación de la magnitud de las tendencias

Luego de la aplicación de la técnica de Mann-Kendall se procedió a la identificación de la magnitud y el sentido de la tendencia del comportamiento de los caudales anuales máximos y mínimos del río Cauca, utilizando la técnica del Sen's Slope. Como resultado se estableció que en la cuenca alta del río Cauca los caudales máximos anuales están tendiendo a decrecer, esto considerando los datos registrados por las estaciones de Puente Aragón, Julumito y La Virginia, con variaciones anuales registradas de -0,57, -2,17 y -1,21 m<sup>3</sup>/s/año respectivamente por año. Como se observa en la Tabla 2 en la cuenca alta del río, no se observan tendencias para los caudales mínimos anuales (Silva, 2017).

Por su parte en la cuenca baja del río Cauca los caudales máximos anuales presentan tendencia al crecimiento, esto considerando los datos registrados por las estaciones Margento, Las Varas y Tres Cruces, con variaciones anuales registradas de 8,93 8,78 y 6,44 m<sup>3</sup>/s/año respectivamente por año. Igualmente, los caudales mínimos anuales presentan tendencia al crecimiento, de acuerdo con los datos registrados por las estaciones Las Varas y Tres Cruces, con variaciones anuales registradas de 0,56 y 1,33 m<sup>3</sup>/s/año respectivamente por año (Ver *Tabla 3*

*Resultados de la prueba no paramétrica Senslope Tabla 3).*

Tabla 3

*Resultados de la prueba no paramétrica Senslope*

Estación	Tipo de serie	P-valor	Tipo de Tendencia.	Pendiente de sen (m <sup>3</sup> /s/año)
Puente Aragón	Máximo	0,014	Decreciente	-0,57

Julumito	Máximo	0,021	Decreciente	-2,17
La Virginia	Máximo	0,002	Decreciente	-1,21
Margento	Máximo	0,0019	Creciente	8,93
Las Varas	Mínimo	0,027	Creciente	0,56
	Máximo	0,010	Creciente	8,78
Tres Cruces	Mínimo	0,021	Creciente	1,33
	Máximo	0,003	Creciente	6,44

Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.1 Prueba Sen's Slope para las series de caudales mínimos anuales

Al realizar los análisis de tendencia para las series de caudales de mínimos anuales, se encontró que únicamente dos (2) estaciones ubicadas en la cuenca baja (Las Varas y Tres cruces) presentaban tendencias significativas, de las cuales correspondían a una tendencia creciente con valores de Sen's Slope entre 0,56 y 1,33 m<sup>3</sup>/s/año.

La pendiente observada en los datos reportados por las estaciones Las Varas y Tres Cruces respecto de la tendencia del crecimiento de los caudales anuales mínimos del río Cauca en su cuenca baja es menor que la presentada en los caudales máximos anuales, lo cual indica que la variación general del caudal en esta zona tiende a conservar un volumen estable en la fuente hídrica (Álvarez & Poveda, 2011).

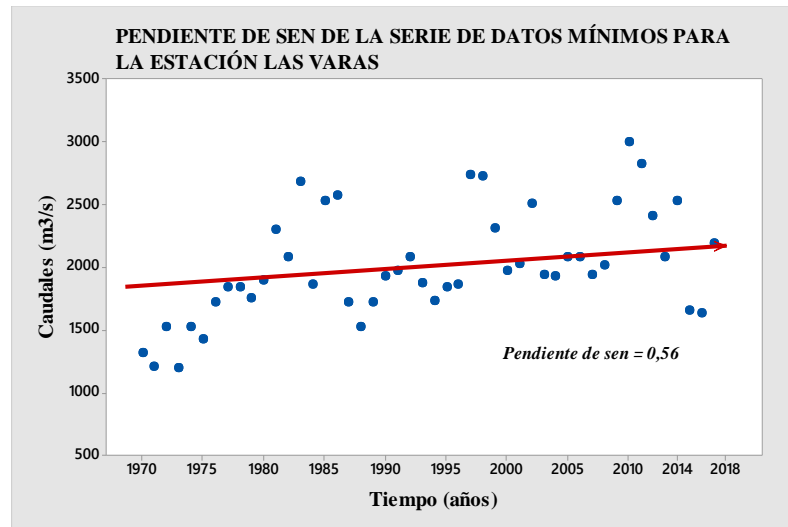


Figura 3 Prueba de Sen Slope de la serie de caudales mínimos para la estación Las Varas. Fuente: Elaboración propia.

