

**ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUPERFICIAL EN LA CUENCA ALTA
Y MEDIA DEL RÍO LA VIEJA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

DAVID ESTEBAN BUSTOS CASTELBLANCO



**UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÉNFASIS EN RECURSOS HÍDRICOS Y MEDIO AMBIENTE
MODALIDAD INVESTIGACIÓN
ARMENIA, QUINDÍO
2021**

**ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUPERFICIAL EN LA CUENCA ALTA
Y MEDIA DEL RÍO LA VIEJA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

DAVID ESTEBAN BUSTOS CASTELBLANCO
C.C 1094966882 de Armenia

Trabajo de grado presentado para optar al título de Magister en Ingeniería



Director
GABRIEL LOZANO SANDOVAL
Ph D Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

ELKIN ANÍBAL MONSALVE DURANGO
Ms. Eng en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÉNFASIS EN RECURSOS HÍDRICOS Y MEDIO AMBIENTE
MODALIDAD INVESTIGACIÓN
ARMENIA, QUINDÍO
2021

CONTENIDO

Capítulo I	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del Problema	2
1.2.1 Problema de Investigación.....	3
1.3 Objetivos de la Investigación.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Justificación	3
Capítulo II	6
2.1 Marco Teórico.....	6
2.2 Estado del Arte.....	15
Capítulo III	19
3.1 Diseño de Metodología de la Investigación.....	19
3.2 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	21
3.3 Zona de Estudio	22
3.4 Procesamiento de Datos y Análisis de Información	25
3.4.1 Análisis de Variables Hidroclimatológicas	28
3.4.2 Análisis de Tendencias Estadísticas	33
3.4.3 Proyecciones de Población	39
Capítulo IV	42
4.1 Presentación y Análisis de Resultados.....	42
4.1.1 Análisis Para la Selección de la Herramienta Hidroinformática de Modelación.....	42
4.1.2 Registro de Variables para la Subzona Hidrográfica en Weap.....	53
4.1.3 Simulación de Escenarios Bajo Condiciones de Cambio Climático	62
4.1.4 Configuración de Escenarios	68
4.1.5 Evaluación de Escenarios	70
4.1.6 Análisis y Comparación de Resultados	77
Capítulo V	84
5.1 Conclusiones	84
5.2 Trabajos Futuros	87
Referencias	89
Anexos	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Registros de ocurrencia del ENOS (1990-2020).....	8
Tabla 2. Evidencia del Cambio Climático en la humanidad	11
Tabla 3. Unidades geográficas de la cuenca La Vieja.....	23
Tabla 4. Listado de estaciones del Eje cafetero.....	26
Tabla 5. Registros de ocurrencia del ENOS a escala anual (1990-2019).....	28
Tabla 6. Resultados de la prueba no paramétrica Mann-Kendall para precipitación	35
Tabla 7. Resultados de la prueba no paramétrica Mann-Kendall para Temperatura	37
Tabla 8. Resultados de la prueba no paramétrica Mann-Kendall para Evapotranspiración.....	38
Tabla 9. Resumen de Herramientas Hidroinformáticas	51
Tabla 10. Evaluación Herramientas Hidroinformáticas	51
Tabla 11. Formatos de escritura y tipos de datos de entrada WEAP	56
Tabla 12. Unidades de variables utilizadas WEAP.....	61
Tabla 13. Métrica para la eficiencia de Nash	64
Tabla 14. Resultados de calibración del modelo Estación El Alambrado.....	64
Tabla 15. Resultados de calibración del modelo Estación Cartago.....	65
Tabla 16. Valores finales para los Supuestos Claves del modelo	65
Tabla 17. Escenarios con proyecciones de Cambio Climático.....	68
Tabla 18. Escenarios con proyecciones de población	69
Tabla 19. Escenarios con variaciones en el uso del suelo	69
Tabla 20. Desviación porcentual por cambio en el uso del suelo según el sitio de demanda	75
Tabla 21. Desviación porcentual por cambio en el uso del suelo según el mes.....	76
Tabla 22. Categorización de vulnerabilidad por demanda no cubierta bruta	78
Tabla 23. Valores de amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa del departamento del Quindío con respecto al recurso hídrico.....	81
Tabla 24. Lista de cumplimiento de objetivos	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca alta y media del río La Vieja.....	4
Figura 2. Pérdidas estimadas por desastres naturales en 2019	11
Figura 3. Metodología del Proyecto	19
Figura 4. Ubicación de la cuenca del río La Vieja	22
Figura 5. Precipitación anual total multianual promedio	29
Figura 6. Precipitación mensual total promedio.....	31
Figura 7. Temperatura mínima, máxima y promedio multianual.....	32
Figura 8. Temperatura mínima, máxima y promedio.....	33
Figura 9. Resultados de la prueba Mann-Kendall para Temperatura de la Estación Apto. El Edén.	39
Figura 10. Proyecciones de población para ciudades con menos de 100,000 habitantes	40
Figura 11. Proyecciones de población para ciudades con más de 100,000 habitantes.....	41
Figura 12. Modelo de dos tanques para el Método de Humedad del Suelo	53
Figura 13. Recuadro para configuración Incrementos de años y tiempos.....	54
Figura 14. Recuadro para configuración de nodos y líneas.....	55
Figura 15. Recuadro con elementos de la pestaña Esquema	55
Figura 16. Recuadro con Supuestos Clave del modelo	58
Figura 17. Recuadro con parámetros para los Usos del Agua.....	59
Figura 18. Recuadro con parámetros del Uso del Suelo	60
Figura 19. Recuadro con parámetros del Clima	61
Figura 20. Calibración de parámetros en PEST	62
Figura 21. Ventana de configuración PEST.....	63
Figura 22. Gestor de escenarios en WEAP	70
Figura 23. Caudal promedio anual simulado para los escenarios bajo Cambio Climático	71
Figura 24. Desviación porcentual del Caudal mensual promedio simulado para los escenarios bajo variaciones de población	73
Figura 25. Desviación porcentual del Caudal mensual promedio simulado para los escenarios bajo cambios de cobertura.....	74
Figura 26. Demanda no cubierta mensual en la subzona hidrográfica río La Vieja.....	78
Figura 27. Demanda no cubierta en la subzona hidrográfica río La Vieja en agosto (sup.) y mayo (inf.)	80

RESUMEN

Título: Análisis de la disponibilidad hídrica superficial en la cuenca alta y media del río La Vieja bajo escenarios de Cambio Climático

Resumen: En esta investigación se simula la disponibilidad hídrica superficial de la parte alta y media de la subzona hidrográfica río La Vieja, considerando variaciones de precipitación y temperatura bajo escenarios de Cambio Climático, tendencias poblacionales y cambios en el uso del suelo. Los escenarios de Cambio Climático se basan en el registro histórico, las proyecciones del IDEAM, la tendencia lineal de la temperatura (según estudio estadístico de estaciones hidroclimáticas) y las proyecciones del IPCC seleccionadas por el Instituto Ambiental de Estocolmo, y otros (2014).

El escenario base fue calibrado con la Herramienta de Estimación de Parámetros utilizando la estación limnográfica El Alambrado como referencia; el ajuste bajo la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) se clasificó como Muy Bueno y la validación del modelo presentó un ajuste Bueno.

El análisis de demanda no cubierta anual, sin considerar el caudal ecológico, ha mostrado que Armenia, Circasia, Quimbaya y La Tebaida están en déficit hídrico para todos los escenarios. El municipio de Salento y Córdoba muestran déficit hídrico alto cuando se presentan los escenarios más críticos (reducción en la precipitación para las proyecciones de 2071 a 2100 [Población Alta]). Y en los demás municipios, ubicados en su mayoría sobre la cuenca baja, no se ha encontrado déficit hídrico bajo ningún escenario de Cambio Climático o cambios en el uso del suelo.

La variación modal del caudal en la subzona hidrográfica demostró que es en los meses secos donde se tienden a presentar escasez hídrica (junio, julio y agosto). En contraste, los meses húmedos (noviembre y diciembre) tienen caudales altos y no suelen mostrar demandas no cubiertas, sin embargo, sí se prevé interrupciones en el suministro de agua potable debido al aumento en la turbidez del líquido o movimientos de remoción en masa y/o inundaciones.

Como resultado, se ha determinado que la escasez hídrica proyectada para la parte media y alta de la subzona hidrográfica río La Vieja es producto de la distribución temporal del agua y no de la cantidad que circula anualmente, por lo tanto, la reforestación, especialmente en la ronda hídrica del río; las estructuras de almacenamiento de agua; o nuevas fuentes de agua son necesarias para asegurar la disponibilidad hídrica a mediano y largo plazo.

Asimismo, es necesario reducir los aprovechamientos pecuarios que se dan a lo largo de toda la subzona hidrográfica (grandes coberturas de pastos), así como los monocultivos de mediana y gran extensión que se desarrollan en la parte alta y media de la cuenca (pino, eucalipto, aguacate Hass), teniendo en cuenta que el aumento en la demanda de agua y la pérdida de la capacidad de regulación hídrica que se relaciona con la producción agroforestal (menor cantidad de agua disponible en temporada seca) reducen el caudal base.

Palabras claves: Cambio Climático, Disponibilidad hídrica, Escorrentía superficial, Río La Vieja, Subzona Hidrográfica.

ABSTRACT

Title: Analysis of surface water supply in the upper and middle basin of Río La Vieja under Climate Change scenarios

Abstract: This research simulates the surface water supply of the upper and middle Río La Vieja hydrographic subzone, considering variations in precipitation and temperature under scenarios of Climate Change, population trends and changes in land use. The Climate Change scenarios are based on the historical record, the IDEAM projections, the linear temperature trend (according to a statistical study of hydroclimatic stations) and the IPCC projections selected by the Stockholm Environmental Institute, and others (2014).

The baseline scenario was calibrated with the Parameter Estimation Tool using the El Alambrado limnigraphic station as a reference; the fit under the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) was classified as Very Good and the model validation showed a Good fit.

The annual non-covered demand analysis, without considering the ecological flow, has shown that Armenia, Circasia, Quimbaya and La Tebaida are in water deficit for all scenarios. Salento and Córdoba show high water deficit when the most critical scenarios are presented (reduction in precipitation for the projections from 2071 to 2100 [High population]). And in the other urban helmet, mostly located on the lower basin, no water deficit has been found under any scenario of Climate Change or changes in land use.

The modal variation of the flow in the hydrographic subzone showed that it is in the dry months where there is a tendency to present water scarcity (June, July, and August). In contrast, the humid months (November and December) have high flows and do not usually show unmet demands, however, interruptions in the supply of drinking water are anticipated due to the increase in the turbidity of the liquid or movements of mass removal and/or floods.

As a result, the water scarcity projected for the middle and upper Río La Vieja hydrographic subzone is product of the temporary distribution of water and not of the amount that circulates annually, therefore, reforestation, especially in the stream buffer; water storage structures; o new sources of water are necessary to ensure water supply in the medium and long term.

Likewise, it is necessary to reduce the livestock sector that occur throughout the entire hydrographic subzone (extensive pasture covers), as well as medium and extensive monocultures that develop in the upper and middle basin (pine, eucalyptus and Hass avocado crops), taking into account that the increase in water demand and the loss of water regulation capacity that is related to agroforestry production (less water supply in the dry season) reduces the base flow.

Keywords: Climate Change, Water supply, Surface runoff, Río La Vieja, Hydrographic Subzone.

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El manejo de los recursos hídricos es uno de los procesos más relevantes en el mundo para la regulación de los sistemas naturales y humanos. Son numerosos los estudios que han investigado la relación entre el agua y los sistemas, en ellos se ha evaluado la calidad (CRQ, 2018), cantidad (Bertoni & Ganancias, 2010), transformación (Wang, Huang, Liu, Li, & Zhao, 2015) y otros parámetros con los que se ha buscado optimizar el manejo de los recursos naturales y reducir las amenazas que estos conllevan. Sin embargo, de estos estudios una de las tendencias que más se ha observado y expuesto es la pérdida de validez de la estacionariedad en los procesos climáticos e hidrológicos debido al Cambio Climático (IPCC, 2014; BIS, y otros, 2020) que, en consecuencia, ha puesto en duda la efectividad del diseño y las obras hidráulicas que se han realizado o se desarrollarán.

La relevancia del comportamiento estacionario en los procesos climáticos e hidrológicos radica en que estudios del siglo XX basaron gran cantidad de modelos y diseños en el período de retorno, es decir, se asumió que los registros históricos serían el reflejo del comportamiento futuro, por lo cual las magnitudes de los eventos extremos coincidirían en magnitud. Lo anterior, sumado a la visión disciplinar de la planeación hidráulica, implica que la mayoría de países en la toma de decisiones relacionadas con el clima consideraron únicamente la caracterización de las amenazas ocurridas históricamente (análisis de eventos extremos) y la disminución de la vulnerabilidad (aumento en la robustez de la infraestructura) o, en el caso del abastecimiento y remoción de aguas, el enfoque se orientó en suplir las demandas existentes de los usuarios, encontrar cuerpos de agua suficientes para abastecer estas demandas y, más adelante, en incluir el sistema natural a las demandas de aguas.

En este contexto, los balances hídricos usados como herramientas para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico necesitan de una gran cantidad de parámetros y estudios para establecer si la oferta de agua es mayor a la demanda, considerando comportamiento mensual de la precipitación, el crecimiento poblacional, cambios en el uso del suelo, expansión de la frontera humana, eventos de variabilidad climática y, sobre todo, cambios en la tendencia del clima.

La subzona hidrográfica Río La Vieja, es una región que se caracteriza por sus amplias áreas de cultivos y el alto porcentaje de habitantes que se encuentran en sus zonas rurales. La topografía de esta región es altamente montañosa y se encuentra influenciada por la Cordillera Central, privilegiándola de calidad y cantidad del recurso hídrico, pero dificultando el desarrollo de actividades humanas y siendo vulnerable por cambios en el uso del suelo.

Con esta investigación se busca realizar el balance hídrico en la subzona hidrográfica río La Vieja, para ello se integrarán los Modelos de Circulación General (MCG) con el comportamiento hidrológico, específicamente de lluvia-escorrentía, en la cuenca alta y media del río La Vieja con

punto de cierre en la estación limnigráfica El Alambrado, teniendo como base la integración de estudios previos y registros históricos más extensos. Dentro de los productos de esta investigación se presenta la disponibilidad hídrica en la cuenca bajo condiciones tendenciales, escenarios de Cambio Climático, escenarios con variación de la población y escenarios con cambios en el uso del suelo.

Los resultados de la modelación, así como el mismo modelo, son aprovechables para la toma de decisiones sobre la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, la caracterización de fenómenos hidroclimáticos, y la evaluación de políticas y proyectos relacionados con la mitigación y adaptación al Cambio Climático.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El clima a nivel mundial siempre ha sido un tópico de suma importancia para las actividades humanas debido a que son estas condiciones las que definen en gran medida los recursos disponibles, los períodos en que están disponibles y la facilidad de acceder a estos. Si bien el comportamiento del clima no ha sido lineal en la historia del planeta tierra, existen evidencias claras de que en las últimas décadas el aumento en la temperatura media mundial ha provocado una mayor recurrencia y magnitud de fenómenos naturales, lo cual ha hecho necesario la integración del componente de Cambio Climático en la mayoría de las herramientas para la toma de decisiones sobre los territorios, especialmente, sobre la evaluación de la capacidad de los sistemas hídricos para suplir las actividades humanas que ocurrirán en el mediano y largo plazo, sin poner en riesgo la capacidad de los sistemas naturales.

A nivel regional, ya existen estudios sobre la relación entre la Oferta y Demanda hídrica que indican que el Quindío o alguno de sus municipios se encuentran cerca del estrés hídrico; asimismo, los estudios de suelos establecen que en gran parte de la cuenca del Río La Vieja están desarrollando un uso de suelo incorrecto al que las propiedades físicas, geométricas y químicas permiten (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, pág. 20; Echeverría, Huber, & Taberlet, 2007, pág. 10). En complemento a lo anterior, es necesario resaltar que la vocación de la región se ha direccionado en las casas y alojamientos campestres, monocultivos externos a los tradicionales (principalmente aguacate Hass) y un desarrollo urbano cada vez más acelerado, por lo tanto, es claro que la demanda de agua para el Río La Vieja es cada vez mayor y está cerca de sobrepasar la oferta natural a corto o mediano plazo bajo las tendencias actuales.

Además de los resultados mencionados, son numerosos los estudios hídricos que se han realizado en el Quindío y la subzona hidrográfica Río La Vieja (Rodríguez C. , 2020; CRQ, 2018; MinAmbiente, y otros, 2015), sin embargo, la retroalimentación, actualización y enfoque sistémico son elementos que pocas veces se han considerado en ellos y, por ende, si bien han servido para estudiar el fenómeno que era objeto de estudio, no es posible utilizarlos para representar la realidad de la región debido a la caducidad de la metodología utilizada o la pérdida de precisión del modelo.

Lo anterior, se traduce en que aun cuando hay investigaciones que tienen por objeto la implementación de nuevas metodologías o áreas del conocimiento sobre la región, existe una carencia

en los estudios que buscan recopilar, analizar y llenar los vacíos de conocimiento que han sido producto de investigaciones anteriores o que se ha generado por el cambio o actualización de los estudios regionales, nacionales e internacionales sobre el Cambio Climático y la relación Oferta-Demanda.

A partir de lo descrito, esta investigación tiene por objeto el balance hídrico en la cuenca alta y media del Río La Vieja, a través de la modelación usando como base la respuesta hidrológica y las demandas por actividades humanas en la subzona hidrográfica. Es importante mencionar que dentro de la investigación se tiene como óptica: la evaluación de estudios anteriores sobre el tema y su inclusión dentro de la simplificación de los modelos; además de considerar su incertidumbre como una característica de análisis debido a los registros históricos usados como entrada y las dinámicas socioeconómicas que se desarrollan en la región.

1.2.1 Problema de Investigación

Incertidumbre de la disponibilidad hídrica bajo los escenarios del Cambio Climático en la cuenca alta y media del río La Vieja.

¿Cuál es la disponibilidad hídrica bajo los escenarios del Cambio Climático en la cuenca alta y media del río La Vieja?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general

Simular la disponibilidad hídrica superficial en la cuenca alta y media del río La Vieja bajo proyecciones del Cambio Climático.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el comportamiento del clima en la subzona hidrográfica río La Vieja.
- Modelar la respuesta hidrológica en la subzona hidrográfica según los registros históricos.
- Determinar la disponibilidad hídrica en cuenca alta y media del río La Vieja con base en las variaciones de precipitación y temperatura de los escenarios de Cambio Climático.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Los investigadores del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC] (2014) han evaluado que es muy probable que los eventos extremos de precipitación aumenten su severidad y frecuencia en los próximos años en las zonas tropicales, y que este comportamiento se mantendrá en las siguientes décadas. Esto implica que la modelación y el diseño dentro de la Ingeniería Civil debe adaptarse a los requerimientos humanos y naturales del futuro, lo cual solo es posible al analizar sistémicamente las interacciones entre elementos y generar modelaciones que operen de forma correcta la información resultante.

Por esta razón, ha surgido la necesidad de estudiar las interrelaciones que existen entre la oferta y la demanda hídrica bajo condiciones de Cambio Climático, teniendo en cuenta que la investigación sobre esta área genera simulaciones acertadas al contexto global y local en cuanto a la disponibilidad hídrica se refiere, además de permitir la toma de decisiones para el desarrollo, diseño e intervención de las estructuras y los planes gubernamentales que se enfocan en la prevención y/o mitigación de fenómenos hidrológicos extremos y sus consecuencias; todo bajo la integración de estudios previos sobre esta temática y la declaración explícita de las consideraciones que tiene este estudio.

El proyecto se desarrolla en la cuenca alta y media del Río La Vieja utilizando como punto de cierre la estación El Alambrado (Figura 1). En esta cuenca se realiza un estudio de la red pluviográfica y pluviométrica, así como de los datos geomorfológicos y de uso del suelo, con lo cual se establece la cantidad, calidad y forma de representación de la información disponible. A partir de los datos obtenidos se analiza y describen las herramientas e información que refleja el comportamiento hidrológico y antrópico (demanda) de la zona, y posteriormente se alimenta el modelo de la subzona hidrográfica y se construyen los escenarios que consideran el Cambio Climático.

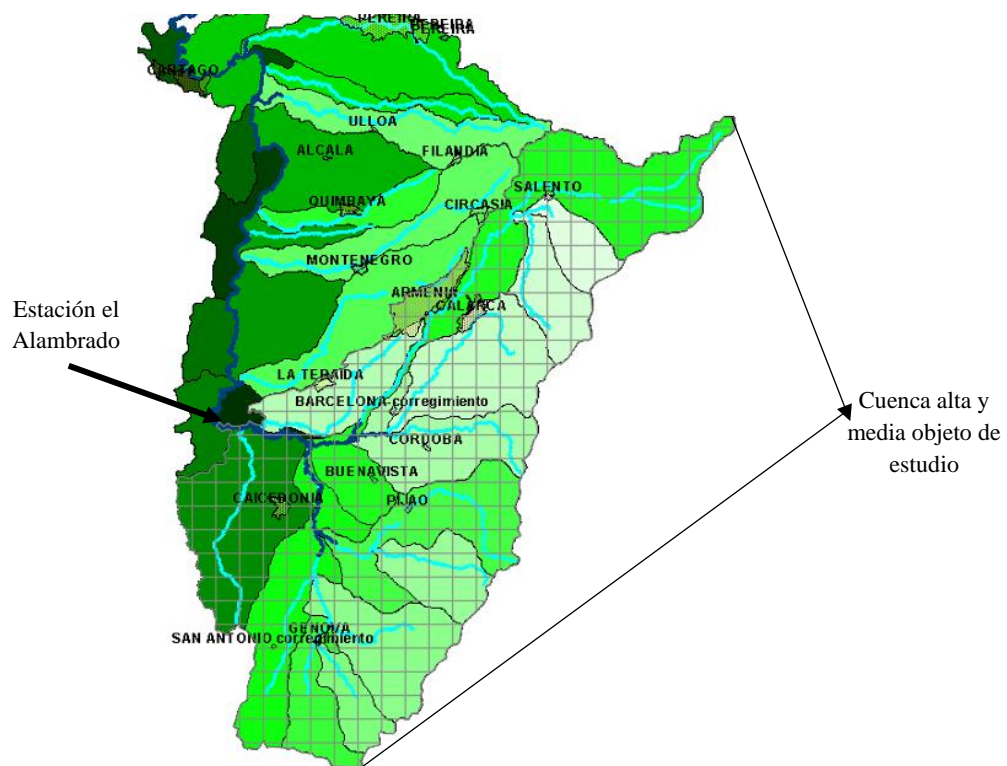


Figura 1. Cuenca alta y media del río La Vieja
Fuente: El autor

Teniendo en cuenta lo anterior y lo mencionado en la metodología, se proyecta una identificación del comportamiento hídrico superficial en la subzona hidrológica que es útil para contrastar estudios previos, caracterizar comportamientos hidrológicos propios de la región, además de generar

información para hacer diseños y modelaciones más aproximadas a la realidad que se espera para este siglo.

Es importante considerar que esta área del conocimiento ha sido punto focal para la investigación en las últimas décadas, por lo tanto, se dispone de estudios relacionados con la temática a nivel nacional y mundial que sirven como base para el desarrollo del proyecto (CRQ, 2018; SEI, y otros, 2014; IDEAM, 2019d; UNESCO & ONU-Agua, 2020).

Como aspecto final, cabe resaltar que el resultado de cualquier modelo es una representación de la realidad, es decir, se busca que una serie de elementos de entrada se transformen en el comportamiento esperado de un fenómeno, sin embargo, cada una de las simplificaciones utilizadas en el modelo generan diferencias con la realidad y, por lo tanto, el resultado es un reflejo que posee un nivel de confianza respecto a la validación de los registros. Lo anterior, induce a aclarar que esta investigación considerará un análisis de la incertidumbre debido a los datos de entrada, las herramientas de gestión, procesamiento y modelación de datos e información, así como la proveniente de los escenarios planteados que consideran el Cambio Climático y las actividades humanas; no obstante, la misma naturaleza de los fenómenos estudiados, además de los eventos disruptivos y los hechos portadores del futuro, hacen que los resultados de la simulación no sean una predicción, en cambio presentan información fundamentada para la toma de decisiones y el conocimiento de la cuenca.

CAPÍTULO II

2.1 MARCO TEÓRICO

Los **recursos hídricos** pueden ser definidos como los cuerpos de agua que existen en el planeta Tierra; estos pueden ser superficiales o subterráneos y se presentan como océanos, lagunas, ríos, pozos, entre otros. Si bien, tradicionalmente los recursos hídricos y el agua han sido concebidos como recursos naturales, materiales y/o herramienta para el desarrollo humano y la preservación de la vida, las últimas décadas han cambiado la denominación de estos elementos hacia bienes comunes, indispensables y, recientemente en Colombia, a sujetos de derechos¹.

Este cambio en la concepción de los recursos hídricos ha llevado al concepto denominado **Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH)** el cual, según el Ministerio de Ambiente (2020), es definida como: “un proceso que promueve la gestión y aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, el suelo y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas”. Es importante tener en cuenta que, bajo la normatividad colombiana, las acciones necesarias para realizar la GIRH se enmarcan en una perspectiva de cuenca hidrográfica.

La **cuenca hidrográfica**, según el Decreto 1729 de 2002, en su Artículo 1, se define como:

El área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

La delimitación de una cuenca se realiza con base en las cotas máximas de la topografía que dividen dos cursos de agua y que no poseen relación hasta un punto de cierre, considerando en la delimitación los intercambios de escorrentía subterránea que pueden existir.

En este contexto, el análisis de la disponibilidad hídrica superficial implica un estudio de la relación del recurso hídrico con el medio ambiente y las actividades humanas sobre una cuenca hidrográfica, considerando los elementos más representativos que intervienen en el ciclo hidrológico regional, la cantidad de agua demandada y la disponibilidad hídrica superficial. Lo cual, según la literatura clásica, se puede modelar mediante la comparación de oferta y demanda.

¹ Es importante considerar que el Río Quindío (Procuraduría General de la Nación, 2019) y el Valle de Cócora (Tribunal Superior del Distrito Judicial de Armenia, 2020) ya poseen esta denominación, abarcando desde el recurso natural mencionado hasta las tradiciones, fauna y flora que interactúan de forma directa con este.

Con base en lo anterior, es importante definir conceptos relacionados con la disponibilidad hídrica:

El primer término por definir es la **oferta hídrica superficial** que, según el IDEAM (2019b), es: “el agua que fluye por la superficie de suelo, que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos y/o en los cuerpos de agua lénticos de una unidad hidrográfica”. Por lo tanto, para la oferta hídrica superficial se considera todo el volumen de agua que escurre sobre la cuenca hidrográfica, la cual proviene de la interacción climática y se ve afectada por fenómenos de variabilidad climática o el Cambio Climático (C.C.).

El segundo término corresponde a la **demanda hídrica**, esta se puede definir como la totalidad de agua consumida por cada una de las actividades socioeconómicas que se desarrollan en una cuenca hidrográfica. Estos consumos de agua consideran la demanda de agua por uso doméstico, uso industrial, para el sector de servicios, uso agrícola, pecuario y, en algunos casos, los relacionados con pérdidas comerciales (consumos ilegales o no medidos). (Corponariño, 2011)

De la relación entre la oferta y la demanda hídrica se obtiene el **balance hídrico**, el cual consiste en la evaluación de los cambios en el almacenamiento de una masa de agua para un período definido en un área específica, por medio de la cuantificación de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico. El resultado de la evaluación permite establecer la **disponibilidad hídrica**, en otras palabras, se determina si el agua almacenada es suficiente para abastecer las demandas por actividades humanas y naturales en el espacio, si es insuficiente y el medio ambiente está en procesos de degradación, o si se encuentra en estrés hídrico (la demanda es igual a la oferta, no se pueden desarrollar más actividades humanas, y los servicios ecosistémicos y el medio ambiente está en riesgo). (IDEAM, 2019b)

El balance hídrico para escorrentía superficial en períodos históricos extensos se sugiere calcular con una ecuación simplificada que relaciona entradas y salidas de masas de agua en una unidad hidrográfica, la cual considera que los cambios de almacenamiento son pequeños y pueden despreciarse, es decir, el balance se realiza bajo condiciones similares (año medio, seco y húmedo) considerando las variables de precipitación, evapotranspiración y escorrentía. (IDEAM, 2019b)

La **precipitación** en la hidrología puede ser definida como la caída de un conjunto de partículas de agua líquida o sólida (lluvia, nieve, cinarra, granizo, entre otros) que se originan en una nube, atraviesan la atmósfera y llegan al suelo. (IDEAM, 2019c)

La **evapotranspiración** engloba los procesos de transporte de agua desde la superficie terrestre hasta la atmósfera. Los principales procesos son la evaporación desde el suelo y el océano, y la transpiración de la vegetación. (IDEAM, 2019c)

La **escorrentía** se define como la precipitación que se transporta por la superficie del suelo hacia un cuerpo de agua (escorrentía superficial y sub-superficial) o hacia el subsuelo (escorrentía

subterránea) (IDEAM, 2019c). Cabe anotar que el balance hídrico se calcula con base en modelos lluvia-escorrentía, concepto que será abordado en el próximo capítulo.

De los términos afines a esta temática es importante definir conceptos como el **clima**, el cual es la medición promedio de variables climáticas, como lo son la temperatura, la precipitación, la evaporación, entre otras. El período de medición puede considerarse desde meses a millones de años, sin embargo, según la Organización Mundial Meteorológica, el rango de tiempo que muestra sensibilidad climática es de 30 años. (World Meteorological Organization, 2021)

Dentro del clima un elemento determinante es el **régimen hidrológico**, debido a que este describe: “las variaciones del estado y características de una masa de agua que se repiten regularmente en el tiempo y en el espacio y que son cíclicas, por ejemplo, estacionales” (UNESCO & OMM, Glosario internacional de hidrología, 1992). Además, como ya se ha mencionado, los regímenes que generalmente se consideran son el medio, el seco y el húmedo.

Existen fenómenos que se relacionan con el régimen hidrológico y se denominan **variabilidad climática**, los cuales consisten en desviaciones estadísticas significativas con respecto a la media climática y tienen una temporada de recurrencia (meses, años, décadas, etc.) (World Meteorological Organization, 2021). El fenómeno de variabilidad climática más representativo para Colombia es **El Niño Oscilación del Sur** (ENOS), el cual consiste en dos temporadas; El Niño, que implica temperaturas mayores y precipitaciones menores en la superficie terrestre debido al aumento en la temperatura del océano Pacífico y; La Niña, la cual significa temperaturas menores y precipitaciones mayores en la superficie terrestre debido a la disminución de la temperatura en el océano Pacífico. (Minagricultura, 2021)

A continuación, se presenta el registro mensual de la ocurrencia del fenómeno ENOS desde 1990. Esta información ha sido obtenida del Servicio Climatológico Nacional de Estados Unidos (2021), quienes consideran que un año Niño o Niña ocurre cuando se supera el umbral de +/- 0.5°C para el Índice Oceánico de El Niño (ONI) en un período base de 30 años (actualizados cada 5 años) y por más de 5 temporadas. Una temporada consiste en la medía móvil de 3 meses de anomalías.

Tabla 1. Registros de ocurrencia del ENOS (1990-2020)

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2

Fuente: (National Weather Service, 2021)

Asociado a los fenómenos de variabilidad climática, el 2011 fue para Colombia uno de los años más significativos debido a la incidencia de La Niña, en donde ocurrieron lluvias torrenciales, inundaciones y anegaciones en todas las regiones del país. Según las investigaciones de la FAO (2012)²: “[...] los derrumbes, inundaciones y accidentes producidos a consecuencia de las lluvias dejaron al menos 185 muertos, 138 heridos y 22 desaparecidos, así como unos 9.000 damnificados, según los registros de la Cruz Roja Colombiana”

Cabe anotar que, aun cuando se puede establecer un período de retorno para estos fenómenos, la precisión en el pronóstico de la ocurrencia y magnitud no es exacta y requiere de la consideración de las variaciones tendenciales en el comportamiento del clima, en otras palabras, la extrapolación de datos históricos a partir de distribuciones estadísticas no permite evaluar la amenaza ante fenómenos climáticos porque estos procesos no son lineales y los valores extremos presentan una respuesta a gran cantidad de variables como la precipitación, la temperatura y el viento, las cuales están sujetas a otros procesos como el Cambio Climático.

Para reducir la incertidumbre frente a las estimaciones en el comportamiento hidroclimático son muchas las instituciones y entidades que han desarrollado **herramientas hidroinformáticas de modelación**, las cuales tienen por finalidad la representación de la respuesta de una cuenca

² FAO es la sigla utilizada para la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

hidrográfica con base en parámetros climáticos, físicos y demandas de agua para consumo humano. La herramienta utiliza un conjunto de formulaciones matemáticas que relacionan los procesos hidrológicos que se mencionaron para el balance hídrico.

