



ESTADO DEL ARTE DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE LA TENDENCIA DE LOS CAUDALES EN LOS RÍOS EN COLOMBIA

**Andrés Acevedo Acosta
Jazmín Rocío Jiménez Pescador
Wilmer Ferney Rodríguez Moque**

**Universidad La Gran Colombia
Facultad de Ingeniería Civil
Bogotá D.C.**

2016

ESTADO DEL ARTE DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE LA TENDENCIA DE LOS CAUDALES EN LOS RÍOS EN COLOMBIA

**Andrés Acevedo Acosta
Jazmín Rocío Jiménez Pescador
Wilmer Ferney Rodríguez Moque**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil**

**Asesor Disciplinar:
I.C. MSc Alberto Sánchez de la Calle**

**Asesor Metodológico:
Lic. Roy W. Morales Pérez**

**Universidad La Gran Colombia
Facultad de Ingeniería Civil
Bogotá D.C.**

2016

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 25 de Julio de 2016

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
2.	PLANTEAMIENTO PROBLEMA.....	6
3.	OBJETIVOS.....	7
3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	7
3.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	7
4.	JUSTIFICACIÓN	8
5.	METODOLOGÍA	9
5.1.	Métodos de búsqueda y recuperación documental.....	9
5.2.	Criterios de inclusión y exclusión documental.....	9
5.3.	Categorías de análisis.....	10
6.	CONTENIDO.....	11
7.	CONCLUSIONES.....	24
8.	REFERENCIAS.....	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tendencia de caudales medios anuales.....	6
Figura 2	Demografía en Colombia	8
Figura 3	Cambios de temperatura a nivel mundial.....	12

1. INTRODUCCIÓN

El agua superficial y subterránea son la parte fundamental del sistema de aprovechamiento de agua en Colombia, los usos principales son el abastecimiento y saneamiento público, sistemas de riego agrícola y diversas actividades industriales, en épocas recientes se está reconociendo el potencial uso de los ríos para deportes y actividades ambientales. Sin embargo, este recurso no es ajeno a las amenazas por la contaminación y la excesiva demanda que ejercen los diferentes usos. Según (Hernandez & Navar, 2010) en muchos lugares se usa el agua de estos sistemas con mayor rapidez que con el que puede reemplazarla la naturaleza.

Las aguas que discurren por la superficie de las tierras emergidas son muy importantes para los seres vivos, a pesar de que suponen una ínfima parte del total de agua que hay en el planeta. su importancia reside en la proporción de sales que llevan disueltas, muy pequeña en comparación con las aguas marinas. por eso decimos que se trata de agua dulce. En general proceden directamente de las precipitaciones que caen desde las nubes o de los depósitos que estas forman. Siguiendo la fuerza de la gravedad, los ríos discurren hasta desembocar en el mar o en zonas sin salida que llamamos lagos. El régimen hidrológico natural de los ríos ha sido controlado progresivamente para satisfacer las crecientes demandas de recurso hídrico, esto debido al crecimiento exponencial de la población a nivel nacional, las corrientes fluviales proporcionan valiosas utilidades que han cautivado históricamente a las sociedades de manera distinta, dependiendo de las prioridades estipuladas y de la capacidad tecnológica del momento. no obstante es de gran importancia validar el compromiso humanitario con el agua, a nivel global en donde se genere una responsabilidad única por el recurso, que prevalezca por encima de todo como prioridad fundamental la protección del agua.

Desde hace décadas, los investigadores afirman que el acceso al agua limpia será el mayor problema ambiental del presente siglo (Postel & al, 2000). Un estudio del principio de milenio preveía que si los patrones de consumo de la época continuaban al mismo ritmo, al menos 48% de la población mundial vivirá en cuencas de agua desabastecidas por sobreuso y contaminación en el año 2025 (World Resources Institute, 2000).

En los últimos años la manera de mirar a nuestros ríos ha cambiado radicalmente. Ciudadanos, gestores, y el propio legislador, han asumido una realidad a la que se le venía dando la espalda: la gestión de los recursos hídricos en todas sus dimensiones –sociales, políticas, técnicas y económicas-, debe estar supeditada al mantenimiento de la funcionalidad ambiental del río como ecosistema y como parte esencial del macrosistema ambiental de las comarcas por las que discurre. Algunos otros factores, como las exportaciones del agua, el rápido crecimiento y la concentración de la población en zonas urbanas y el cambio climático, aumentan la demanda de nuestra sociedad por las aguas superficiales y subterráneas.

2. PLANTEAMIENTO PROBLEMA

En la actualidad la ausencia de estudios sobre las tendencias de los caudales en los ríos de Colombia son deficientes, existen carencias significativas en la toma de registros, hace falta una mayor cobertura con una adecuada instrumentación hidrológica, estos elementos dificultan el estudio y posterior análisis del comportamiento que van a tomar los caudales a lo largo del tiempo e influyen en la manera en la cual se toman medidas en los aspectos concernientes a la infraestructura hidráulica, prevención de riesgos y proyección de eventos naturales que puedan afectar la población.

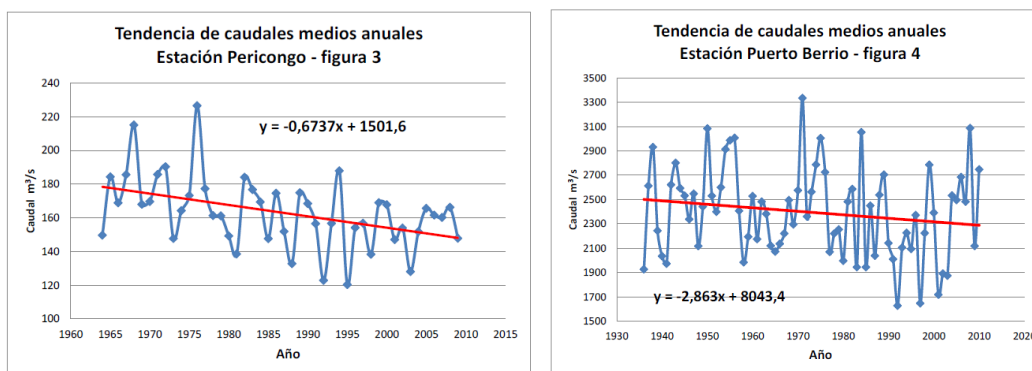


Figura 1 Tendencia de caudales medios anuales.
Fuente: (Cortes Maldonado, 2013)

Como lo muestran las figuras anteriores los regímenes de caudales en los ríos colombianos se han venido deteriorando rápidamente por incontrolladas acciones antrópicas. Se hace referencia principalmente a los asentamientos irregulares tala de bosques la práctica de la agricultura mecanizada, la quema de rastrojos como parte de las tareas agrícolas, la minería, la construcción de obras públicas y privadas sin mayores precauciones ambientales, los desarrollos urbanísticos, industriales y recreacionales entre otras acciones sociales, que en el plano teórico se señalan como causas o graves alteraciones del régimen de escurrimiento en una cuenca hidrográfica.

El deterioro y la afectación no son evidentes de manera cuantitativa confiable ya que no hay antecedentes de tendencias de caudales para las cuencas hidrográficas en Colombia. Son muchos los eventos que se presentan anualmente en forma de inundaciones, desbordamiento de ríos entre otros, que registran pérdidas materiales por valor en promedio entre 35 y 50 millones de dólares anuales, con más de 65000 personas damnificadas y alrededor de 150 vidas humanas perdidas, lo que nos indica que es indispensable implementar instrumentación y registros de tendencias de caudales, que sirva de contingencia estadística para contrarrestar los desastres y a su vez el óptimo y adecuado aprovechamiento del recurso hídrico.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar nuevas comprensiones sobre las explicaciones e interpretaciones que los teóricos e investigadores han construido sobre las tendencias de los caudales de los ríos en Colombia, dando un enfoque crítico a los desarrollos existentes en esta área para favorecer la identificación de tendencias y propiciando el planteamiento de perspectivas y líneas de trabajo en el campo de la hidrología.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Obtener datos relevantes acerca de los enfoques teóricos y disciplinares de las tendencias de los caudales de los ríos en Colombia.