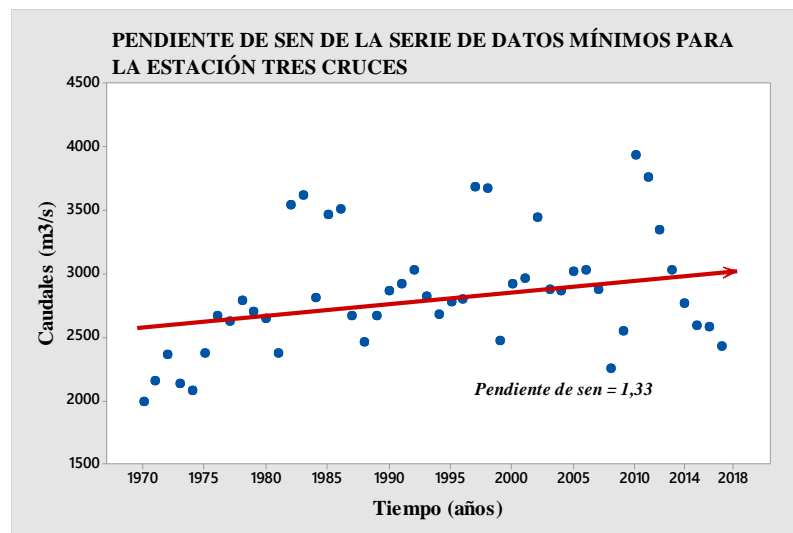


Figura 4 Prueba de Sen Slope de la serie de caudales mínimos para la Tres Cruces. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.2 Prueba Sen's Slope para las series de caudales Máximos anuales

En la siguiente subsección se presenta un análisis de los resultados según el tipo de pendiente encontrado en la serie.

#### 6.3.2.1 Pendiente ascendentes caudales máximos.

Tal como se puede observar en (Figura 5, Figura 6 y Figura 7) los datos reportados en las diferentes estaciones presentan comportamientos distintos, destacando en la estación Las Varas una

clara estacionalidad, la cual también se observa en Margento, aunque menos evidentemente dado que presenta una desviación estándar mucho mayor. A este respecto llama la atención los datos presentados en la estación Tres Cruces, la cual presenta la mayor desviación estándar de las estaciones y al mismo tiempo una marcada linealidad en su tendencia. Estos tres comportamientos dificultarían la escogencia de un método de pronóstico que pudiera predecir el comportamiento futuro de los caudales máximos anuales en la cuenca baja del río Cauca.

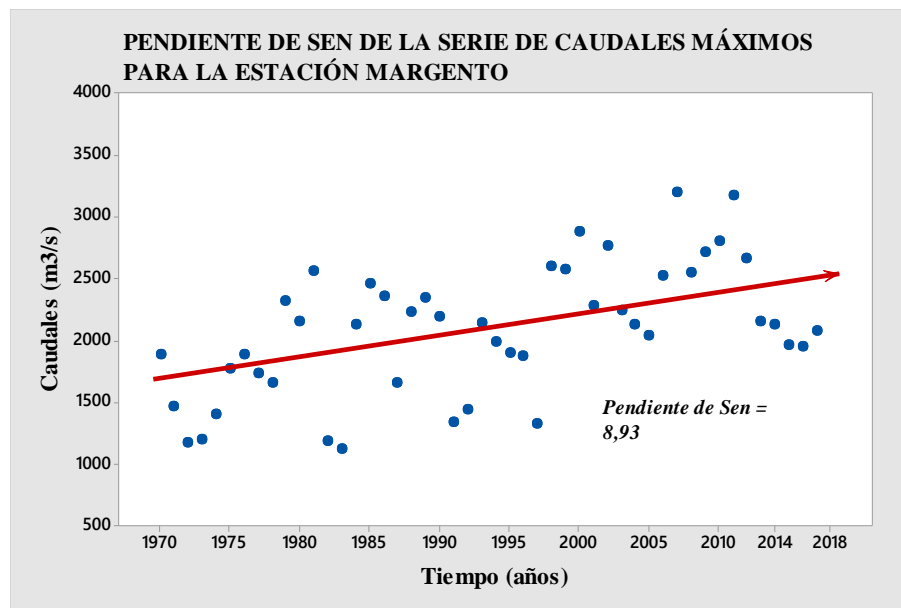


Figura 5 Prueba Sen Slope de la serie de caudales máximos para la estación Margento. Fuente: Elaboración propia.