Cabe destacar que la hidroinformática permite la simulación hidrológica e hidráulica de una cuenca a través de la tecnología para la solución de problemas de la ingeniería, hidrología y medio ambiente, sin embargo, depende del objetivo de la investigación o proyecto el tipo de modelo que se utilizará (agregado y distribuido), el período de análisis, el tamaño de paso, entre otras características; incluyendo el Cambio Climático.

El **Cambio Climático** es definido como una variación estadística en la tendencia media de las variables climatológicas para un período mayor a una década (World Meteorological Organization, 2021). La causa de esta desviación estadística es la variación en la cantidad de gases atmosféricos que bloquean la salida del calor de La Tierra, denominados de efecto invernadero (Vapor de agua, Dióxido de Carbono, Metano, Óxido nitroso y Clorofluorocarbonos, principalmente); lo cual resulta en variaciones: de la temperatura media; la velocidad de procesos hidrológicos (cambios en la evaporación, nubosidad, precipitación, etc.); e incluso en la distribución espacial del clima.

Esta tendencia estadística ha sido natural en el planeta, y se han registrado variaciones disruptivas debido a forzamientos externos como ciclos solares o erupciones volcánicas, aunque, en los últimos 100 años se ha determinado que se está desarrollando un Cambio Climático diferente al registrado, puesto que se ha podido establecer que las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) antrópicas (producidas por procesos industriales, aprovechamiento de combustibles fósiles, entre otros) y los cambios en el uso del suelo han acelerado este proceso a un ritmo alarmante y que no permite la adaptación de los sistemas naturales y humanos. Tanto así, que medios como *The Guardian* han decidido llamar el Cambio Climático como **Crisis Climática**, considerando que el término original no refleja la seriedad y severidad del impacto que tienen estos procesos (Zeldin, 2019).

Además, teniendo en cuenta que los efectos del Cambio Climático se pronosticaban desde hace más de dos décadas, ya existen evidencias de cambios en el comportamiento del tiempo en todas partes del mundo (TeleSUR TV, 2020), algunos ejemplos son: tormentas de nieve en lugares donde históricamente no ocurrían (Montgomery, Robertson, Krauss, & Fazio, 2021), pérdidas físicas y humanas por el paso de huracanes (BBC News Mundo, 2020), inundaciones con mayor impacto y frecuencia (Wires, 2021), entre muchos otros.

Con el mismo enfoque, Low (2020) afirma que en el año 2019 ocurrieron desastres naturales con enormes pérdidas económicas y materiales, causadas por ciclones tropicales en Asia, inundaciones constantes en India y China, así como tormentas severas en los EE. UU e incendios de gran extensión en Australia. En complemento de lo anterior, en la Figura 2, se visualiza un gráfico que estima las pérdidas relacionadas con desastres naturales.

El mismo autor (Low, 2020) indica que las pérdidas generales y aseguradas por desastres naturales en 2019 fueron cercanas a los US \$150 mil millones (billón US), el cual es un valor menor a la media de la última década (US \$ 187 mil millones). Pero, esta cifra aún representa un valor significativo para la economía mundial, además, se debe considerar que estos costos fueron activados por miles de eventos pequeños que ocasionaron pérdidas y no por un fenómeno de gran magnitud, entonces, comparado con los años de comportamiento benigno (2014 y 2015), las pérdidas sí fueron mayores a las esperadas.

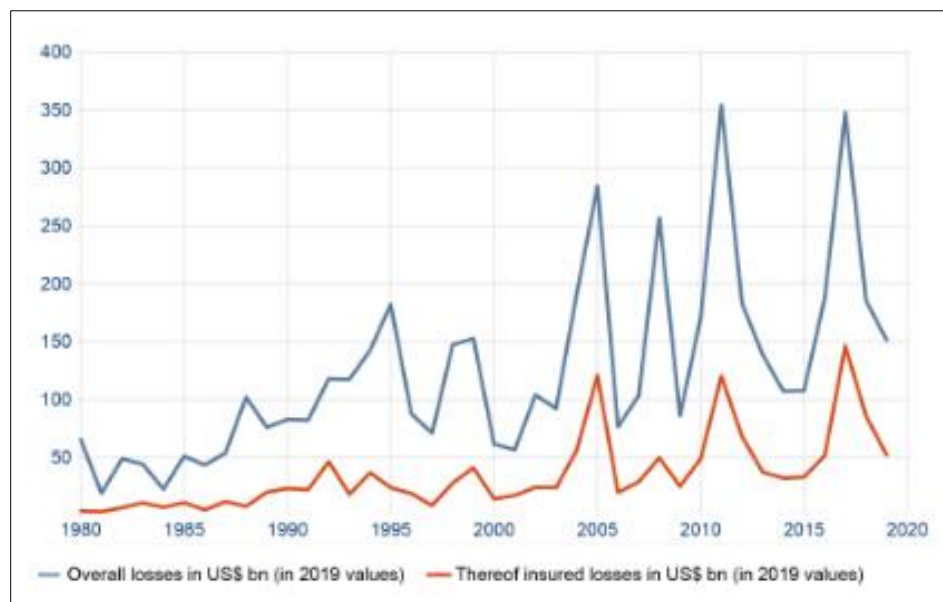


Figura 2. Pérdidas estimadas por desastres naturales en 2019
Fuente: (Low, 2020)

Cabe aclarar que la asociación de estos fenómenos al Cambio Climático se fundamenta en estudios como la recopilación realizada por Mora (2021), es decir, investigaciones científicas en donde se puede establecer específicamente el impacto del C.C. para la humanidad. En la siguiente tabla se presenta algunos **impactos representativos asociados al Cambio Climático** (Mora, 2021):

Tabla 2. Evidencia del Cambio Climático en la humanidad

Impacto	Cambio Cobertura Vegetal	Aumento Temperatura	Lluvia	Inundación	Incendios	Nivel del Mar
Salud						
Malnutrición		X	X	X		
Salud Mental		X		X X	X	
Suicidio		X	X	X X		
Riesgo de accidentes	X	X				X
Muerte	X	X X	X	X X	X	

Impacto Cambio Climático	Cambio Cobertura Vegetal	Aumento Temperatura	Lluvia	Inundación	Incendios	Nivel del Mar
Enfermedades patógenas	X X	X X	X X	X		
Enfermedades	X	X	X	X	X	X
Peligro Calidad Aire	X X	X	X		X	
Comida						
Contaminación		X	X	X	X	
Agricultura	X X	X X	X X	X	X	X
Acuicultura	X	X X		X X		X
Pesa Marina	X	X X	X X	X X		X
Ganado	X	X X	X X	X		
Precio de la Comida		X	X	X		
Agua						
Escasez		X	X			
Calidad	X X	X	X	X	X	X
Suministro	X X	X	X	X	X	X
Escorrentía	X		X	X	X	
Infraestructura						
Puentes		X		X		
Refugios	X	X		X	X	
Transporte	X	X X	X	X	X	X
Electricidad		X	X	X	X	X
Edificios		X	X	X	X	X
Pérdida de Tierra	X	X	X	X		X X
Barreras Costeras	X	X	X	X		X X
Comunicaciones	X	X		X		
Vías		X	X X	X		
Agua y aguas residuales	X	X	X	X		
Seguridad						
Migración	X	X X	X X	X X		X
Violencia	X	X X	X X	X		
Conflictos	X X	X X	X X	X X		X
Desplazamiento		X	X	X	X	X
Economía						
Trabajos	X	X		X		

Impacto Cambio Climático	Cambio Cobertura Vegetal	Aumento Temperatura	Lluvia	Inundación	Incendios	Nivel del Mar
Costos por daño a infraestructura	X	X	X	X		
Turismo	X	X X	X X	X	X	X
Costos de operación	X	X	X	X	X	
Ingresos	X X	X X	X X	X X	X	
Recursos Naturales	X	X X	X			X
Pérdidas económicas	X	X	X	X X	X	
Crecimiento económico		X X	X X	X		
Costos de adaptación		X	X	X		X

Nota: Las equis rojas denotan investigaciones que ya han sido evaluados por pares académicos y se han confirmado los resultados obtenidos. Las equis azules corresponden a estudios en revisión.

Fuente: Traducido y adaptado de Mora (2021)

Es importante resaltar del cuadro anterior que los impactos atribuidos al Cambio Climático en la temática de agua superficial son de escases, calidad, suministro y escorrentía, en otras palabras, afecta directamente todos los componentes de disponibilidad hídrica. Asimismo, las pérdidas materiales, el aumento de enfermedades, dificultan la extracción, producción y demás efectos adversos en las actividades o productos humanos, implicando mayores demandas hídricas para los seres humanos.

Por otra parte, se debe considerar que la demanda hídrica varía según el país, el territorio, el sector económico, clima, tecnología, etc. No obstante, lineamientos generales del consumo humano han sugerido orientar el sistema capitalista hacia un consumo más responsable que incluya modelos sostenibles (usando economías verdes, naranjas o azules). En donde el Cisne Verde (BIS, y otros, 2020) representa uno de los informes más relevantes para el cambio de paradigmas en la forma de consumo de agua, de recursos y las emisiones de gases de efecto invernadero, puesto que el informe explica que la política monetaria tradicionalmente toma una posición expectante ante eventos con un potencial desconocido, en caso de que el impacto sea temporal se responde observando a través del shock y se toman medidas para volver a las condiciones iniciales; en caso contrario, cuando el impacto tiene efectos duraderos, es necesario tomar medidas políticas y económicas que se ajusten a las nuevas condiciones monetarias.

Continuando, en el mismo documento (BIS, y otros, 2020) se explica que, según Olovsson (2018), los riesgos relacionados con el clima involucran cambios irreversibles en ciertos patrones e impactos climáticos, lo cual significa que la política monetaria debe considerar:

- i. Si bien el uso de instrumentos cíclicos tiene como objetivo estimular o someter la actividad en la economía durante períodos relativamente cortos, se espera que el cambio climático mantenga su

trayectoria durante largos períodos de tiempo (Cœuré (2018), citado por BIS, y otros (2020)). Esta situación puede conducir a perturbaciones de la oferta de estancamiento que la política monetaria puede ser incapaz de revertir por completo (Villeroy de Galhau (2019a), citado por BIS, y otros (2020)).

- ii. El cambio climático es un problema global que exige una solución global, mientras que la política monetaria parece ser actualmente difícil de coordinar entre países (Pereira da Silva (2019a), citado por BIS, y otros (2020)). Como tal, el caso de un solo país o incluso una zona monetaria para reaccionar a las crisis inflacionarias relacionadas con el clima podría ser irrelevante.
- iii. Incluso si los bancos centrales pudieran restablecer la estabilidad de precios después de un choque inflacionario relacionado con el clima, la pregunta sigue siendo si podrían tomar medidas preventivas para protegerse ex ante contra los riesgos climáticos de cola gruesa, es decir, eventos de cisne verde (Cœuré (2018), citado por BIS, y otros (2020)).

Entonces, queda claro que el Cambio Climático es una temática relevante que se está incluyendo en la planificación político-económico-territorial de todos los países debido al impacto directo que representan los costos asociados a la adaptación, mitigación y recuperación por fenómenos naturales entre los territorios y en ellos mismos. La cual debe ser intervenida a través de estrategias particulares y locales que consideren la incertidumbre en la elección de escenarios futuros (relacionando tecnologías, políticas, comportamientos, economía y patrones climáticos), la evaluación y adaptación de los escenarios planteados, y la toma de decisiones acertadas para mitigar el impacto de los fenómenos asociados al Cambio Climático (BIS, y otros, 2020).

Bajo este panorama, Colombia, a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ha investigado y publicado múltiples informes sobre la adaptación y mitigación del Cambio Climático. En el 2017 se publicó la Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA), el cual es el reporte de todas las actividades, avances y resultados de las políticas nacionales para implementar la Convención, además de presentar la información más actualizada sobre el Cambio Climático. Se destaca que este informe muestra las tendencias climáticas esperadas de precipitación y temperatura a escala departamental para todo Colombia, utilizando los escenarios climáticos más representativos sugeridos por el IPCC.

De igual forma, se han desarrollado estudios regionales sobre el Cambio Climático, siendo el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Quindío (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) el más representativo para el análisis de la cuenca del Río La Vieja. Este documento contiene la síntesis del diagnóstico y las estrategias que se plantean en el territorio para mejorar la capacidad de adaptarse a los cambios de temperatura y precipitación proyectadas hasta el 2030, así como reducir las emisiones de GEI según los compromisos del Acuerdo de París.

De este informe es importante considerar dos elementos: i) El Plan de Ordenación y Manejo Ambiental del Río La Vieja no incluye consideraciones de Cambio Climático y esta investigación funciona como un anexo que debe agregarse en los lineamientos planteados años atrás; y ii) Los resultados y las estrategias vinculadas al recurso hídrico se basan en estudios de Rendimiento Hídrico

(IDEAM, 2015b), calificaciones de indicadores sobre seguridad alimentaria (IDEAM, y otros, 2017)³ e índices del uso del agua (DANE, 2016); los cuales son a escala departamental, anteriores al Plan Integral de Gestión, su resultado se determina a través de indicadores y no se plantea una actualización o verificación para ajustar las estrategias hasta que se termine el horizonte del proyecto en 2030 (se plantea actualizar costos, indicadores y Planes de Ordenamiento Territorial).

Con base en lo anterior, se puede establecer la necesidad de estudios a escala municipal que sean integrados por parte de las entidades públicas en la toma de decisiones, los cuales se deben realizar a escala de unidades de cuencas. Asimismo, se debe integrar la mejora continua para la toma de decisiones sobre la mitigación y adaptación del Cambio Climático sobre el Quindío.

Para finalizar con este apartado se presenta la visión que tiene el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Quindío, al cual se busca contribuir con esta investigación:

Para el año 2030, el Quindío será un departamento sostenible y sustentable, resiliente, humano, educado, equitativo, con conciencia ciudadana, justo e incluyente socialmente. Su crecimiento será coherente con la oferta ambiental y tendrá en cuenta los riesgos climáticos a los que se expone, para tomarlos como punto de partida para la Planeación y el Ordenamiento del Territorio, aumentando la capacidad de resiliencia de la población y los sectores productivos. Promoverá la diversificación de los productos y servicios que contribuyen con la economía del Departamento, incentivando su desarrollo con bajas emisiones de carbono mediante la investigación e innovación, el desarrollo de competencias educativas y la formación laboral. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

2.2 ESTADO DEL ARTE

El estudio de las investigaciones y documentos relacionados con la temática de Cambio Climático y Balance Hídrico, además de los presentados en el apartado anterior, han dado como resultado los siguientes precedentes:

Son múltiples los autores a nivel mundial que afirman una tendencia en el trópico a la disminución de la precipitación total anual y un aumento en la intensidad de los eventos extremos considerando únicamente el fenómeno de precipitación, ejemplo de ello son estudios realizados en Portugal (Sanches, Pereira, Morgado, & Macário, 2018), Argentina (Iturraspe & Urciuolo, 2010), Canadá (Wang, Huang, Liu, Li, & Zhao, 2015) y Colombia (Pabón, 2012). Sin embargo, otros autores han ido más allá al evaluar la calidad de los resultados de estas proyecciones junto con otras variables o en la aplicación dentro de la Ingeniería Civil y Ambiental, en donde se pueden encontrar estudios sobre la calidad del agua (Sokac, Veliskova, & Dubova, 2013; Gaviño, 2010) y la afectación de la precipitación a las cuencas (Xu, y otros, 2018).

De estas investigaciones sobresale la desarrollada por Bertoni y Ganancias (2010), quienes exponen de forma clara el comportamiento estacionario asumido para las variables

³ Los resultados del estudio utilizados hacen parte de una entrega parcial en el 2016 y no al documento final.

hidrometeorológicas, las tendencias que se han encontrado en la precipitación, la sensibilidad de esta variable y el caudal por perturbaciones en la temperatura y la evapotranspiración. En conclusión, son numerosos los estudios que plantean un escenario en donde se muestra la relevancia del estudio del Cambio Climático y la integración de múltiples enfoques en un solo sistema.

Una vez se ha presentado el contexto hidroclimático a nivel mundial, se presenta una investigación que ha comparado la respuesta hídrica de dos regiones, una con cobertura de bosque y otra con pradera, ambas naturales y ubicadas al sur de Chile. El estudio fue desarrollado por Echeverría, Huber y Taberlet (2007) y mostraron que el contenido de humedad es muy variable a través del tiempo en cualquiera de las dos coberturas, sin embargo, la variación espacial es apreciable en la totalidad del perfil analizado en el bosque (3 metros de profundidad), mientras que en la pradera la desecación es aguda en el primer metro de suelo. Asimismo, el estudio encontró que el agua percolada alcanzó el 66% y 87%, para el bosque y la pradera, respectivamente, pero esta diferencia es consecuencia de la evapotranspiración en cada zona, la cual corresponde al porcentaje faltante. Como resultado final de esta investigación, los autores ratifican que la respuesta hídrica en una región depende de la distribución de precipitaciones, condiciones climáticas, características de las aéreas de vegetación y el tipo de sistema reticular. Con base en lo anterior, un cambio entre la cobertura significa modificaciones en el agua que llega al suelo mineral, variación en la cantidad espacial y temporal del agua en la cuenca, así como la cantidad interceptada e infiltrada.

Con un enfoque más aplicado, Day y Howarth (2019) realizan el balance hídrico del ciclo hidrológico para evaluar la disponibilidad futura del recurso hídrico en todas las escalas espaciales. Este estudio investigó los impactos de los cambios proyectados en la temperatura del aire y lluvias mensuales a mediados del siglo XXI en comparación con las condiciones climáticas normales de 1981–2010 en una cuenca de media escala, cubierta principalmente por bosques en el sureste de los Estados Unidos (USA). Los resultados mostraron un incremento en el déficit de humedad del suelo durante los períodos secos y una disminución en la humedad anual del suelo, lo cual se traduce en una vulnerabilidad alta frente a la disponibilidad de recursos hídricos dentro de la cuenca.

A nivel nacional, Colombia ha sido objeto de estudios relacionados con la disponibilidad hídrica de forma histórica, recurrente y localizada. Una de las investigaciones más representativas es el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2019d), el cual contiene conocimiento del agua de manera integral en las subzonas hidrográficas de todo el país, estableciendo el potencial desabastecimiento, la calidad del agua, así como información sobre sequías e inundaciones que pueden ayudar en la planificación y adaptación a la variabilidad climática.

De forma específica, Velásquez y Poveda (2019) realizaron el balance hídrico superficial por medio de la escorrentía media anual en la zona continental del dominio geográfico de Centro América, validando los resultados en los principales ríos de la región del Pacífico Colombiano: Atrato, San Juan, Baudó, Patía y Mira. En la investigación se usaron los registros de caudal de las estaciones hidrológicas del IDEAM, así como los reportados en el Estudio Nacional del Agua del 2015. Para la estimación de los campos de precipitación se utilizó la información de *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) y *Climate Hazard group InfraRed Precipitation with Station* (CHIRPS); para la

evapotranspiración real se usó información del Max Planck Institute (MPI), así como los métodos de Choudhury y Budyko partiendo de información de evapotranspiración potencial del *Climatic Research Unit* (CRU). Los autores lograron obtener con la ecuación de balance hídrico en los ríos Atrato y Baudó un error del orden de cercano al 15% y en el Río Mira se presentan errores del 40%.

Asimismo, en el municipio de Montería (Córdoba), se llevó a cabo un balance hídrico de la cuenca de la quebrada Aguas Blancas, en donde López, Martínez, Feria y Cruz (2016) investigan la sostenibilidad del recurso hídrico según las demandas de la población ubicada en el área de estudio. Los autores utilizaron los registros históricos de siete estaciones meteorológicas, se cuantificó la oferta hídrica de la zona y se comparó con la demanda requerida para consumo doméstico. Es de destacar, que en la investigación se implementó el uso de Sistemas de Información Geográfico (SIG) y programas de simulación para generar los escurrimientos mensuales con base en datos de precipitación. Los resultados obtenidos mostraron que es posible resolver la problemática de suministro de agua almacenando la escorrentía superficial en períodos húmedos, para luego utilizarla en los períodos de sequía.

Como complemento, se presenta la investigación de Osso, Cabrales y Rosso (2017), quienes aplicaron la técnica de Monte Carlo para simular los flujos de entrada y de salida pertenecientes al balance hídrico, de tal forma que se incluyó la incertidumbre que poseen los fenómenos hidroclimáticos en el estudio de la represa que provee agua a la ciudad de Tunja, Colombia. Además, en el estudio se analizaron dos fuentes alternas para agua potable, pero los resultados demostraron que la mejor fuente alternativa para el abastecimiento de agua para Tunja en los próximos 40 años es el embalse de La Copa. Cabe resaltar que los autores utilizaron herramientas para ajustar la precipitación, la infiltración, la escorrentía, la evapotranspiración y el caudal subterráneo a variables aleatorias (requerimiento de la técnica de Monte Carlo).

Dentro de la cuenca que es objeto de estudio, la investigación más relevante se titula: “Construcción de capacidades bajo escenarios de Cambio Climático en las cuencas del río La Vieja y Otún en Colombia - Ríos del Páramo al Valle por urbes y campiñas” y fue desarrollada por el Instituto del Ambiente de Estocolmo (SEI) en asociación con los grupos de investigación de la Universidad del Quindío (Grupo de Investigación Desarrollo y Estudio del Recurso Hídrico y Ambiente [CIDERA]), Universidad Tecnológica de Pereira (Grupo de Investigación en Ecología, Ingeniería y Sociedad [EIS]) y la Universidad del Valle (Instituto de Investigación y Desarrollo de Abastecimiento de Agua, Saneamiento y Conservación del Recurso Hídrico [CINARA]); en conjunto con prestadoras del servicio de agua potable, corporaciones autónomas y otras entidades gubernamentales. En esta investigación se realizó la Planeación y Gestión de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos La Vieja y el Otún bajo escenarios de Cambio Climático con Modelos de Circulación General del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Estados Unidos (NCAR). De igual forma, este estudio incluyó la estimación de carga contaminante en la cuenca, sectorizando por el tipo de actividad (55% del sector doméstico, 30% del industrial y 15% de los sectores cafetero y porcícola) y el aporte por afluente. Además, se realizaron talleres en las capitales de los departamentos en donde se encuentra la cuenca (Armenia y Pereira) para la identificación de, lo que fueron, 14 incertidumbres y 10 estrategias relacionadas con el manejo del agua en la cuenca del río La Vieja. La cohesión de los

modelos de cantidad, calidad y demanda de agua permitieron establecer las tendencias hacia el estrés hídrico de la subzona hidrográfica como consecuencia de las actividades humanas y afectadas por el Cambio Climático. (SEI, y otros, 2014)

No obstante, también es necesario resaltar el estudio titulado “Modelación hidrológica distribuida para la estimación de la oferta hídrica superficial de la subzona hidrográfica del Río La Vieja”, desarrollada por Cesar Rodríguez (2020), ya que en esta se presenta la modelación hidrológica distribuida de la subzona hidrográfica del río La Vieja utilizando el modelo TETIS en su versión 9.0.1. Con este estudio se calibró y estimaron parámetros para el modelo, además de estimar la oferta hídrica superficial para 45 puntos.

Con base en este estudio se pueden obtener datos, información y consideraciones actualizadas de la cuenca para los componentes más relevantes de la hidrología, y utilizarse para comparar los resultados con los obtenidos de la presente investigación, sin considerar el Cambio Climático.

En adición, es importante mencionar que a nivel mundial se ha generalizado la implementación de herramientas que simplifican el comportamiento hidroclimático y que no consideran el Cambio Climático. Ejemplo de lo anterior, es el método simplificado de Vargas y Díaz-Granados (1998) para determinar las intensidades de tormenta, el cual suele ser utilizado como insumo para el cálculo de caudales debido a que provee una aproximación al comportamiento de la intensidad en el país con base en la precipitación máxima diaria promedio anual, datos de fácil acceso en la mayoría de las regiones del país. No obstante, estudios como el realizado por Vélez, y otros (2002), y por Bustos y Lopera (2019) han encontrado que las estimaciones con este método no se ajustan al comportamiento local de las tormentas, presentando cambios en la distribución de la lluvia, magnitud de la intensidad o errores sistemáticos al considerar el período de retorno. En otras palabras, han generado incertidumbre sobre el comportamiento de la intensidad, incluso sin considerar el Cambio Climático, con lo cual se resalta la necesidad de realizar herramientas que permitan estimar el comportamiento hidroclimático de forma más precisa, eficaz y eficiente.

Para finalizar, es de destacar que la mayoría de los estudios presentados que tratan el Cambio Climático están bajo el marco del IPCC (2014), dado que este panel se plantea como la mayor organización de agrupación y desarrollo sobre el clima, además de haber planteado los Modelos de Circulación General del cual se desprenden los escenarios que son evaluados para cualquier estudio relacionado con el Cambio Climático. Asimismo, el enfoque que rige los estudios climáticos nacionales sigue el mismo marco mundial, adaptado bajo las características propias y proveídas por la República de Colombia (2015; 2017).

CAPÍTULO III

3.1 DISEÑO DE METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para este proyecto se ha planteado como metodología el desarrollo de ocho componentes:

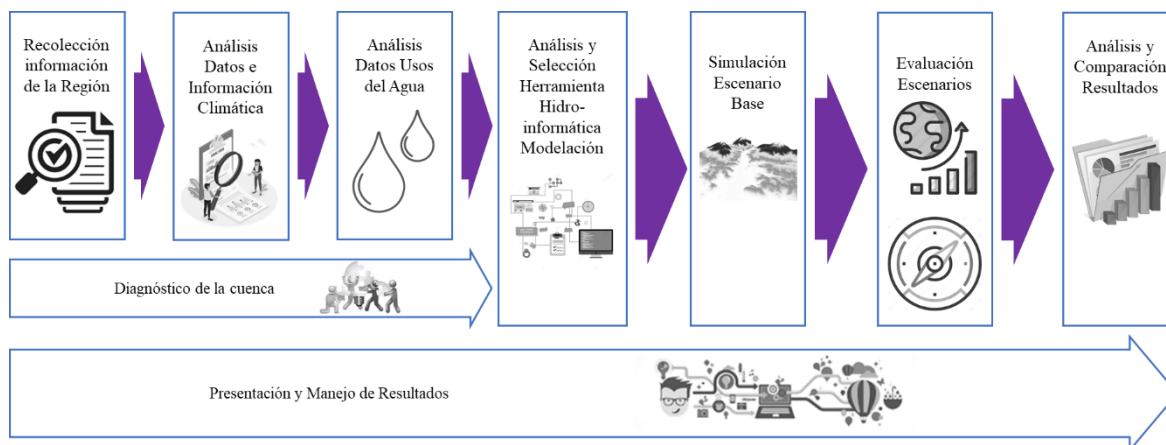


Figura 3. Metodología del Proyecto

Fuente: El autor

Diagnóstico de la cuenca y recolección de información hidroclimatológica de la región: en la primera fase del proyecto se tiene por objetivo la identificación de las tendencias y procesos hidrológicos que se dan en la cuenca, así como el estado de la red de datos disponible en el área de estudio. Esta labor se hace a través del análisis de información hidroclimatológica secundaria, ya sea de datos medidos por instrumentación de la región o por investigaciones anteriores que han determinado información relevante para esta investigación. Es importante considerar que el análisis planteado se acompaña de un estudio de la red hidrológica que cubre a la cuenca, observando el tipo de estaciones, su calidad y su ubicación espacial.

Análisis de datos e información hidroclimática: esta sección tiene por objeto analizar la información recolectada para el estudio de cada uno de los componentes que intervienen en la cuenca. Las actividades que se consideran son análisis estadístico, transformación de los datos en información geográfica, definición de período de estudio y representación de variables en componentes topológicos. A partir de los resultados se identifica la cantidad, la calidad y el peso de la información sobre precipitación de la cual se tiene registro y se establece el comportamiento hidroclimático de la región según cada fenómeno, así como de las tendencias cuantificables.

Análisis de datos e información sobre usos del agua: considerando que un balance hídrico es la comparación de la oferta y la demanda en un área hidrográfica determinada, para esta investigación se debe definir cada uno de los usos del agua que son representativos para la zona de estudio y establecer las tendencias o fenómenos antrópicos que se prevén para la cuenca (con base en

investigaciones y estudios previos). Esta información es producto de la revisión de investigaciones previas relacionadas con balances hídricos, datos recolectados de Corporaciones Autónomas Regionales u otras entidades, en donde se resalta el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del río La Vieja, el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) del río Quindío y la información gestionada por la Corporación Autónoma del Quindío (CRQ), en donde se hallan lineamientos para el manejo de la cuenca, además de contener la caracterización de los actores y usos que en esta intervienen.

Análisis para la selección de la herramienta hidroyinformática de modelación: en los sistemas hídricos son múltiples las herramientas que permiten modelar los comportamientos y las interrelaciones que se desarrollan dentro de una cuenca; teniendo en cuenta que ya existen precedentes de modelación en Water Evaluation And Planning System (WEAP) y que dentro de sus funciones como Sistema de Soporte a la Decisión (SSD) se puede modelar el comportamiento de la cuenca a partir de registros medios mensuales que integren condiciones especificadas por el investigador, este software se ha seleccionado como la herramienta principal para el desarrollo del proyecto. No obstante, se han analizado las herramientas hidroyinformáticas existentes y se han evaluado los datos disponibles y su formato, valorando las características de los programas, accesibilidad, su utilización en estudios previos y los tipos de fenómenos que modela.

Modelación de escenario base: siguiendo los lineamientos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2014) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2017), como entidades especializadas en el estudio climático en el mundo y Colombia; se plantea un modelo para la cuenca compuesto por elementos de mayor resolución con respecto a estudios previos (sin abarcar necesariamente la totalidad de estos), se analiza el clima con condiciones propias de la región y se identifican comportamientos que no se habían realizado o requerían de una escala menor. Es decir, se utiliza la herramienta hidroyinformática para modelar el escenario base que representa el comportamiento ya registrado en la subzona hidrográfica, implementando los procesos de calibración para los años históricos, y su posterior validación y retroalimentación con datos no incluidos en la calibración.

Simulación de escenarios bajo condiciones de Cambio Climático: una vez se ha modelado el escenario base con su respectiva calibración y validación, se pone en marcha la simulación de escenarios de Cambio Climático, para esto se utilizan variaciones en las condiciones de temperatura y precipitación según investigaciones anteriores y los escenarios de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático relacionados con el Quindío (2015). De los escenarios climáticos resultantes se modifican variables demográficas, las cuales afectarán directamente las demandas y los usos del agua en la cuenca que, en consecuencia, supondrán diferentes resultados del balance hídrico.

Evaluación de los escenarios: al tener los escenarios, estos son evaluados y organizados según su importancia y probabilidad. Esta clasificación se materializa en el contexto de la región y se ejemplifican con algunos resultados esperados. Lo anterior, permite identificar a groso modo las amenazas por fenómenos naturales y la situación esperada para el ambiente y el sistema humano de la región.

Análisis y comparación de resultados: a partir de los análisis, la modelación y las simulaciones realizadas, se estudian los escenarios planteados y su relación con el contexto de la cuenca, generando información que apoya la toma de decisiones de entidades gubernamentales y privadas relacionadas con la disponibilidad hídrica en la región y las actividades humanas.

3.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Como se comentó en los primeros dos capítulos de la metodología, la recolección de datos se basa en cuatro fuentes principales: datos hidroclimáticos del IDEAM, datos climáticos de CENICAFE, datos hidroclimáticos de la CRQ, parámetros base utilizados en el estudio “Construcción de capacidades bajo escenarios de Cambio Climático en las cuencas del río La Vieja y Otún en Colombia - Ríos del Páramo al Valle por urbes y campiñas” (SEI, y otros, 2014), y en información secundaria resultante de estudios como el POMCA del río La Vieja (MinAmbiente, y otros, 2015), Estudio semidetallado de suelos del departamento del Quindío, entre otros.

Específicamente, del IDEAM se han obtenido series de datos de precipitación, evapotranspiración, temperatura y caudal. Los datos fueron revisados y se ha optado por utilizar las mismas estaciones y período que en el estudio realizado por Rodríguez (2020), puesto que asegura confiabilidad en las series históricas y comparación entre el modelo resultante de ese estudio y el de la presente investigación. Los datos son accesibles a través de los servicios en línea del IDEAM⁴.

La información obtenida de CENICAFE, la CRQ y la CVC es análoga a la anterior, es decir, se han obtenido registros de precipitación y temperatura de la red de estaciones que tienen las entidades y se han utilizado las mismas estaciones y período de análisis que en el estudio desarrollado por Rodríguez (2020). La información utilizada corresponde a la recopilación de registros históricos que se encuentran en las bibliotecas de la CRQ y CVC, así como en los anuarios de CENICAFE que se emiten de forma digital desde el año 2006; esta información fue recopilada por Rodríguez (2020).