Describir el estado de desarrollo alcanzado en torno a los recursos hidrológicos de nuestro país.

Ampliar el conocimiento sobre la tendencia de los caudales con el fin de aportar argumentos que contribuyan a justificar y definir el alcance de una futura investigación.

Conocer las perspectivas metodológicas de las investigaciones realizadas por diferentes autores y estudiar la evolución del problema.

Generar nuevas interpretaciones y posturas críticas en torno a la realidad colombiana en el mundo de los recursos hídricos.

4. JUSTIFICACIÓN

El fenómeno del calentamiento global causado por diversos factores entre los cuales se encuentran: la excesiva disposición de gases que provocan el efecto invernadero en la atmósfera, lo cual ocurre por la quema de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón, el gas, la gasolina, y demás productos derivados del crudo, aunado a las actividades agrícolas y ganaderas que durante las últimas décadas han deforestado grandes extensiones de selva en el país, provocan que de los patrones de circulación oceánica y atmosférica de gran escala, y del ciclo hidrológico global, provocando eventos hidrometeorológicos más intensos. Por otro lado los procesos de desarrollo humano están afectando el desarrollo del ciclo hidrológico en dos aspectos fundamentales, el primero es causado por la construcción de grandes urbanizaciones, plazoletas y vías, que impiden que en las ciudades se presente la infiltración del agua a través del suelo, lo cual causa que la recarga de los acuíferos no se genere y evita el mantenimiento de los niveles de los ríos en épocas de estiaje, el segundo aspecto se presenta por la rápida disposición del agua lluvia en los efluentes por las cunetas de las vías y los sistemas de alcantarillados que hacen que se incrementen los caudales máximos y permiten que las crecidas sean mucho más destructivas.

Es importante detectar la situación actual de las fuentes de agua, ya que el aumento de la población (Figura 2) ha provocado una disminución en la disponibilidad del recurso hídrico, tanto por su consumo como por la contaminación de los cauces, todos los asentamientos humanos dependen de la cantidad y la calidad del agua que se usa tanto para consumo, como para diversos procesos industriales y para sistemas de riego, es por esto que (Martinez & Fernandez) citado por (Madroleño & Maflar, 2013), expresa que “es prioritario el mantenimiento de la funcionalidad ambiental del río como ecosistema y como parte esencial del macrosistema ambiental”, entendiendo la importancia de los caudales en la preservación de los hábitats acuáticos, de forma que sean suficientes para flora y fauna y que a la vez se asegure el aprovechamiento ecológico en los requeridos por la sociedad.

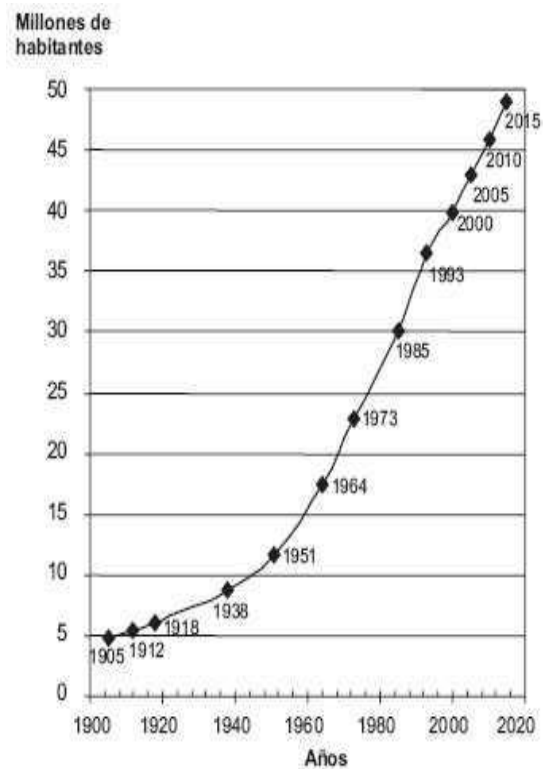


Figura 2 Demografía en Colombia
Fuente: (Carmona J. , 2005)

5. METODOLOGÍA

5.1. Métodos de búsqueda y recuperación documental

El diseño metodológico está enfocado en la descripción de los elementos que se implementaron para realizar la investigación. Al seleccionar y plantear el diseño buscamos maximizar la validez y confiabilidad de la información y reducir los errores en los resultados, iniciados a partir de documentación específica referenciadas por el ingeniero Alberto Sánchez de la Calle que gracias a su gran experiencia puntualizo el criterio que se requiere para abordar el tema de análisis de tendencias de caudales, no obstante es de vital importancia recurrir a planteamientos elaborados en tesis que formulan puntos de vista que registran argumentos que sirven de análisis para conformar nuestro argumento. La información hallada representa confiabilidad y consistencia, coherencia y estabilidad de la información recolectada. Los datos de una investigación son confiables cuando estos son iguales al ser medidos en diferentes momentos, o por diferentes personas o por distintos instrumentos. La información encontrada nos dio Validez en cuanto refiere al grado en que se logra medir lo que se pretende medir. Esta característica es importante, pues es requisito para lograr la confiabilidad de los datos. Si una información es válida, también es confiable. Un dato puede ser confiable pero no válido.

Para la investigación cuantitativa el diseño representa una guía bastante estructurada y exacta de cómo se va a realizar la investigación. Se elabora antes de iniciar la etapa de recolección de datos y es poco flexible en cuanto a la realización de modificaciones una vez iniciada esta etapa. En la investigación cualitativa, de la esta implementado el documento, el diseño toma un significado un tanto diferente, en el sentido que es una planificación más flexible. Indica la pauta o las grandes líneas de acción Diseño metodológico pero no plantea exactamente cómo se va a realizar cada aspecto. Por esto se le denomina "diseño emergente", el cual permite ir explorando el fenómeno de estudio y modificando el camino y los métodos según sea necesario

5.2. Criterios de inclusión y exclusión documental

Análisis de los criterios específicos de la zona de estudio.

Los criterios específicos y de la zona de estudio, además de los correspondientes a los diferentes tipos de aprovechamientos, son muy importantes en el establecimiento de un régimen de caudal. Esto es, los impactos generados por los proyectos dependen de las características del aprovechamiento y de las particularidades naturales de la zona de ubicación.

Análisis a los criterios hidrológicos

Los criterios hidrológicos se refieren a las características de la información hidrológica, la agregación temporal, magnitud, duración y frecuencia de los caudales ambientales, que sin dudas se relacionan a los caudales mínimos de las corrientes. En general, como lo indican diferentes autores, la información hidrológica en Colombia tiene una mala calidad y cobertura. Sin embargo, los autores de la metodología exponen que la información utilizada para dichas estimaciones debe de ser de una calidad difícil de encontrar en nuestro país. Además de esto, para definir la magnitud, duración, frecuencia del régimen de caudales ambientales se basa en copias de metodologías utilizadas en otras latitudes, que tienen objetivos ambientales, de desarrollo y condiciones naturales muy diferentes a las presentes en el país, además que se enfocan en tipos específicos de proyectos (con embalse de regulación).

5.3. Categorías de análisis

Tendencia: Una serie temporal o cronológica es una secuencia de datos, observaciones o valores, medidos en determinados momentos del tiempo, ordenados cronológicamente y normalmente, espaciados entre sí de manera uniforme. El análisis de series temporales comprende métodos que ayudan a interpretar este tipo de datos, extrayendo información representativa, tanto referente a los orígenes o relaciones subyacentes como a la posibilidad de extrapolar y predecir su comportamiento futuro¹. De hecho, uno de los usos más habituales de las series de datos temporales es su análisis para predicción y pronóstico. Por ejemplo de los datos climáticos, de las acciones de bolsa, o las series pluviométricas. Resulta difícil imaginar una rama de las ciencias en la que no aparezcan datos que puedan ser considerados como series temporales.