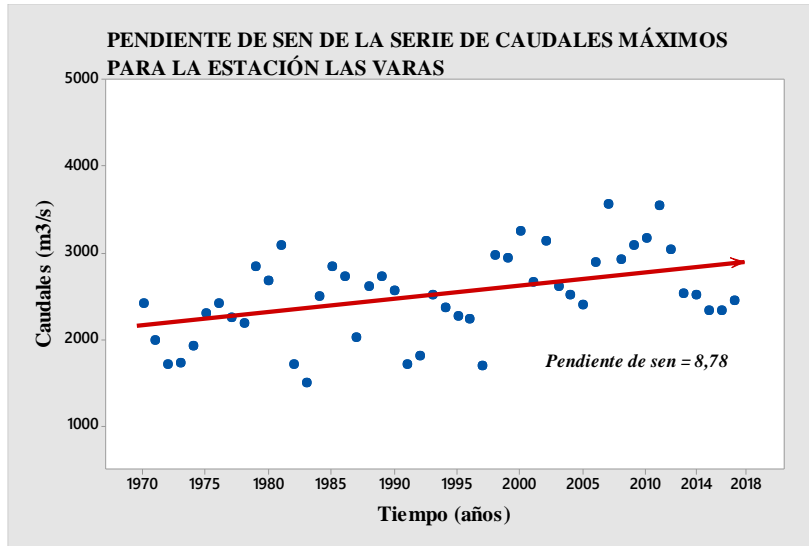


Figura 6 Prueba Sen Slope de la serie de caudales máximos para la estación Las Varas. Fuente: Elaboración propia.

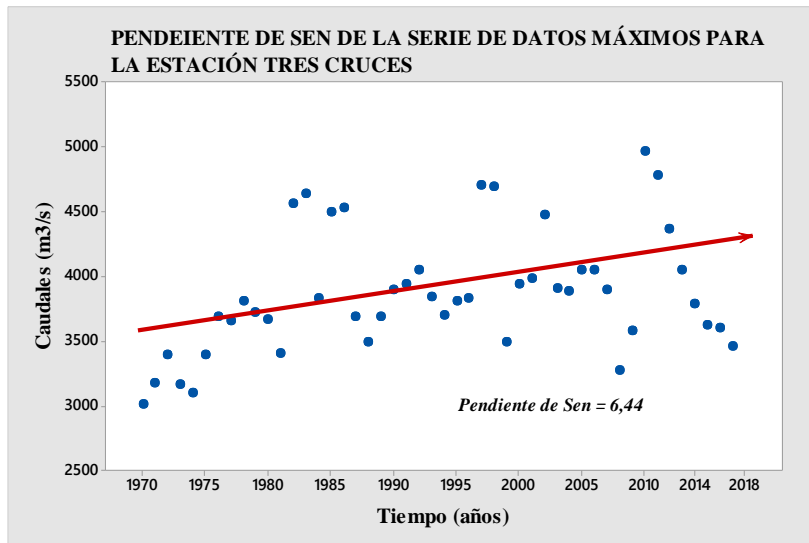


Figura 7 Prueba Sen Slope de la serie de caudales máximos para la estación Tres Cruces. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.2.2. Pendientes descendentes para caudales máximos

Los valores de las pendientes de las series de datos correspondientes a los caudales máximos anuales reportados por las estaciones Puente Aragón, Julumito y La Virginia muestran una pendiente negativa que varía entre  $-0,57$  y  $-2,17$  m<sup>3</sup>/s/año, proyectando así una disminución ligera pero constante del caudal del río Cauca en su cuenca alta.

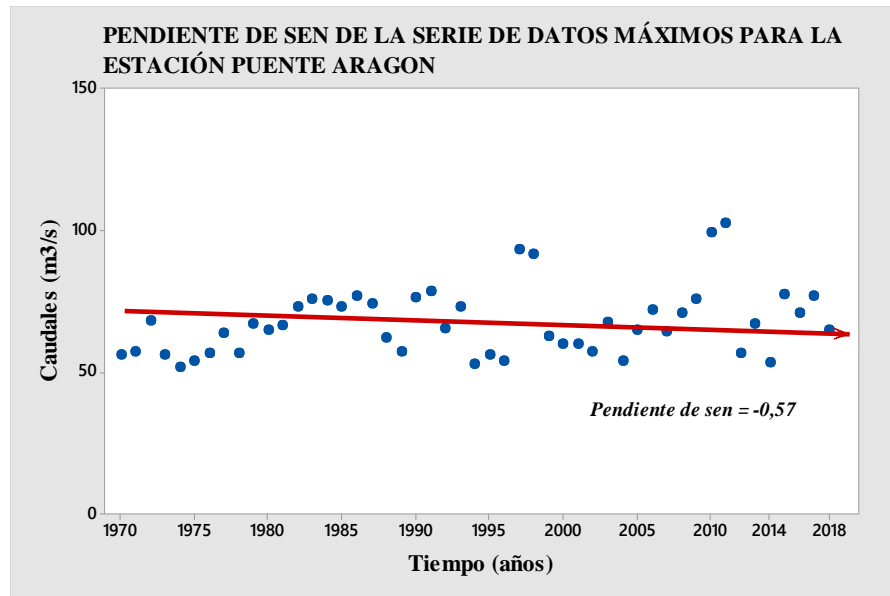


Figura 8 Prueba Sen Slope de la serie de caudales máximos para la estación Puente Aragón. Fuente: Elaboración propia.