En total se han utilizado los registros de precipitación de 59 estaciones climáticas, 12 estaciones para los registros de temperatura y 4 estaciones para la evapotranspiración.

Los datos de demanda se basan en los consumos medios por persona que se han calculado para cada uno de los municipios que componen a la subzona hidrográfica, determinadas por SEI, y otros (2014). Estos datos se han comparado con las concesiones otorgadas por la CRQ hasta el año 2019, los cuales fueron suministrados directamente por dicha entidad y permiten evaluar los consumos máximos esperados dentro de la cuenca de forma legal.

Correspondiente a la población de los municipios, los datos se basan en los censos nacionales realizados por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) en los años 1993, 2005 y 2018. Si

⁴ La página de acceso para esta información es: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

bien la información se ha dividido en residentes urbanos y rurales, para el modelo se ha considerado que el total de la población se concentra en el casco urbano.

Los demás parámetros corresponden a la recolección de información secundaria de estudios institucionales a nivel departamental, de zona hidrográfica o nacional. De los cuales se ha obtenido parámetros como las propiedades del suelo, escenarios de evaluación y estudios de comparación de los resultados obtenidos.

3.3 ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río La Vieja se encuentra ubicado entre el Valle del Cauca por el Suroeste, al Norte con Risaralda y al Sureste con la cordillera de Los Andes en el Tolima, abarcando la totalidad del departamento del Quindío, así como parte del Valle del Cauca y de Risaralda (Ver Figura 4). La cuenca se encuentra ubicada entre las coordenadas $4^{\circ}04'24.24''$ y $4^{\circ}48'49.32''$ de Latitud Norte, y los $75^{\circ}58'03.43''$ y $75^{\circ}22'58.8''$ de Longitud Oeste, naciendo en la cordillera Central a 4,602.7 msnm y desembocando en el río Cauca a 896.6 msnm.

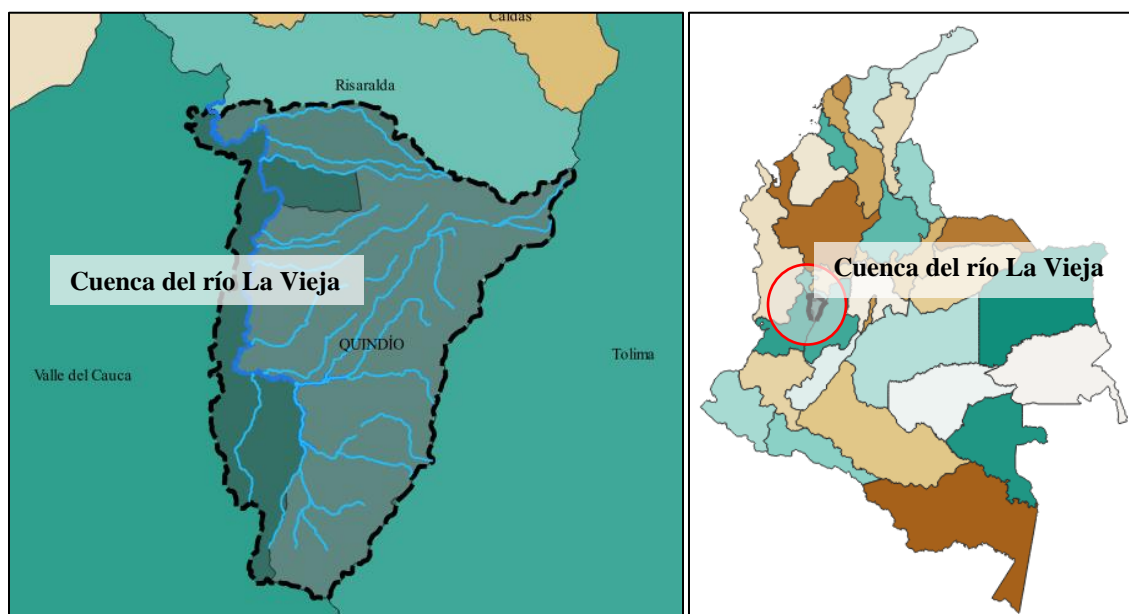


Figura 4. Ubicación de la cuenca del río La Vieja
Fuente: Adaptado de IGAC (2021)

Específicamente, los límites de la cuenca del río La Vieja son:

Partiendo del Nevado del Quindío al sur por la cordillera central hasta el Páramo de Barragán; luego en dirección oeste siguiendo la línea divisoria entre Quindío y Valle hasta el sitio Rincón Santo. De este sitio en dirección norte siguiendo la divisoria de aguas pasando por Sevilla, Corozal, Miravalles, Villa Rodas, Cartago hasta la hacienda El Rincón (Valle) sobre el río Cauca; por éste aguas abajo, hasta la Hacienda La Tigra (Risaralda); de aquí en dirección este por la divisoria de aguas hasta Cerritos, sobre la carretera central, por esta hacia Pereira; se sigue en dirección sureste tocando los puntos La

Bella, Morro Azul, hasta la Cuchilla Media Luna (Divisoria Quindío-Risaralda) para finalizar en el Nevado del Quindío (CRQ, y otros, 2008).

La cuenca del río La Vieja según la clasificación del IDEAM está identificada con el código 2612, el cual indica que el área de estudio corresponde a una **subzona hidrográfica** y hace parte de la cuenca Magdalena Cauca (2), específicamente de la zona hidrográfica Cauca (26).

La subzona hidrográfica tiene un área aproximada de 2,837 km², la altura media es de 1,767 msnm y en general tiene un clima templado. Con base en la jurisdicción departamental, el 68% (1,962 km²) de la subzona del río La Vieja pertenecen al Quindío, el 10% (299 km²) a Risaralda y el 22% (619 km²) al Valle del Cauca. Lo cual representa que la cuenca se compone de 21 municipios, en donde 12 son del Quindío (Filandia, Quimbaya, Circasia, Salento, Montenegro, Armenia, Calarcá, La Tebaida, Córdoba, Buenavista, Pijao y Génova.), 8 del Valle del Cauca (Cartago, Obando, La Victoria, Zarzal, Sevilla, Caicedonia, Ulloa y Alcalá.) y 1 del Municipio de Risaralda (Pereira).

El área de estudio está compuesta por 21 microcuencas y 28 descargas directas, en donde el 9.52% (2 microcuencas) de las microcuencas pertenecen a Risaralda, el 76.19% (16 microcuencas) a Quindío y el 14.39% (3 microcuencas) están ubicados entre dos departamentos. Asimismo, de las descargas directas el 60.71% (17 unidades) pertenecen al Valle del Cauca, el 10.71% (3 unidades) son de Pereira y el 28.57% (8 unidades) se ubican en el Quindío.

A continuación, se presenta la tabla que contiene cada una de las microcuencas de la subzona hidrográfica:

Tabla 3. Unidades geográficas de la cuenca La Vieja

Unidad Hidrográfica	Microcuenca	Departamento	Área (km ²)	Perímetro
Q. Buenavista, R. Barbas, Q. Santodomingo	R. Barbas	Risaralda – Quindío	107.28	83.80
Q. Cristales, R. Roble, R. Espejo	Q. Cristales	Quindío	92.41	56.57
Q. Cristales, R. Roble, R. Espejo	R. Espejo	Quindío	155.37	78.64
Q. Cristales, R. Roble, R. Espejo	R. Roble	Quindío	115.54	79.02
Q. San Felipe, R. Barbas	Q. Buenavista	Quindío	55.19	53.86
Q. San Felipe, R. Barbas	Q. San Felipe	Valle - Quindío	21.71	31.48
Q. San Felipe, R. Barbas	Q. San Felipe	Quindío	28.12	38.59
R. Consota, Q. Cestillal	Q. Cestillal	Risaralda	50.67	60.12
R. Consota, Q. Cestillal	R. Consota	Risaralda	163.62	81.24
R. Lejos	R. Azul	Quindío	75.19	40.15
R. Lejos	R. Lejos	Quindío	155.87	90.23
R. Quindío	Q. La Picota	Quindío	42.63	30.59
R. Quindío	R. Boqueron	Quindío	50.68	33.49
R. Quindío	R. Navarco	Quindío	74.14	47.88
R. Quindío	R. Quindío	Quindío	276.50	168.21

Unidad Hidrográfica	Microcuenca	Departamento	Área (km²)	Perímetro
R. Quindío	R. Santodomingo	Quindío	151.99	58.70
R. Quindío	R. Verde	Quindío	122.81	70.99
R. Rojo	R. Gris	Quindío	53.75	41.56
R. Rojo	R. Rojo	Quindío	127.54	56.22
R. Rojo	R. San Juan	Quindío	63.08	43.55
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Quindío	31.56	38.06
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Quindío	44.76	39.82
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Quindío	23.35	31.20
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Quindío	17.34	23.49
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Quindío	12.69	16.91
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Quindío	19.01	24.93
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Quindío	5.08	19.54
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Quindío	4.60	13.83
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Risaralda	31.41	25.96
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Risaralda	5.96	13.70
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Risaralda	9.31	32.13
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	13.12	21.57
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	66.12	52.72
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	10.47	23.26
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	15.70	18.65
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	15.23	23.01
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	9.89	18.72
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	26.15	25.42
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	8.60	17.37
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	7.92	17.50
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	11.36	17.26
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	29.95	37.13
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	17.63	26.68
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	17.45	24.64
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	29.55	29.32
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	7.52	18.64
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	31.53	44.33
Directo R. Vieja	Directo R. Vieja	Valle	179.25	66.19
Directo R. Vieja	R. Barragán	Valle - Quindío	156.80	98.66

Fuente: El autor

Según el POMCA del río La Vieja (MinAmbiente, y otros, 2015), las características morfológicas de la subzona hidrológica son:

- Al tener un índice de compacidad igual a 1.69 y un factor de forma de 0.32, la subzona tiene una forma alargada entre oblonga y oblonga rectangular, lo cual significa que la

susceptibilidad a avenidas torrenciales es baja-media. Este valor es apoyado por la pendiente media de 8.68%.

- El cauce principal del río La Vieja está ubicado hacia la vertiente izquierda de la cuenca, indicado por el factor de asimetría de 1.35.
- La pendiente media del cauce es igual a 2.36%, esta es representativa para la mayor parte de la cuenca (exceptuando la alta montaña) y se considera un valor bajo.
- El tiempo de concentración del agua es cercana a las 43 horas, es decir, este tiempo es necesario para que la gota más alejada de la divisoria de aguas de la cuenca llegue hasta la desembocadura del río.

3.4 PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

El procesamiento inicial de los datos climáticos se ha basado en un análisis de cantidad y calidad de la información que, según lo mencionado, ha partido del análisis hidroclimático de Rodríguez (2020). En este estudio se tomaron las series históricas recolectadas sin procesamiento, por lo tanto, se completaron los datos faltantes con el método general de ponderación por distancia (IDW).

Este método consiste en la interpolación de valores en una estación a partir de los registros de otras estaciones, es decir, se utiliza una media ponderada con base en el registro de las estaciones cercanas y se utiliza la distancia inversa para determinar la importancia de los datos.

La fórmula que representa este método está dada por:

$$z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^\beta}}$$

En donde, z_j es el valor estimado para el punto
 n es el número de puntos usados en la interpolación
 z_i es el valor registrado en el punto i -ésimo
 d_{ij} es la distancia entre el punto donde se estima el valor y el punto i -ésimo
 β es un exponente de ponderación que controla la variación con la distancia.

Notas:

- El valor β utilizado para la sustitución de datos se ha considerado como 2.0 para todas las estaciones. Este valor se ha tomado de la literatura y se recomienda profundizar en los estudios para determinar este valor según la elevación de la estación en la cuenca (Rodríguez & Vargas, 2019).
- Además, es importante considerar que los valores d y β son constantes entre dos estaciones una vez se han establecido, por lo tanto, la escala temporal de este método no significa cambios a escala diaria, mensual y anual si los periodos de vacíos son iguales (30 días de vacío comparado con un mes, doce meses comparados con 1 año, etc.).

- La distancia máxima para considerar las estaciones ha sido 20 km alrededor del punto de estudio, teniendo en cuenta que esta longitud permite estimar registros para las estaciones con la menor densidad de estaciones cercanas y que las estimaciones para estaciones con distancias menores a 9 km⁵ no presentan cambios considerables al ser un método que asigna un peso de participación según la cercanía entre los puntos.

Este proceso se ha realizado a través de **R**, un software libre para gráficos y computación estadística que permite la sistematización de procedimientos y cuenta con paquetes para ejecutar métodos y procesos específicos. En el Anexo 1 se presenta el código con el cual se realizó el llenado de datos a escala diaria para la precipitación y la temperatura.

Una vez se han completado los registros se continua por la agregación de datos a escala mensual y anual. Para la lluvia y la evapotranspiración se ha tomado la precipitación y evapotranspiración total y para la temperatura se ha considerado el máximo y mínimo diario, así como el promedio mensual y anual. En los registros de precipitación, temperatura y evapotranspiración se ha utilizado un período de análisis igual a 25 años o 300 registros mensuales, correspondiente a 1992 hasta 2016.

Con respecto a la información de caudal, se ha extraído los registros mensuales desde el 2002 hasta el 2020 de la estación limnigráfica El Alambrado, la información disponible ya poseía estimaciones para los períodos faltantes, aunque existe un vacío entre los años 2009 y 2013. Por lo tanto, el período de calibración del modelo será de 11 años (1992 hasta 2002) y el período de validación será de 2003 hasta 2008.

Considerando que el período de tiempo de calibración sólo alcanza los 10 años con los datos registrados por la estación limnigráfica, el proceso de validación del modelo se ha complementado con la comparación de los registros de la estación limnigráfica Cartago y los resultados de caudal en este punto para el período completo calibración y validación (17 años).

Nota: El período de 2009 hasta 2016 se ha establecido como período de simulación base y en este se ha evaluado los resultados de los años 2010 y 2011, teniendo en cuenta que estos dos años presentaron registros superiores de precipitación y caudal debido a la incidencia del fenómeno de La Niña.

A continuación, se presenta el listado de las estaciones utilizadas en el proyecto:

Tabla 4. Listado de estaciones del Eje cafetero

Estación	Código	Tipo	Municipio	Latitud WGS 84	Longitud WGS 84	Altitud m.s.n.m.	Entidad
Alegrías	2614400101	PM	Sevilla	4.0805	-75.8636	2290	CVC
Almacafé Vivero	1001	PM	Quimbaya	4.6167	-75.7667	1330	CENICAFE

⁵ El área mínima recomendada por la WMO (1976) para ubicar estaciones de precipitación es de 100km² a 250km², equivalente a una distancia lineal entre 5.5km y 9km.

Estación	Código	Tipo	Municipio	Latitud WGS 84	Longitud WGS 84	Altitud m.s.n.m.	Entidad
Apto El Edén	26125060	SP	Armenia	4.4547	-75.7664	1229	IDEAM
Apto Matecaña	26135040	SP	Pereira	4.8159	-75.7372	1199	IDEAM
Arturo Gómez	1002	CP	Alcalá	4.6667	-75.7833	1259	CENICAFE
Barragán	26105140	CO	Tuluá	4.0331	-75.8880	3100	IDEAM
Bremen	23	ME	Filandia	4.6689	-75.6158	2040	CRQ
Ceilán	26100770	PM	Bugalagrande	4.1143	-76.0425	1382	IDEAM
Centro de la Guadua	7	ME	Córdoba	4.4019	-75.7158	1212	CRQ
Ceros	26110300	PM	Toro	4.6164	-76.0344	940	IDEAM
Combia	1003	PM	Pereira	4.8500	-75.7833	1173	CENICAFE
Corozal	26120130	PM	Zarzal	4.4028	-75.9154	1178	IDEAM
CRQ	21	ME	Armenia	4.5561	-75.6636	1550	CRQ
Cruces	2610000103	PM	Obando	4.6513	-75.9183	935	CVC
Cumbarco	26125130	CO	Sevilla	4.1851	-75.8324	1749	IDEAM
El Agrado	1004	CP	Montenegro	4.5167	-75.8000	1275	CENICAFE
El Alambrado	26120180	PM	Zarzal	4.4093	-75.8753	1070	IDEAM
El Berrión	1005	PM	Cartago	4.6667	-75.8333	1166	CENICAFE
El Cedral	1006	CP	Pereira	4.7000	-75.5333	2120	CENICAFE
El Granario	2625500102	PM	El Águila	4.9005	-76.0505	1813	CVC
El Recreo	1007	PG	Ulloa	4.7000	-75.7333	1421	CENICAFE
Galicia	26100410	PM	Bugalagrande	4.1719	-76.0564	1191	IDEAM
La Alejandría	1008	PM	Génova	4.1833	-75.7833	1600	CENICAFE
La Argentina	1009	PM	La Tebaida	4.4500	-75.7833	1200	CENICAFE
La Bella	1010	CP	Calarcá	4.5000	-75.6667	1449	CENICAFE
La Camelia	26120120	PM	Caicedonia	4.3316	-75.8348	1240	IDEAM
La Catalina	1011	CP	Pereira	4.7500	-75.7333	1321	CENICAFE
La Elvira	2614900102	PM	Zarzal	4.3884	-76.0473	927	CVC
La Esperanza	1012	PM	Filandia	4.6333	-75.6833	1671	CENICAFE
La Esperanza	1013	PM	Buenavista	4.3667	-75.7500	1428	CENICAFE
La Gitana	2614100103	PM	Tuluá	3.9455	-76.0095	2783	CVC
La Montaña	30	PM	Salento	4.6328	-75.4594	2860	CRQ
La Playa	24	ME	Salento	4.6410	-75.5574	1880	CRQ
La Renta	1014	PM	Pereira	4.7833	-75.7833	1194	CENICAFE
La Sierra	37	ME	Pijao	4.3414	-75.6839	1900	CRQ
La Sirena	1015	CP	Sevilla	4.2833	-75.9000	1519	CENICAFE
La Virginia	26140180	PM	La Virginia	4.8925	-75.8828	922	IDEAM
Maracay	1017	CP	Quimbaya	4.6000	-75.7333	1402	CENICAFE
Maracay	26130220	PM	Pereira	4.8122	-75.8431	1210	IDEAM
Miravalles	2614900201	CO	La Victoria	4.5192	-75.9167	1233	CVC

Estación	Código	Tipo	Municipio	Latitud WGS 84	Longitud WGS 84	Altitud m.s.n.m.	Entidad
Mónaco	1018	PM	Córdoba	4.4167	-75.7000	1350	CENICAFE
Navarco	22	PG	Salento	4.4831	-75.5539	2860	CRQ
Obando	26100300	PM	Obando	4.5886	-75.9658	986	IDEAM
Palmasola	26100830	PM	Cartago	4.6884	-75.9617	940	IDEAM
Paraguaicito	1019	CP	Buenavista	4.4000	-75.7333	1203	CENICAFE
Piedras De Moler	2615400111	PM	Cartago	4.7122	-75.8515	1100	CVC
Pijao	26120170	PM	Pijao	4.3328	-75.7063	1685	IDEAM
Planta de Tto.	1020	PG	Pereira	4.8000	-75.6667	1487	CENICAFE
Potreros	26130170	PM	Santa Rosa De Cabal	4.8856	-75.5581	2134	IDEAM
Pto Molina	2610000105	PM	Obando	4.6226	-76.0236	886	CVC
Puerto Frazadas	26100350	PM	Tuluá	4.0544	-75.9948	1657	IDEAM
Quebradanueva	2615400107	PM	Zarzal	4.3810	-75.9435	1043	CVC
Roncesvalles	22070010	PM	Roncesvalles	4.0066	-75.6078	2581	IDEAM
Salento	26120160	PM	Salento	4.6363	-75.5692	2060	IDEAM
San Francisco	26110160	PM	Toro	4.6849	-76.0357	974	IDEAM
San Isidro	26130180	PM	Pereira	4.8010	-75.8583	1196	IDEAM
San Pedro	26100740	PM	La Victoria	4.5156	-76.0406	949	IDEAM
Zaragoza	2610000202	ME	Cartago	4.7138	-75.9302	925	CVC
Zarzal	26100780	PM	Zarzal	4.3831	-76.0735	953	IDEAM

*Nota: Las estaciones de CENICAFE se han numerado con códigos a partir de 1000 para permitir la organización en R y en bases de datos.

** CO: Convencional; CP: Climatológica Principal; ME: Meteorológica; SP; Sinóptica Principal; PM: Pluviométrica, PG: Pluviográfica.

Fuente: El autor

3.4.1 Análisis de variables hidroclimáticas

Una vez completados los registros se ha seguido con el análisis del comportamiento hidroclimático de las estaciones utilizadas para el presente estudio. Para este análisis se ha tenido en cuenta el registro completo de datos, al igual que el análisis multianual por registros máximos, mínimos y medios, así como con la consideración del fenómeno de variabilidad climática ENOS.

En adición, se precisa que un año se ha denominado Niño, Niña o Normal según el fenómeno que tuvo ocurrencia por más meses en un año. El resultado de este análisis se ve reflejado en la Tabla 5:

Tabla 5. Registros de ocurrencia del ENOS a escala anual (1990-2019)

AÑO	ENOS	AÑO	ENOS	AÑO	ENOS
1990	Normal	2000	Niña	2010	Niña
1991	Niño	2001	Normal	2011	Niña
1992	Niño	2002	Niño	2012	Normal
1993	Normal	2003	Normal	2013	Normal

AÑO	ENOS
1994	Normal
1995	Niña
1996	Normal
1997	Niño
1998	Niña
1999	Niña

AÑO	ENOS
2004	Niño
2005	Normal
2006	Normal
2007	Normal
2008	Niña
2009	Niño

AÑO	ENOS
2014	Normal
2015	Niño
2016	Normal
2017	Normal
2018	Niño
2019	Normal

Fuente: Adaptado de National Weather Service (2021)

A continuación, se presenta el análisis general de las variables climáticas de la subzona hidrográfica del río La Vieja. **Los gráficos de cada estación se presentan en los anexos y a través del enlace: <https://tabsoft.co/2RzIMza>**

Precipitación Anual Total Multianual

La precipitación anual total multianual representa la lluvia total que se ha registrado en cada año para un período de análisis específico. Con base en el comportamiento que se observe en cada estación se puede establecer tendencias climáticas de la región, como precipitación total promedio, máxima y mínima, datos representativos para determinar la ocurrencia de eventos extremos o la correlación del comportamiento pluvial con otras variables (variabilidad climática y Cambio Climático, entre otros).

En el siguiente gráfico (Figura 5) se presenta el promedio de los registros de precipitación anual total multianual para todas las estaciones, resaltando con el color naranja los años que tuvieron influencias de El Niño, en color azul la influencia de La Niña y en gris años con valores Normales.

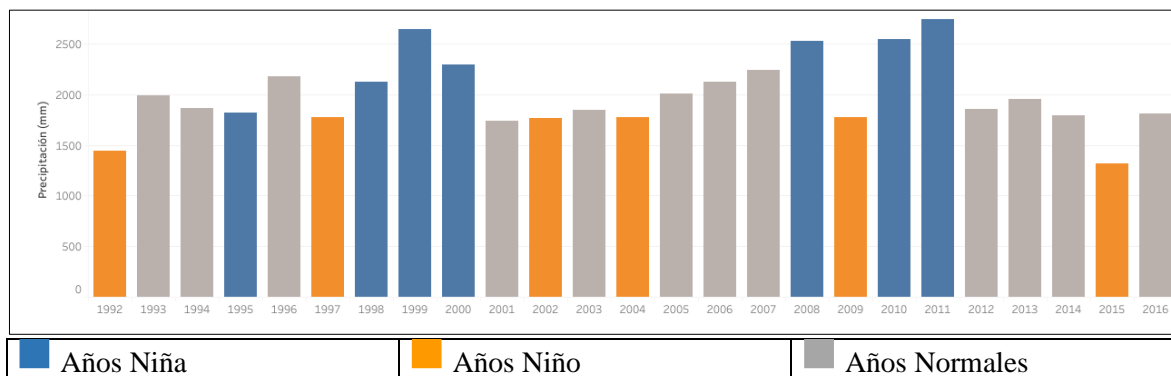


Figura 5. Precipitación anual total multianual promedio

Fuente: El autor

Del gráfico anterior se puede observar que la precipitación media de la cuenca del río La Vieja es cercana a los 1,800 mm. Además, se observa que La Niña provoca un aumento en la precipitación media de la región, considerando que los años con mayores registros tuvieron influencia de este fenómeno (1999, 2010 y 2011); de manera análoga, El Niño ocasiona los años con menores registros de lluvia (1992 y 2015); mientras que los años Normales suelen presentar valores medios.

Es importante tener en cuenta que esta descripción se ha realizado para generalizar el comportamiento de la precipitación anual en la subzona hidrográfica, sin embargo, el comportamiento específico de la lluvia anual de cada estación se presenta en los gráficos anexos.

Precipitación Mensual Promedio

Al igual que el análisis de precipitación anual, también es importante observar el comportamiento mensual de la lluvia, puesto que las tendencias para este período suelen ser similares a lo largo del tiempo. Por esta razón, en seguida, se presenta el análisis de la precipitación promedio de forma generalizada para todas las estaciones, en donde el gráfico superior denota el promedio mensual de todos los registros de precipitación y el gráfico inferior los clasifica según la ocurrencia del ENOS (Figura 6).

De esta figura se puede observar que para las precipitaciones mensuales promedio en la subzona hidrográfica los registros más altos tienden a presentarse en abril y noviembre, superando los 230 mm. En contraste, los registros mínimos de precipitación promedio se presentan en los meses de enero y agosto, al presentar valores inferiores a 130 mm.

Este comportamiento muestra que la precipitación en la subzona hidrográfica del río La Vieja tiene un comportamiento modal que se repite dos veces en el año, en donde las precipitaciones más bajas ocurren al principio de año y crecen gradualmente hasta llegar a abril, desde este punto empieza una reducción en las precipitaciones y desde agosto se tiene nuevamente un comportamiento creciente de la lluvia. Es importante considerar que los valores mínimos absolutos tienden a presentarse en junio y los máximos absolutos en noviembre.

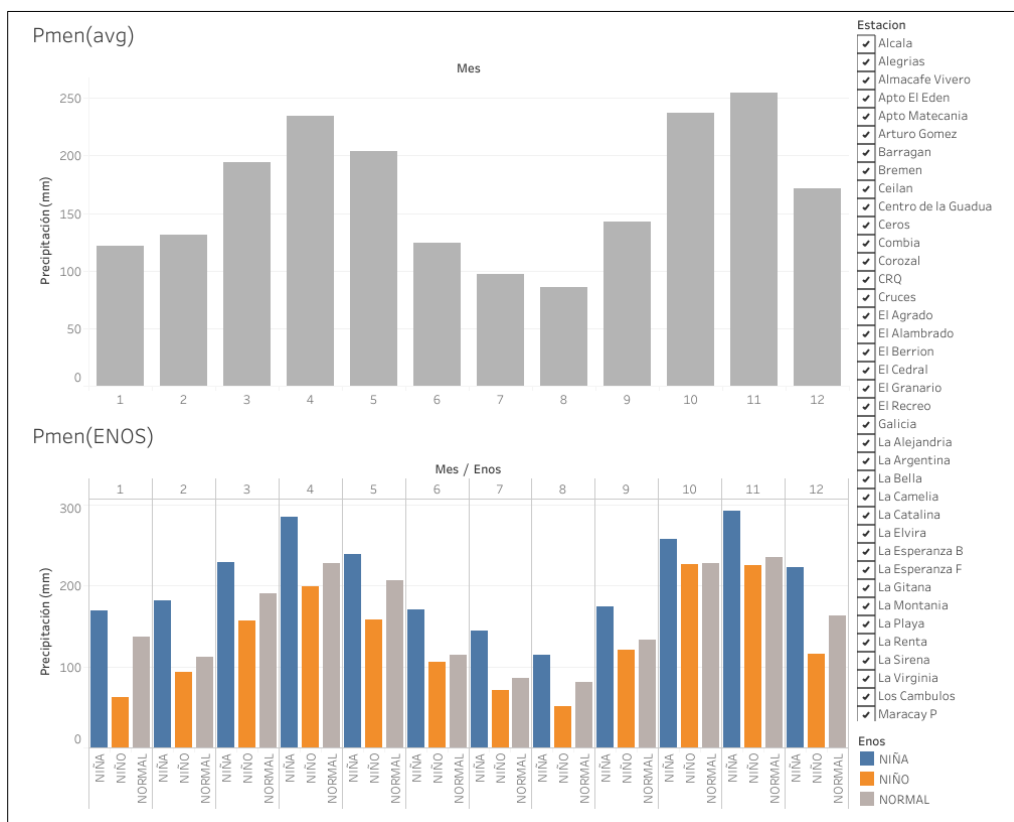


Figura 6. Precipitación mensual total promedio
Fuente: El autor

Con respecto a los valores extremos mensuales, el gráfico presentado en la Figura 6 indica que el fenómeno de La Niña tiene una incidencia clara en el aumento de precipitación en la subzona comparada con los períodos Normales y Niño. De forma análoga, los años con influencia de El Niño muestran en promedio registros de lluvia menores a los ocurrido en meses Normales y Niña.

Es importante tener en cuenta que esta descripción se ha realizado para generalizar el comportamiento de la precipitación mensual en la subzona hidrográfica, sin embargo, el comportamiento específico de la lluvia mensual de cada estación se presenta en los gráficos anexos.

Temperatura Mínima, Máxima y Promedio Multianual

La temperatura multianual representa el rango de temperatura que se ha registrado en el período de tiempo estudiado; a partir de estos valores es posible observar tendencias climáticas de la subzona hidrográfica y relacionarla con la influencia de fenómenos de variabilidad climática y el Cambio Climático.

En la Figura 7 se puede observar que la temperatura media de la subzona hidrográfica ha tendido a los 20°C en los últimos 25 años, asimismo, la temperatura máxima ha sido en promedio de 28.5°C y de 13.8°C para los registros mínimos.

Con respecto a los valores mensuales, las tendencias de la temperatura son iguales en cuanto a la magnitud de los registros, sin embargo, se puede observar que los meses de febrero y agosto tienden a presentar los registros más altos, mientras que abril y noviembre presentan los valores más bajos. Este comportamiento concuerda con el de la precipitación (mayor precipitación cuando hay menores temperaturas y viceversa) y se puede atribuir a las variaciones de brillo solar que, dada la ubicación geográfica de Colombia, genera que junio y julio presente las condiciones solsticiales de verano (días más cortos) y diciembre presenta condición solsticial de invierno (días más largos).

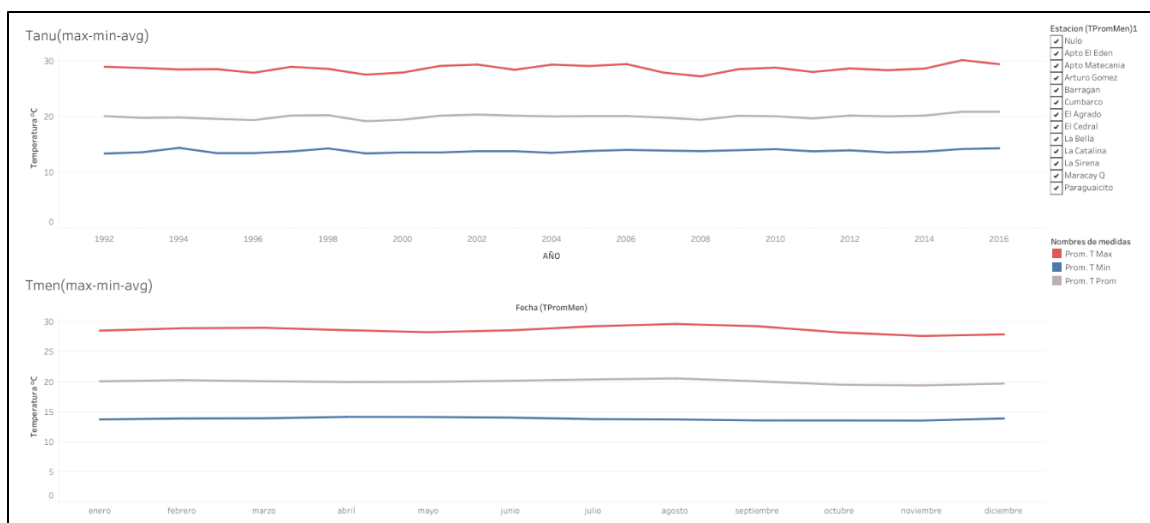


Figura 7. Temperatura mínima, máxima y promedio multianual
Fuente: El autor

Cabe aclarar que esta descripción se ha realizado para generalizar el comportamiento de la temperatura media en la subzona hidrográfica, sin embargo, el comportamiento específico de la temperatura de cada estación se presenta en los gráficos anexos.

Temperatura Mensual Máxima, Mínima y Promedio

Adicional al análisis anterior se ha evaluado el comportamiento de la temperatura considerando la influencia del ENOS, resaltando que la figura presenta la temperatura media de los registros mínimos, máximos y promedio de todas las estaciones.