Caudal: Los caudales son generados por la interacción existente entre las precipitaciones que caen sobre su cuenca vertiente y las características propias de la cuenca²⁵. Conocer los datos de caudales es útil para el diseño de obras hidráulicas las cuales comprenden presas de embalse, captaciones, conducciones, estructuras de control, vertederos de excesos, tanques de almacenamiento y sistemas de distribución. Las magnitudes de los caudales superficiales que pasan por la estación, y sus variaciones con el tiempo, representan las respuestas de la cuenca a las lluvias que caen sobre ella. Los caudales pertenecen al régimen de flujo permanente debido a que su magnitud depende de las lluvias que caen en su cuenca. La forma de tener un control estricto del comportamiento de los caudales en el tiempo se representa mediante las hidrógrafas².

¹ RAMOS, Josneidy. "Análisis de series de tiempo". [en línea] <http://www.es.scribd.com> recuperado el 8 de Julio de 2016

² SILVA, Gustavo. Hidrología básica. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.1998.p 75.

6. CONTENIDO

El balance de la evidencia muestra que hay cambio climático global por la acción antropogénica. Este cambio climático tiene repercusiones ambientales, ecológicas, sociales y económicas de primer orden. Uno de los efectos hidrológicos y climáticos previstos del cambio climático es la perturbación del ciclo hidrológico en espacio y tiempo. La ocurrencia de eventos extremos más frecuentes y más intensos es una de las mayores preocupaciones hidrológicas, por sus implicaciones climáticas y su relación con factores de riesgo y vulnerabilidad social.

Algunas predicciones sugieren que el cambio climático global causaría eventos más fuertes y más frecuentes. El fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) es el modulador de primer orden en la hidroclimatología Colombiana a escala de tiempo interanual, y por ello la pregunta por la evolución temporal del clima se hace más importante. Algunas de las predicciones hasta hoy realizadas son todavía preliminares y no involucran todas las posibles retroalimentaciones del sistema, sin embargo a medida que se avanza en el conocimiento de la física de los fenómenos, las predicciones se hacen más confiables.

Estudios previos sobre la existencia de cambio climático en Colombia presentan resultados cuantitativos consistentes: Hense et al. (1988) encontraron una tendencia de $+0,016^{\circ}\text{C/año}$ en las temperaturas medias anuales de la troposfera entre 200 y 700 hPa para Bogotá durante el período 1965-1984 ($+0,033^{\circ}\text{C/año}$, para el período diciembre - agosto), asociado a tendencias crecientes en la humedad relativa promedio anual de $0,27\%/año$ en los 700 hPa; Hoyos (1996) y Hastenrath y Ames (1995) encontraron un retroceso en todos los glaciares de montaña de Colombia y el Perú; Kapala et al (1994) ha identificado tendencias crecientes en la evaporación en áreas de los océanos Pacífico y Atlántico, a ambos lados de Panamá y para el período 1947-1989 se reporta un incremento $7,6 \text{ W/m}^2$ para la zona del océano Pacífico al sur de Panamá y de 16 W/m^2 para la zona del mar Caribe al frente de las costas de Colombia y Smith et al. (1996) realizaron un estudio para la detección de señales del cambio climático en Colombia mediante el análisis de tendencia y homogeneidad en las series hidrológicas en todo el país. En esta línea de investigación, el Posgrado en Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín, ha venido desarrollando una amplia investigación en búsqueda de tendencias y cambios en la media y la varianza de series hidrológicas de precipitación, evaporación, caudal y temperatura mínima, media y máxima (Mesa, Poveda y Carvajal, 1997). Los resultados de tal estudio muestran cambios estadísticamente significativos en dichas series, como aumentos en las temperaturas mínimas y medias, tendencia decreciente en los caudales de las principales cuencas colombianas y aumentos en la humedad atmosférica y en la evaporación potencial; las lluvias no presentan señales claras de cambio climático. Dichos resultados son consistentes con un escenario de calentamiento global, incluyendo corrimientos importantes dentro del año, de las temporadas de altas y bajas lluvias en Colombia (Pérez et al., 1998).

No sólo los fenómenos naturales de origen climático pueden afectar la disponibilidad hídrica. La actividad del hombre, que demanda cada vez más todo tipo de recursos

naturales ha comenzado a comprometer el recurso clima en la escala global (IPCC, 1995). Está comprobado que estas actividades están aumentando la concentración de los gases que intensifican el efecto invernadero de la atmósfera (dióxido de carbono, metano, clorofluorocarbonos, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre entre los más importantes).

La temperatura del planeta se ha incrementado en el último siglo en cerca de 0,5°C, y científicamente se ha comprobado que buena parte de este aumento es atribuible al efecto invernadero de origen antropogénico (IPCC, 1995). Si el ritmo del crecimiento de las emisiones continúa sin ningún tipo de limitación, se estima que para el año 2025 la temperatura media del planeta se incrementaría en 1°C y para fines del próximo siglo en 3°C. Los incrementos de la temperatura no serán homogéneos sobre el planeta y como consecuencia, todo el sistema climático se alteraría, modificando los niveles de precipitación media en muchas regiones e incrementando los eventos extremos generadores de inundaciones y sequías. La figura siguiente ilustra los cambios en la temperatura a nivel mundial.

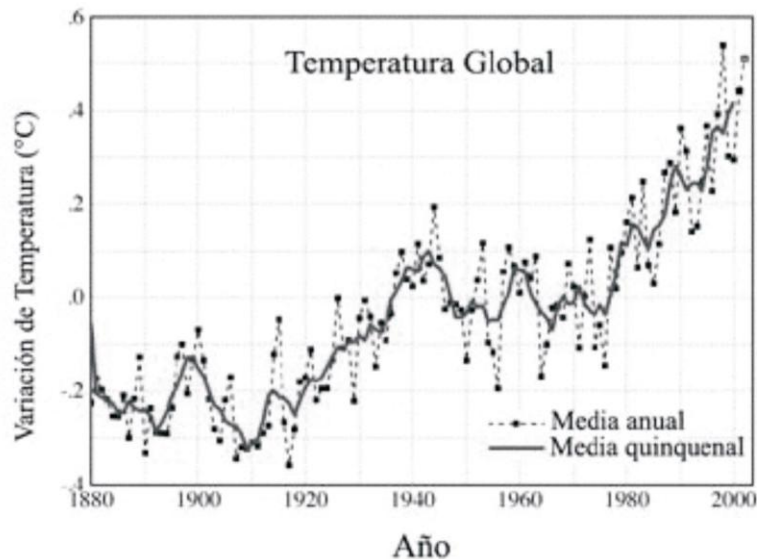


Figura 3 Cambios de temperatura a nivel mundial.
Fuente: (Prodiversitas, 2015)

Un cambio climático global de la magnitud y velocidad prevista podría provocar alteraciones importantes en la biosfera conduciendo a migraciones y extinciones de numerosas especies y al aumento del nivel del mar. Estos cambios perjudicarían también a las actividades agropecuarias y a la generación hidroeléctrica.

Los modelos climáticos computacionales anticipan que el ciclo de evapotranspiración se acelerará a nivel mundial y esto implica que lloverá más, pero que las lluvias también se evaporarán más rápidamente, volviendo los suelos más secos durante los períodos críticos de la temporada de cultivo (Prodiversitas, 2005). Nuevas sequías, o más intensas, en particular en los países más pobres, podrían disminuir el abastecimiento de agua potable hasta el punto de amenazar la salud pública.

Sin embargo la potencialidad de las corrientes fluviales ha fascinado al hombre por su capacidad para satisfacer las demandas crecientes del recurso hídrico superficial a escala temporal y espacial. Actualmente la idea de que los caudales naturales de un río deban reservarse para preservar el funcionamiento adecuado del ecosistema resulta utópica, al menos en sociedades que progresan. Una ordenación eficaz del recurso hídrico se caracteriza por ser racional y ecosistémica, con una gestión fundamentada en un régimen de caudales ecológicos (RCE) que compagina los usos del agua asegurando una condición aceptable del ecosistema.