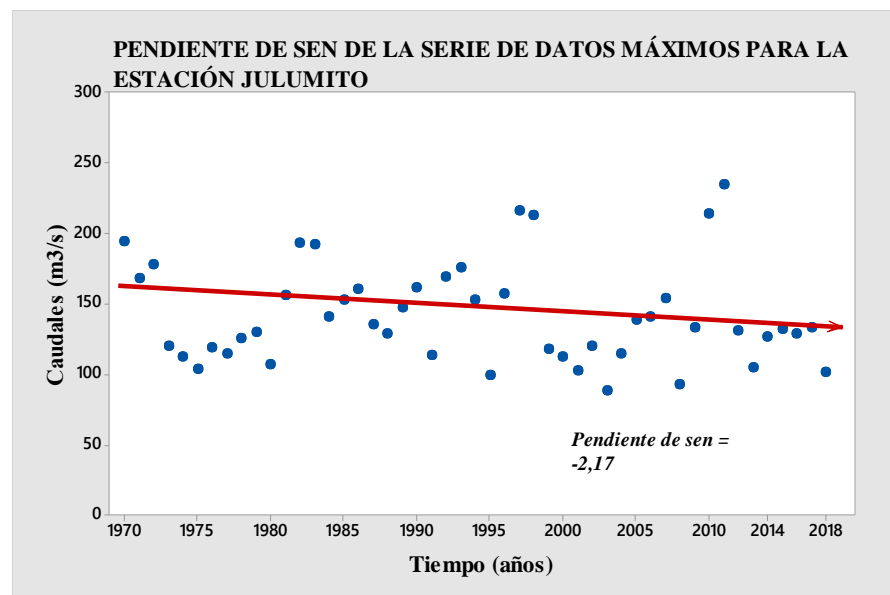


Figura 9 Prueba Sen Slope de la serie de caudales máximos para la estación Julumito. Fuente: Elaboración propia.

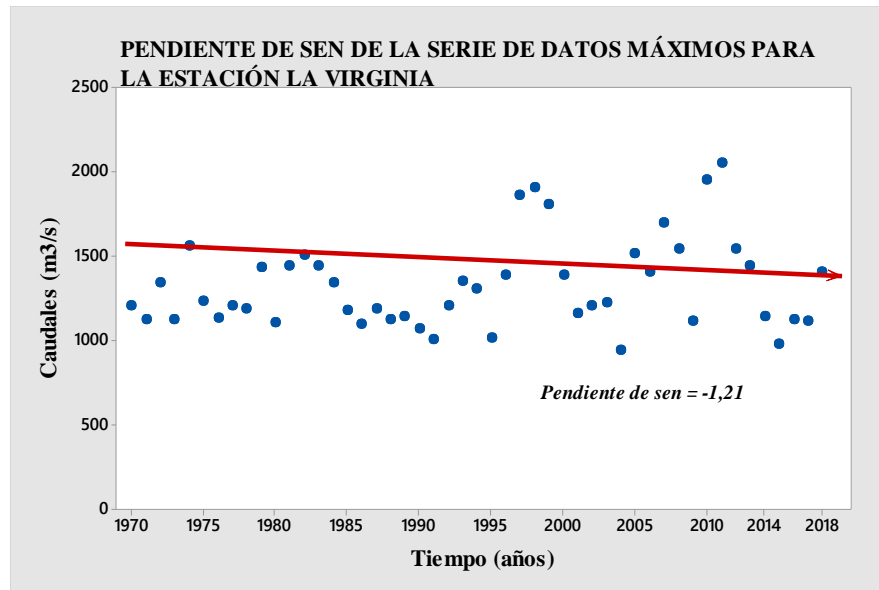


Figura 10 Prueba Sen Slope de la serie de caudales máximos para la estación La Virginia. Fuente: Elaboración propia.

## 6.4 Variación espacial de las tendencias

### 6.4.1 Variación Espacial en las series de valores mínimos anuales

Como se mencionó anteriormente para el estudio se consideraron los caudales mínimos anuales para la corriente del río Cauca. En ese orden de ideas, al realizar los análisis de tendencia para las series de caudales mínimos, se evidencia que en la cuenca alta y en la cuenca media no se identificaron tendencias, lo que indica que no existe variación ascendente o decreciente en dichos tramos del río. Sin embargo, en la cuenca baja se obtuvieron tendencias ascendentes significativas en los caudales mínimos respecto al tiempo con magnitudes de  $0,56 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$  y  $1,33 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$  en las estaciones Las Varas y Tres Cruces respectivamente.



*Figura 11* Variación espacial de las estaciones en el recorrido del río cauca y su tipo de tendencia para las series de datos mínimos anuales. *Fuente:* Elaboración propia.