El análisis generalizado de la temperatura indica que los valores medios a escala mensual tienden a los 20°C cuando no se tiene influencia del ENOS, mientras que en presencia de El Niño se tiene una temperatura media de 20.8°C y bajo influencia de La Niña los valores son cercanos a los 19.4°C. Cabe destacar que el comportamiento suele ser análogo sin importar la influencia de la variabilidad climática, es decir, se mantienen temperaturas mayores en los meses de agosto y febrero, mientras que los valores mínimos mensuales ocurren en abril y noviembre.

El comportamiento de la temperatura máxima promedio es igual al descrito para los valores multianuales, pero con variaciones en la magnitud, siendo el promedio para los años Niño de 30°C,

de 28°C para los años Normales y de 27.5°C para los años Niña. Adicionalmente, se puede observar que existen variaciones más agudas entre los valores con influencia del ENOS.

Respecto a los valores mínimos, no se ha observado una diferencia significativa bajo la influencia del ENOS, puesto que todos los registros tienden a los 14°C.

La descripción anterior se puede apreciar de forma gráfica en la siguiente figura:

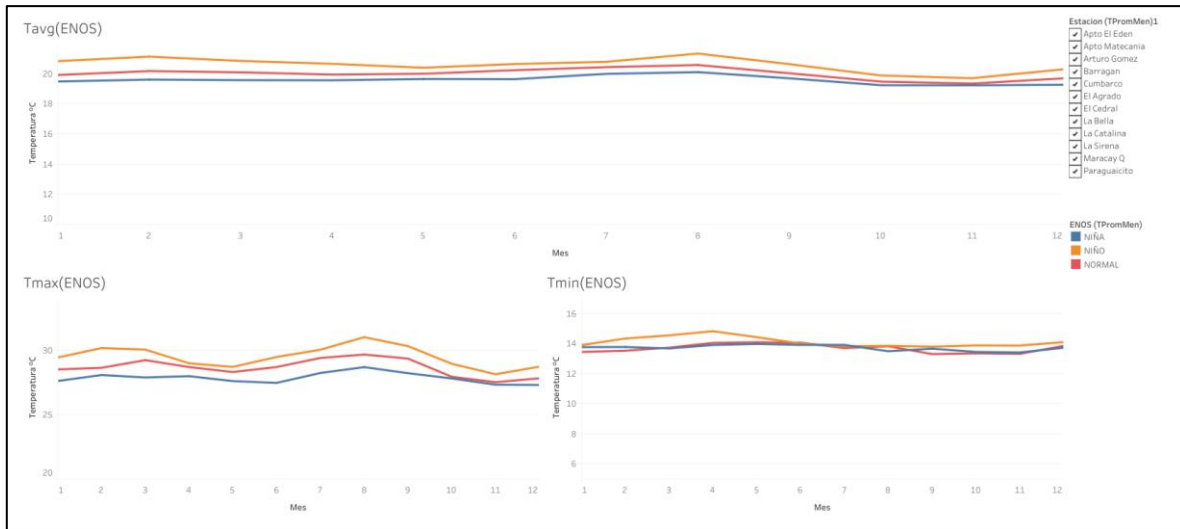


Figura 8. Temperatura mínima, máxima y promedio
Fuente: El autor

Cabe aclarar que esta descripción se ha realizado para generalizar el comportamiento de la temperatura mensual en la subzona hidrográfica, sin embargo, el comportamiento específico de la temperatura mensual bajo influencia del ENOS de cada estación se presenta en los gráficos anexos.

3.4.2 Análisis de tendencias estadísticas

Una vez se completaron los registros y se estableció el período de calibración, validación y simulación base, se continuó con un análisis estadístico de tendencias no paramétrico. El objetivo de este análisis es determinar si existe una tendencia significativa creciente o decreciente en un período de registros, por lo tanto, se ha optado por implementar la prueba de Mann-Kendall.

La selección de esta prueba se basa en la capacidad que tiene el método para la existencia de una tendencia monótona hacia arriba o hacia abajo, además, de que no necesita una distribución normal o lineal en los datos.

Mann-Kendall utiliza los siguientes supuestos (Pacific Northwest National Laboratory, 2021):

- Cuando no hay ninguna tendencia, las mediciones (observaciones o datos) obtenidas a lo largo del tiempo son independientes y están distribuidas de manera idéntica. El supuesto de independencia significa que las observaciones no se correlacionan en serie a lo largo del tiempo.
- Las observaciones obtenidas a lo largo del tiempo son representativas de las condiciones reales en los momentos de muestreo.
- Los métodos de recolección, manipulación y medición de muestras proporcionan observaciones no sesgadas y representativas de las poblaciones subyacentes a lo largo del tiempo.

La prueba busca rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis alternativa (H_a), la cual corresponden a que NO existe una tendencia monótona o SÍ existe una tendencia monótona, respectivamente.

El proceso de cálculo de esta prueba consiste en:

- Organizar los registros en orden cronológico.
- Determinar el signo de todas las posibles diferencias entre el valor x_i y los registros x_j , en donde $j > i$.
- Con base en el resultado de las diferencias, asignar el signo 1, 0 o -1, según el resultado. Lo anterior, se calcula de la siguiente forma:

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} (x_j - x_i) > 0 & 1 \\ (x_j - x_i) = 0 & 0 \\ (x_j - x_i) < 0 & -1 \end{cases}$$

- Luego se realiza la sumatoria de los resultados de cada diferencia entre los registros para la totalidad de datos. Es decir:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{j-k+1}^n sgn(x_j - x_i)$$

- Si $n \leq 10$, se utiliza una tabla de probabilidades para determinar si la probabilidad es menor a α , de ser así se rechaza la hipótesis nula y se concluye que la SÍ existe una tendencia.
- Si $n \geq 10$ se debe calcular la varianza de S utilizando la siguiente fórmula:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right]$$

En dónde g es el número de grupos empatados y t_p es el número de observaciones en el p grupo.

Posteriormente, se calcula la estadística de la prueba con la siguiente ecuación:

$$Z_{MK} = \begin{cases} S > 0 & \frac{S - 1}{\sqrt{VAR(S)}} \\ S = 0 & 0 \\ S < 0 & \frac{S + 1}{\sqrt{VAR(S)}} \end{cases}$$

En caso de que el valor sea positivo o negativo, se tiene que existe una tendencia al aumento o reducción a través del tiempo, siempre que se cumpla $|Z_{MK}| \geq Z_{1-\alpha}$ o $Z_{MK} \leq -Z_{1-\alpha}$. Teniendo en cuenta que:

$$Z_{1-\alpha} = 100(1-\alpha)$$

Los resultados de la aplicación de esta prueba para los registros de las estaciones utilizadas indican que, para los datos de precipitación, son:

Tabla 6. Resultados de la prueba no paramétrica Mann-Kendall para precipitación

Código	Estación	Z	Sign	Q	B
26120150	Alcalá	-1.92938006	1	-0.125	105.0625
2614400101	Alegrías	-0.28912202	0	-0.01606452	160.508032
1001	Almacafé Vivero	0.45729086	0	0.03339529	33.4833024
26125060	Apto El Edén	-0.28451151	0	-0.02116461	120.510582
26135040	Apto Matecaña	1.18930541	0	0.08333333	82.4583333
1002	Arturo Gómez	0.17623792	0	0.01005254	81.9949737
26105140	Barragán	0.1549314	0	0.0041323	43.9979339
23	Bremen	0.86389273	0	0.08928571	119.955357
26100770	Ceilán	-0.55117158	0	-0.03333333	48.0166667
7	Centro de la Guadua	-0.02246144	0	0	139
26110300	Ceros	-0.18085014	0	-0.00510217	95.5025511
1003	Combia	1.06432503	0	0.07469661	63.4626517
26120130	Corozal	-0.86851293	0	-0.05169912	135.02585
21	CRQ	0.2349802	0	0.02	141.49
2610000103	Cruces	0.12152357	0	0.00534775	48.4973261
1004	El Agrado	0.37032519	0	0.02531646	80.9873418
26120180	El Alambrado	-0.27472082	0	-0.01643848	97.5082192
1005	El Berrion	-0.18545107	0	-0.00945632	42.0047282
1006	El Cedral	-0.08754177	0	-0.00673469	139.003367
2625500102	El Granario	0.24707487	0	0.01587302	141.992064
1007	El Recreo	0.1912108	0	0.01392119	64.4930394
26100410	Galicia	-1.23481102	0	-0.06896552	116.034483
1008	La Alejandría	-2.40741223	1	-0.15328112	136.076641
1009	La Argentina	1.10809732	0	0.0785014	114.460749

Código	Estación	Z	Sign	Q	B
1010	La Bella	0.50969894	0	0.04056547	106.979717
26120120	La Camelia	-0.9168888	0	-0.06196519	93.5309826
1011	La Catalina	0.35650445	0	0.0253172	86.9873414
2614900102	La Elvira	0.1451382	0	0.00496281	58.4975186
1013	La Esperanza B	1.10693982	0	0.09782609	107.451087
1012	La Esperanza F	-0.35650145	0	-0.03125	131.515625
2614100103	La Gitana	0.31734044	0	0.025	91.4875
30	La Montaña	0.2309525	0	0.01030928	55.9948454
24	La Playa	0.42964579	0	0.03319559	148.983402
1014	La Renta	0.72971467	0	0.04336075	54.9783196
1015	La Sirena	0.03801152	0	0	77.5
26140180	La Virginia	1.31083918	0	0.07675941	62.9616203
1016	Los Cábmulos	1.27915591	0	0.07906977	55.9604651
26130220	Maracay P	0.19754624	0	0.01167333	71.9941633
1017	Maracay Q	0.09790871	0	0.00711753	93.4964412
2614900201	Miravalles	-0.5638425	0	-0.03081671	86.0154084
1018	Mónaco	-0.23670927	0	-0.01846171	124.509231
22	Navarco	0.17969154	0	0.01117353	127.494413
26100300	Obando	0.42274039	0	0.01898734	91.9905063
26100830	Palmasola	0.91575009	0	0.04081633	64.4795918
1019	Paraguacito	-0.21021656	0	-0.01476035	136.50738
2615400111	Piedras de Moler	-0.23901483	0	-0.01312967	57.0065648
26120170	Pijao	0.00057593	0	0	135.5
1020	Planta de Tto.	1.54580693	0	0.11437177	94.4428141
26130170	Potreros	-2.16665974	1	-0.1407823	118.570391
26100350	Pto. Frazadas	-0.43598261	0	-0.02739726	87.0136986
2610000105	Pto. Molina	1.03035857	0	0.05137632	87.9743118
2615400107	QuebradaNueva	1.21062016	0	0.06589147	60.4670543
22070010	Roncesvalles	0.49473759	0	0.02083333	52.4895833
26120160	Salento	0.61511013	0	0.05499808	148.472501
26110160	San Francisco	-0.49358346	0	-0.0212766	82.0106383
26130180	San Isidro	0.82243743	0	0.04761905	90.4761905
26100740	San Pedro	-0.17739247	0	-0.00655745	77.0032787
2610000202	Zaragoza	-0.50279783	0	-0.02380952	61.0119048
26100780	Zarzal	1.40358995	0	0.05780347	78.9710983

Fuente: El autor

El análisis de tendencia de Mann-Kendall para la precipitación ha mostrado que en la zona hidrográfica del río La Vieja no existen tendencias generalizadas al aumento o disminución de los

registros históricos, es decir, sólo tres (3) estaciones (Potreros, Alcalá y La Alejandría) tienen una tendencia decreciente en las series de lluvia, el resto de las estaciones no muestran tendencia alguna.

Cabe anotar que las estaciones Zarzal, Quebrada Nueva, Planta de Tratamiento, La Virginia, Los Cábmulos y el Aeropuerto Matecaña están cerca de presentar una tendencia positiva (aumento de la precipitación), al acercarse a un valor Z mayor a 1.65. Destacando que estas estaciones tienen un comportamiento tendencial contrario al de las estaciones ya mencionadas.

Con respecto a los registros de temperatura se tiene que:

Tabla 7. Resultados de la prueba no paramétrica Mann-Kendall para Temperatura

Código	Estación	Z	Sign	Q	B
26125060	Apto El Edén	5.64921728	1	0.00293347	21.5712898
26135040	Apto Matecaña	5.61121016	1	0.00278827	21.3171334
1002	Arturo Gómez	5.44594547	1	0.00264206	21.3228247
26105140	Barragán	6.67837889	1	0.00379152	11.6852819
23	Bremen	1.18755325	0	0.0005769	16.7568553
7	Centro de la Guadua	-2.22767194	1	-0.00115537	22.4292762
2612513	Cumbarco	1.51524817	0	0.00078191	19.0132258
1004	El Agrado	-1.61719075	0	-0.00090554	21.816287
1006	El Cedral	3.33747294	1	0.00158914	15.0902329
1010	La Bella	4.51696394	1	0.00241085	20.2441859
1011	La Catalina	4.95638852	1	0.00234604	21.1521994
24	La Playa	4.53251561	1	0.00266681	17.3151661
37	La Sierra	5.12169043	1	0.00311153	17.4058834
1015	La Sirena	3.05411315	1	0.00159805	20.0330483
26130220	Maracay P	3.71124748	1	0.00183887	20.4075421
1019	Paraguaicito	3.85694938	1	0.00207674	21.5468282

Fuente: El autor

El análisis de tendencia para la temperatura permite establecer que en la zona hidrográfica del río La Vieja existe una tendencia generalizada al aumento de la temperatura, debido a que doce (12) de las estaciones evaluadas muestran una significancia mayor a 3 y un valor Q positivo.

Es importante resaltar que de las cuatro (4) estaciones restantes, una presenta una tendencia significativa a la disminución de la temperatura (Centro de la Guadua), El Agrado está muy cerca de tener una tendencia significativa (-1.62) y las dos estaciones restantes (Cumbarco y Bremen) tienden a un aumento en la magnitud de los registros, aunque no es significativo.

Por último, para los registros de evapotranspiración se tiene que la tendencia bajo la prueba de Mann-Kendall son:

Tabla 8. Resultados de la prueba no paramétrica Mann-Kendall para Evapotranspiración

Código	Estación	Z	Sign	Q	B
26125060	Apto El Edén	1.50373141	0	0.01317557	131.068156
26135040	Apto Matecaña	-1.68687673	1	-0.01959265	140.209796
26105140	Barragán	-0.41408665	0	-0.00557437	86.5377827
2612513	Cumbarco	-2.33823735	1	-0.02432096	95.713751

Fuente: El autor

La prueba no paramétrica Mann-Kendall para las series históricas de evapotranspiración muestran que dos (2) de las estaciones tienen una tendencia significativa a la reducción de los registros (Aeropuerto Matecaña y Cumbarco), que la estación Aeropuerto Matecaña está cerca de tener una tendencia significativa al aumento de la evapotranspiración y la estación Barragán no muestra tendencia.

Como resultado de esta prueba se tiene que en la zona hidrográfica del río La Vieja existe evidencias de un aumento en la temperatura media para el período 1992 – 2016, sin embargo, no se ha encontrado tendencias generalizadas al alza o baja en la precipitación y evapotranspiración. Los resultados del análisis de tendencia para cada una de las estaciones se pueden observar en los Anexos, los cuales son manejados bajo el esquema anterior.

Asimismo, si se considera la pendiente de crecimiento/decrecimiento promedio de las estaciones (denotada por el valor Q), el aumento de la temperatura promedio en la subzona hidrográfica es de 0.0018 a escala mensual y de 0.019 a escala anual. Por lo tanto, el aumento de temperatura en el período 1992-2016 se puede estimar en 0.5°C.

Utilizando la misma tendencia se puede estimar que en el período 2011-2040 el aumento de temperatura será de 0.52°C que, al compararse con las estimaciones del IDEAM (2015) para el Quindío en el mismo tiempo, está 0.29°C por debajo (0.81°C). Este resultado indica que de conservar las condiciones de estas décadas el aumento de temperatura en el Quindío será menor al esperado, no obstante, si se mantienen las tendencias incrementales en la emisión de gases de efecto invernadero es probable que se alcance o supere las estimaciones planteadas por el IDEAM.

Para la estimación entre años se ha utilizado la función exponencial modificada, la cual determina el factor exponencial con base en la desviación del logaritmo natural entre dos años conocidos, es decir:

$$a = \frac{LN(Habitantes_n) - LN(Habitantes_i)}{año_n - año_i}$$

En donde,
 Habitantes n es el número de habitantes en el año final
 Habitantes i es el número de habitantes en el año inicial
 Año n es el año final del que se conoce la población
 Año i es el año inicial del que se conoce la población
 a es el factor exponencial para la interpolación

Con base en el factor exponencial calculado, se determina la cantidad de habitantes en cada año interpolado o extrapolado utilizando la siguiente ecuación:

$$Habitantes_{i+1} = Habitantes_i * e^{(a*(año_{i+1} - año_i))}$$

De esta forma, la cantidad de habitantes simulados para cada municipio con menos de 100,000 habitantes dentro de la subzona hidrográfica entre 1985 y 2100 es:

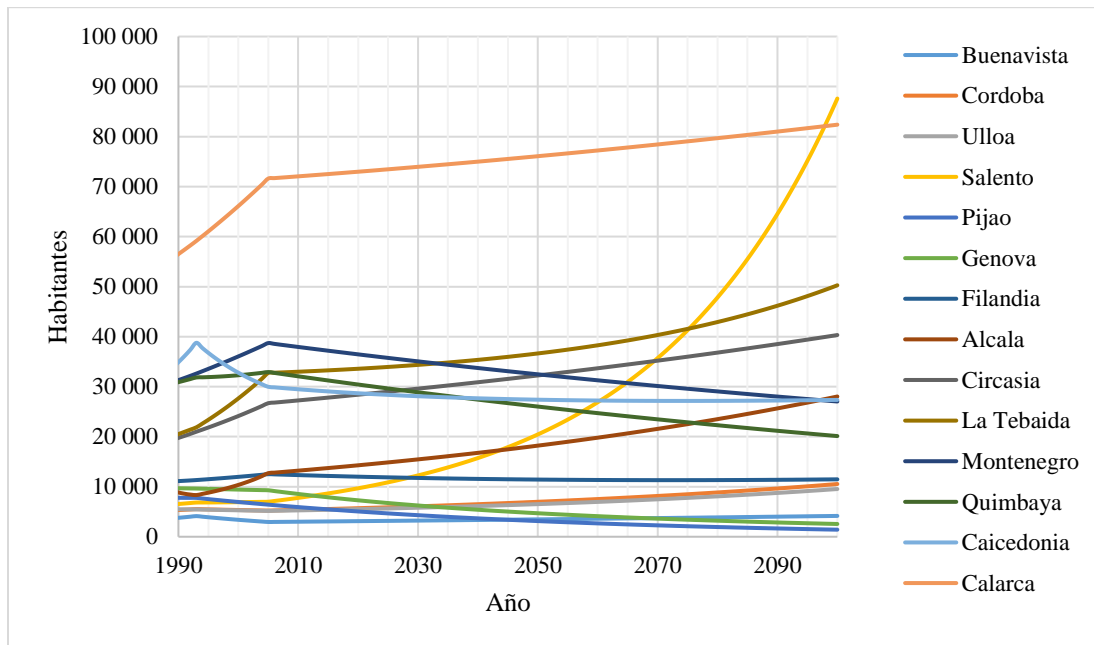
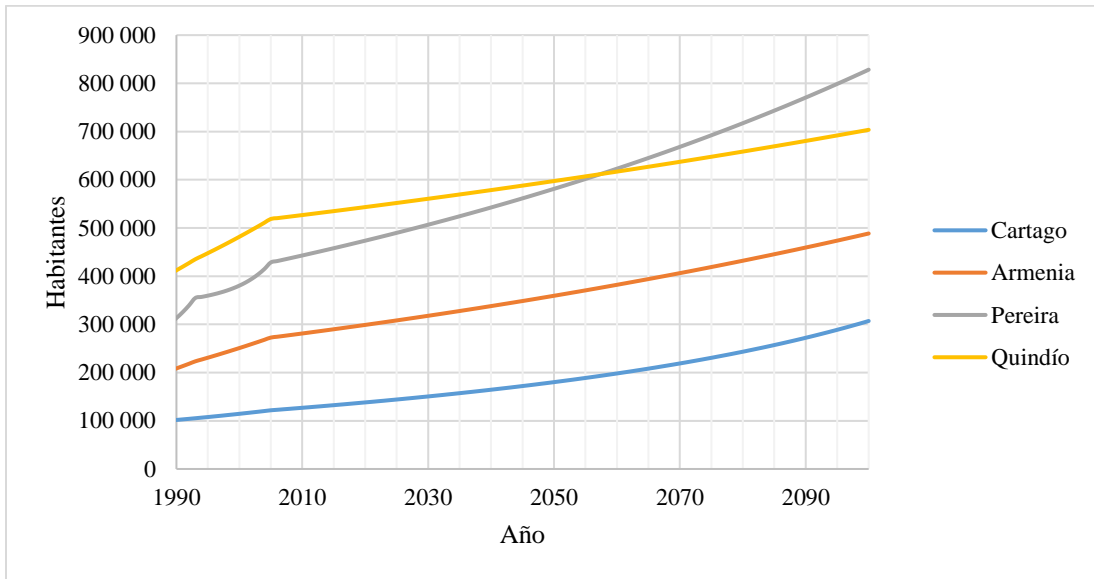


Figura 10. Proyecciones de población para ciudades con menos de 100,000 habitantes
 Fuente: El autor

Asimismo, para los municipios con más de 100,00 habitantes y la totalidad del Quindío, se tiene que la población simulada es:



*Figura 11. Proyecciones de población para ciudades con más de 100,000 habitantes
Fuente: El autor*

Nota: i) En estas estimaciones se debe considerar que las tendencias de Salento son de un crecimiento exponencial y representa que la presión antrópica ha superado las barreras normativas y naturales que hay en este territorio, además, al considerar la población flotante por turismo, mano de obra para cultivos (crecimiento de plantaciones de aguacate Hass) y el aumento de viviendas de tipo campestre, la cantidad de personas proyectada puede ser equivalente a los requerimientos de agua esperados.

CAPÍTULO IV

4.1 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1 Análisis para la selección de la herramienta hidroinformática de modelación

La implementación de un **modelo hidrológico** tiene por finalidad la representación de la respuesta de una cuenca hidrográfica con base en parámetros climáticos, físicos y las demandas de agua para consumo humano. El modelo utiliza un conjunto de fórmulas matemáticas relacionadas por medio de un sistema de tanques para determinar el comportamiento de cada uno de los procesos hidrológicos.

Los **tanques** hacen referencia a los depósitos que pueden tener una unidad espacial y los procesos que ocurren en cada uno de ellos, es decir, un tanque superficial puede tener entradas por lluvia, escorrentía superficial y escorrentía subsuperficial, y las salidas serían escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial, evapotranspiración y conducción a otro tanque. Cada uno de los tanques tiene una formulación matemática que se basa en parámetros y coeficientes de relación; siguiendo con el ejemplo anterior, un tanque superficial deberá definir parámetros como porosidad, cobertura, fracción impermeable, precipitación o morfología, los cuales serán calibrados por medio de coeficientes para asegurar una representación aproximada a la realidad.

Actualmente, los modelos hidrológicos son ejecutados a través de la **hidroinformática**, definida como la compilación de técnicas y herramientas de simulación hidrológica e hidráulica para la solución de problemas de la ingeniería, hidrología y medio ambiente. La hidroinformática utiliza la sistematización de métodos numéricos para aumentar la capacidad de procesamientos de modelos hidrológicos, orientando las investigaciones hacia la eficiencia, eficacia y toma de decisiones sobre un territorio u objeto de estudio.

Dentro de la hidroinformática existen dos tipos de modelos: agregados y distribuidos. Los **modelos distribuidos** son aquellos que consideran la variación espacial para todos los parámetros y variables del área estudiada. En otras palabras, en estos modelos se define uno o varios tamaños de celda (espacio unitario de cálculo) y a cada una de estas se le asigna tres atributos: dos coordenadas para la ubicación espacial y una tercera que representa la magnitud del parámetro que describe (altura, número de curva, coeficiente de Manning, etc.). Cabe resaltar que en estos modelos cada celda descarga el agua hacia la celda vecina (según la dirección de flujo) y se calcula de acuerdo con el proceso hidrológico activo. (Olsson y Pilesjo (1999) citado por Mendoza, Bocco, Bravo, Siebe, & Ortiz (2002)).

Es importante considerar que este tipo de modelos tienen una gran robustez y sus salidas representan una alta densidad para el procesamiento de cálculos. Además, los resultados suelen ser mapas con capacidad de cambiar al incluir la variable tiempo.

Lo anterior, significa que estos modelos tienen una gran capacidad de representar con precisión las características de un área de estudio, por lo que son ideales para determinar el impacto de un fenómeno o evento definido, evaluar los cambios en cualquier lugar del área de estudio o para investigaciones que requieren una aproximación muy cercana a la realidad.

En cuanto a los **modelos hidrológicos agregados**, son aquellos modelos en donde las variables y parámetros de entrada de la unidad de cuenca son homogenizadas, para que las características sean constantes. (Chong-yu, 2002).

Teniendo en cuenta que los modelos agregados no son eficaces para la representación de cuencas con áreas extensas debido al cambio de las propiedades físicas y climáticas que existen en la realidad, se han desarrollado **modelos sub-agregados**; estos son la representación de la realidad a través de la agrupación de elementos o propiedades de un espacio según atributos representativos, en donde, las variables y parámetros de entrada suelen ser el promedio o moda del espacio que se está modelando. Este tipo de modelos no suelen utilizar atributos espaciales, pero sí contiene varios grupos que representan sub-cuencas o áreas con parámetros homogéneos. (Chong-yu, 2002)

Los modelos sub-agregados se caracterizan por tiempos de cálculos cortos, comparados con otro tipo de modelos, y simulaciones cercanas a la realidad que permiten evaluar la amenaza por fenómenos naturales o eventos definidos, además de facilitar la creación de escenarios con base en la variación de los parámetros de entrada. Lo anterior, significa que este tipo de modelos facilitan la toma de decisiones y la creación de indicadores de progreso.

Para finalizar con la descripción de modelos, es importante señalar que la implementación de un modelo se basa en el objetivo que tiene la investigación, el nivel de detalle que se requiere y la infraestructura técnica y tecnológica de la cual se dispone. Asimismo, se deben considerar las salidas resultantes del modelo, el formato de estos resultados y la representación gráfica que pueden tener.

Con base en la descripción realizada, a continuación, se presentan algunos de los modelos hidrológicos que existen actualmente, definiendo sus características según lo descrito por los autores de la herramienta:

Water Evaluation And Planning (WEAP) (Centro de Cambio Global UC, SEI, 2009)⁶:

WEAP es una herramienta hidroinformática para la planificación integrada de los recursos hídricos que tiene por objetivo la simulación de procesos físicos, químicos, económicos y energéticos de una cuenca hidrográfica para la toma de decisiones acertada por parte de expertos. Por el enfoque que utiliza esta herramienta, se puede clasificar como un Sistema de Soporte a las Decisiones (SSD). WEAP tiene un marco amplio, flexible y fácil de usar para la planificación y análisis de políticas o gestión de cuencas hidrográficas.

WEAP se fundamenta en el principio básico del balance hídrico y puede ser implementado para sistemas municipales, microcuencas, cuencas hidrográficas o en complejos sistemas de cuencas transfronterizas. La implementación de WEAP permite modelar principalmente demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso. Además, esta herramienta también se puede integrar con el modelo de agua subterránea MODFLOW, con el modelo de calidad del agua QUAL2K y módulos de análisis financiero para comparar el costo-beneficio de los proyectos. Lo anterior, permite realizar en WEAP modelos socioeconómicos para la evaluación de escenarios y priorización de estrategias.

La herramienta tiene la capacidad de modelar diversas fuentes de suministro (ríos, agua subterránea, embalses, hidroeléctricas, etc.), plantas de tratamiento de aguas residuales, demandas de agua, generación de contaminación, y requisitos de ecosistemas. Destacando que la estructura de datos y el nivel de detalle se pueden modificar para satisfacer las necesidades y la disponibilidad de datos para un sistema y un análisis particular, teniendo en cuenta que el sistema se plantea como un modelo sub-agregado.

Es importante destacar que WEAP es accesible debido a su interfaz gráfica, en comparación con otras herramientas similares. No obstante, implementan las ecuaciones y términos propios de la hidrología y requiere de conocimiento técnico para ser usado.

La metodología sugerida por el equipo técnico de WEAP es:

- Definición del Estudio: Están establecidos el horizonte de tiempo, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
- Cuentas Corrientes: Se elabora un panorama de la demanda de agua, las cargas contaminantes y los recursos y suministros reales para el sistema. Esto puede ser visto como la etapa de calibración en el desarrollo de una aplicación.
- Escenarios: Se pueden explorar una serie de alternativas de supuestos acerca de los impactos futuros de políticas, costos y del clima, por ejemplo, en la demanda, suministro, hidrología y contaminación del agua (los escenarios simulados se presentan en detalle en la siguiente sección).
- Evaluación: Los escenarios son evaluados con respecto a la disponibilidad de cantidad suficiente de agua, costos y beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales, y la sensibilidad a la incertidumbre de las variables clave.

⁶ UC es utilizado como la sigla para la Universidad Católica de Chile

The Global Change Analysis Model [GMAC] (Joint Global Change Research Institute, 2021):

GCAM es una herramienta de modelación climática dinámica y recursiva que permite la representación de procesos económicos, del sector energético, el uso de la tierra y el agua, la cual puede utilizarse para explorar políticas de mitigación del cambio climático, incluidos los impuestos al carbono, el comercio de carbono y el despliegue de tecnologías energéticas.

Esta herramienta utiliza un período de ejecución que se extiende desde 1990 hasta 2100 con un tamaño de paso de 5 años y es capaz de simular escenarios, políticas y objetivos de emisión de varias fuentes, incluido el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Los posibles resultados incluyen la simulación de la oferta y la demanda de energía en el futuro, las emisiones de gases de efecto invernadero esperadas, el forzamiento radiactivo y el impacto de 16 gases de efecto invernadero. La resolución del modelo es de $0,5 \times 0,5$ grados, dependiendo de los parámetros asumidos para la población, economía y tecnología futuras, así como para las políticas de mitigación del Cambio Climático.

El GCAM se integra principalmente por tres componentes: i) El sistema de datos GCAM, el cual contiene los supuestos y modelos de resolución de los problemas, siendo posible su modificación o implementación directa; ii) El núcleo GCAM, componente que utiliza conjuntos de datos de entrada para generar bases de datos que representan las decisiones económicas y las interacciones dinámicas entre los sistemas humanos y naturales, y; iii) Los conjuntos de modelos de desagregación, con los cuales se pueden realizar representaciones espaciales y temporales más finas, además, permiten incluir nuevas variables y procesos de análisis para el modelo inicial (a través de la adición de paquetes de desagregación).

Como se mencionó, la base técnica del sistema de datos GCAM implementa diferentes conjuntos de datos e incorpora sistemáticamente una serie de supuestos futuros. Por lo tanto, la calibración del modelo requiere de un conjunto de datos XML con datos históricos y del año base, junto con supuestos sobre trayectorias futuras como el PIB, la población y la tecnología. Se pueden crear nuevos archivos XML "complementarios" para sobrescribir supuestos clave de escenarios futuros, como población, actividad económica, costos, rendimiento de la tecnología, entre otros.

Es importante resaltar que esta herramienta fue desarrollada para el análisis de la relación entre las actividades humanas y los procesos naturales, por lo tanto, los modelos de sistemas de agua son conjuntos de desagregación que deben anexarse al núcleo GCAM base. Aunque, existe una rama de investigación de GCAM que incluye este sistema completamente integrado con los sistemas de macroeconomía, energía, agricultura y tierra.

Como último aspecto, se debe reconocer que esta herramienta posee una gran potencialidad para la modelación de sistemas climáticos que incluyan análisis socioeconómicos, además de contar con soporte de paquetes de programación para todas las áreas del conocimiento, debido a que utiliza R como principal lenguaje de programación. Sin embargo, también se debe mencionar que GCAM no posee una interfaz accesible para personas no expertas y requiere de capacitación en programación.

Software TETIS (Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la UPV, 2021):

La herramienta hidrológica TETIS permite la simulación hidrológica y del ciclo de sedimentos de tipo distribuido por medio del análisis de celdas regulares, con parámetros físicamente basados. Esta herramienta permite el análisis de la respuesta hídrica de crecidas que duran minutos u horas, así como la disponibilidad hídrica en períodos extensos (discretización diaria).

Esta herramienta, al utilizar un modelo distribuido, permite una mejor representación de la variabilidad espacial de la respuesta hidrológica en las cuencas, facilitando la obtención de resultados en cualquier punto de la cuenca y sin utilizar metodologías de interpolación.