Las corrientes fluviales proporcionan valiosas utilidades que han cautivado históricamente a las sociedades de manera distinta, dependiendo de las prioridades estipuladas y de la capacidad tecnológica del momento. El régimen hidrológico natural de los ríos ha sido controlado progresivamente para satisfacer las crecientes demandas de recurso hídrico a escala temporal y espacial, asociadas al ámbito agropecuario, la generación hidroeléctrica y el abastecimiento humano e industrial. La regulación de caudales se realiza mediante las intervenciones estructurales ligadas principalmente a los trasvases, derivaciones, presas, minicentrales e infraestructuras asociadas. Respecto a las emblemáticas grandes presas, el último informe de la Comisión Mundial de Presas (WCD, 2000) contabiliza más de 40.000 en el mundo, unas 980 en Suramérica y 49 en Colombia. Los servicios que proporcionan estas obras en el país son indiscutibles: Generan una hidroelectricidad que supone el 5,7% de la oferta energética nacional (IDEAM, 2001) y cubren el 68% del consumo eléctrico global (WCD, 2000); además abastecen de agua para el consumo doméstico y las actividades agrícolas e industriales; amortiguan las crecidas en cuanto a la intensidad y duración; y por último posibilitan actividades lúdico-recreativas.

La modificación del régimen hidrológico ligada a las utilidades anteriores induce alteraciones significativas en la dinámica geomorfológica y en la integridad del ecosistema fluvial. Es conocido que el caudal es una variable esencial que integra muchos procesos ambientales y conforma el patrón estructural y funcional del ecosistema.

La variación del caudal a escala temporal y espacial determina los procesos ecológicos fundamentales del río y su ribera asociada: la disponibilidad, persistencia y conectividad del hábitat fluvial; el grado de competencia y prelación entre especies; y la tasa de entrada, transformación y flujo de nutrientes y materia orgánica.

Un régimen de caudales se define por cinco componentes que incluyen la magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y tasa de variación (Poff y Ward, 1989): la alteración de los valores naturales de cualquiera de ellos perturba el funcionamiento, la estructura o la composición del ecosistema fluvial. Por otra parte, no es raro que una corriente regulada se encuentre también contaminada, dos adversidades evitables cuyo efecto sinérgico menoscaba dramáticamente el estado ecológico del sistema fluvial.

La sociedad colombiana conoce con diferente grado de aproximación la información aportada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM en su divulgado "Estudio nacional del agua" (IDEAM, 2000), donde se destaca que las condiciones hidrológicas del país determinan una de las mayores ofertas hídricas del mundo (58 L/s.km²), valor que triplica el promedio de Latinoamérica y sextuplica la media mundial. Sin embargo, el análisis del Índice de escasez para aguas superficiales (IES) que incluye el estudio revela que, paradójicamente, cerca del 50% de la población urbana tiene riesgo de desabastecimiento en años hidrológicos intermedios y hasta un 80% durante sequías prolongadas. El ámbito científico, y progresivamente la sociedad colombiana en su conjunto están demandando la práctica de una nueva cultura del agua que defienda la gestión integral, ecosistémica y solidaria del recurso hídrico. Esta nueva filosofía propugna un aprovechamiento racional de los bienes del río que salvaguarde valores intrínsecos cada vez más valorados, como son el ecológico, cultural, estético, recreativo y deportivo. Para propiciar este avance es indispensable que los planes de ordenamiento de cuencas incorporen como una restricción inicial un régimen de caudales ecológicos (RCE) en los tramos regulados, conformado por los valores del flujo mínimo capaz de mantener el funcionamiento, la composición y la estructura del ecosistema fluvial en unos niveles aceptables y coherentes con la dinámica natural.

Actualmente las directrices para fijar los RCE en Colombia se concretan con claridad en el Art. 21 del proyecto de Ley del Agua (Ministerio de Ambiente, 2006), que designa al IDEAM para diseñar los lineamientos definitivos en esta materia. Hasta que eso se produzca, se plantea un procedimiento hidrológico con una concepción simple del sistema fluvial que considera como caudal ecológico "...el valor de permanencia en la fuente durante el 90% del tiempo...". Anteriormente la Resolución 0865 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004), que detalla la metodología de cálculo del Índice de escasez, plantea dos métodos hidrológicos para calcular el caudal ecológico. El primero se basa en el Estudio Nacional del Agua (2000), y computa el caudal medio diario promedio de 5 a 10 años cuya duración es igual o mayor del 97,5%, que se comprueba corresponde a un período de retorno asociado de 2,3 años. El segundo enfoque vincula el caudal mínimo a un porcentaje aproximado al 25% del caudal medio mensual multianual menor de la corriente estudiada.

Dos aspectos básicos para la correcta gestión ecosistémica del agua mediante RCE son: La selección de un procedimiento de cálculo avanzado que integre los requerimientos ecológicos del ecosistema y esté ampliamente contrastada científicamente; así como la estandarización del proceso operativo para la caracterización fluvial, el procesamiento de los datos, la interpretación de los resultados y el análisis de las alternativas. Aprender de los errores cometidos en otros países posibilita la elección del método idóneo para asignar caudales ambientales en Colombia. La tendencia a escala mundial se ha alejado de soluciones rápidas con percepciones simplistas del sistema fluvial, y se centra en esquemas predictivos cimentados en modelos hidrobiológicos como IFIM, capaces de generar soluciones que conjugan los intereses conservacionistas y desarrollistas alrededor de los ríos.

El objeto de estudio lo definimos como estado del arte, la naturaleza y el punto al cual se ha llegado a las tendencias de caudales, que son definidos a partir de los caudales medios multianuales, sabiendo que la pendiente de la regularidad de los registros tomados están dados bajo la pendiente de 2%, que indica que es estable y mantiene la regularidad deseada para dar el uso pertinente para dar al análisis.

La definición de los caudales además de multianuales las series de caudales medios, medios mensuales y mínimos medios diarios

EL complemento de series de caudales medios puede hacerse por el procedimiento de las correlaciones.

Estas correlaciones podrán ser simples o múltiples, graficas o analíticas, según sea la naturaleza del problema que se desea resolver y la cantidad y calidad de la información disponible.

El concepto de correlación puede explicarse como aquel mediante el cual se halla la vinculación existente entre dos o más variables aleatorias. Una vez establecida la correlación, ella se usa para explicar, en forma parcial, La variación total de una variable en función de la variación de otras variables aleatorias involucradas, La correlación define el grado de vinculación entre dos o más variables aleatorias.

La regresión es la ecuación que presenta la correlación entre dos o más variables aleatorias

Para el caso del escurrimiento interesan dos tipos muy frecuentes de correlación en hidrología.

Correlaciones causa-efecto. El ejemplo mejor de este tipo de correlaciones es el vínculo que hay entre precipitaciones y escurrimiento. Se busca establecer la relación entre una o varias causas y su correspondiente efecto.

Correlaciones entre variables aleatorias que tienen causas iguales o similares. Los caudales de ríos de cursos adyacentes frecuentemente presentan este tipo de correlación.

Los modelos de sistema distribuido permiten utilizar las salidas de un cierto número de subsistemas, que pueden ser de bloque, aplicados a pequeñas extensiones, para obtener una relación única entrada-salida. (Sanchez & Estrada, 2015)

Las series artificiales de caudales anuales, mensuales y mínimos diarios

Es de fundamental importancia poder contar con información directa, basada en mediciones, del escurrimiento. Sin embargo, es posible que se requiera situada construir una serie de caudales para una sección de una corriente situada en una cuenca con numerosos puestos de medida y con información directa abundante, en el cual no se hayan tomado mediciones. Las relaciones de generalización, pueden ser usadas para generar la serie deseada. El procedimiento resulta plenamente satisfactorio si el fin perseguido es de carácter general. (Sanchez & Estrada, 2015)

Para el desarrollo de una metodología clara de análisis, de las tendencias de los caudales es indispensable tener claro que en Colombia los ríos se afectan de gran manera por el desorden y la poca argumentación estadística, en toma de datos por parte de los estamentos del estado, además de su poca atención al estudio y protección ambiental de los afluentes, y el uso indiscriminado del recurso.