Las magnitudes de los caudales también fueron objeto de estudio, ya que, según el reporte de avance del Estudio Nacional del Agua publicado en noviembre del año 2018, históricamente se han presentado varios eventos de sequía, con diferentes grados en la severidad de la disminución de lluvias, representando un importante riesgo en la disponibilidad de agua sobre grandes porciones del territorio nacional. Durante el periodo comprendido desde 1990 hasta el año 1992 se presentaron los niveles más bajos de disponibilidad hídrica en el río cauca y a su vez, la sequía de 2016 ha sido la más importante desde comienzo de siglo, afectando gran parte de la cuenca hídrica del río Cauca esto se pudo evidenciar en la relación que se obtuvo al analizar las series mínimas de cada una de las estaciones, en donde los niveles más bajos en las magnitudes de los caudales comprendieron los primeros años de la década del 90 y a mediados de la segunda década del siglo 21.

Al visualizar la *Figura 12* se observa el comportamiento anual de los caudales mínimos para cada una de las estaciones dentro del periodo comprendido desde el año 1970 hasta el año 2018, se puede

apreciar que existe una conducta similar de los datos, cuando se intenta ver en qué años se encuentran los mínimos más bajos y los mínimos más altos en las estaciones, esto ayuda a inferir que existe una concordancia entre los datos evaluados.

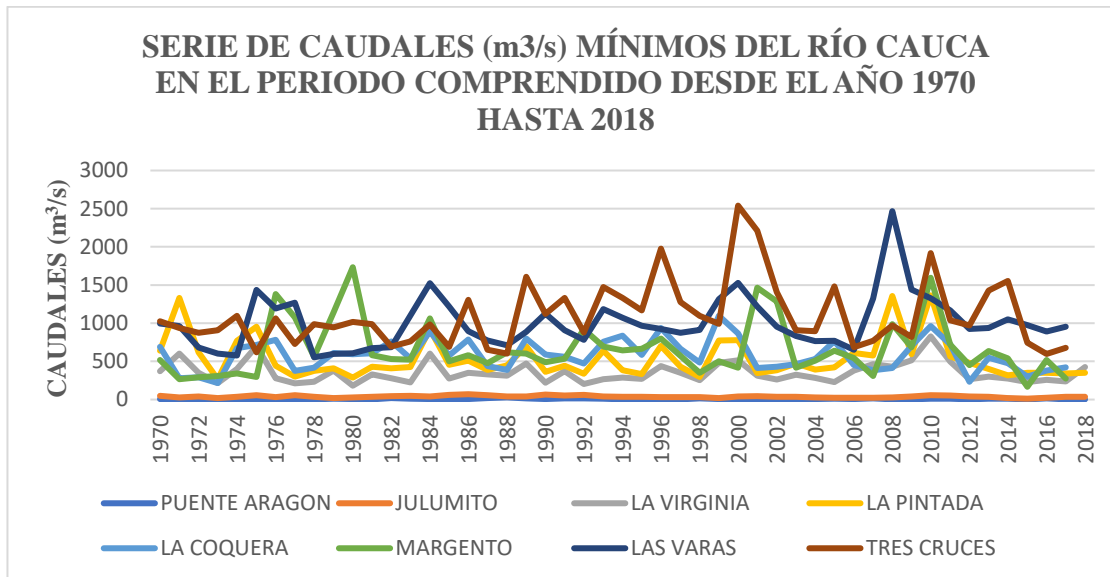


Figura 12 Serie de caudales mínimos del río Cauca en el periodo comprendido desde el año 1970 hasta 2018. Fuente: Elaboración propia.