El modelo hidrológico que utiliza esta herramienta se basa en una estructura de tanques para cada una de las celdas, las cuales se conectan vertical y horizontalmente a través de los tanques de acuíferos; manto de nieve, interceptación, almacenamiento en superficie y almacenamientos capilar y gravitacional del suelo superior. Lo anterior, permite representar la interceptación, fusión de nieve, evapotranspiración, infiltración, escorrentía directa, percolación, flujo base y flujo subterráneo profundo.

Para la simulación de los procesos mencionados es necesario disponer de series temporales de precipitación, evapotranspiración y temperatura, asimismo, se utiliza información cartográfica tipo ráster, modelos de elevación digital y mapas con las características del suelo y subsuelo.

TETIS cuenta con algoritmos de calibración automática que facilitan la determinación de los parámetros efectivos y los valores iniciales de todas las variables de estado necesarios para el modelo. Además, la herramienta cuenta con una interfaz desarrollada en Visual Studio para facilitar la gestión de información y la visualización de resultados.

Con base en lo anterior, TETIS es una herramienta que permite modelar de forma detallada cuencas de pequeño y gran tamaño, aprovechando la información espacial proveniente de cartografía digital, sistemas de información geográfica y mediciones con sensores remotos. Es decir, los resultados de TETIS son modelos robustos que permiten estudios detallados y simulación de fenómenos precisos que permiten la toma de decisiones para eventos con duración de minutos, horas o días, sin embargo, la precisión de la herramienta depende de la cantidad de información disponibles temporal y espacialmente.

Sistema de Modelación de agua MOHID Land (Marine, Environment y Technology Center, 2020): MOHID Land es una herramienta hidroinformática que utiliza un modelo distribuido espacialmente para la simulación de los procesos hidroclimáticos y de aguas continentales. Para la modelación cada una de las celdas es configurada con características de 4 medios: atmósfera, superficie del suelo, medios porosos y red fluvial. En donde, la atmósfera suministra la información meteorológica al modelo (precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc.) de forma espacial y temporal; la superficie terrestre contiene la rejilla para la definición de fronteras; el medio poroso, además de la información espacial, incluye un componente vertical para representar el espesor de capa variable y; la red fluvial es un elemento de una dimensión que une los centros de la rejilla para toda la superficie.

La herramienta implementa un algoritmo explícito con un intervalo de tiempo variable, que es máximo cuando la temperatura es seca y mínimo cuando ocurren los eventos de lluvia.

MOHID Land permite forzar datos atmosféricos con registros históricos de estaciones hidroclimáticas o la implementación de modelos meteorológicos, y con base en esto interpolar espacial y temporalmente los datos sobre toda el área de estudio.

Dentro de los resultados posibles, esta herramienta permite representar el medio poroso, la superficie del agua (escorrentía, cauces de cuerpos hídricos e inundaciones), infiltración, evapotranspiración, dinámica vegetal y embalses; todo basado en la ecuación de continuidad (gradiente de superficie entre la escorrentía y la red de drenaje). Asimismo, el tamaño de paso es variable y se puede adaptar a la magnitud de los flujos, es decir, definir tamaños de paso pequeños cuando está presente el fenómeno objeto de estudio y definir tamaños de paso grandes en períodos con pocas interacciones.

Esta herramienta, al igual que TETIS, permite modelar de forma detallada las cuencas de pequeño y gran tamaño, implementando la información espacial proveniente de cartografía digital, sistemas de información geográfica y mediciones con sensores remotos.

De igual forma, MOHID Land produce modelos robustos para estudios detallados y la simulación de fenómenos precisos utilizados en la toma de decisiones para eventos con duración de minutos, horas, días o períodos mayores, sin embargo, la precisión de la herramienta depende de la cantidad de información disponibles temporal y espacialmente, y su interfaz gráfica, así como los las herramientas para ingreso de datos no es óptima, por lo menos en la versión libre para investigadores (Existen empresas privadas que han adoptado la base matemática de esta herramienta para sus propias herramientas hidroinformáticas).

También se debe anotar que los resultados de esta herramienta son archivos con un peso de almacenaje importante y no se considera óptimo para la generación de múltiples escenarios sobre una misma área de estudio (se deben generar simulaciones separadas).

HEC-HMS (U.S. Army Corps of Engineers, 2021a):

Esta herramienta hidroinformática es un sistema de modelado para la representación de cuencas hidrográficas a través de la construcción de modelos agregados que separan el ciclo hidrológico y las cuencas en partes manejables. Para la representación del ciclo hidrológico y los flujos de energía, la herramienta dispone de varios métodos de cálculo para representar cada proceso. Es importante destacar que la diversidad de modelos matemáticos con los que cuenta HEC-RAS permite trabajar en diferentes entornos, bajo diferentes condiciones.

Los componentes de HEC-HMS se presentan en un entorno de trabajo completamente integrado, el cual dispone de bases de datos asociadas a información de Estados Unidos, utilidades de entrada de datos, motor de cálculo y herramientas de informes de resultados. Asimismo, la herramienta tiene una interfaz gráfica de usuario que permite el movimiento fluido entre las diferentes partes del programa.

La representación física de una cuenca se logra con un modelo. Esta herramienta considera la red dendrítica para simular los procesos de escorrentía desde aguas arriba hacia aguas abajo utilizando los elementos de *subcuenca*, *tramo*, *empalme*, *embalse*, *desvío*, *fuentes* y *sumidero*.

Algunos de los métodos de cálculo con los que cuenta esta herramienta son: Para la simulación de pérdidas por infiltración se incluye la constante inicial, número de curva SCS, exponencial, Green Ampt y Smith Parlange; para transformar el exceso de precipitación en escorrentía superficial cuenta con métodos de hidrograma unitario como Clark, Snyder y SCS; también se pueden representar los embalses de agua mediante una relación de almacenamiento-descarga ingresada por el usuario; e incluir bombas según sea necesario para simular el área de inundación interior.

El análisis de datos meteorológicos se realiza mediante el modelo meteorológico e incluye radiación de onda corta, radiación de onda larga, precipitación, transpiración por evaporación y deshielo. Si bien no es necesario que todos los modelos cuenten con los componentes mencionados, se deben ingresar registros de precipitación y en algunos casos de evapotranspiración.

Para los procesos de calibración HEC-HMS puede hacer uso de tareas de estimación de parámetros automatizadas utilizando pruebas de optimización. La incertidumbre dentro del modelo puede estimarse cuantitativamente y evaluarse numéricamente mediante el análisis de incertidumbre, principalmente utilizando el método de Monte Carlo.

Cabe resaltar que HEC-HMS cuenta con Gestor de Información Geográfica propio que mejora la interfaz gráfica y usabilidad de la herramienta hidroinformática, además de permitir análisis basados en información geográfica.

De igual forma, se debe destacar que esta herramienta genera una cantidad de archivos individuales considerables para cada uno de los modelos desarrollados, y que el desarrollo de escenarios demanda la creación de modelos individuales.

HEC-ResSim (U.S. Army Corps of Engineers, 2021b):

Reservoir System Simulation (HEC-ResSim) es una herramienta hidrológica desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU., el Instituto de Recursos Hídricos y el Centro de Ingeniería Hidrológica (CEIWR-HEC), la cual se utiliza para modelar los flujos que existen entre los reservorios/cuencas, como la operación de embalses para la gestión de inundaciones, estimación de caudales mínimos y suministro de agua para estudios de planificación, y soporte a la toma de decisiones en tiempo real. HEC-ResSim puede simular eventos únicos o un período completo de registro utilizando los intervalos de tiempo disponibles.

Esta herramienta se encuentra subdividida en tres módulos para facilitar la gestión de elementos específicos y series de datos del modelo. Los módulos con los que cuenta HEC-ResSim son *configuración de la cuenca*, *red de reservorios* y *simulación*.

Algunos de los métodos de cálculo con los que cuenta esta herramienta son: Para la simular pérdidas por infiltración se incluye la constante inicial, número de curva SCS, exponencial, Green Ampt y Smith Parlange; para transformar el exceso de precipitación en escorrentía superficial cuenta con métodos de hidrograma unitario como Clark, Snyder y SCS; también se pueden representar los embalses de agua mediante una relación de almacenamiento-descarga ingresada por el usuario; e incluir bombas según sea necesario para simular el área de inundación interior.

El análisis de datos meteorológicos se realiza mediante el modelo meteorológico e incluye radiación de onda corta, radiación de onda larga, precipitación, transpiración por evaporación y deshielo. Si bien no es necesario que todos los modelos cuenten con los componentes mencionados, se deben ingresar registros de precipitación y en algunos casos de evapotranspiración.

La interfaz de HEC-ResSim se ha desarrollado para facilitar el manejo por parte de los usuarios mediante funciones familiares de entrada de datos, y los "mini gráficos" que permiten representar la mayoría de las tablas registradas. Asimismo, la herramienta cuenta con una variedad de gráficos e informes predeterminados, que facilitan el análisis de salida.

Uno de los factores que diferencian HEC-ResSim de otras herramientas son los métodos que incluye para simular el proceso de toma de decisiones que los administradores deben implementar en cualquier estudio, el cual utiliza una descripción basada en reglas de los objetivos operativos y las limitaciones que los operadores para determinar las decisiones más óptimas.

MODSIM-DSS (Colorado State University, 2017):

MODSIM-DSS es una herramienta hidroyinformática que puede ser definida como un SSD la modelación de flujos de red para cuencas fluviales desarrollado en la Universidad Estatal de Colorado, siendo diseñado específicamente para el análisis del crecimiento de las demandas y las presiones en cuencas hidrográficas.

Las estructuras de datos incorporadas en cada objeto disponible en los modelos de MODSIM están controladas por un sistema de gestión de base de datos, que también se consulta mediante la activación de comandos o el visor gráfico. Los archivos de datos que no se utilizan en el modelo se preparan de forma interactiva y un modelo de optimización de flujo de red que se ejecuta automáticamente desde la interfaz sin requerir ninguna intervención directa por parte del usuario. Los resultados de la optimización son presentados de manera gráfica.

Esta herramienta se ha vinculado con modelos de corriente-acuífero para el análisis del uso conjunto de los recursos hídricos subterráneos y superficiales, asimismo, cuenta con la capacidad de acoplarse a modelos de simulación de la calidad del agua para evaluar la eficacia de las estrategias de control de la contaminación. De forma análoga, la simulación de modelos que consideren el Cambio Climático de una forma explícita necesita integrar a esta herramienta el Soil & Water Assessment Tool.

De la misma forma que otras herramientas para la modelación hidrológica, MODSIM-DSS puede utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG) para gestionar los requisitos de bases de datos espaciales.

Síntesis de Herramientas Hidroinformáticas:

Con base en la descripción presentada, a continuación, se presenta una síntesis de los aspectos más representativos de cada una de las herramientas hidroinformáticas, las cuales permitirán seleccionar cual herramienta será utilizada para la modelación de la cuenca del río La Vieja.

Tabla 9. Resumen de Herramientas Hidroinformáticas

Herramienta	Modelo	Precedentes	Enfoque	Módulos adicionales
WEAP	Sub-agregado	Modelo del río La Vieja (2014)	Planificación integrada de Recursos Hídricos con SSD	- Análisis económico - Calidad del agua - Energía hidroeléctrica - SIG
GCAM	Distribuido	Estudios internacionales	Evaluación de políticas de mitigación del C.C con SSD.	- Recurso Hídrico - Economía Energética - SIG
TETIS	Distribuido	Modelo del río La Vieja (2020)	Modelación hidrológica.	- Ciclo de sedimentos - SIG
MOHID Land	Distribuido	Estudios nacionales e internacionales	Modelación hidrológica.	- Sistemas sanitarios - SIG
HEC-HMS	Sub-agregado	Estudios nacionales	Modelación hidrológica.	- SIG
HEC-SimRes	Sub-agregado	Estudios nacionales	Planificación integrada de Recursos Hídricos con SSD	- SIG - Calidad del Agua - Gestión de decisiones
MODSIM-DSS	Sub-agregado	Estudios internacionales	Planificación integrada de Recursos Hídricos con SSD	- Calidad del Agua - Cambio Climático - SIG

Fuente: El autor

Con base en la información presentada, a continuación, se presenta la evaluación y selección de la herramienta hidroinformática que se utilizará en la investigación. Esta decisión se basa en la ponderación de criterios, en donde cada uno se ha calificado de 1 a 5 y se selecciona aquella herramienta con mayor puntaje. El análisis se presenta en la siguiente matriz:

Tabla 10. Evaluación Herramientas Hidroinformáticas

Herramienta	Modelo	Precedentes	Enfoque principal	Series datos requeridas	Alcance para trabajos futuros	Total
WEAP	3	5	5	4	5	22
GCAM	5	3	4	2	4	18
TETIS	5	5	3	3	3	19
MOHID Land	5	4	3	3	3	18
HEC-HMS	3	4	3	5	2	17
HEC-SimRes	3	3	5	5	5	21
MODSIM-DSS	3	3	5	4	5	20

Fuente: El autor

De los criterios presentados se puede precisar algunos aspectos considerados en la evaluación:

1. Se ha optado por seleccionar herramientas con modelos ya desarrollados para la zona hidrográfica, teniendo en cuenta que facilitan la modelación (nueva o de profundización) de la cuenca en otros estudios, presenta recomendaciones y consideraciones importantes para la investigación, y brinda una base para la construcción de la metodología de trabajo.
2. Comparando las ventajas y desventajas entre modelos sub-agregados y distribuidos, la herramienta con mayor ajuste para este proyecto son los sub-agregados debido a que requiere menor tiempo de procesamiento y tiene implícita la discretización de las variables para la falta de registros espaciales.
3. Se ha priorizado el enfoque en los Recursos Hídricos y se ha resaltado el Sistema de Soporte a las Decisiones.
4. Se ha evaluado la cantidad y tipo de series de datos que se requieren para desarrollar un modelo en la herramienta hidroeinformática, así como la flexibilidad de la que dispone esta para utilizar distintos métodos de cálculo.
5. Se ha considerado los módulos adicionales para la profundización o estudios futuros a los de este proyecto.

Lo anterior, permite establecer que WEAP es la herramienta hidroeinformática seleccionada debido a que está diseñada para la simplificación espacial de los modelos hidrológicos, ya ha sido implementada en estudios sobre la zona hidrográfica río La Vieja, cuenta con herramientas para el manejo y comparación de escenarios, además, de poseer opciones para la autocalibración de parámetros.

Para finalizar con este apartado, a continuación, se presenta el diagrama conceptual y las ecuaciones que están incorporadas en el modelo de dos tanques de WEAP denominado Método de Humedad del Suelo:

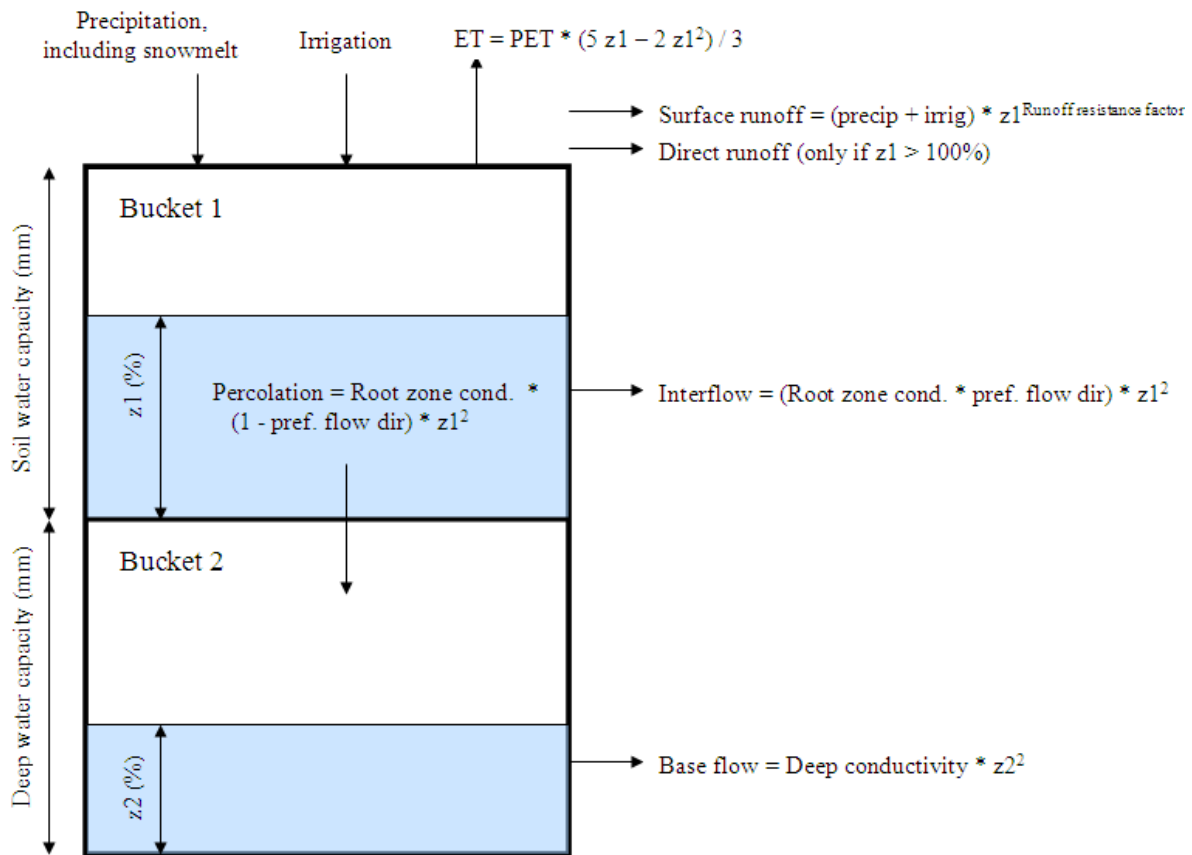


Figura 12. Modelo de dos tanques para el Método de Humedad del Suelo
Fuente: (WEAP, 2021)

Los parámetros que componen este modelo serán explicados a continuación junto con los parámetros que se relacionan con la demanda.

4.1.2 Registro de variables para la subzona hidrográfica en WEAP

A continuación, se presenta el proceso de construcción y el resultado del modelo que se ha desarrollado en WEAP para determinar la disponibilidad hídrica que hay en la cuenca del Río La vieja. Es importante aclarar que la topología y algunas consideraciones están basadas en la investigación realizada por SEI, y otros (2014).

Requerimientos de datos en WEAP

Según el nivel de detalle, herramienta hidroinformática y objetivo de la investigación se determinará el tipo y cantidad de datos que alimentarán al modelo. En este caso se ha optado por una modelación basada en cuerpo hídricos superficiales, sitios de demanda (poblaciones), tributaciones externas a la cuenca e interacción climática.

El inicio de la modelación se realiza con la especificación de los parámetros generales del modelo, es decir, dentro de la pestaña *Incrementos de años y tiempos* se define cuál es el año en que se inicia la modelación y el último año que será simulado (incluyendo el periodo de los escenarios). Asimismo, se determina cuál será el tamaño de paso que existirá en un año (en este caso se ha considerado 12 por la escala mensual del modelo) y se define si el incremento del tiempo se basará en meses calendario, todos los incrementos serán iguales o si se ingresarán manualmente.

Por último, se verifica cuál es el mes inicial para empezar la simulación y se verifica en el recuadro de la derecha que todos los componentes sean los configurados. Esta descripción se puede observar de forma gráfica en la siguiente imagen:

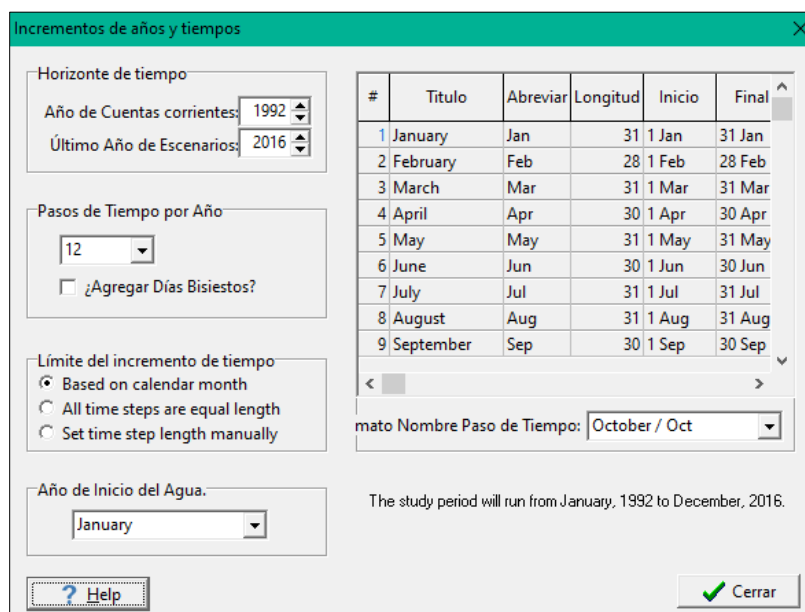


Figura 13. Recuadro para configuración *Incrementos de años y tiempos*
Fuente: Adaptado de SEI-US

Una vez se ha configurado el período de tiempo que se trabajará en la modelación se continúa con la esquematización topológica de cada uno de los componentes de la subzona hidrográfica, considerando que WEAP es una herramienta hidrológica que utiliza la modelación sub-agregada a través de la representación de elementos tipo nodos y líneas con posibilidad de ubicación georreferenciada. En donde los nodos representan unidades relevantes que sintetizan las propiedades de una región o territorio (Embalse, unidad hidrológica, sitio de demanda, PTAP, etc.); y las líneas simbolizan la interacción que existe entre los nodos (ríos, derivaciones, conducciones, retornos, etc.).

Entonces, para la configuración de la subzona hidrológica del río La Vieja se ha utilizado elementos tipo *shape* para mostrar gráficamente cada una de las microcuencas y cascos urbanos que componen a la subzona, luego, se ha colocado los nodos para resumir las propiedades de cada elemento y se han conectado a través de líneas para representar las relaciones del sistema hídrico

superficial. La información necesaria para generar el elemento es el nombre y etiqueta, además de establecer si el elemento se considera en el esquema inicial y si se incluye áreas regadas (ver figura).

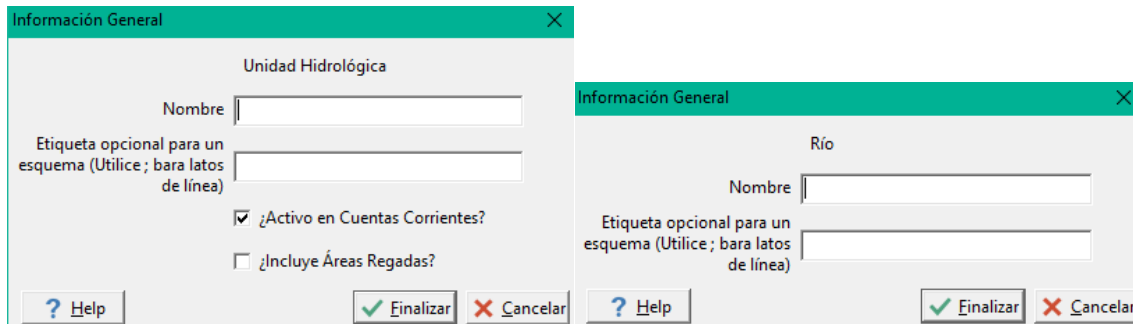


Figura 14. Recuadro para configuración de nodos y líneas
Fuente: Adaptado de SEI-US

El resultado de la representación topológica se puede observar en la Figura 15. En donde el recuadro en verde muestra los elementos topológicos que se pueden ingresar al modelo y la cantidad que ya se ha colocado para cada uno; el recuadro en naranja muestra el esquema completo de la subzona y el cuadro en morado es la pantalla en la cual se gestiona la representación topológica.

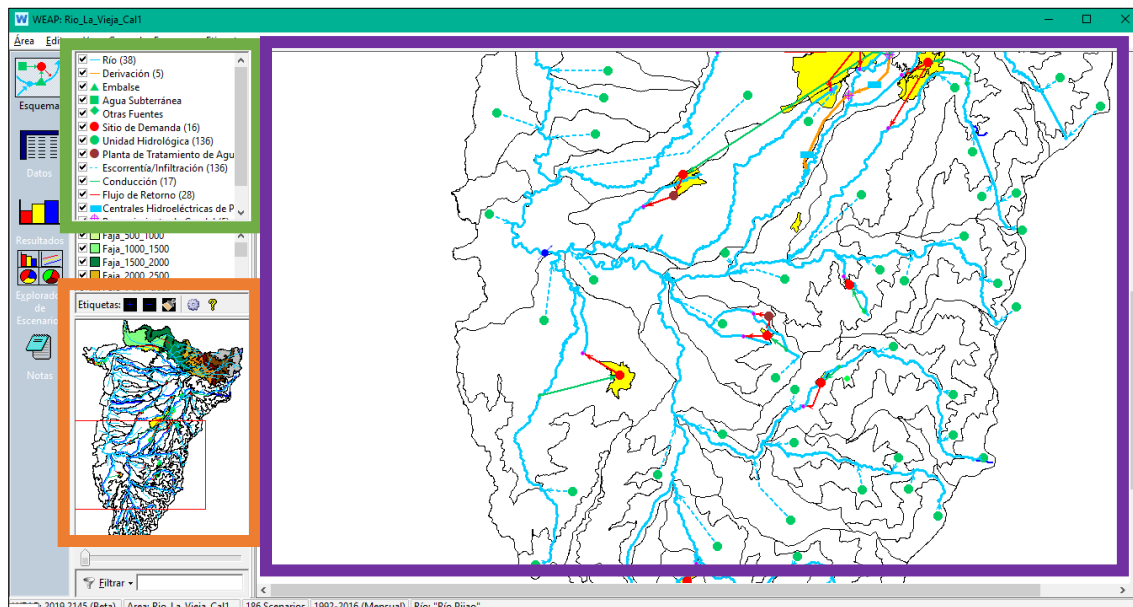


Figura 15. Recuadro con elementos de la pestaña Esquema
Fuente: Adaptado de SEI-US

Una vez configurados la topología, se continúa por ingresar los datos (en la pestaña *Datos*) que se han determinado necesarios para simular el comportamiento climático en la subzona hidrográfica y determinar la demanda de las actividades humanas que hay sobre esta.

Es importante señalar que los registros pueden estar representados de distintas maneras, según el tipo de elementos que se va a caracterizar. Las opciones que tiene WEAP para registrarlas son:

Tabla 11. Formatos de escritura y tipos de datos de entrada WEAP

Método de introducción de dato	Formato	Tipo de dato
Expression builder	Escritura directa en WEAP	Ecuaciones o valor combinando elementos del modelo
Monthly Time-Series Wizard	Escritura directa en WEAP	Series temporales (a escala mensual)
Yearly Time-Series Wizard	Escritura directa en WEAP .csv o hojas de cálculo	Series temporales (escala anual con valores multianuales)
Read From File Wizard	.csv u hojas de cálculo	Series temporales (a escala diaria, mensual y anual, con valores multianuales)

Fuente: El autor

Las opciones para el registro de datos y parámetros se pueden definir como:

- *Expression builder*: Permite escribir o calcular valores basados en caracteres, ecuaciones y/o combinando datos del modelo.
- *Monthly Time-Series Wizard*: En esta opción se introduce de forma **manual** series temporales con **resolución mensual** de un solo año. Esta opción se utiliza normalmente para los datos de la Cuenta Corriente.
- *Yearly Time-series Wizard*: Permite introducir series temporales de manera **manual** con **resolución anual**. Esta herramienta es utilizada para colocar valores generales y realizar estimación entre años, también se pueden ingresar datos con base en **Hojas de cálculo** (formato .csv, .xlsx, etc.).
- *Read from File Wizard*: En esta opción se pueden ingresar datos de forma **manual** y a través de **Hojas de cálculo** (formato .csv, .xlsx, etc.). El formato utilizado para las hojas de cálculo está dado por una primera columna que especifica el año, la segunda columna para el mes (opcional) y una última columna que tiene el registro de la variable para ese momento.

Con base en estas entradas, los elementos que se han considerado dentro del modelo son:

Supuestos clave: Corresponde a todos los parámetros específicos de una cuenca, estas se basan en propiedades físicas, morfológicas y uso del suelo, las cuales dependen del modelo de tanques que utilice la herramienta hidroeinformática. En WEAP se emplea método de MABIA, un modelo de dos tanques que utiliza las siguientes variables:

- *Kc*: Es el coeficiente de cultivo, relativo al tipo de suelo.

- *Dirección de Flujo*: La dirección de flujo es un parámetro utilizado para distribuir el flujo que estará en la capa de la zona de la raíz (tanque superior), el flujo intermedio y el flujo en la capa inferior del suelo (tanque inferior) o agua subterránea. Este valor puede variar entre los tipos de clase de tierra y sus valores oscilan representan un 1.0 cuando el flujo es 100% horizontal y 0 cuando el flujo es 100% vertical.
- *Capacidad de Agua de la Zona de la Raíz (Sw_cap)*: Es la capacidad efectiva que tiene la capa superior del suelo para retener agua. Este valor representa el tanque superior y su unidad de medida es en mm.
- *Conductividad de la Zona de la Raíz (Rootzone_Cond)*: Es la tasa o ratio de conductividad de la zona de la raíz (tanque superior) bajo condiciones de saturación completa, el flujo intermedio y el flujo a la capa inferior del suelo. Esta tasa depende del tipo de suelo.
- *Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF)*: Este parámetro se utiliza para controlar la respuesta de la escorrentía superficial, en donde, la escorrentía tenderá a disminuir con valores más altos (rango de 0 a 1000). Este parámetro puede variar entre los tipos de suelo.
- *Z1*: Altura inicial del tanque superior en la simulación. Este valor está dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total de la Capacidad de Agua de la Zona de la Raíz.
- *Capacidad de Aguas Profundas (Dw_Cap)*: Es la capacidad efectiva de retención de agua de la capa de suelo más baja y profunda (tanque inferior). Este valor es único para la cuenca, se mide en mm y NO varía según el tipo de suelo.
- *Conductividad Profunda (Deep_Cond)*: Es la tasa de conductividad de la capa profunda (tanque inferior) en saturación completa que controla la transmisión del flujo base. Este parámetro es un valor único para la cuenca y NO varía según el tipo de suelo.
- *Z2 Inicial*: Altura inicial del tanque inferior en la simulación. Este valor está dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total de la cubeta de suelo inferior (Capacidad de Aguas Profundas).

Con base en la descripción presentada, en el modelo se ha implementado una clasificación de los parámetros Kc, FlowDirection, Sw_Cap, Rootzone_Cond, RRF y Z1 según el tipo de suelo, los cuales se han clasificado en: **Glaciares, Agrícola, Bosque, Café, Páramo, Zonas Urbanas, pastos, Cuerpos de Agua y Suelos Desnudos**. De forma análoga, para los parámetros Dw_Cap, Deep_Cond y Z2 se ha utilizado una clasificación según: **Parte Alta, Parte Media y Parte Baja**. De forma gráfica, el resultado de colocar los valores iniciales de los supuestos clave es:

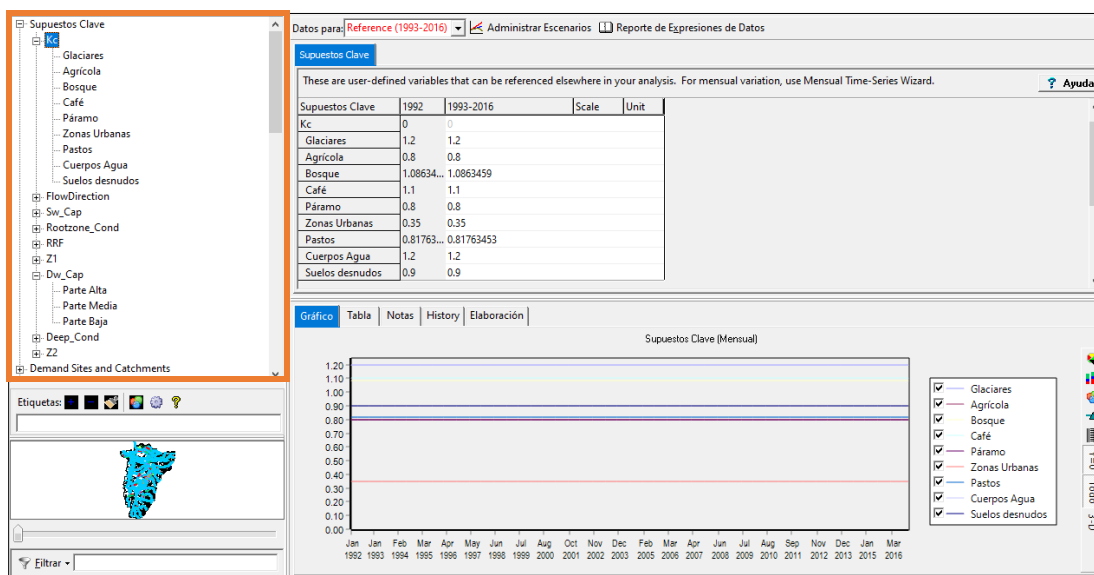


Figura 16. Recuadro con Supuestos Clave del modelo
Fuente: Adaptado de SEI-US

Nota: Es importante anotar que estos parámetros han sido estimados con base en la calibración del modelo, por lo tanto, sus valores serán mostrados en apartados siguientes.