Hasta el momento no se conoce la tendencia de los caudales en los principales ríos del país y existe la creencia popular que los caudales vienen disminuyendo en las últimas décadas y que las cuencas hidrográficas están cada vez más deterioradas, se sabe que estas cuencas son unidades naturales que transforman la precipitación en caudal, y por lo tanto las tendencias de los caudales son un indicador del estado de la cuenca. (Sanchez & Estrada, 2015).

Son muchos los eventos que se han presentado en los últimos tiempos, tal es el caso de los cuatro ríos que surten de agua a las 22 comunas de Cali tienen disminuciones en sus caudales como consecuencia de las altas temperaturas y del déficit de lluvias.

Tal es el caso de los ríos Cali, Cauca, Pance y Meléndez, los cuales registran disminuciones hasta del 66 % en sus caudales. Ese es el caso del río Meléndez, que a su paso por la bocatoma de la planta La Reforma está en 400 litros por segundo, cuando su promedio histórico para el año 2015 es de 1200 litros por segundo.

Es claro que Colombia al estar ubicada en los trópicos, es un país con gran probabilidad de afectación por el cambio climático y la ocurrencia de fenómenos que en el transcurso del tiempo se han desequilibrado pasando de este estado a mostrar extremos, tal es el caso de elevadas temperaturas, con prolongadas sequías que afectan a gran parte del país, por otro lado se presenta las fuertes y prolongas lluvias que se vuelven incontrolables, ya que la topografía de nuestro país presenta grandes montañas que junto con las grandes premeditaciones propician los derrumbes y deslizamientos, cuando no hay lluvia el sol y las altas temperaturas, afectan también el equilibrio ya que los embalses bajan su capacidad, aumentan los incendios y los animales mueren al no tener acceso a afluentes.

Una de las iniciativas para mantener el equilibrio es de vital importancia la construcción de embalses y tanques de almacenamiento, con el que su principal función está en aprovechar las altas precipitaciones, captando este caudal de tal forma que sea aprovechable cuando la temporada seca llegue.

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 del 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 su mejor calidad de vida. (Sanchez & Estrada, 2015).

Es claro entender que un embalse es el lugar donde se reúnen grandes cantidades de agua producida por la construcción de una represa sobre el lecho de un río, la cual cierra parcial o totalmente su cauce.

Los mismos, se construyen para regular el caudal de un río, almacenando el agua de los períodos húmedos para utilizarlos durante los períodos más secos; para la generación de energía eléctrica; para el riego de cultivos; para el abastecimiento de agua potable para la población (consumo humano); para el uso industrial; para permitir la navegación; para diluir sustancias contaminantes; para contener y atenuar los caudales extremos de las crecidas (función de regulación de crecientes) y para crear espacios de esparcimiento y deportes acuáticos. No obstante en los últimos tiempos se ha llegado puntos que no son suficientes ya que la demanda del precioso líquido es muy grande, además de que la población no da un uso adecuado y responsable.

Existen variaciones elevadas entre los caudales de un año y otro en gran mayoría de las estaciones analizadas, por lo que se hace casi imposible predecir a futuro, el comportamiento de los mismos. Es así como se hace indispensable diseñar las estructuras hidráulicas con un factor de seguridad alto, ya que nunca se sabe cuándo se presentara un caudal demasiado grande y por ende peligroso para los pueblos rivereños y para la estabilidad de las obras. (Sanchez & Estrada, 2015).

Los meses con mayores caudales son abril, mayo, junio, julio y Diciembre, mientras los de menos caudal son enero, febrero y septiembre.

La climatología colombiana es compleja, debido a sus características de relieve, posición geográfica y exposición a diversos eventos de mesoescala. La cadena de los Andes, va desde la dirección sur-suroeste hacia al norte noreste y cubre el tercio occidental del país, se divide en tres estribaciones distintas en el sur del país, formando valles interandinos. Los picos más altos, aproximadamente 5000 m s.n.m, están en la Cordillera Central. Las cordilleras occidental y central comienzan a disminuir en altura cerca de 5°N, y casi desaparecen en los 8°N. Hay tres vertientes, la oriental descarga a los ríos Orinoco y Amazonas, la central entre las cordilleras oriental y central al río Magdalena, y la occidental entre las Cordilleras Occidental y Central al río de Cauca, a su vez afluente del río Magdalena

Precipitación La zona de confluencia intertropical (ZCIT) está definida como una estrecha banda zonal de vigorosa convección que se manifiesta por el desarrollo de cúmulos y señala la convergencia entre el aire de los hemisferios norte y sur. En la ZCIT los vientos Alisios del noreste, originados como un flujo alrededor de la alta del Atlántico Norte, se reúnen con los vientos Alisios del sureste, formados como un flujo alrededor de las altas del Pacífico Sur y Atlántico Sur. El flujo proveniente de la alta del Pacífico Sur rutinariamente cruza el Ecuador y se recurva hacia el Oriente, en tales casos se conocen como los suroestes u oestes ecuatoriales, tal como se aprecia frecuentemente sobre la costa pacífica colombiana. La penetración de este aire depende de la época del año y de la localización de la alta del Pacífico Sur. Debido al flujo convergente, la ZCIT es una zona de máxima nubosidad y lluvia (Ideam, 2005). Teniendo en cuenta el diagnóstico elaborado para la Política

Nacional del Recurso Hídrico (MAVDT, 2010) con base en estimaciones del Ideam et al. (2004), en promedio en Colombia la precipitación media anual es de 3.000 mm con una evapotranspiración real de 1.180 mm y una escorrentía media anual de 1.830 mm. Las menores lluvias, teniendo en cuenta los promedios, se presentan en la alta Guajira, con totales anuales de 500 mm o menos. Los núcleos máximos se registran en la región Pacífica con valores de más de 10.000 mm al año. La región Caribe presenta lluvias con 500 y 2.000 mm con un gradiente muy definido en dirección sur. La región Andina posee una gran complejidad pluviométrica, con lluvias relativamente escasas (menos de 2.000 mm) a lo largo de la cordillera oriental y en los valles del Alto Magdalena y Alto Cauca, además de núcleos máximos de 3.000 a 5.000 mm en la zona media de los valles de los ríos Magdalena y Cauca. En la Orinoquia generalmente predominan las lluvias de 2.000 a 3.000 mm anuales en la parte central, mientras en el piedemonte pueden observarse registros hasta de 6.000 mm, incrementándose tales valores en algunas cuencas hacia las partes medias de la cordillera. En el extremo norte de Arauca se registra un comportamiento diferente, con lluvias menores a 1.500 mm. Por su parte, la mayor proporción de la Amazonia recibe lluvias de entre 3.000 y 4.500 mm por año mientras que la región Pacífica se ubica entre los 3.000 y 12.000 mm anuales (Ideam et al., 2004). En San Andrés la precipitación anual es de alrededor de 2000 mm por año con los mayores valores de alrededor de 300 mm/año en los meses de octubre y noviembre y meses más secos en febrero y marzo.

La gran cuenca hidrográfica cauca, atraviesa más de 180 municipios en los departamentos del cauca, valle del cauca, Risaralda, caldas, Antioquia, córdoba, sucre, y bolívar. Su red hidrográfica satisface las necesidades hídricas no solo de la población ya mencionada, sino que junto con la cuenca hidrográfica de magdalena cubren más de la mitad de la población colombiana que precisamente se haya asentada en estas cuencas. La gran cuenca del cauca tiene una superficie aproximada de 63.300 km² y equivale al 6% del territorio colombiano. Debido a la gran importancia de esta cuenca hidrográfica para el proceso del país, es indispensable conocer el comportamiento o cambios que pueda tener su caudal, ya que se estima que este podría disminuir, lo que ocasionaría grandes inconvenientes para la comunidad que se beneficia de esta riqueza natural.