#### 6.4.1 Variación Espacial en las series de caudales máximos anuales

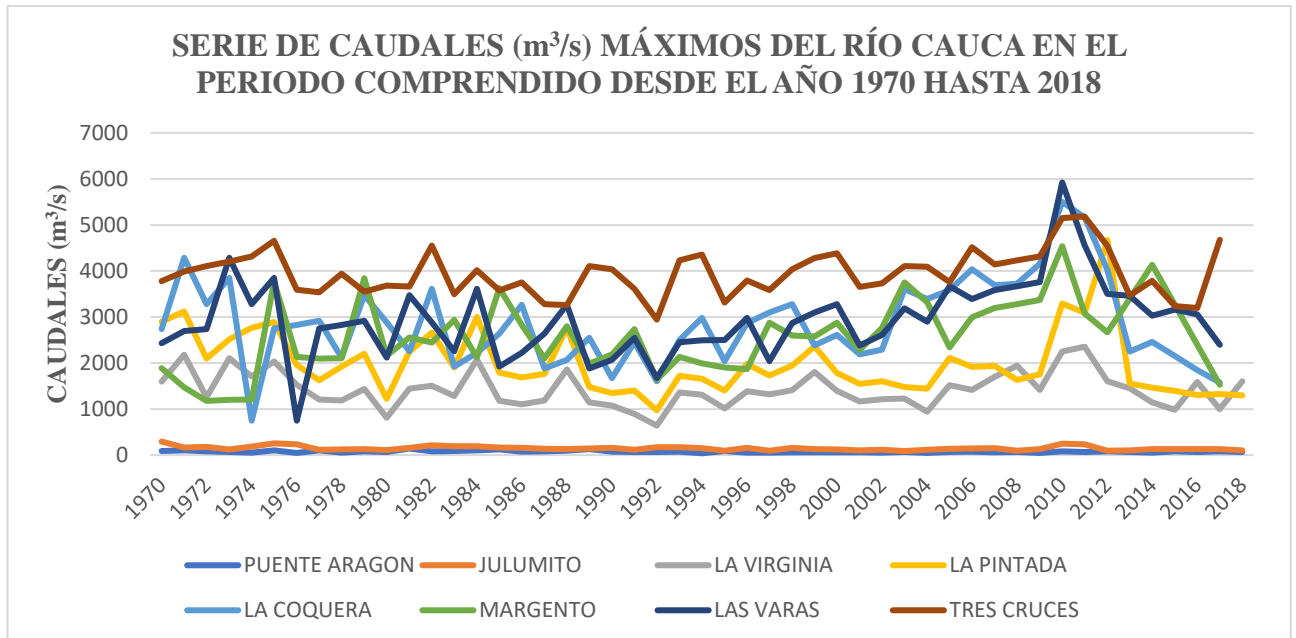
Los caudales máximos ayudan a identificar en que épocas se presentaron los incrementos más significativos del volumen del flujo de agua en la cuenca alta, media y baja del río Cauca. Al analizar las series de datos máximos de cada estación, los resultados evidenciaron que, las tendencias varían entre sí en la cuenca alta, media y baja del río Cauca. La cuenca alta se caracteriza por tendencias decrecientes que oscilan  $-0,57 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$  para la estación de Puente Aragón y hasta un valor de  $-2,17 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$  en la estación de Julumito. Se resalta en este análisis que a pesar de que en la estación La Virginia la tendencia continúa siendo descendente la pendiente baja a  $-1,21 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$  respecto al resultado de la estación anterior.

En la cuenca media no se apreciaron tendencias, sin embargo, en la cuenca baja, las tendencias en las estaciones Margento, Las Varas y Tres Cruces son ascendentes con magnitudes de 8,93, 8,78 y 6,44 m<sup>3</sup>/s/año respectivamente tal cual cómo se puede apreciar en la **Figura 13**.



*Figura 13* Variación espacial de las estaciones en el recorrido del río cauca y su tipo de tendencia para las series de datos máximos anuales. *Fuente:* Elaboración propia.

Al examinar la representación gráfica de la serie de caudales máximos, estas señalan que en el periodo comprendido desde el año 2009 hasta mediados del año 2011, se encontraron los picos de flujo más altos anuales en cada una de las estaciones. Al igual que en la representación gráfica de los caudales mínimos anuales, en esta se puede apreciar una relación bastante similar en el comportamiento de las magnitudes de los caudales máximos registrados en cada una de las estaciones. Conjuntamente, esta representación concuerda con los eventos en donde las poblaciones ribereñas se encontraron en riesgo de inundación tales como las que se presentaron en octubre y noviembre del año 2017, las cuales conllevaron a un desalojo masivo de las poblaciones como La Candelaria, La Playa Renaciente, La Victoria y Yotoco (IDEAM, 2018).



*Figura 14* Serie de caudales máximos del río Cauca en el periodo comprendido desde el año 1970 hasta 2018. *Fuente:* Elaboración propia.

### Identificación de posibles causas o incidencias en las tendencias de las series de caudales máximos y mínimos anuales

Debido a la extensión del río Cauca, se presentan dos (2) secciones geográficamente establecidas para el monitoreo por parte del IDEAM (cuencas: alta y baja)(IDEAM, 2015). Además, dicha zonificación permite no solamente estudiar los caudales de este río, sino también asociarlos con los distintos escenarios presentados; en la **Figura 15** se presenta el esquema básico del río Cauca con sus principales afluentes. En el recuadro en color amarillo se presenta la zona de ubicación de la cuenca baja del río Cauca.