Sitios de demandas y captaciones: Abarca todos los nodos relacionados con la gestión de los recursos hídricos del sistema; los más importantes son sitios de demanda (cabeceras urbanas) y microcuencas hidrográficas.

Es importante resaltar que cada nodo contiene dos jerarquías de parámetros, una que determina el tipo de elemento que se va a representar y un segundo que contiene los parámetros necesarios para simular el comportamiento de ese elemento. Para los nodos relacionados con sitios de demanda la jerarquía mayor contiene *Uso del agua, Pérdida y Reuso, Manejo de la Demanda, Calidad del Agua, Costo, Prioridad, y Avanzado*, sin embargo, en este modelo sólo se considerará el elemento *Uso del Agua*.

En cuanto a la segunda jerarquía de los sitios de demanda, para el elemento *Uso del Agua*, los parámetros que se pueden ingresar en los nodos son:

- *Nivel de Actividad Anual:* Es el nivel de actividad anual que se origina por la demanda como resultado de las actividades humanas (domésticas, agricultura o industrial). En este caso se estima como la población anual proyectada para cada una de las cabeceras que hay en la cuenca.
- *Tasa Anual de Uso del Agua:* Es la tasa anual de agua demandada por las actividades definidas. En este caso se han utilizado las mismas que en el modelo anterior.

- *Variación Mensual*: Es la proporción mensual de la demanda anual. Como en este modelo la proporción está determinada por el número de días en cada mes, el valor se ha dejado en blanco.
- *Consumo*: Es el porcentaje del caudal afluente que es consumido o perdido en el sistema. Este valor se ha determinado como 20% para todas las captaciones.

En la Figura 17 se muestra la pestaña con los elementos descritos:

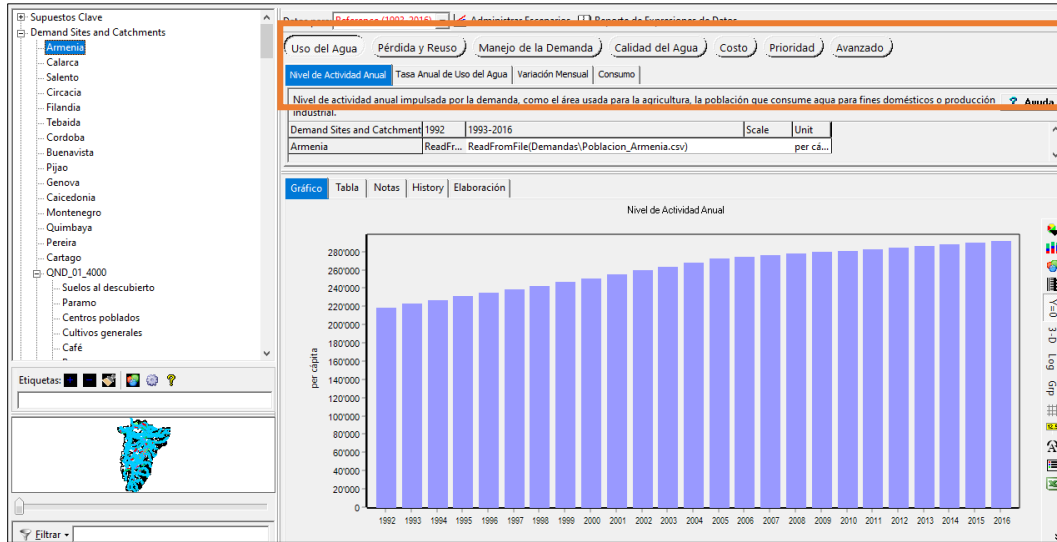


Figura 17. Recuadro con parámetros para los Usos del Agua
Fuente: Adaptado de SEI-US

Para las captaciones o microcuencas los parámetros que se pueden introducir se basan en los tipos de suelos que se han definido en los Supuestos Clave y las jerarquías principales son *Uso de Suelo*, *Clima*, *Inundación*, *Rendimiento*, *Calidad del Agua*, *Costo* y *Avanzado*, no obstante, en este modelo solo se han utilizado los campos de *Uso del Suelo* y *Clima*.

Los parámetros utilizados para la jerarquía *Uso del Suelo* son los presentados en los *Supuestos Clave* a excepción de:

- *Área*: Es el área de la microcuenca en km² y la proporción porcentual de los tipos de suelo que esta tiene. Las áreas de las unidades hidrográficas provienen del análisis geoespacial de las capas tipo *shape* que se han generado en la investigación de SEI, y otros (2014), además de utilizar las proporciones porcentuales definidas en esta.

En la Figura 18 se puede observar la pestaña con los elementos descritos:

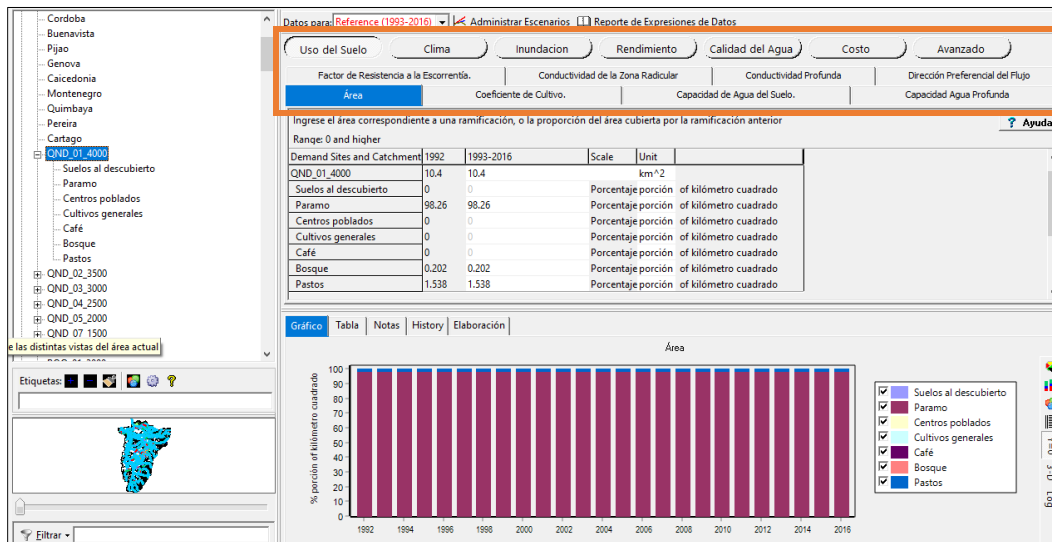


Figura 18. Recuadro con parámetros del Uso del Suelo
Fuente: Adaptado de SEI-US

Los parámetros utilizados para la jerarquía Clima son:

- **Precipitación:** Es la precipitación mensual que se ha registrado/simulado para la microcuenca en un período determinado. La unidad de medida son los mm y se han utilizado los registros históricos presentados en el capítulo 3.
- **Temperatura:** Representa el promedio registrado/simulado de la temperatura mensual para la microcuenca en un período determinado. La unidad de medida son los °C y se han utilizado los registros presentados en el capítulo 3.
- **Humedad:** Es la humedad relativa registrada/simulada a escala mensual para la microcuenca en un período determinado. La unidad de medida es porcentual y se han utilizado los registros utilizados en el modelo anterior (SEI, y otros, 2014).
- **Viento:** Es el promedio de la velocidad del viento con granularidad mensual. En este caso se ha asumido un valor constante de 2.0 m/s.
- **Fracción de nubosidad:** Fracción de horas del día sin nubes con granularidad mensual. Para este parámetro se ha definido un valor de 1.0 en todos los meses, el cual corresponde a un cielo sin nubes.
- **Latitud:** Latitud en grados de la microcuenca. En este caso toda la subzona hidrográfica se ubica en la coordenada 4°.

Las demás variables de la jerarquía Clima están relacionadas con la nieve y, considerando que este fenómeno no es significativo para La Vieja, se han utilizado los parámetros por defecto de la herramienta hidroeinformática.

En la Figura 19 se puede observar la pestaña con los elementos descritos:

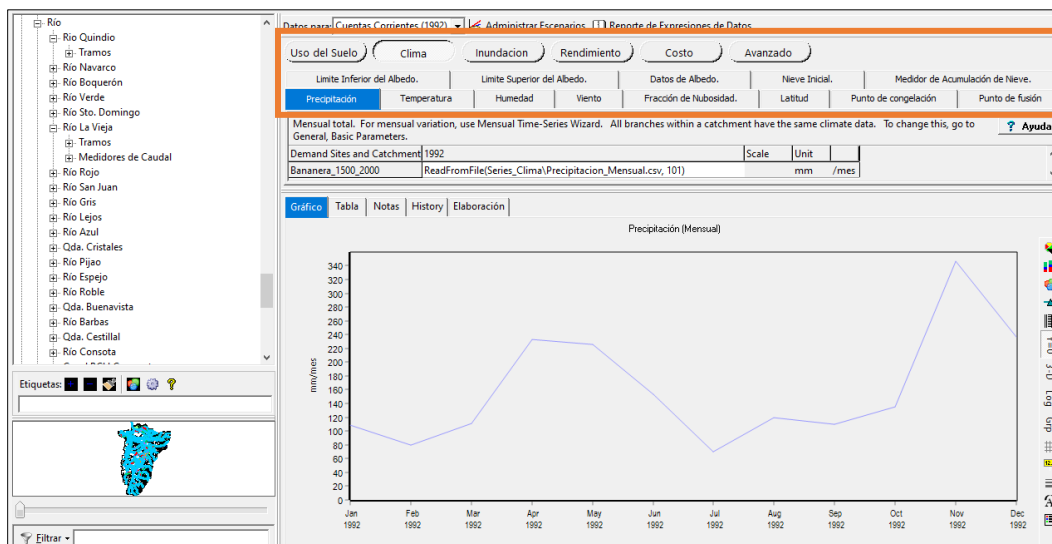


Figura 19. Recuadro con parámetros del Clima
Fuente: Adaptado de SEI-US

Nota: Las demás jerarquías no se han utilizado para la modelación (Inundación, Rendimiento, Costo y Avanzado) porque no eran relevante para el objeto de esta investigación.

Recursos y Suministros: Este elemento contiene todos los cuerpos hídricos superficiales y canales antrópicos que se están modelando dentro de esta investigación, en el cual se puede determinar datos como caudales máximos para inundación, afluentes y efluentes de agua subterránea, evaporación, entre otros. Sin embargo, este elemento es utilizado en el modelo para ingresar los registros de caudal que se poseen de las estaciones limnigráficas El Alambrado y Cartago, los cuales fueron presentados en el capítulo 3.

Nota: Los demás elementos del SSD no son presentados porque no fueron utilizados para el modelo.

Para finalizar se presentan las unidades utilizadas para cada una de las variables que se han ingresado o se calculan en la herramienta hidroeinformática para este proyecto:

Tabla 12. Unidades de variables utilizadas WEAP

Variable	Unidad	Abreviatura unidad
Área	Hectárea	Ha
Consumo agua	Metro cubico/Hectárea	m ³ /H
	Metro cubico/Persona	m ³ /per
Distancia	Metro	m
	Milímetro	mm

Variable	Unidad	Abreviatura unidad
Flujo	Milímetro/Mes	mm/mes
	Milímetro/Día	mm/día
	Metro cubico por segundo	m ³ /s
Habitantes	Personas	Personas
Horas (de sol)	Hora	Hr
Latitud	Grado	°
Masa	Kilogramo	Kg
Peso	Kilogramo	Kg
Sin dimensiones	Adimensional	-
Temperatura	Grado centígrado	°C
Volumen	Metro cubico	m ³
	Millón metro cubico	M m ³

Fuente: El autor

4.1.3 Simulación de escenarios bajo condiciones de Cambio Climático

Una vez se ha configurado los parámetros iniciales del modelo e ingresado los registros de precipitación y temperatura, se procede a determinar los valores que permiten simular las condiciones normales en la subzona hidrográfica, es decir, se buscan los valores de los *Supuestos Clave* que, basados en la bibliografía y el modelo anterior (SEI, y otros, 2014), permiten estimaciones tendientes a los valores registrados en la estación limnigráfica El Alambrado para el período de tiempo 1992 – 2002.

El proceso de calibración del modelo se ha desarrollado a través de la Herramienta de Estimación de Parámetros (PEST), herramienta incluida en WEAP para automatizar el proceso de comparación entre los valores simulados y los registros históricos por medio de la variación de los parámetros especificados en el modelo. Para la utilización de PEST se deben seleccionar los valores del modelo que se desean calibrar, y mediante la definición de título, nombre e intervalo de búsqueda (incluyendo un valor semilla) se llenan los campos que se observan en la siguiente imagen:

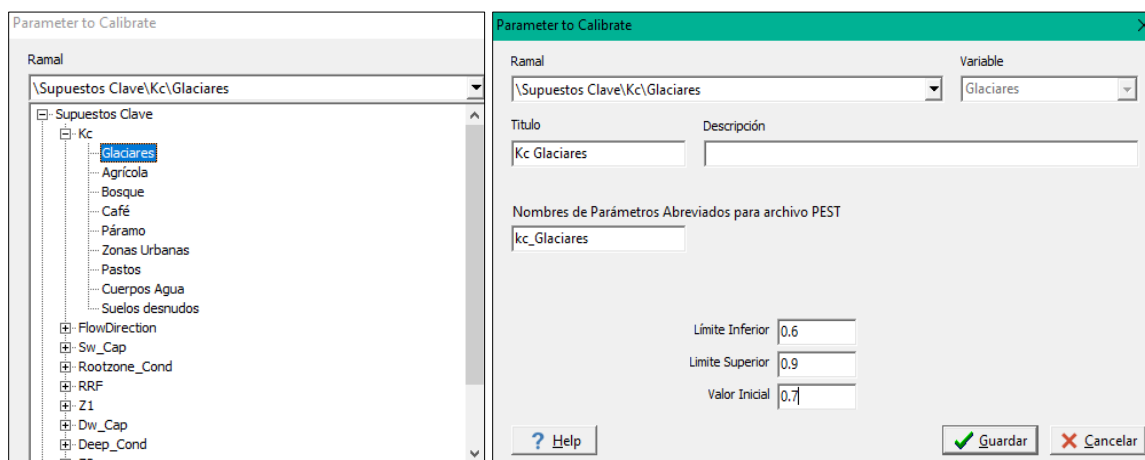


Figura 20. Calibración de parámetros en PEST

Fuente: Adaptado de SEI-US

Después de ingresar cada uno de los valores que se van a calibrar (cada uno de los elementos y clasificaciones de los Supuestos Clave), se procede a definir los datos que se utilizarán para la calibración del modelo. Como se mencionó, los Medidores de Caudal pertenecen a los registros de la estación El Alambrado, sin datos de Embalse ni capa de nieve, para todos los meses y especificando el período de tiempo (1992-2002).

Para finalizar con la definición de parámetros se selecciona el Escenario que se va a calibrar (escenario base) y se seleccionan las opciones para modificar los parámetros de las Cuentas Corrientes, Normalizar los datos de observación y Ejecutar PEST después de crear los archivos PEST de entrada (ver Figura 21).

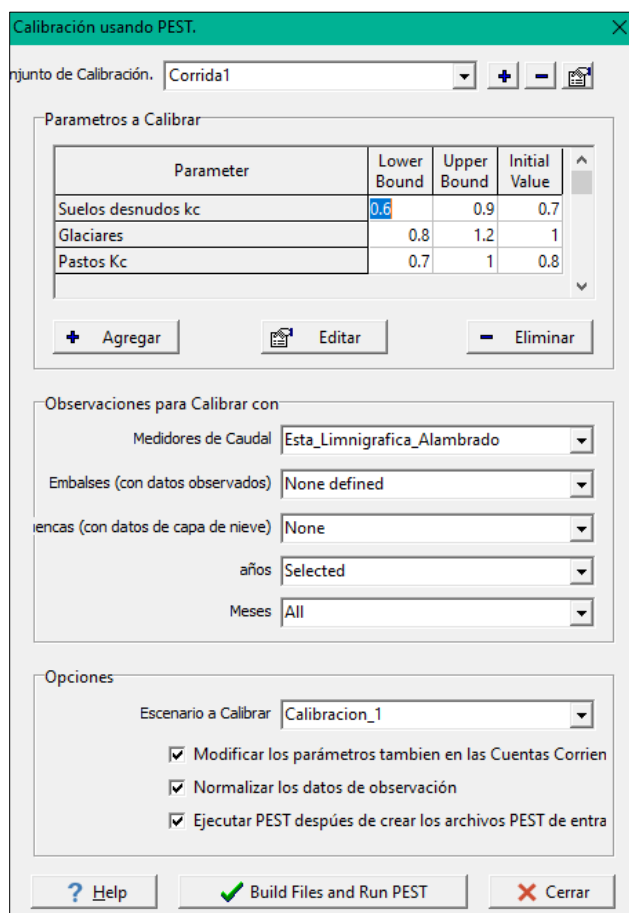


Figura 21. Ventana de configuración PEST
Fuente: Adaptado de SEI-US

Luego, se selecciona la opción de Build Files and Run PEST, con lo cual se genera un archivo con los datos de caudal que son utilizados para la calibración y se permite el desarrollo de un proceso iterativo que resuelve una matriz cuadrada con un tamaño igual al número de parámetros que se desean calibrar. Esta matriz se resuelve varias veces y a través de una selección por calor (se

seleccionan los resultados simulados con mayor proximidad a los registrados) se eligen los parámetros con mayor precisión.

Los resultados de esta calibración fueron exportados a una hoja de cálculo y por medio de la métrica de Nash-Sutcliffe (NSE) se determina la calidad de las estimaciones. Cabe mencionar que la NSE es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) comparado con la varianza medida de los registros (información). Esta métrica calcula el desempeño relativo, en donde un valor cercano a uno (1) indica un mejor ajuste (ver tabla).

Tabla 13. Métrica para la eficiencia de Nash

Coefficiente de Nash	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: (Molnar, 2011)

Entonces, los resultados de la calibración son analizados bajo la Eficiencia de Nash-Sutcliffe para el período 1992-2002 (período de calibración), 2003-2007 (período de validación) y 1992-2007 (período total). Con base en los valores obtenidos y los parámetros calculados (se evalúa si los parámetros se encuentran en el intervalo definido), se realiza un proceso iterativo en el cual se definen parámetros tendenciales del modelo a través de los ciclos y se reduce el número de elementos que se calibran bajo la PEST.

El proceso iterativo se detuvo al obtener los siguientes valores para la NSE:

Tabla 14. Resultados de calibración del modelo Estación El Alambrado

Período de tiempo		
1992 - 2002	2003 – 2007	1992 – 2007
0.71	0.43	0.56

Fuente: El autor

Con base en los resultados de la calibración, se ha obtenido que el modelo tiene un ajuste **Muy Bueno** (0.71) en comparación con los datos registrados entre 1992 y 2002 en la estación El Alambrado. Asimismo, la validación del modelo muestra un **Bueno** para los datos registrados por la misma estación en el período 2002 – 2007.

No obstante, un período de calibración de 11 años y 5 años de validación pueden no ofrecer un resultado preciso sobre la calidad del modelo. Por lo anterior, se ha optado por utilizar los registros de la estación limnigráfica Cartago para un segundo proceso de validación, es decir, estos registros se han comparado con los valores simulados. Lo cual ha mostrado los siguientes resultados:

Tabla 15. Resultados de calibración del modelo Estación Cartago

Período de tiempo		
1992 - 2002	2003 – 2007	1992 – 2007
0.75	0.41	0.54

Fuente: El autor

Como se puede observar con los coeficientes obtenidos del estadístico, los valores simulados en el modelo al compararse con los datos registrados en la estación Cartago tienen un ajuste **Muy Bueno** para el período de calibración y un ajuste **Bueno** para la validación y la totalidad del tiempo de simulación. Por lo tanto, se puede establecer que los parámetros determinados en los Supuestos Clave son apropiados para el modelo y con base en estos se pueden proyectar y analizar los escenarios bajo condiciones de Cambio Climático.

Para concluir con este apartado se presentan los valores seleccionados para los Supuestos Claves:

Tabla 16. Valores finales para los Supuestos Claves del modelo

Supuesto Clave	Categoría	Unidad	Valor
Kc	Glaciares	N/A	1.20
Kc	Agrícola	N/A	0.80
Kc	Bosque	N/A	1.09
Kc	Café	N/A	1.10
Kc	Páramo	N/A	0.80
Kc	Zonas Urbanas	N/A	0.35
Kc	Pastos	N/A	0.82
Kc	Cuerpos Agua	N/A	1.20
Kc	Suelos desnudos	N/A	0.90
FlowDirection	Glaciares	N/A	0.80
FlowDirection	Agrícola	N/A	0.45
FlowDirection	Bosque	N/A	0.35
FlowDirection	Café	N/A	0.60
FlowDirection	Páramo	N/A	0.40
FlowDirection	Zonas Urbanas	N/A	0.65
FlowDirection	Pastos	N/A	0.65
FlowDirection	Suelos desnudos	N/A	0.50
FlowDirection	Cuerpos Agua	N/A	0.90

Supuesto Clave	Categoría	Unidad	Valor
Sw_Cap	Glaciares	mm	400
Sw_Cap	Agrícola	mm	800
Sw_Cap	Bosque	mm	520
Sw_Cap	Café	mm	550
Sw_Cap	Páramo	mm	500
Sw_Cap	Zonas Urbanas	mm	492.82
Sw_Cap	Pastos	mm	550
Sw_Cap	Cuerpos Agua	mm	700
Sw_Cap	Suelos desnudos	mm	505.24
Rootzone_Cond	Glaciares	mm	MonthlyValues(Jan, 90, Feb, 100, Mar, 100, Apr, 100, May, 100, Jun, 100, Jul, 90, Aug, 90, Sep, 100, Oct, 100, Nov, 100, Dec, 100)
Rootzone_Cond	Agrícola	mm	MonthlyValues(Jan, 90, Feb, 90, Mar, 150, Apr, 150, May, 150, Jun, 150, Jul, 90, Aug, 90, Sep, 150, Oct, 150, Nov, 150, Dec, 150)
Rootzone_Cond	Bosque	mm	MonthlyValues(Jan, 110, Feb, 110, Mar, 190, Apr, 190, May, 190, Jun, 190, Jul, 110, Aug, 110, Sep, 190, Oct, 190, Nov, 190, Dec, 190)
Rootzone_Cond	Café	mm	MonthlyValues(Jan, 90, Feb, 90, Mar, 150, Apr, 150, May, 150, Jun, 150, Jul, 90, Aug, 90, Sep, 150, Oct, 150, Nov, 150, Dec, 150)
Rootzone_Cond	Páramo	mm	MonthlyValues(Jan, 110, Feb, 110, Mar, 180, Apr, 180, May, 180, Jun, 180, Jul, 110, Aug, 110, Sep, 180, Oct, 180, Nov, 180, Dec, 180)
Rootzone_Cond	Zonas Urbanas	mm	MonthlyValues(Jan, 80, Feb, 80, Mar, 125, Apr, 125, May, 125, Jun, 125, Jul, 80, Aug, 80, Sep, 125, Oct, 125, Nov, 125, Dec, 125)
Rootzone_Cond	Pastos	mm	MonthlyValues(Jan, 100, Feb, 100, Mar, 130, Apr, 130, May, 130, Jun, 130, Jul, 100, Aug, 100, Sep, 130, Oct, 130, Nov, 130, Dec, 130)
Rootzone_Cond	Cuerpos Agua	mm	MonthlyValues(Jan, 100, Feb, 100, Mar, 140, Apr, 140, May, 140, Jun, 140, Jul, 100, Aug, 100, Sep, 140, Oct, 140, Nov, 140, Dec, 140)
Rootzone_Cond	Suelos desnudos	mm	MonthlyValues(Jan, 75, Feb, 75, Mar, 130, Apr, 130, May, 130, Jun, 130, Jul, 75, Aug, 75, Sep, 130, Oct, 130, Nov, 130, Dec, 130)

Supuesto Clave	Categoría	Unidad	Valor
RRF	Glaciares	N/A	MonthlyValues(Jan, 5, Feb, 5, Mar, 3, Apr, 3, May, 4, Jun, 4, Jul, 5, Aug, 5, Sep, 3, Oct, 3, Nov, 4, Dec, 4)
RRF	Agrícola	N/A	MonthlyValues(Jan, 6, Feb, 6, Mar, 3.5, Apr, 3.5, May, 4.5, Jun, 4.5, Jul, 6, Aug, 6, Sep, 3.5, Oct, 3.5, Nov, 4.5, Dec, 4.5)
RRF	Bosque	N/A	MonthlyValues(Jan, 6.5, Feb, 6.5, Mar, 4, Apr, 4, May, 5, Jun, 5, Jul, 6.5, Aug, 6.5, Sep, 4, Oct, 4, Nov, 5, Dec, 5)
RRF	Café	N/A	MonthlyValues(Jan, 6, Feb, 6, Mar, 3.5, Apr, 3.5, May, 4.5, Jun, 4.5, Jul, 6, Aug, 6, Sep, 3.5, Oct, 3.5, Nov, 4.5, Dec, 4.5)
RRF	Páramo	N/A	MonthlyValues(Jan, 6, Feb, 6, Mar, 4, Apr, 4, May, 5, Jun, 5, Jul, 6, Aug, 6, Sep, 4, Oct, 4, Nov, 5, Dec, 5)
RRF	Zonas Urbanas	N/A	MonthlyValues(Jan,4.5, Feb, 4.5, Mar, 3.3, Apr, 3.3, May, 4, Jun, 4, Jul, 4.5, Aug, 4.5, Sep, 3.3, Oct, 3.3, Nov, 4, Dec, 4)
RRF	Pastos	N/A	MonthlyValues(Jan, 5.5, Feb, 5.5, Mar, 3.5, Apr, 3.5, May, 4, Jun, 4, Jul, 5.5, Aug, 5.5, Sep, 3.5, Oct, 3.5, Nov, 4, Dec, 4)
RRF	Cuerpos Agua	N/A	MonthlyValues(Jan, 4.5, Feb, 4.5, Mar, 3.5, Apr, 3.5, May, 4, Jun, 4, Jul, 4.5, Aug, 4.5, Sep, 3.5, Oct, 3.5, Nov, 4, Dec, 4)
RRF	Suelos desnudos	N/A	MonthlyValues(Jan, 4.5, Feb, 4.5, Mar, 3.5, Apr, 3.5, May, 4, Jun, 4, Jul, 4.5, Aug, 4.5, Sep, 3.5, Oct, 3.5, Nov, 4, Dec, 4)
Z1	Todas*	%	MonthlyValues(Jan, 30, Feb, 30, Mar, 100, Apr, 100, May, 100, Jun, 50, Jul, 30, Aug, 30, Sep, 100, Oct, 100, Nov, 100, Dec, 100)
Dw_Cap	Todas*	mm	900
Deep_Cond	Todas*	mm	200
Z2	Todas*	%	MonthlyValues(Jan, 30, Feb, 30, Mar, 100, Apr, 100, May, 100, Jun, 50, Jul, 30, Aug, 30, Sep, 100, Oct, 100, Nov, 100, Dec, 100)

*Nota: Las casillas con la denominación de **Todas** representan las categorías de ese grupo que se han calibrado con los mismos valores.

Fuente: El autor

4.1.4 Configuración de Escenarios

Una vez calibrado y validado el escenario de referencia, el siguiente paso consiste en establecer los escenarios que representan las posibles condiciones en el futuro. Para esto se ha implementado las condiciones generales del IPCC (2014), el IDEAM (2015) y el presente estudio, en donde se ha establecido que las proyecciones se deben realizar entre 2011 - 2040, 2041 – 2070 y 2071 -2100 según las tendencias en la concentración de Gases de Efecto Invernadero. Entonces, los escenarios considerados se basan en:

- El IPCC (2014), quienes han considerado más de 900 escenarios de mitigación por concentración de CO₂- equivalente, sin embargo, en la investigación desarrollada por SEI, y otros (2014) se estableció que son cinco (5) las tendencias representativas para la subzona hidrográfica del río La Vieja, en donde 4 representan una reducción de la precipitación del 1% al 21% junto con incrementos de temperatura entre 1.2°C y 3.2°C, y el último considera un aumento de la lluvia en un 16% y de la temperatura en 1.1°C.
- El IDEAM (2015) donde se determinó que en el departamento del Quindío el escenario más probable indica un aumento de la precipitación cercana al 6.34% y de temperatura de 0.8°C para el 2040, de 12.20% y 1.52°C para finales de 2070, y de 24.28% y 2.32°C para el 2100.
- Con base en el análisis estadístico de las estaciones hidrometeorológicas se ha proyectado un aumento de 0.52°C para la temperatura a finales del 2040 y de 1.83°C para el 2100. En este análisis no se consideran cambios en la precipitación de la subzona hidrográfica.

Con base en lo anterior, los escenarios relacionados con el Cambio Climático utilizados en esta investigación son:

Tabla 17. Escenarios con proyecciones de Cambio Climático

Nombre	Precipitación	Temperatura
Histórico	No hay variaciones	No hay Variaciones
IDEAM 2011 – 2040	+ 6.34%	+ 0.80°C
IDEAM 2041 – 2070	+ 12.20%	+ 1.52°C
IDEAM 2071 – 2100	+ 24.28%	+ 2.32°C
Tendencia Lineal 2011 - 2040	No hay variaciones	+ 0.52°C
Tendencia Lineal 2071 – 2100	No hay variaciones	+ 1.83°C
P-1% T+3.2	- 1.00%	+ 3.20°C
P-7% T+1.2	- 7.00%	+ 1.20°C
P-21% T+1.1	- 21.00%	+ 1.10°C
P-12% T+1.7	- 12.00%	+ 1.70°C

Fuente: El autor

Sin embargo, se considera necesario evaluar el impacto del Cambio Climático con variaciones de las condiciones antrópicas, por lo tanto, a cada uno de los escenarios del C.C. se le ha sumado tres escenarios que consideran las proyecciones de población (estimadas con base en el censo del DANE en el 2018 -2019 para cada uno de los municipios) para el año 2040, 2070 y 2100, las cuales se denominan *Población Alta*, *Población Media* y *Población Baja*, respectivamente.

La síntesis de estos escenarios se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 18. Escenarios con proyecciones de población

Nombre	Población
Población Baja	Proyectada del 2011 al 2040
Población Media	Proyectada del 2041 al 2070
Población Alta	Proyectada del 2071 al 2100

Fuente: El autor

Adicionalmente, a cada uno de los escenarios con variación de la población se le agregaron cinco escenarios con cambios en la cobertura del suelo, siendo equivalentes a +/-10% de las áreas de cultivo/bosque, a +/-30% del área de cultivo/páramo y +5% del área urbana.

Con base en lo anterior, los escenarios resultantes son:

Tabla 19. Escenarios con variaciones en el uso del suelo

Escenario Climático	
Población Proyectada	
Nombre	Uso del suelo
Cambio Suelo +10%	+10% de Cultivos -10% de Bosques y/o Páramos
Cambio Suelo -10%	-10% de Cultivos +10% de Bosques y/o Páramos
Cambio Suelo +30%	+30% de Cultivos -30% de Bosques y/o Páramos
Cambio Suelo -30%	-30% de Cultivos +30% de Bosques y/o Páramos
Cambio Suelo +30% Urbanización +5%	+30% Cult. -30% Bosq. +5% de Urbanización

Fuente: El autor

Cabe mencionar que el manejo de nomenclatura para los escenarios resultantes consiste en la inscripción de las siglas de los escenarios que lo preceden más el nombre del escenario actual. Es decir, un escenario de Cambio Climático se denominará *P-1% T+3.2*; el mismo escenario considerando población alta tendrá el nombre de *PIT3.2 Población Alta*; y al tener en cuenta un cambio en el uso del suelo de -30% en los cultivos se llamará *PIT3.2PA Cambio Suelo - 30%*.