La cuenca hidrográfica cauca ocupa dentro del contexto nacional un lugar estratégico y exponencial, puesto que en ella se localizan la industria azucarera, la mayor parte de la zona cafetera, las zonas de desarrollo minero y agropecuario de Antioquia y el bajo cauca y un sector significativo de la industria manufacturera del occidente colombiano. Por la importancia de la zona, se tienen innumerables estudios proyectados para satisfacer las necesidades de los sectores industriales, entre los que cabe anotar el potencial hidroenergetico que se estima en 10000 megavatios.

Dentro de la cuenca se encuentran ubicadas dos de las ciudades más pobladas del país, tres de las consideradas intermedias y cinco que superan fácilmente los 100.000 habitantes. Se estima que la población proyectada a 1995, lo cual equivale al 25.5% de la población total del país.

Adicional a esto en el campo de la ingeniería civil este estudio sería de gran apoyo técnico, ya que la tendencia de los caudales obtenida en dicha investigación daría una gran visual del estado hídrico de la cuenca hidrográfica cauca en caso que se planifique alguna obra hidráulica en este territorio. De esta forma se podría determinar si es factible la ejecución de dicho proyecto de infraestructura hidráulica, o por el contrario sería perjudicial en términos ambientales, económicos, sociales entre otros, lo que permitiría optar por una alternativa que pudiese encontrar un equilibrio entre las partes. Si el resultado final de todo el estudio arrojara que los regímenes del caudal en la cuenca hidrográfica cauca.

Como se dijo anteriormente los caudales medios en el río Magdalena están tendiendo a disminuir, lo cual afecta directamente la disponibilidad del recurso hídrico en algunas de las principales cabeceras municipales de la Región Andina del país, nuevas sequías, o más intensas, ocurridas particularmente en las zonas más pobres, provocando desabastecimiento de agua potable hasta el punto de amenazar la salud pública (Prodiversitas, 2015), puede pensarse que los fenómenos macroclimáticos ENSO y NAO podrían estar relacionados, a lo cual (Velasco & Granados, 2006) manifiestan:

[...] podría causar alarma que, de 40 estaciones, 26 estén presentando algún grado de correlación negativa con el fenómeno ENSO (mientras el ENSO se intensifica, el caudal disminuye). Esto quiere decir que el índice MEI explica en parte la ocurrencia de disminuciones de caudal. Sin embargo, es necesario mirar con mucho cuidado estos resultados, teniendo en cuenta que solamente cinco de ellos poseen un nivel de confianza mayor al 90%. Esto sugiere que para las estaciones de Puente Garcés que pertenece al Río Suaza, Puente Santander, Purificación y Angostura, que pertenecen a la corriente del Río Magdalena y Puente Mulas del Río Neiva [...]

Así mismo (Velasco & Granados, 2006) ratifican en su investigación que en todas las estaciones estudiadas a lo largo de la cuenca alta y media del río Magdalena, se aprecia una correlación negativa con el fenómeno ENSO al menos durante los tres primeros meses del año, lo cual corrobora lo expresado por (Poveda, Mesa, & Carvajal, 1997) ya que mientras el fenómeno del Niño va en aumento, se evidencia una fuerte disminución de los caudales, sin embargo en muchos casos la disminución del caudal puede explicarse por otros fenómenos antrópicos tales como el crecimiento de la población y el aprovechamiento del recurso hídrico para riego, acueductos, hidroeléctricas, consumo humano.

Por otra parte, (Velasco & Granados, 2006) consideran que existe una escasa correlación entre la variación del caudal medio del río Magdalena y el índice NAO, aunque se encontró que en las estaciones que presentan series de tiempo cortas, de unos 9 años, se presentaron correlaciones negativas, aunque esto es causado por los pocos años de registros y esta razón por la cual los resultados no se consideran confiables, ya que, no muestran el comportamiento real de la zona. De la misma manera (Carvajal, Correa, Muñoz, & Escobar, 2007) expresan: [...] el régimen hidrológico del río Cauca ha experimentado desde 1985 una variación, principalmente en sus caudales extremos [...] Este cambio en el régimen de caudales y niveles es una consecuencia del efecto regulador del embalse de Salvajina [...]

Aunque (Poveda & Alvarez, 2012) exponen, que la mayoría de las series de caudales promedios mensuales de los ríos de Colombia exhiben tendencias decrecientes y se puede llegar a creer que tal disminución en los caudales promedio mensuales es una condición general en todo el territorio nacional, en la investigación de (Cortés, 2006) se observa un comportamiento uniforme del clima en el oriente colombiano, específicamente en la Región de la Orinoquía en el departamento del Casanare y al oriente del departamento de Boyacá, donde la precipitación y el caudal muestran unas pendientes ligeramente positivas, se considera que los resultados obtenidos en dicha investigación son confiables dado que se muestran análisis confirmatorios, así mismo, (Cortés, 2006) afirma: [...] el comportamiento de la precipitación y el caudal se encuentra sectorizado en zonas donde se tiende a la disminución y en otras que cobijan el aumento siendo estas últimas las que contenían la mayor cantidad de estaciones [...]

Es importante mencionar la influencia de las oscilaciones intra-estacionales de diferentes frecuencias que tienen una marcada afectación en los registros de precipitación, (Carmona A. M., 2010) es su investigación de la Región Amazónica [...] se encontró influencia del paso de las oscilaciones de Madden-Julian (3 meses), de la ZCIT (evidenciado en las frecuencias encontradas asociadas a 6 y 12 meses), de la Oscilación Cuasi-Bienal (2.4 años), del sistema ENSO (5.8 años) y finalmente de fenómenos decadales con períodos entre 14 y 42 años [...] esto indica que se debe tener cuidado en los análisis de tendencias ya que existen fenómenos cuyo comportamiento debe estudiarse con registros de mayor longitud, y en muchas ocasiones las series de datos son muy cortas o presentan periodos de suspensión que dificultan el estudio del comportamiento real de las cuencas.

En el caso de la cuenca hidrográfica del Amazonas (Carmona A. M., 2010) identificó que el cambio climático es el principal agente de cambio y ha causado que los caudales y temperatura media presenten una tendencia decreciente, mientras que las series de temperatura mínima presentan, casi en forma unánime, una tendencia creciente, [...] de igual manera hay una coherencia entre los resultados obtenidos para las estaciones de precipitación y caudal ya que precisamente son los ríos localizados hacia la región del pacífico los que muestran una tendencia creciente, mientras que la tendencia del resto de los ríos es decreciente. Esto concuerda con la tendencia creciente hallada en la serie del Chorro del Chocó, que evidencia un aumento en la advección de humedad hacia esta zona [...] (Carmona A. M., 2010)

Por otro lado, (Carmona A. M., 2010) encontró indicios de cambio climático ya en su investigación detectó que en algunas estaciones del Amazonas presentan tendencias decrecientes en los caudales medios y al comparar los resultados con los registros de dichas estaciones en el estudio (Poveda, Mesa, & Carvajal, 1997) se identificó que en este último no se habían percibido tendencias similares, sin embargo, dice (Carmona A. M., 2010) [...] se deben continuar las investigaciones para determinar si estas tendencias se mantienen en el tiempo, desaparecen, o son parte de ciclos estacionarios de más largo plazo [...]

De la misma manera, en la cuenca Amazónica, haciendo un paralelo entre los estudios relevantes, mientras que para la mayoría de las estaciones se mantienen

las tendencias decrecientes, hubo estaciones en las cuales se presenta el caso contrario, es decir, en el estudio de (Poveda, Mesa, & Carvajal, 1997) presentaban tendencias decrecientes estadísticamente significativas, al realizarse la comparación con el estudio de (Carmona A. M., 2010) que contaba con hasta 10 años más de registros, se identificó que este último no advierte cambios en dichas tendencias, esto puede ser un indicativo de dos condiciones climatológicas significativas, la primera es que el comportamiento de la cuenca pueda estar afectada más por periodicidades de largo plazo, es decir variaciones temporales en el clima, que por cambio climático, y la segunda es que en el desarrollo de los estudios solo se estén contemplando los fenómenos estacionarios, lo cual podría implicar que se requiera el uso de técnicas estadísticas multivariadas para el análisis de las tendencias en los caudales de las cuencas.