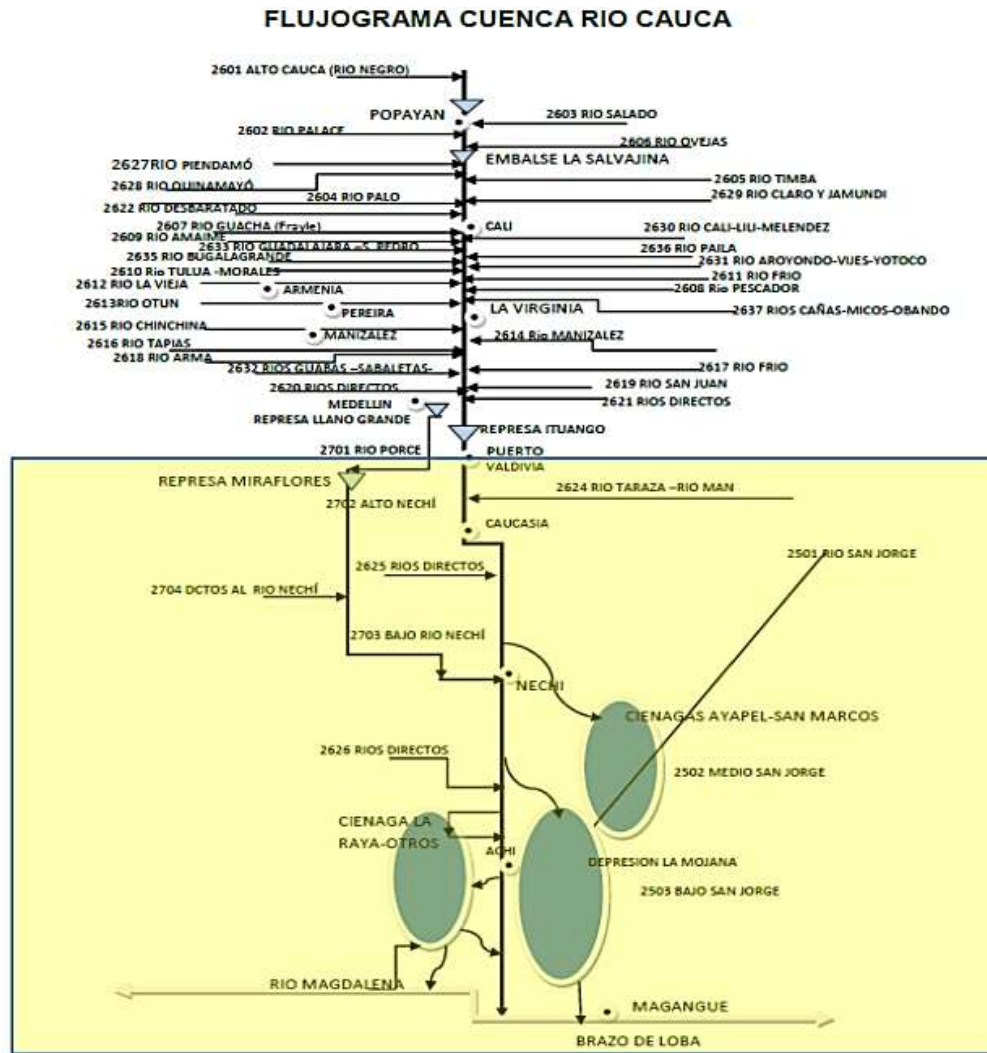


Figura 15 Flujograma del río Cauca. Fuente: IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Flujograma cuenca río Cauca. Subdirección de Hidrología, 2015

El río Cauca mantiene constantes variaciones de los caudales en los distintos tramos de la cuenca, esto se puede evidenciar al observar la *Figura 15*. Los incrementos de las magnitudes de los caudales del río a medida de su recorrido es válido asociarlo a los diferentes afluentes que se encuentran desembocando o aportando de manera significativa al recurso hídrico, además, los resultados de las tendencias e incidencias de variaciones se puede asociar principalmente a estos valores.



No obstante, el comportamiento también puede verse reflejado a los tipos de uso y cobertura del suelo pues, según el plan de ordenación y manejo de los suelos inmediatos a la cuenca del río Cauca, constan con un total de 44 tipos de cobertura agrupadas en 5 niveles y sus respectivos subgrupos; territorios artificializados (zonas urbanizadas, industriales o comerciales), territorios agrícolas, bosques o áreas seminaturales, áreas húmedas continentales y superficies de aguas continentales (IDEAM, 2017, p. 267).

Donde, en la zona alta de la cuenca existen más de 18000 ha de pastos limpios y zonas de cultivos cubriendo el suelo aledaño a la cuenca, esto se relaciona con la alta capacidad de absorción que tienen este tipo de suelos lo que ayuda a inferir que por tal motivo las series de datos máximos tienden a descender, debido a la absorción y uso del recurso para fines agrícolas (Duque-escobar, 2019).

A su vez, en la parte media del río Cauca se presenta una distribución en donde predomina los bosques fragmentados en su mayoría y territorios artificiales en su minoría, en el cual este último ocupa más de 17000 ha. Esto tiene una relación con la tendencia ascendente de los caudales respecto al tiempo ya que en las zonas de cobertura artificial se carece de infiltración de agua en el suelo y el recurso hídrico tiende a drenar en dirección hacia el río, formulando así incrementos en el volumen de flujo del río (Pérez-Valbuena et al., 2015).

## 7. Conclusión

En el estudio se analizó la variabilidad espacio temporal del río Cauca en el periodo comprendido desde el año 1970 hasta 2018. En esta investigación se identificó y cuantificó las tendencias en las series anuales de máximos y mínimos del río Cauca, cuya red hidrológica se encuentra ubicada en el territorio colombiano, y es el principal afluente del río Magdalena.