De forma gráfica, el manejo de los escenarios en WEAP es:

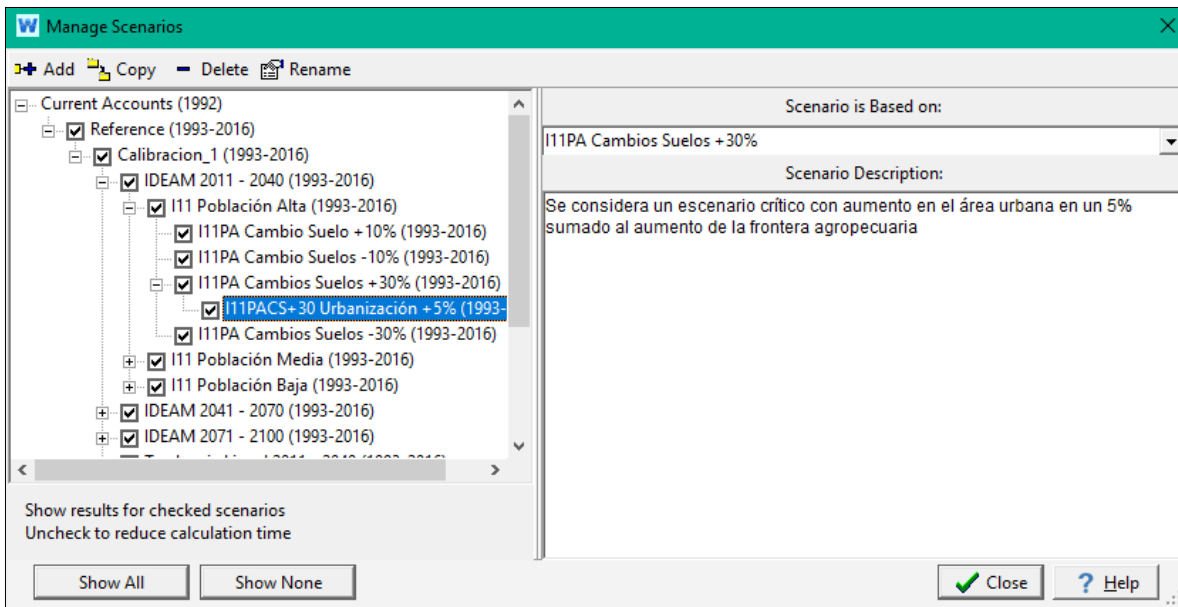


Figura 22. Gestor de escenarios en WEAP
Fuente: Adaptado de SEI-US

4.1.5 Evaluación de escenarios

Una vez definidos y simulados los escenarios tendenciales en la herramienta hidroeinformática, se continúa con el análisis de los resultados que se han obtenido. Dentro de las salidas que tiene el modelo se ha optado por estudiar el caudal, demanda no satisfecha y un cálculo adicional para determinar la desviación porcentual de los escenarios con respecto al base.

Es importante anotar que las simulaciones de la respuesta hídrica consideraron los escenarios de Cambio Climático, proyecciones poblacionales y cambios en el uso del suelo, permitiendo estimar el caudal que circula en cada uno de los elementos que componen la topología del modelo.

A continuación, se presenta la síntesis de los resultados en los nodos de captación para los centros poblados que pertenecen a la cuenca del río La Vieja.

Simulaciones de caudal bajo condiciones de Cambio Climático

Como análisis inicial, la simulación de los escenarios considerando las variaciones por Cambio Climático comprueba la relación que existe entre la precipitación y el caudal, en donde se presenta una tendencia general a presentar mayores caudales en los escenarios que tienen un incremento en la precipitación y caudales menores en los escenarios con tendencias a la reducción de la lluvia, siendo consecuente con la relación hidrológica que existe entre los dos fenómenos. Cabe resaltar que la temperatura no se ha mostrado como una variable representativa para la disponibilidad de agua en la subcuenca debido a que la variación de la temperatura en los escenarios (principalmente en los escenarios que consideran únicamente los aumentos tendenciales de temperatura) no muestra cambios significativos en los caudales calculados. Lo anterior, se da porque dentro de las cuencas de montaña, como es el caso del río La Vieja, no existen cuerpos de agua lóticos que posean tasas de evapotranspiración sensibles y que reduzcan o aumenten de forma significativa la cantidad de agua escurrida.

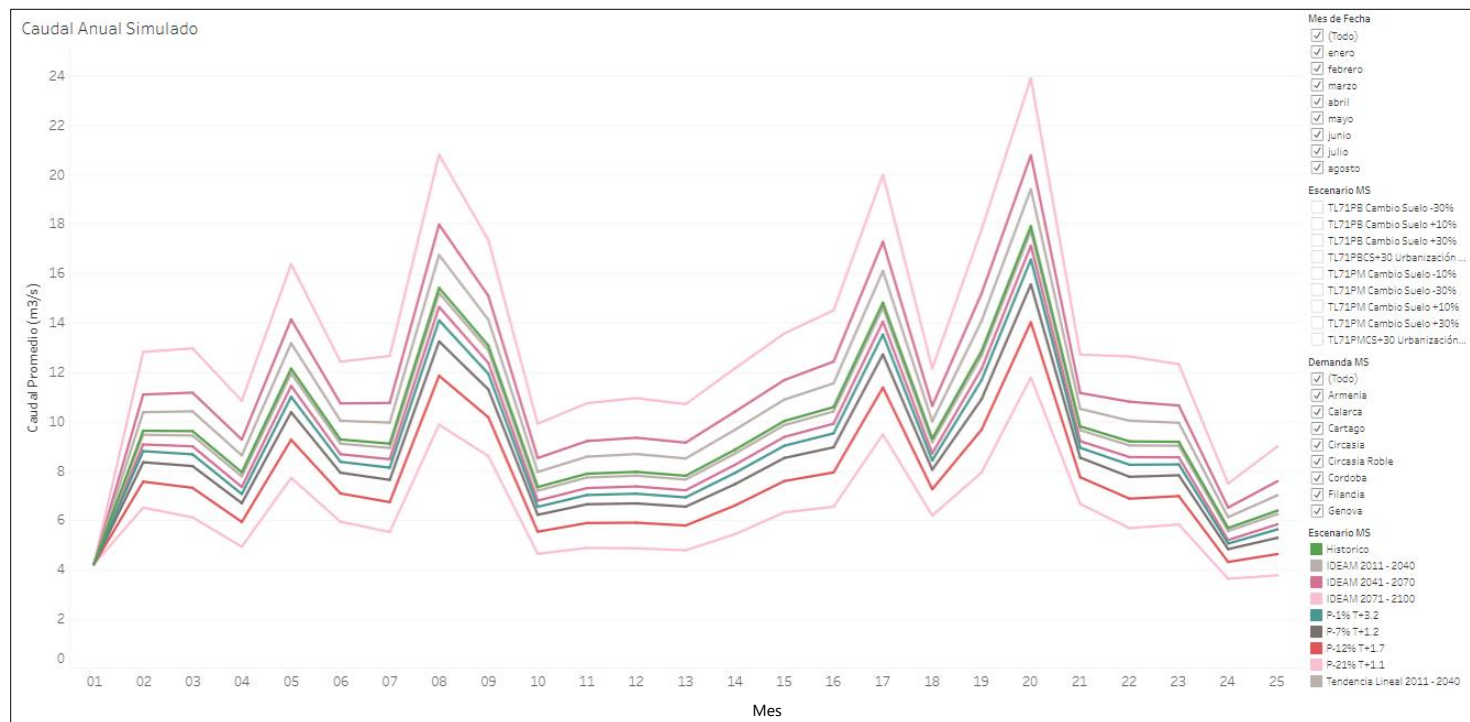


Figura 23. Caudal promedio anual simulado para los escenarios bajo Cambio Climático
Fuente: El autor (Accesible desde <https://tabsoft.co/3itmfCq>)

Para el análisis de los demás escenarios planteados (población y cambios del suelo) se ha optado por calcular la variación porcentual con respecto al escenario base. En otras palabras, se ha calculado la desviación de los escenarios de población con respecto al escenario de Cambio Climático y las estimaciones porcentuales de cambios de suelo se basan en los escenarios de población. La descripción anterior se puede representar con la siguiente fórmula:

$$D\% = \frac{\text{Escenario}_i - \text{Escenario}_{base}}{\text{Escenario}_{base}}$$

En donde,

$D\%$ es la desviación porcentual del escenario seleccionado con respecto al escenario base (escenario anterior).

Escenario_{base} es el escenario anterior al escenario seleccionado, para los escenarios de C.C. corresponden al escenario histórico, para los escenarios con variaciones en la población son los escenarios de C.C. y para los escenarios con cambios en el suelo son los escenarios con variaciones en la población.

Escenario_i es el escenario seleccionado.

De esta forma, la desviación porcentual a escala mensual para los escenarios que consideran las proyecciones de población como parámetro principal muestran que una mayor población reduce el caudal disponible y el mayor ratio de variación suele presentarse en agosto, debido a que este mes tiende a presentar los caudales más bajos y por ende es más sensible a los cambios porcentuales. El resultado anterior es consistente con el régimen hidrológico de la subcuenca, en donde agosto es el mes en donde se presentan los valores más bajos de precipitación

Cabe resaltar que el comportamiento de los escenarios bajo Cambio Climático a escala mensual es análogo al presentado a escala anual, en donde la precipitación origina la respuesta hidrológica del caudal y, por ende, la escorrentía crece cuando la lluvia crece y se reduce cuando la otra se reduce. De esta respuesta hidrológica se puede observar que las variaciones en cada escenario tienen un comportamiento similar en la magnitud de los caudales simulados, es decir, la variación de los resultados tiende a valores de aumento o reducción similares para cada escenario.

Nota: Para los escenarios del IDEAM y las tendencias lineales se ha considerado como población base el período de proyección del escenario, es decir, para un aumento en la precipitación del 24.28% (IDEAM 2070 - 2100) se ha utilizado la población alta como población inicial. Lo anterior indica que los cambios porcentuales comparados con este escenario para las proyecciones de población media y baja serán diferentes a las observadas en los demás escenarios (se simula un mayor caudal que el del escenario base).

Para ilustrar el comportamiento promedio de la subzona hidrográfica se presenta en la siguiente figura:

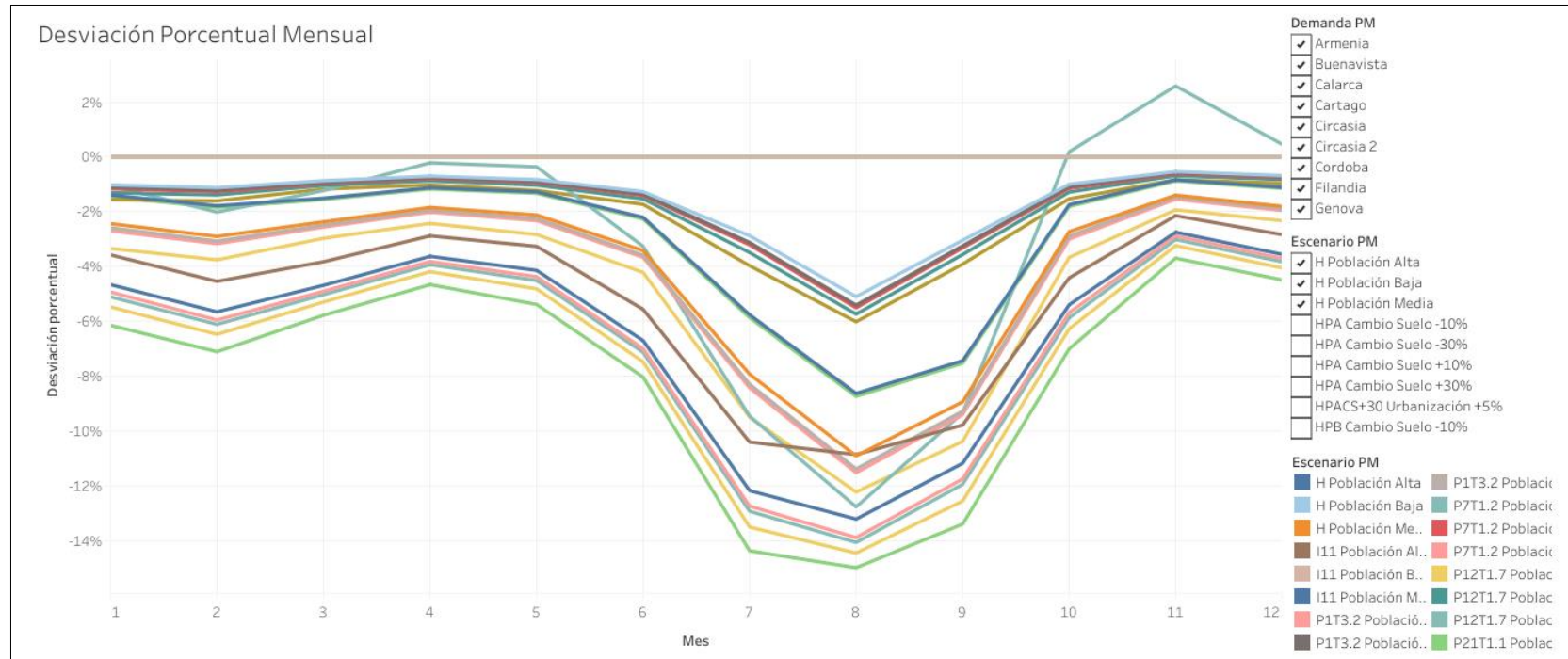


Figura 24. Desviación porcentual del Caudal mensual promedio simulado para los escenarios bajo variaciones de población
Fuente: El autor (Accesible desde <https://tabsoft.co/3itmfCq>)

Continuando con el análisis de las simulaciones, la desviación porcentual del caudal para los escenarios que consideran las variaciones en la cobertura del suelo como elemento de análisis muestra que un aumento general en la cobertura de bosque y/o páramo en la subzona hidrográfica mejora las condiciones de regulación hídrica de las unidades y la subzona hidrológica en general. Específicamente, un aumento en la cobertura de bosque y/o páramo ocasiona menores caudales en los meses más húmedos y caudales similares o mayores en comparación con los escenarios base para los meses más secos.

En contraste, los escenarios con aumento de la cobertura de pastos, cultivos y/o zona urbana presentan un aumento en la escorrentía superficial en los meses más húmedos y valores similares o menores a los simulados en el escenario base.

Es importante tener en cuenta que los cambios más representativos en la desviación porcentual se presentan en los meses más húmedos del año, en donde se superan las variaciones del 12% y -10% para los escenarios más críticos. Estos valores sugieren que el impacto que tiene la pérdida de la cobertura vegetal (bosques y páramos) es mayor al que representa los cambios de pastos a bosques. Sin embargo, este resultado se produce porque la parte alta y media del río La Vieja tiene unidades hidrográficas con porcentajes de cobertura de bosque mayores al 70% (áreas protegidas o enmarcadas en procesos de forestación), por lo tanto, existen áreas en las que no ha sido posible aumentar el 10% o 30% de la cobertura prevista en la simulación.

Con base en lo anterior, se hace evidente que las estrategias de preservación de los bosques juegan un papel fundamental en la regulación hídrica de la subzona hidrológica y el área que se puede perder en las zonas de amortiguación y protección (principalmente el área que se denomina como alta montaña) es mayor al de las áreas que se pueden reforestar, proceso que sigue siendo necesario.

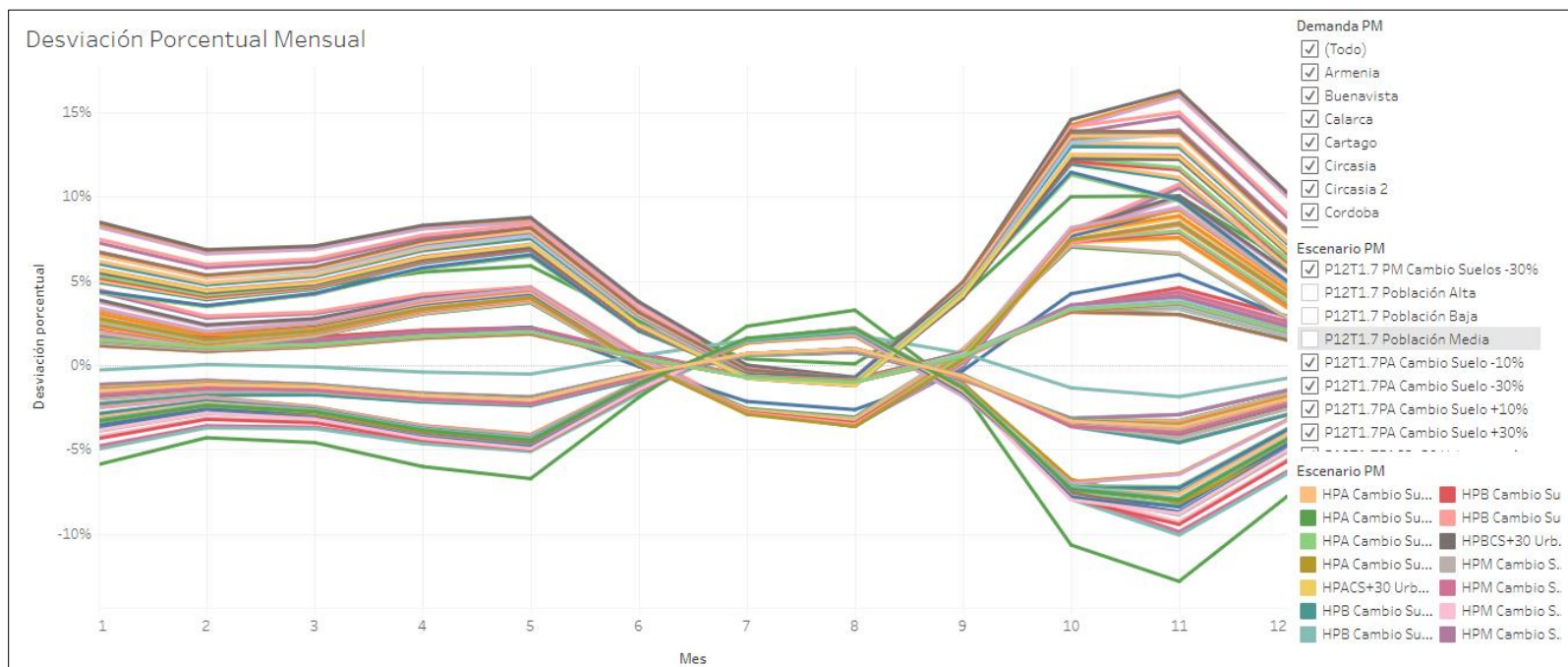


Figura 25. Desviación porcentual del Caudal mensual promedio simulado para los escenarios bajo cambios de cobertura
Fuente: El autor (Accesible desde <https://tabsoft.co/3itnfCq>)

Además del comportamiento gráfico, se ha observado que la desviación porcentual debido al cambio de cobertura del suelo varía en un rango similar entre los escenarios para cada uno de los puntos analizados. Es decir, un aumento generalizado del 10% en los cultivos representa, en promedio, para los meses **más húmedos** un aumento del 4% del caudal base para cualquier punto de la subzona hidrográfica; un aumento del 30% de los cultivos suele aumentar el caudal base en un 9% y si se adiciona un aumento del 5% de los suelos urbanos el caudal se reduce en un 6% adicional (15.00%).

En contraste, un aumento del 10% de bosques y páramos representan un 4% más de caudal con respecto al caudal base; mientras que un aumento del 30% tiende a aumentar el caudal en un 9% para los períodos **más húmedos**.

En los períodos **secos**, se ha identificado que el aumento en el porcentaje de cultivos reduce el caudal entre un 1% y un 3%; mientras que el aumento en los bosques incrementa el caudal de estos meses entre un 1% y un 2%.

Es importante considerar que el aumento en el caudal para los períodos más húmedos y la disminución en los períodos más secos resultante por el aumento de áreas con cultivos, como se presenta más adelante, significa una pérdida en la capacidad de la regulación hídrica de la cuenca. Es decir, la cuenca responde con caudales picos de mayor intensidad en las temporadas donde se presentan más lluvias (amenaza por inundaciones) y el caudal base se reduce en las temporadas más secas (amenaza por sequía).

Tabla 20. Desviación porcentual por cambio en el uso del suelo según el sitio de demanda

Demanda	Cambio de Suelo				
	+10%	+30%	+30% +5%	-10%	-30%
Armenia	1.79%	2.04%	6.68%	-1.93%	-3.44%
Buenavista	0.76%	-8.60%	-4.79%	-2.08%	-1.78%
Calarcá	1.98%	4.15%	10.17%	-2.01%	-3.20%
Cartago	1.18%	1.73%	4.88%	-1.95%	-3.41%
Circasia	2.03%	4.32%	7.96%	-1.58%	-2.75%
Circasia 2	1.68%	3.52%	6.61%	-1.79%	-2.82%
Córdoba	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Filandia	1.94%	4.04%	7.71%	-1.68%	-0.83%
Génova	2.05%	4.37%	7.89%	-1.31%	-1.29%
La Tebaida	1.87%	2.01%	7.30%	-2.03%	-3.58%
Pijao	1.82%	3.83%	7.01%	-1.69%	-2.90%
Quimbaya	0.00%	-0.34%	0.00%	-2.74%	-2.40%
Salento	2.10%	4.59%	8.31%	-0.92%	-1.26%
<i>Promedio</i>	<i>1.48%</i>	<i>1.97%</i>	<i>5.36%</i>	<i>-1.67%</i>	<i>-2.28%</i>

Fuente: El autor

Nota: Es importante considerar que el aumento o reducción generalizada en la cobertura del suelo se ha intentado aplicar sobre la totalidad de las microcuencas definidas, no obstante, la distribución de coberturas no permitió que este proceso se realizara de esta forma. Por esta razón, algunos resultados no presentan la tendencia esperada u observada para los escenarios simulados, en especial en los sitios ubicados en la cuenca alta de la subzona hidrográfica (destacando Córdoba, Buenavista y Quimbaya).

En complemento a los resultados mostrados, a continuación, se presenta la desviación porcentual promedio según el mes:

Tabla 21. Desviación porcentual por cambio en el uso del suelo según el mes

Escenario	Desviación mensual (%)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Prom
+10%	1.73	1.20	1.39	1.94	2.20	0.49	-0.86	-1.18	0.52	3.69	4.24	1.93	-1.48
+30%	2.36	1.32	1.78	2.86	3.40	0.16	-2.39	-2.99	0.33	6.29	7.08	4.06	-1.97
+30% +5%	5.65	4.48	4.95	6.34	7.00	2.50	-0.50	-0.94	4.12	12.03	11.99	6.74	5.36
-10%	-1.92	-1.45	-1.59	-2.17	-2.46	-0.70	0.76	1.07	-0.75	-3.93	-4.40	-2.52	-1.67
-30%	-2.59	-1.87	-2.18	-3.07	-3.54	-0.84	1.37	1.85	-0.94	-5.75	-6.32	-3.49	-2.28

Fuente: El autor

De la Tabla 21 se puede observar que los meses de octubre, noviembre y diciembre presentan **reducciones del 4.0% al 6.5%** del caudal base en el escenario de cobertura con aumento del 30% de bosques, mientras que en los **meses más secos se aumenta entre un 1.5% y 2%** la escorrentía. Por el contrario, el escenario con un aumento en los cultivos del 30% y de la zona urbana en un 5% genera **caudales entre un 6% y un 12% en los meses más húmedos, y los meses más secos presentan caudales entre un 0.5% y un 1% menor.**

Estos resultados, como se explicó anteriormente, indican que la distribución del agua en las cuencas se fundamenta en la capacidad de regulación, por lo cual la disponibilidad hídrica, aun sin considerar el Cambio Climático, depende de la capacidad antrópica o natural de tener agua almacenada en los meses más secos. Lo anterior, significa que, sin importar la tendencia al alza o la baja de las precipitaciones en la región, los escenarios más representativos para la escasez hídrica son los de proyecciones de población y cambio en el uso del suelo y, por ende, es necesario implementar estrategias de uso eficiente del agua, y reforestación y protección de la ronda hídrica de las quebradas y ríos para asegurar la disponibilidad hídrica en la subzona hidrográfica.

Adicionalmente, se puede inducir que es muy probable que la degradación de la cobertura del suelo propicie avenidas torrenciales de mayor magnitud y frecuencia. Por lo tanto, se debe priorizar estrategias de conservación de bosques y páramos, y detención de la frontera urbana (estrategias de adaptación) sobre la mitigación del Cambio Climático.

Se debe tener en cuenta que la reducción de la frontera urbana hace parte de la gestión del crecimiento poblacional en la parte media y alta de la subzona hidrográfica. Sin embargo, otras

alternativas para reducir la vulnerabilidad en estos escenarios también integran planes para reducir el consumo de agua por cápita, ampliar las fuentes hídricas que abastecen los puntos de demanda o implementar estructuras de almacenamiento de agua para regular el flujo de agua; estas dos últimas no son recomendadas si no están acompañadas de estudios ambientales que garanticen la preservación del sistema natural y la biodiversidad.

Una vez analizado el comportamiento que tiene la cuenca por los escenarios simulados, se puede clasificar en orden de importancia los escenarios como: 1) variaciones en el tipo de suelo, 2) cantidad de personas y 3) escenarios de Cambio Climático. Para los escenarios de Cambio Climático, no se ha podido establecer una priorización de estrategias puesto que en todos los escenarios existe un aumento de temperatura y no se ha observado una tendencia en los registros de precipitación entonces, es necesario que las políticas, diseños e investigaciones consideren un aumento y reducción de la lluvia para horizontes a mediano y largo plazo, según la condición más crítica para el tipo estudio que de desarrolle.

Cabe anotar que los registros de la próxima década o la implementación de otras herramientas estadísticas para el análisis histórico de datos puede demostrar la tendencia de la precipitación en la zona de estudio.

A continuación, se realiza el análisis de disponibilidad hídrica en la cuenca y cada uno de los puntos de demanda⁷, teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones y las condiciones actuales de la subzona hidrográfica río La vieja.

4.1.6 Análisis y comparación de resultados

Para finalizar con el estudio de los escenarios proyectados, se calcula la disponibilidad hídrica que hay en los sitios de demanda que se han considerado en la topología. Cabe mencionar que el comportamiento de la demanda se ha generalizado por el número de habitantes en cada municipio, es decir, no se consideran consumos industriales, agropecuario o caudales mínimos ecológicos.

La Figura 26 muestra la síntesis de la disponibilidad hídrica anual para algunos escenarios evaluados:

⁷ Es importante resaltar que la demanda no cubierta se ha determinado como el caudal neto demandado vs el caudal neto en el río, es decir, no se ha considerado caudales ecológicos ni Objetivos de Calidad del Agua. Por lo tanto, un valor de demanda no cubierta mayor a cero ya representa un déficit hídrico grave.

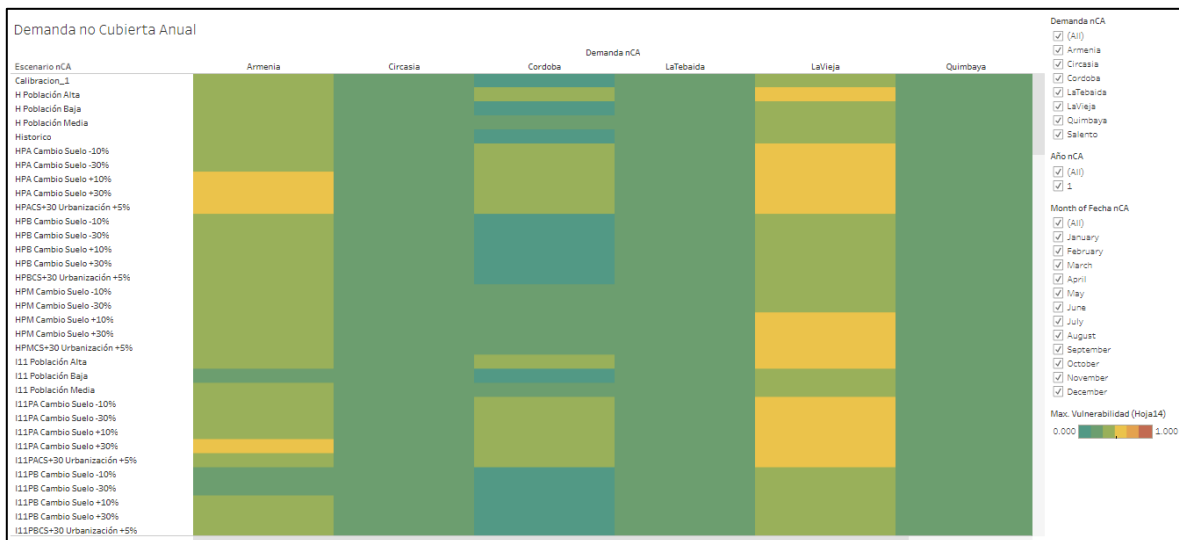


Figura 26. Demanda no cubierta mensual en la subzona hidrográfica río La Vieja
Fuente: El autor (Accesible desde <https://tabsoft.co/3itnfCq>)

Como aclaración de la figura anterior, la Tabla 22 presenta la escala utilizada para determinar la vulnerabilidad por la demanda no cubierta es el siguiente:

Tabla 22. Categorización de vulnerabilidad por demanda no cubierta bruta

Vulnerabilidad	Código
Sin déficit	
Estrés Hídrico	
Déficit hídrico leve	
Déficit hídrico alto	
Desabastecimiento de agua	

Fuente: El autor

El análisis de demanda no cubierta anual, sin considerar elementos como el caudal ecológico, ha mostrado que Armenia está en déficit hídrico para todos los escenarios proyectados en los períodos de tiempo considerados. En donde sólo los escenarios con tendencias al alza de la precipitación tienen vulnerabilidad media-baja (mayor a 0 m³/s y menor a 0.05 m³/s); los demás escenarios tienen una vulnerabilidad media y alta ante el desabastecimiento.

De forma análoga, Circasia, Quimbaya y La Tebaida tienen una tendencia al déficit hídrico, siendo los escenarios con descensos en la precipitación del 12% y 21% los más críticos. Los demás escenarios están con una caudal igual o levemente menor al demandado.

El municipio de Salento tiene una vulnerabilidad alta cuando se presentan los escenarios más críticos (reducción en la precipitación para las proyecciones de 2071 a 2100 [Población Alta]). Para

los demás escenarios si bien se observa una vulnerabilidad media, es importante considerar que las dinámicas turísticas que se desarrollan pueden duplicar la población del territorio en las temporadas de fiestas o vacaciones, por lo tanto, la vulnerabilidad hídrica del municipio se estima como media-alta.

Para el municipio de Córdoba se ha observado que la fuente hídrica de abastecimiento es capaz de suplir las demandas de agua para cualquier escenario hasta el 2040, sin embargo, un aumento progresivo en la población requerirá de otras fuentes superficiales o subterráneas para suplir el requerimiento por actividades humanas.

En los demás municipios, ubicados en su mayoría sobre la cuenca baja de la cuenca, no se ha encontrado déficit hídrico bajo ningún escenario de cambio climático o en el uso del suelo.

Cabe resaltar que el comportamiento modal de la precipitación que se obtuvo del análisis de las estaciones hidrometeorológicas es equivalente al comportamiento del caudal en la subzona hidrográfica, por esta razón es claro que las temporadas en donde se tiende a presentar la escasez hídrica corresponde a los meses de junio, julio, y con mayor vulnerabilidad, agosto. Sin embargo, los meses de enero y febrero también son susceptibles a presentar este fenómeno.

Los demás meses del año (temporadas húmedas) la demanda no cubierta para todos los puntos de demanda es muy baja o toda la demanda está cubierta, lo cual apunta a que la disponibilidad hídrica para esta temporada bajo los escenarios más desfavorables tiene como máximo el estrés hídrico y se podría abastecer a toda la población bajo el escenario de demanda más crítica (**el gráfico mostrado para el mes de mayo tiene una escala de vulnerabilidad entre 0 y 0.2**).

El comportamiento descrito a escala mensual se puede observar de forma gráfica en la siguiente figura:



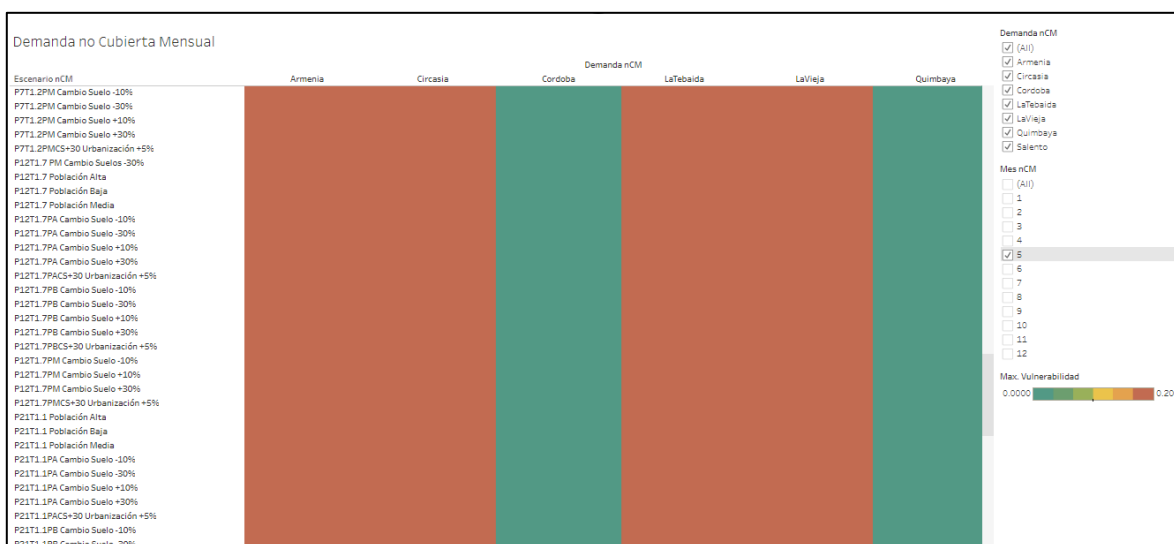


Figura 27. Demanda no cubierta en la subzona hidrográfica río La Vieja en agosto (sup.) y mayo (inf.)
Fuente: El autor (Accesible desde <https://tabsoft.co/3itnfCq>)

Nota: Todos los gráficos mostrados en esta sección, así como los gráficos correspondientes a cada uno de los sitios de demanda, escenarios y períodos de análisis se presentan en detalle en los documentos anexos y en el enlace: <https://tabsoft.co/3itnfCq>

En complemento al análisis anterior, se debe considerar que en la temporada de estudio ya se han presentado fenómenos de escasez hídrica o interrupción en el servicio de suministro de agua debido a las condiciones climáticas o corrimientos de lodo. Por lo tanto, resultados como los caudales en temporadas con influencia del fenómeno de El Niño (más secos), que presentan valores entre los 3.5 m³/s y 5 m³/s, permiten establecer que el caudal anual promedio en este sector del río Quindío es mayor al máximo permitido por la concesión de la EPA (1,400 l/s) asegurando un caudal ecológico y suministro para otras actividades humanas aguas abajo.