Para (Carvajal A. C., 2014) específicamente en el caso del análisis de los caudales máximos afirma que la hipótesis de estacionariedad no aplica para los estudios de frecuencia de caudales máximos en las series de caudales en Colombia en la cuenca del Río Amazonas, ya que para el 63% de las 130 estaciones analizadas en su estudio, en la cuenca del Río Amazonas y el 70% de las 20 estaciones analizadas en Colombia no se cumple la hipótesis de estacionariedad³, esta situación muestra la necesidad que tiene la ingeniería colombiana de empezar a de realizar análisis no estacionarios para la estimación de caudales máximos. Según (Carvajal A. C., 2014) [...] los análisis no estacionarios para estimación de caudales máximos son una herramienta de diseño que debe ser implementada en las prácticas de ingeniería en Colombia, ya que mejora la confiabilidad de los diseños, e incluso puede generar optimización económica de estos [...] Sin embargo, cabe aclarar que el desarrollo teórico del análisis de no estacionariedad es un poco más robusto que el análisis convencional, se puede emplear el método de covariables con fenómenos macroclimáticos (Poveda & Alvarez, 2012) manifiestan que es una herramienta muy adecuada para representar la física de las tendencias de largo plazo y la baja frecuencia asociada con los fenómenos macroclimáticos y su efecto sobre las series de caudales máximos anuales.

A lo largo de toda la cuenca del Patía ubicada en Región Pacífico, el desarrollo investigativo de (Castro & Machado, 2008) se encontró que las series presentan los valores pico respecto al medio mensual multianual entre noviembre y febrero, así mismo, la estadística muestra que la tendencia presenciar caudales de estiaje es propia de los meses de junio a septiembre. Un detalle particular que encontró el autor es que las series de las estaciones que suelen ubicarse en ríos afluentes a lo largo de la trayectoria sur-norte de la cuenca del río Patía, presentan un desplazamiento de los meses de estiaje de aproximadamente dos meses. Haciendo la comparación entre las investigaciones de (Castro & Machado, 2008) y (Cortés, 2006) se puede establecer que el comportamiento las series en la Región Pacífico es inversamente proporcional a las tendencias que se presentan en los ríos de la

³ El concepto de estacionariedad es de suma importancia en la teoría de la cointegración. Aquí se utilizará el concepto de estacionariedad en sentido débil, o de segundo orden. Considerando una serie temporal como la realización de un proceso estocástico, se dirá que éste es estacionario en sentido débil si tiene momentos de primer y segundo orden finitos y que no varían en función del tiempo. En línea, recuperado de <http://www.economia.unam.mx/> el 06 de Julio de 2016.

Orinoquia. Todas las series encontradas muestran un comportamiento regional característico producto de la alta variabilidad climática de Colombia.

Para los habitantes de Bogotá y de todo el Departamento de Cundinamarca, el tema de la recuperación del Río Bogotá ha trascendido los escenarios políticos y se ha enmarcado en una necesidad real, de salud pública, de estética y de imagen, (Boada, 2011) realizó la caracterización climatológica de la cuenca alta y media del Río Bogotá, y los resultados son de mucha importancia en cuanto, al tema de interés, la tendencia de los caudales, en el entendido caso que el río Bogotá presenta un alto grado de contaminación por el vertimiento de aguas residuales desde los asentamientos ubicados en la ronda del río, incluso a pocos kilómetros de la cabecera, los resultados de la investigación de (Boada, 2011), son reveladores y no difieren del comportamiento de las cuencas en la Región Andina, se encontró que en gran parte de la cuenca alta del río Bogotá, los niveles medios anuales presentan una tendencia positiva, aunque las precipitaciones y los caudales tienen una tendencia negativa.

El comportamiento descrito anteriormente en el caso específico del Río Bogotá, puede estar relacionado con la alta concentración de contaminantes que provocan el levantamiento del fondo del río a causa de los acelerados procesos de sedimentación, la afectación de la cuenca producto de vertimientos de aguas residuales que contienen sustancias altamente peligrosas provenientes principalmente de la industria curtidora, así mismo los caudales vertidos en el cauce por el sistema de alcantarillado hace que aumente el registro de los niveles con respecto al tiempo, esta es la principal explicación de la tendencia positiva en los niveles.

(Boada, 2011) encontró una ligera disminución de las cantidades de precipitación al pasar el tiempo, sin embargo, más allá del notorio deterioro de la cuenca la tendencia negativa de las precipitaciones puede estar relacionada con la calidad de los datos disponibles, registros menores a 30 años y que en su mayoría están incompletos, así mismo se puede afirmar que las tendencias de la precipitación y los caudales están relacionados con la marcada incidencia que tiene el fenómeno ENSO, sobre el comportamiento hídrico de la cuenca alta del río Bogotá.

Así mismo (Sanchez & Estrada, 2015) exponen las evidencias que muestran que el régimen de caudales medios mensuales y mínimos anuales del río Magdalena ha disminuido gradualmente durante las últimas décadas, mientras que los caudales máximos anuales siguen en aumento. Dicen los autores que estos son síntomas claros del deterioro de las cuencas de los ríos afluentes del Magdalena, lo cual altera seriamente la relación existente entre precipitación, cuenca y escorrentía, dada la magnitud del problema se hace necesaria una intervención inmediata para evitar daños mayores y puede que irreversibles. En realidad, el análisis de la triada precipitación-cuenca-caudal es complejo y tiene relación con caudales medios anuales, medios mensuales multianuales, máximos anuales y mínimos anuales de cada estación los cuales deben ser tomados a lo largo de períodos significativos de al menos 30 años.

Las tendencias analizadas por (Sanchez & Estrada, 2015) muestran deterioro importante de la cuenca en un periodo de tiempo relativamente corto debido a múltiples factores expuestos anteriormente, la reducción de los caudales medios es un problema alarmante no solo por la magnitud, sino porque significa decrecimiento de la oferta natural de agua en la cuenca más importante de la Región Andina del país. (Sanchez & Estrada, 2015) presentan una de las principales explicaciones a las inundaciones que frecuentemente vivimos en nuestros días:

[...] el urbanismo hace que la escorrentía de lluvias intensas sea captada y conducida rápidamente a quebradas y corrientes mayores, con aumento de los picos de las crecidas. Otro tanto ocurre con los sistemas de drenaje vial que, como ya se anotó, llevan rápidamente los excesos de agua a los cauces de los ríos, con el consiguiente incremento de los caudales máximos [...]

Es notable como en los estudios más recientes se indica un deterioro importante en las cuencas de los Ríos Magdalena y Cauca, una problemática que se maximiza debido a la relación con el componente climático, como lo dice (Carvajal, Correa, Muñoz, & Escobar, 2007) [...] La alta variabilidad climática de Colombia hace que la predicción de caudales sea difícil y que esté sujeta a una incertidumbre muy grande [...] Ahora bien, el desconocimiento en el comportamiento de la precipitación y los caudales se convierte en un inconveniente mayor a medida que se dificulta la predicción de eventos extremos.

Para (Poveda & Alvarez, 2012)[...] la estimación tradicional de los caudales extremos (máximos y mínimos) de distintos períodos de retorno se basa en la hipótesis de estacionariedad en la serie de caudales extremos anuales [...] el panorama cambia ante las evidencias de los impactos del cambio climático, y en el caso de las Cuencas de los Ríos Magdalena y Cauca son las actividades antrópicas como la deforestación, el uso inadecuado de los suelos y el agua, que provocan en mayor medida las afectaciones que se están evidenciando sobre los procesos hidrológicos para (Sanchez & Estrada, 2015) el daño en la cuenca es debido a:

[...] la torrencialidad del sistema natural de drenaje suele causar daños en infraestructura, inundaciones y eventualmente pérdidas de vidas y de bienes. La rapidez con que escurren las aguas lluvias por los drenajes artificiales dificulta los procesos de infiltración lo que a su vez empobrece los depósitos subterráneos con el consiguiente decrecimiento de los caudales de estiaje. Esto último se nota en las pendientes de los caudales mínimos anuales multianuales. A lo ya anotado puede sumarse la pérdida de vegetación arbustiva y gramínea, fenómeno muy notable en las regiones agrícolas y pecuarias de la cuenca [...]