En las 16 series de datos se identificaron que para los caudales mínimos estaciones (Las Varas y Tres cruces), ubicadas en la cuenca baja del río Cauca, se identificaron con tendencias ascendentes y a su vez en las series de los máximos 6 de las 8 estaciones estudiadas fueron identificadas con conductas; en las cuales 3 estaciones ubicadas en la zona alta del río Cauca reflejaron tendencias descendentes y 3 estaciones ubicadas en la zona baja dieron como resultado tendencias ascendentes.

La variación en la magnitud de los caudales máximos y mínimos se asociaron espacialmente con los diferentes tramos del río ya que en este existen múltiples aportes del caudal generados por afluentes que desembocan en este, tales como los ríos Nechí, Man y Tarazá, entre otros, sin embargo el comportamiento también puede verse afectado por los tipos de cobertura del suelo; además se reconoció que las tendencias más pronunciadas, se encontraron en las estaciones localizadas en la cuenca baja del río (Margento y Las Varas) justo después de la represa del Hidroituango.

Los análisis presentados en el Estudio Nacional Del Agua 2018 (IDEAM, 2018) indican que la zona hidrográfica Magdalena–Cauca es de las que presenta mayor variabilidad hidroclimática y que las variaciones de los niveles y caudales tienen una gran relación de los comportamientos de los caudales con los fenómenos climáticos como en ENSO (Fases de El Niño/La Niña). Esta variación también fue detectada en esta investigación, ante la proporcionalidad de los caudales con la presencia de las fases del ENSO. Para años en donde hubo presencia de la fase El Niño se detectó

una reducción de los caudales mínimos anuales, mientras que para años en que se presentó la fase La Niña, hubo caudales máximos anuales más alto.

Este estudio es de utilidad para realizar pronósticos que ayuden a la elaboración de proyectos o estudios referentes a la cuenca del río Cauca. No obstante, este tipo de investigación se debe hacer periódicamente ya que el tiempo puede hacer desaparecer o invertir las tendencias en los caudales del río como respuesta a las intervenciones antrópicas sobre el cauce y/o la cuenca.

## 8. Referencias

- Alfaro, E. (2009). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 16(1), 60. h
- Álvarez, D. (2011). Análisis de Frecuencia de los Caudales Máximos Diarios en Ríos de Colombia Considerando las Fases del Fenómeno ENSO Germán Poveda. *XVII Seminario Nacional de Hidraulica e Hidrología*, 184–193.
- Atencio, A. (2018). Evaluación de las tendencias de los caudales medios, mínimos y máximos del río Guaviare. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(4), 2046–2069.
- Benavides, H. O. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam*, 1–102.
- Castaño, A., Urrego, L., & Bernal, G. (2010). Dinámica del manglar en el complejo lagunar de Cispatá (Caribe colombiano) en los últimos 900 años. *Revista de Biología Tropical*, 58(4), 1347–1366.
- Ceballos, J. L., Euscátegui, C., Ramírez, J., Cañon, M., Huggel, C., Haeberli, W., & Machguth, H. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*, 43, 194–201.
- Duque-G. (2019). *El Río Cauca en el desarrollo de la región*. 1–23.
- Hernández-Rodríguez, H., Návar-Cháidez, J. (2010). Tendencias en los caudales en ríos de Michoacán, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(1), 153–159.
- IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. In *Estudio Nacional del Agua 2014*.
- IDEAM. (2017). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca alto río Cauca*. 1–152.
- IDEAM. (2018). *Estudio nacional del agua*. [http://www.andi.com.co/Uploads/ENA\\_2018-comprimido.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf)
- López, P.,(2007). *Análisis de tendencia en series autocorrelacionadas*. February, 8.  
<http://www.ina.gov.ar/pdf/CRA-HSup-J-Tendencia series aurocorrelacionadas.pdf>
- Pérez, G. (2015). Río Cauca : la geografía económica de su área de influencia. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana ; No. 225*.

<http://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/3075>

- Pérez, R. (2016). ESTADO ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE TENDENCIA DE CAUDALES EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA. *IOSR Journal of Economics and Finance*, 3(1), 56.
- Poveda, G. (2002). Predicción de caudales medios mensuales en ríos Colombianos usando métodos no lineales. *Meteorología Colombiana*, 6, 101–110.
- Sedano, R. (2017). Influencia de la variabilidad climática y factores antrópicos en los extremos hidrológicos en el Valle Alto del río Cauca, Colombia. *Doctoral Thesis*, 211.  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/90579?show=full>
- Silva, A.(2017). Introducción al análisis no estacionario y modelado de variables hidrológicas. *Naghattini M. (Eds)*, 1.
- Van, L. (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. *Principles of Sediment Transport in Rivers , Estuaries and Coastal Seas*, 1, 1–17.