La coherencia de los resultados obtenidos hasta hoy y las apreciaciones producto del presente análisis hace reflexionar acerca del conjunto de interpretaciones físicas que sugiere un análisis de tendencias, contando por supuesto con la variabilidad climática, los problemas de orden público a los que se enfrentan los hidromensores y la limitada disponibilidad de recursos económicos que se destinan para el estudio de las variables climatológicas, las razones expuestas hacen que se dificulte la labor, la intención es abrir un punto de discusión, ya que a pesar de la cuestionable calidad y disponibilidad información hidrometeorológica en Colombia y ante el

escenario del cambio climático en el país se debe presentar una fuerte reflexión, hay que interpretar si la manera en la cual interpretamos el clima es la mas adecuada, esto debe verse reflejado necesariamente en políticas gubernamentales de educación, cuidado y vigilancia de los recursos ambientales.

7. CONCLUSIONES

Es recomendable relacionar el caudal con otras variables de importancia hidrológica, tales como precipitación, temperatura, velocidad del viento, se ha encontrado pocas investigaciones que las mencionan y estos factores también tienen una alta incidencia en la disponibilidad hídrica y permiten determinar con mayor precisión las relaciones existentes entre las diferentes variables. Es necesario enfatizar sobre las políticas ambientales tendientes a la conservación del recurso hídrico, tales como protección de zonas que producen agua, reforestación, conservación del suelo a través de rotación de cultivos y zonas de pastoreo, tratamiento de aguas servidas y campañas de información y la implementación de tecnologías sostenibles, a partir de desarrollos locales, que adecuen los costos. Se debe tener en cuenta que la importación de tecnologías y métodos extranjeros no siempre se implementa de manera adecuada en el país. La aplicación de los principios de uso eficiente de agua, requiere un fortalecimiento de las instituciones, y se debe insistir en el desarrollo del trabajo interdisciplinario en el campo técnico, social y económico.

Es importante que se continúe con las investigaciones que analicen en detalle el comportamiento del clima y su relación con los con los fenómenos globales externos que pueden modificarlo y alterarlo, por otra parte las evidencias encontradas demuestran que el cambio climático podría eventualmente tener incidencia en las significativas tendencias hacia la reducción de los caudales principalmente de los ríos de la región andina durante los últimos decenios, causada por aumento en la temperatura y la humedad sin variación significativa de la precipitación. La disponibilidad hídrica en la cuenca del Magdalena y el Cauca se considera relevante, debido a que en esta zona se concentra la mayoría de la población, hecho que la hace más vulnerable frente a la escasez del recurso. Se estima una alta disminución del caudal hacia el 2025, por esta razón es conveniente tomar medidas que mejoren la conservación del recurso mediante educación ambiental, que se traduce en desarrollo de la cultura del cuidado, la vigilancia y el control del recurso hídrico, así como la adecuada concepción de los Programas de Ordenamiento Territorial. Es importante insistir en la necesidad de mejorar la cobertura e instrumentación hidrológica del país, capacitar a los hidromensores mejorar la confiabilidad de los datos y así lograr un monitoreo de las principales cuencas que permita realizar un análisis general de la situación del recurso hídrico en Colombia. Lo anterior no sólo es vital desde el punto de vista investigativo sino que es necesario para el diseño de técnicas de planificación y mitigación de consecuencias socioeconómicas y ambientales adversas ante el inminente deterioro de la triada precipitación-cuenca escorrentía.

La perspectiva posterior del estado del arte de las investigaciones sobre la tendencia de los caudales en los ríos en Colombia estará centrada en tres aspectos; el primero de ellos es elaborar la caracterización morfológica de las principales cuencas del país, pues en muy pocas investigaciones se hace referencia a este tema y las amplias variaciones mencionadas a lo largo del presente documento demuestran que existen factores, como el balance hidrológico y el tamaño de las cuencas, que están influyendo en la desviación espacial tan amplia en los escurrimientos anuales promedio; el segundo, guarda relación con la estimación y análisis del comportamiento de los caudales de estiaje y de crecientes para cada cuenca analizada, finalmente la situación tropical de Colombia y las constantes suspensiones de los registros en las estaciones hace necesario que se presenten metodologías homologadas para la reconstrucción de los datos de caudales por métodos indirectos, para permitir el correcto entendimiento de las variables hidrológicas.

8. REFERENCIAS

Boada, P. A. (2011). *Caracterización climatológica de la cuenca alta del río Bogotá*. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.

Carmona, A. M. (2010). *Identificación de modos principales de variabilidad hidroclimática en Colombia y la Cuenca Amazónica mediante la Transformada de Hilbert-Huang*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

Carmona, J. (2005). Cambios demográficos y epidemiológicos en Colombia durante el siglo XX. *Biomédica*, 25 (4), 17-19.

Carvajal, A. C. (2014). *Estimación de Caudales Máximos en Contexto de Cambio Climático*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

Carvajal, Y., Correa, G., Muñoz, M., & Escobar, F. (2007). Modelos de predicción de caudal utilizando variables macroclimáticas y técnicas estadísticas multivariadas en el valle del río Cauca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* (6), 67-81.

Castro, M., & Machado, L. (2008). Análisis regional de caudales medios mensuales de la cuenca del río Patía. *Boletín Científico CCCP*, 123-138.

Centro de ciencia y tecnología de Antioquia – CTA. (2013). *Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia 2010 – 2012*. Medellín: Centro de ciencia y tecnología de Antioquia – CTA.

- Cortes Maldonado, H. M. (2013). *Estudio de las tendencias de los caudales medios del río magdalena comprendido entre 1964 y 2010*. Bogotá D.C.: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad la Gran Colombia.
- Cortés, M. (2006). Análisis de variables de caudal y precipitación de sectores en los departamentos de Boyacá y Casanare y su alteración por fenómenos macroclimáticos y de cambio global. *L'esprit Ingénieur* , 114-132.
- Hernandez, H., & Navar, J. (2010). Tendencias en los caudales en ríos de Michoacán, México. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México* , 1, 153-159.
- Madroleño, S. M., & Maflar, F. R. (2013). Caudales Ecológicos y su Relación con el Cambio y la Variabilidad Climática. *Unimar* (61), 61-77.
- Postel, S., & al, e. (2000). Entering an era of water scarcity: the challenges ahead. *Ecological Applications* , 10 (4), 941-948.
- Poveda, G., & Alvarez, M. (2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. (U. d. Andes, Ed.) *Revista de Ingeniería* (36), 65-76.
- Poveda, G., Mesa, O. J., & Carvajal, L. F. (1997). Introducción al clima en Colombia. Medellín: Universidad Nacional Sede Medellín, Facultad de Minas.
- Prodiversitas. (2015). Obtenido de <http://www.prodiversitas.bioetica.org/>
- Rave, C., Mantilla, R., & Poveda, G. (2004). *Tendencias en la distribución de probabilidades de lluvias y caudales en algunas cuencas colombianas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Sanchez, A., & Estrada, A. (2015). *¿Están disminuyendo los caudales de los ríos colombianos Magdalena y Cauca?* . Bogotá D.C.: Universidad la Gran Colombia - Facultad de Ingeniería Civil.
- Velasco, A., & Granados, M. D. (30 de Octubre de 2006). Tendencias e Incidencia de los Fenómenos Macroclimáticos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* , 1-16.
- World Resources Institute. (2000). *World Resources 2000*. Nueva York: World Resources Institute.