Sin embargo, el análisis mensual del caudal en el mes más seco (agosto) muestra que el caudal mínimo se encuentra entre los 1.55 m³/s y 3.50 m³/s para los escenarios simulados, es decir, 2 m³/s menos que el promedio mensual. Estos valores indican que no es posible captar el agua máxima concesionada para Armenia asegurando un caudal ecológico aguas abajo del punto de captación.

En contraste, los caudales máximos asociados al fenómeno de La Niña tienden a presentar grandes variaciones y se pueden esperar años con caudales entre 9 m³/s y 34 m³/s en promedio. Con respecto al análisis en el mes más lluvioso (noviembre), se estiman caudales promedio mensuales entre los 19 m³/s y 93 m³/s que, al compararse con eventos históricos anteriores, se pueden asociar a inundaciones de la bocatoma y/o interrupciones en el suministro de agua potable para Armenia debido a la turbidez alta del agua producto del transporte de lodo (EPA, 2021).

Bajo este panorama, el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Quindío 2030 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) indica que la importancia de la

amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa de la parte media y alta de la subzona hidrográfica (Quindío) es:

Tabla 23. Valores de amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa del departamento del Quindío con respecto al recurso hídrico

Componente	Amenaza		Sensibilidad		C. Adaptativa	
	% Contribución	Valor	% Contribución	Valor	% Contribución	Valor
Seguridad Alimentaria	65.06	0.27	9.9	0.68	14.7	0.46
Recurso hídrico	11.77	0.83	12.3	0.79	2.9	0.46
Biodiversidad	1.84	0.46	3.4	0.47	0.8	0.72
Salud	5.62	0.65	2.4	0.59	12.0	0.65
Hábitat humano	9.54	0.29	53.5	0.89	58.0	0.72
Infraestructura	6.17	0.24	18.6	0.89	11.6	0.39
Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy Bajo		

Nota: La lectura de porcentajes de participación por componente y valores, se leen de igual forma en Amenaza y Sensibilidad, **excepto** por la clave de color tipo semáforo, que para este caso, utiliza los colores verdes para aquellos con alto valor de Capacidad Adaptativa y colores hacia el rojo bajos valores.

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

De estos valores se puede observar que el recurso hídrico se encuentra bajo una amenaza alta por desabastecimiento y tiene una sensibilidad alta frente al cambio del Cambio Climático; asimismo, es importante tener en cuenta que la infraestructura tiene una sensibilidad alta ante este fenómeno y que la capacidad adaptativa de ambas variables es alta.

Con el fin de mitigar y adaptarse a este futuro, para el departamento del Quindío se han proyectado, entre otras, las siguientes estrategias (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015):

- Construir Viviendas de Interés Social (VIS) y de Interés Prioritario (VIP) nuevas, con condiciones de diseño mejorado en términos de configuración volumétrica, aperturas, orientación, inclinación, iluminación, ventilación y otras consideraciones arquitectónicas que permitan ahorrar un 10% de agua y energía, en los centros poblados de los 12 municipios de Quindío.
- Fomentar el desarrollo de la caficultura climáticamente sostenible y baja en carbono en 3,000 ha, en el departamento del Quindío, a partir de la implementación de una estrategia de articulación institucional para la reconversión productiva, el fortalecimiento de capacidades humanas y organizacionales, la generación de valor agregado y la protección de los recursos naturales.
- Mejorar la eficiencia de la producción ganadera mediante la aplicación de prácticas compatibles con el clima, que aumenten la productividad y protejan los ecosistemas.
- Mejorar la eficiencia energética, el uso racional del agua y la disposición de residuos en el sector de turismo del departamento del Quindío.
- Disminuir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (CO₂) generadas por la deforestación de bosques naturales en el departamento del Quindío, mediante la implementación de

diferentes mecanismos de incentivos a la conservación como: la estrategia de deforestación evitada, propuesta por CORNARE (Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare); la denominada BanCO2, liderada por la CRQ (Corporación Regional del Quindío); el esquema de Pago por Servicios Ambientales que lidera la Gobernación del Quindío, para promover la conservación de los ecosistemas del Departamento, ubicados en predios privados, a través del reconocimiento y la valoración por los servicios ambientales allí presentes.

- Incrementar el potencial de captura de carbono mediante la restauración ecológica de 2,000 ha de ecosistema boscoso Andino, al año 2030, por medio de la estrategia de enriquecimiento y suplementación del bosque, en el departamento del Quindío.
- Aumentar la cobertura de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales domésticas del Departamento, con sistemas aerobios eficientes en el uso de electricidad, que no generan gas metano durante el proceso.
- Fortalecer la sostenibilidad económica y ambiental en 2,000 ha de cultivos agrícolas en el departamento del Quindío, mediante la implementación de sistemas agroforestales.
- Desarrollar y poner en marcha un Sistema de Alertas Tempranas hidrometeorológico y agroclimático, para apoyar la toma de decisiones de las autoridades locales y la población, para facilitar la gestión del riesgo climático en el Quindío.
- Contribuir a la reducción de la presión sobre los recursos hídricos del departamento del Quindío, mediante la integración de estrategias y alianzas interinstitucionales que disminuyan el porcentaje de pérdidas y fomenten el uso racional y eficiente del agua.

Teniendo en cuenta que la problemática descrita en este plan se encuentra alineada con los resultados encontrados en las simulaciones de esta investigación, se puede observar que plantea soluciones integrales para mitigar y adaptarse al Cambio Climático que, dentro de los escenarios simulados, corresponden al aumento en la cobertura de bosques en un 10% y la población proyectada para el período 2040 – 2070 (sin especificar el aumento o reducción de precipitación).

Con base en lo mencionado, en los escenarios donde no se consideran variaciones o que se reduce el porcentaje de precipitación se producirá estrés hídrico en la subzona hidrográfica debido a que las estrategias proyectadas, si bien conservarán o aumentarán las zonas de bosques y páramos, requieren de lineamientos más ambiciosos para reducir las demandas de agua por actividades humanas y la gestión demográfica (disminuir el crecimiento en las cabeceras municipales); los cuales deben ser paralelos a programas como la reducción del consumo actual de la población (sector doméstico) y el acondicionamiento de las nuevas viviendas VIS y VIP mejoradas. Asimismo, es importante tener en cuenta que el río La Vieja está expuesto a las variaciones de la población residente producto de la inmigración, y las dinámicas adjuntas a la población flotante por turismo o para actividades productivas (en la actualidad cercana a las 500,000 personas/año (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)); fenómenos disruptores que puede cambiar las dinámicas demográficas a mediano y largo plazo.

Tabla 24. Lista de cumplimiento de objetivos

Objetivo	Evidencias	Páginas
Caracterizar el clima y la geomorfología en la subzona hidrográfica río La Vieja.	Diagnóstico de la cuenca y recolección de información hidroclimatológica de la región	15 a 18 21 a 25
	Análisis de datos e información hidroclimática	25 a 38
	Análisis de datos e información sobre usos del agua	38 a 40
Modelar la respuesta hidrológica en la subzona hidrográfica	Análisis para la selección de la herramienta hidroinformática de modelación	41 a 49
	Modelación de escenario base	49 a 63
Simular el comportamiento de temperatura y precipitación bajo condiciones de C.C. en área de estudio	Simulación de escenarios bajo condiciones de Cambio Climático	64 a 66
Analizar escenarios de oferta y demanda hídrica de la cuenca alta y media del río La Vieja.	Evaluación de los escenarios	66 a 73
	Análisis y comparación de resultados	73 a 78

CAPÍTULO V

5.1 CONCLUSIONES

El análisis climático y geomorfológico de la subzona hidrográfica río La Vieja fue desarrollado con base en los datos registrados por la red hidroclimatológica de las instituciones: IDEAM, CRQ, CVC y CENICAFE. De las cuales se obtuvieron 60 estaciones aferentes a la cuenca con registros de precipitación y 12 estaciones con registros de variables como la temperatura, brillo solar y humedad relativa. El período de análisis utilizado fue de 25 años y representa los registros entre 1992 y 2016.

Cabe anotar que la cantidad de estaciones hidrometeorológicas ubicadas en la parte alta de la cuenca es mínima y no es posible realizar análisis y estimaciones climáticas precisas en estas áreas.

El estudio del comportamiento de las variables hidroclimáticas permitió verificar el comportamiento modal que se repite dos veces en el año para la totalidad de estaciones que pertenecen a la subzona hidrográfica, en donde la temporada húmeda ocurre en los meses de abril a mayo, y de octubre a diciembre, mientras que la temporada seca se da en los meses de enero a febrero, y de junio a agosto.

Asimismo, se ha establecido que el fenómeno de variabilidad climática ENOS tiene una relación directa con el comportamiento hidroclimático de la cuenca, puesto que la ocurrencia de La Niña provoca un aumento en la precipitación y una reducción en la temperatura media, y la presencia de El Niño ocasiona los años con menores registros de lluvia y mayores temperaturas promedio, tanto a escala mensual como a escala anual.

El análisis de los registros de caudal y los resultados de investigaciones anteriores han definido las estaciones de *El Alambrado* y *Cartago* como los registros más confiables para la calibración y validación de modelos, debido a que son administradas por el IDEAM, presentan el mayor número de registros continuos en el período de análisis y tienen el menor grado de incertidumbre para los datos registrados.

Los estudios estadísticos de los datos hidrológicos de las estaciones permitieron establecer que ya existe una tendencia incremental en la temperatura media de la cuenca y que en el período 1992 – 2016 ha sido de $+0.019^{\circ}\text{C}$ por año. Con respecto a la precipitación y demás variables hidrológicas, no se ha encontrado una tendencia significativa para los años analizados, por lo tanto, se recomienda la proyección de escenarios de Cambio Climático con tendencias al alza y baja de la precipitación.

Basado en las características morfológicas, la subzona hidrográfica tiene una pendiente media y una forma alargada entre oblonga y oblonga rectangular, lo cual significa que la susceptibilidad a avenidas

torrenciales es baja-media. El cauce principal del río La Vieja se ubica en la vertiente izquierda de la cuenca y el tiempo de concentración del agua se estima en 43 horas.

Con la evaluación de las herramientas hidroeinformáticas se ha decidido utilizar WEAP para la modelación teniendo en cuenta que ya contaba con un modelo desarrollado para la zona hidrográfica, se determinó que un modelo sub-agregados poseía un mayor ajuste para los objetivos de este proyecto, se ha desarrollado como un Sistema de Soporte a las Decisiones y cuenta con módulos adicionales para la profundización o estudios futuros a los de este proyecto.

El primer paso para la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca en WEAP es la construcción del sistema topológico, en donde es la experticia del investigador y el objetivo del estudio el que determina la granularidad de la modelación. Para este caso, se ha optado por la implementación del sistema topológico desarrollado por SEI, y otros (2014), demostrando así que es viable la reutilización de sistemas topológicos para realizar nuevas investigaciones con distribuciones espaciales y/o temporales distintos a las iniciales.

Los registros hidroclimáticos utilizados para alimentar el modelo fueron calculados con el método general de ponderación por distancia (IDW), el cual permitió estimar los valores climáticos en los centroides de las microcuencas con base en los registros de las estaciones cercanas.

Los valores iniciales de los *Supuestos Clave* se basaron en la bibliografía y los valores determinados en el modelo anterior que se desarrolló en WEAP (SEI, y otros, 2014). Para la calibración del modelo se implementó la Herramienta de Estimación de Parámetros (PEST), herramienta incluida en WEAP que automatizó el proceso de comparación entre los valores simulados y los registros históricos de la estación *El Alambrado* para el período 1992 – 2002 por medio de un proceso iterativo.

Los resultados de la calibración fueron medidos con la métrica de Nash-Sutcliffe (NSE) y se encontró que en el período 1992-2002 el ajuste del modelo es **Muy Bueno** (0.71) para la estación *El Alambrado*. Para el período 2002 – 2007 el ajuste fue **Bueno** en la misma estación (validación).

Como complemento al proceso de validación, se utilizó el mismo estadístico para medir la eficiencia de los valores simulados con respecto a los registrados en la estación *Cartago*, en donde los valores simulados presentan un ajuste **Muy Bueno** para el período de calibración y un ajuste **Bueno** para los períodos de validación y para la totalidad del tiempo de simulación. Es importante resaltar que la calibración del modelo se complementó con el Error Cuadrático Medio y al contrastarse con los valores simulados por Rodríguez (2020), se tiende a una sobreestimación promedio del 5 % de los caudales.

Por lo tanto, se puede establecer que los parámetros determinados en los *Supuestos Clave* son apropiados para el modelo y con base en estos se pueden proyectar y analizar los escenarios bajo condiciones de Cambio Climático.

Los escenarios representativos para el análisis de la adaptación y mitigación del Cambio Climático en la subzona hidrográfica del río La Vieja corresponden al **registro histórico** (estacionario); las **proyecciones del IDEAM**, que consideran un aumento en la precipitación de la cuenca; la **tendencia lineal**, basada en las tendencias estadísticas presentadas por los registros de las estaciones hidroclimáticas; y las **proyecciones del IPCC** seleccionadas por el SEI, y otros (2014) con una tendencia a la reducción de precipitación. Para todos los escenarios con variaciones climáticas se proyecta un aumento en la temperatura de la cuenca.

Los escenarios de Cambio Climático estudiados han mostrado una tendencia general a presentar mayores caudales en los escenarios que tienen un incremento en la precipitación y caudales menores en los escenarios con tendencias a la reducción de la lluvia; lo cual es consecuente con la relación hidrológica que existe entre las dos variables. Además, se ha observado que la temperatura no es una variable representativa para la disponibilidad de agua debido a que la subzona hidrográfica de montaña sin cuerpos lóticos de gran extensión.

Para los escenarios que consideran cambios en la cobertura del suelo, se ha observado un comportamiento similar entre cada uno de los escenarios y cada una de las demandas, en donde un aumento generalizado del 10% en los cultivos representa en promedio una reducción del 1.85% del caudal base para cualquier punto de la subzona hidrográfica; un aumento del 30% de los cultivos suele reducir el caudal base en un 3.50% y si se adiciona un aumento del 5% de los suelos urbanos el caudal se reduce en un 0.50% adicional (4.00%). En contraste, un aumento del 10% de bosques y páramos representan un 1.00% más de caudal con respecto al caudal base; mientras que un aumento del 30% tiende a aumentar el caudal en un 3.20%.

El análisis de demanda no cubierta anual, sin considerar el caudal ecológico o actividades humanas no residenciales, ha mostrado que Armenia, Circasia, Quimbaya y La Tebaida están en déficit hídrico para todos los escenarios, en donde sólo los escenarios con tendencias al alza de la precipitación tienen caudales cercanos o un poco menores a los demandados. Es decir, el aumento en el consumo de la población y la expansión urbana son procesos que requieren restricciones y planificación dentro de todas las herramientas de Gestión Integral del Recurso Hídrico.

El municipio de Salento y Córdoba muestran déficit hídrico alto cuando se presentan los escenarios más críticos (reducción en la precipitación para las proyecciones de 2071 a 2100 [Población Alta]). Por lo tanto, un aumento progresivo en la población o demanda de agua requerirá de otras fuentes superficiales o subterráneas para suplir el requerimiento por actividades humanas. En los demás municipios, ubicados en su mayoría sobre la cuenca baja de la cuenca, no se ha encontrado déficit hídrico bajo ningún escenario de cambio climático o en el uso del suelo.

La variación modal del caudal en la subzona hidrográfica significa que las temporadas en donde se tiende a presentar la escasez hídrica corresponde a los meses de junio, julio, y con mayor vulnerabilidad, agosto. Asimismo, los meses de noviembre y diciembre tienen los caudales mayores

y no suelen presentar demandas no cubierta, sin embargo, sí son susceptibles al transporte de lodo que interrumpen el suministro de agua potable debido al aumento en la turbidez del líquido.

Lo anterior, indica que en la parte media y alta de la subzona hidrográfica río La Vieja la escasez hídrica es producto de la distribución temporal del agua y no de la cantidad que circula anualmente, por lo tanto, la reforestación, especialmente en la ronda hídrica del río; las estructuras de almacenamiento de agua; o nuevas fuentes de agua son necesarias para asegurar la disponibilidad hídrica a mediano y largo plazo. Recordando que este análisis se centra en el escenario tendencial proyectado por los planes gubernamentales: aumento de la cobertura de bosque en un 10% con un aumento en la población entre 2040 – 2070 (considerando como base el PIGCCTQ).

En este mismo contexto, es necesario reducir los aprovechamientos pecuarios que se dan a lo largo de toda la subzona hidrográfica (grandes coberturas de pastos), así como los monocultivos de mediana y gran extensión que se desarrollan en la parte alta y media de la cuenca (pino, eucalipto, aguacate Hass), teniendo en cuenta que el aumento en la demanda de agua y la pérdida de la capacidad de regulación hídrica que se relaciona con la producción agroforestal (menor cantidad de agua disponible en temporada seca) reducen el caudal base. Teniendo en cuenta que en los escenarios proyectados no se ha incluido el caudal ecológico; es decir, la demanda no cubierta puede ser mayor que la presentada.

Cabe aclarar que el modelo desarrollado presenta limitaciones para simular los caudales extremos (máximos) de las series históricas registradas, esta limitación es atribuible a los errores que se presentan en la estimación de las variables climáticas y geomorfológicas principalmente de la parte alta de la cuenca, lugar en donde la densidad de estaciones es baja, el suelo es homogéneo según la clasificación utilizada y se carece de registros hidroclimáticos. Por esta razón, se recomienda realizar estudios específicos para estas áreas con el fin de tomar decisiones relacionadas con la GIRH.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

A partir de los resultados y conclusiones obtenidas se han proyectado algunos trabajos e investigaciones futuras que pueden complementar o relacionarse con la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, gestión de la subzona hidrográfica del río La Vieja y el Cambio Climático. Los trabajos futuros considerados son los siguientes:

- Robustecer el modelo actual con información sobre la evolución de cobertura de suelos y registros hidroclimáticos para aumentar la precisión en los procesos de calibración y validación a través de análisis de variabilidad temporal del suelo e instalación de equipos hidrometeorológicos, especialmente en la cuenca alta y zona de cordillera.
- Implementar los escenarios de Cambio Climático en otros modelos realizados sobre la cuenca con el fin de comparar los resultados presentados.
- Desarrollar estudios de disponibilidad hídrica en subcuencas de la zona hidrográfica con el fin de mejorar la precisión y resolución del modelo.
- Desarrollar y/o actualizar estudios sobre caudales ecológicos y objetivos de calidad para determinar la escasez hídrica real en los distintos puntos de la cuenca.

- Simular el caudal entre el 2009 y el 2013 de la estación El Alambrado, lo anterior para tener datos de comparación cuando se implementen modelos lluvia-escorrentía.
- Profundizar en los estudios sobre tendencias estadísticas de las variables hidroclimatológicas de la subzona hidrográfica.

REFERENCIAS

- BBC News Mundo. (17 de noviembre de 2020). *Iota: el mayor huracán de 2020 en el Atlántico golpea con fuerza la costa noreste de Nicaragua* [Sitio web]. Recuperado el 25 de febrero de 2021, de BBC News Mundo: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-54965248>
- Bertoni, J., & Ganancias, F. (2010). Comportamiento hidrológico y criterios del diseño de obras hídricas en sistemas climáticos cambiantes: reflexiones y análisis de casos. *Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes*, 7-22.
- BIS, Bolton, P., Despres, M., Pereira, L., Samama, F., & Svartzman, R. (2020). *The Green Swan*. Basilea: Bank for International Settlements.
- Bustos, D., & Lopera, S. (2019). *Comparación de curvas Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) observadas y simuladas. Estudio de caso del Eje Cafetero* [Tesis de grado]. Armenia: Universidad del Quindío.
- Centro de Cambio Global UC, SEI. (ABRIL de 2009). *Guía Metodológica - Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el modelo WEAP* [Documento de Sitio Web]. Recuperado el 06 de marzo de 2021, de WEAP: <https://bit.ly/3cfQynf>
- Chong-yu, X. (2002). *Modelos Hidrológicos*. Upsala: Universidad de Upsala. Obtenido de IMEFEN. Colorado State University. (23 de julio de 2017). *¿Qué es MODSIM-DSS?* [Sitio web]. Recuperado el 10 de noviembre de 2021, de MODSIM-DSS: <http://modsim.engr.colostate.edu/>
- Corponariño. (2011). *Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico subcuenca Quebrada Miraflores* [Documento Sitio web]. Recuperado el 25 de febrero de 2021, de Coponariño: <https://bit.ly/3aZnfWx>
- CRQ. (2018). *Oferta, Demanda Hídrica e Índice de Uso del Agua (IUA) de las Unidades de Manejo de Cuenca del Departamento del Quindío para el año 2017*. Armenia: CRQ.
- CRQ, CVC, CARDER, UAESPNN, MinAMBIENTE, IDEAM, & GTZ. (2008). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río La Vieja. El Rejuvenecer de La Vieja*. Armenia: CRQ.
- DANE. (1993). *XVI Censo Nacional de Población y V de Vivienda - 1993* [Hoja de cálculo]. Recuperado el 17 de marzo de 2021, de DANE: <https://bit.ly/3reVs9A>
- DANE. (2005). *Resultados Censo General 2005* [Hoja de cálculo]. Recuperado el 16 de marzo de 2021, de DANE: <https://bit.ly/392tlo0>
- DANE. (23 de noviembre de 2016). *Censo Nacional Agropecuario 2014* [Archivo Sitio web]. Recuperado el 01 de marzo de 2021, de Archivo Nacional de Datos (DANE): <https://bit.ly/3uYHpb8>
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV 2018* [Hoja de Cálculo]. Recuperado el 16 de marzo de 2021, de DANE: <https://bit.ly/398e5pE>

- Day, A., & Howarth, A. (2019). Modeling Climate Change Impacts on the Water Watershed, SE USA. *Southeastern Geographer*, 59(2), 110-129.
- Decreto 1729 DE 2002. (2002). *Cuencas hidrográficas*. Bogotá D.C.: República de Colombia.
- Echeverría, C., Huber, A., & Taberlet, F. (2007). Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. *Bosque*, 28(3), 271 - 280.
- EPA. (08 de mayo de 2021). *El día de hoy se efectuó la suspensión del servicio de acueducto en algunos sectores de la ciudad, con el fin de velar por la integridad y salud de nuestros usuarios*. Recuperado el 29 de mayo de 2021, de EPA La empresa de todos: <https://bit.ly/3i1kRmd>
- FAO. (31 de enero de 2012). *La Niña y sus consecuencias sobre el sector agropecuario en América Latina [Sitio web]*. Recuperado el 01 de marzo de 2021, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/509146/>
- Gaviño, M. (2010). Consideraciones ecohidrológicas para la gestión integrada de las inundaciones. *Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes*, 51-65.
- IDEAM. (2015b). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- IDEAM. (2019b). *Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS) [Documento Sitio web]*. Recuperado el 01 de marzo de 2021, de IDEAM: <https://bit.ly/3bimc4n>
- IDEAM. (agosto de 2019c). *Glosario Meteorológico [Documento Sitio web]*. Recuperado el 01 de marzo de 2021, de IDEAM: <https://bit.ly/3qhtVDT>
- IDEAM. (2019d). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011 - 2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional - Regional: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011 - 2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional - Regional: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2017). *Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Bogotá: Puntoaparte.
- IGAC. (01 de junio de 2021). *Datos Abiertos Agrología [Archivo de Sitio Web]*. Recuperado el 04 de junio de 2021, de Geoportal IGAC: <https://bit.ly/3wWniuD>
- Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la UPV. (03 de marzo de 2021). *Modelo de simulación hidrológica e hidráulica de tipo distribuido físicamente basado y orientado a cuencas de montaña [Sitio web]*. Recuperado el 03 de marzo de 2021, de Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la UPV: <https://bit.ly/3by7tCy>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (C. W. Team, R. Pachauri, & L. Meyer, Edits.) Geneva, Suiza: IPCC.

- Iturraspe, R., & Urciuolo, A. (2010). Eventos extremos en cuencas de montaña de régimen pluvionival en el contexto del Cambio Climático. *Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes*, 67-78.
- Joint Global Change Research Institute. (02 de marzo de 2021). *Global Change Analysis Model (GCAM) [Sitio web]*. Recuperado el 02 de marzo de 2021, de GCAM: <https://bit.ly/3vcyjHX>
- López, Á., Martínez, L., Feria, J., & Cruz, J. (2016). Planificación del recurso hídrico en la quebrada Aguas Blancas, zona rural de Montería, Córdoba. *Prospect*, 14(2), 71-80.
- Low, P. (09 de enero de 2020). *Tropical cyclones cause highest losses*. Recuperado el 27 de febrero de 2021, de Munich RE: <https://bit.ly/3q2afnA>
- Marine, Environment y Technology Center. (2020). *MOHID Land [Sitio web]*. Recuperado el 04 de marzo de 2021, de MOHID Water Modelling System: <https://bit.ly/3coxmnp>
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., & Ortiz, M. (4 de abril de 2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones Geográficas*(47).
- Minagricultura. (20 de febrero de 2021). *Fenómeno de El Niño en Colombia [Sitio web]*. Recuperado el 20 de febrero de 2021, de Minagricultura: <https://www.minagricultura.gov.co/atentos-clima/Paginas/default.aspx>
- MinAmbiente. (27 de diciembre de 2020). *Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Recuperado el 27 de diciembre de 2020, de MinAmbiente: <https://bit.ly/3nXDvf4>
- MinAmbiente, MinHacienda, CVC, CRQ, CARDER, Quindío, C. P., & Adaptación, F. (2015). *Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río La Vieja*. Armenia: CRQ.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Departamento de Quindío*. Bogotá D.C.: UT CAEM-E3.
- Molnar, P. (2011). *Calibration*. Zurich: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
- Montgomery, D., Robertson, C., Krauss, C., & Fazio, M. (20 de febrero de 2021). *Icy Storm Barrels Across Central U.S., Leaving Millions Without Power [Sitio web]*. Recuperado el 24 de febrero de 2021, de The New York Times: <https://www.nytimes.com/2021/02/15/us/winter-storm-today.html>
- Mora, C. (20 de febrero de 2021). *Traceable evidence of the impacts of climate change on humanity [Sitio web]*. Recuperado el 20 de febrero de 2021, de Carbon Neutrality Challenge: <http://impact.gocarbonneutral.org/>
- National Weather Service. (12 de abril de 2021). *Cold & Warm Episodes by Season*. Recuperado el 12 de abril de 2021, de NOAA: <https://bit.ly/3s8M7R3>
- Osso, M., Cabrales, S., & Rosso, J. (2017). Diseño metodológico para la simulación del balance hídrico de una represa: caso Tunja, Colombia. *Revista Científica*, 29(2), 230-248. doi:10.14483/udistrital.jour.RC.2016.29.a10
- Pabón, J. (2012). Cambio Climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 261-278.

- Pacific Northwest National Laboratory. (04 de 2021). *Mann-Kendall Test For Monotonic Trend*. Recuperado el 8 de 04 de 2021, de Pacific Northwest National Laboratory: <https://bit.ly/3mFjrOo>
- Procuraduría General de la Nación. (7 de diciembre de 2019). *Por intervención del Ministerio Público, Tribunal Administrativo declaró al río Quindío sujeto de derechos*. Recuperado el 27 de diciembre de 2020, de Procuraduría General de la Nación: <https://bit.ly/2M400Re>
- Rodríguez, C. (2020). *Modelación hidrológica distribuida para la estimación de la oferta hídrica superficial de la subzona hidrográfica del Río La Vieja [Tesis de maestría]*. Armenia: Universidad del Quindío.
- Rodríguez, K., & Vargas, J. (2019). *Implementación del Modelo IDW en la Cuenca del Río Quindío [Tesis de grado]*. Armenia: Universidad del Quindío.
- Sanches, L., Pereira, M., Morgado, S., & Macário, E. (2018). Influence of Climate Change on the design of retention basins in Northeastern Portugal. *Water*, 10(743), 1-17.
- SEI, EIS, CIDERA, CINARA, A&A, CARDER, . . . IDEAM. (2014). *Construcción de capacidades bajo escenarios de Cambio Climático en las cuencas del río La Vieja y Otún en Colombia. Ríos del Páramo al Valle por urbes y campiñas*. Estados Unidos: Stockholm Environment Institute.
- Sokac, M., Veliskova, Y., & Dubova, V. (2013). Assessment of impacts on water quality caused by short-term storm discharges from urbanized catchment. *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 39-46.
- TeleSUR TV. (12 de octubre de 2020). *ONU revela aumento de desastres naturales en últimos 20 años [Sitio web]*. Recuperado el 24 de febrero de 2021, de Telesur TV: <https://bit.ly/3kvKUKK>
- Tribunal Superior del Distrito Judicial de Armenia. (18 de noviembre de 2020). *Tribunal Superior del Distrito Judicial de Armenia Declara al Valle del Cócora como Sujeto de Derechos*. Recuperado el 27 de noviembre de 2020, de Tribunal Superior del Distrito Judicial de Armenia: <https://bit.ly/3mTCFyg>
- U.S. Army Corps of Engineers. (03 de abril de 2021a). *HEC-HMS [Sitio web]*. Recuperado el 10 de noviembre de 2021, de Hydrologic Engineering Center: <https://bit.ly/31V6IAV>
- U.S. Army Corps of Engineers. (01 de noviembre de 2021b). *HEC-ResSim [Sitio web]*. Recuperado el 10 de noviembre de 2021, de U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center: <https://bit.ly/3Dgv5Hd>
- UDEGERD. (febrero de 2017). *Estrategia Departamental para la Respuesta a Emergencias EDRE, Versión 1.1 [Documento de Sitio web]*. Recuperado el 27 de mayo de 2021, de Gobernación del Quindío: <https://bit.ly/3ci603l>
- UNESCO, & OMM. (1992). *Glosario internacional de hidrología* (2da Edición ed.). París: UNESCO.
- UNESCO, & ONU-Agua. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*. París: UNESCO.
- Vargas, R., & Díaz Granados, M. (1998). *Curvas sintéticas regionalizadas de Intesidad - Duración - Frecuencia para Colombia [Libro electrónico]*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes. Recuperado el 23 de enero de 2018, de <http://bit.ly/2kvBV6k>

- Velásquez, M., & Poveda, G. (2019). Estimación del balance hídrico de la región Pacífica Colombiana. *DYNA*, 86(208), 297-306.
- Vélez, J. y otros. (octubre de 2002). Aplicación de diferentes metodologías para estimación de Curvas Intensidad - Frecuencia - Duración en Colombia. 6, 91-100. Recuperado el 23 de enero de 2018, de <http://bit.ly/2F4YTbl>
- Wang, X., Huang, G., Liu, J., Li, Z., & Zhao, S. (2015). Ensemble Projections of Regional Climatic Changes over Ontario, Canada. *Journal of Climate*, 28, 7327-7346.
- WEAP. (01 de junio de 2021). *Land Use [Sitio Web]*. Recuperado el 04 de junio de 2021, de WEAP: <https://bit.ly/3ioDjW2>
- Wires, N. (08 de febrero de 2021). *Severe floods strike southwest France, Paris area on flood alert [Sitio web]*. Recuperado el 25 de febrero de 2021, de France 24: <https://bit.ly/37Try3L>
- World Meteorological Organization. (1976). *Hydrological Network Design and Information Transfer*. Genova: World Meteorological Organization.
- World Meteorological Organization. (20 de febrero de 2021). *Climate [Sitio Web]*. Recuperado el 20 de febrero de 2021, de World Meteorological Organization: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate>
- Xu, Q., Chen, J., Peart, M., Nam, C., Hau, B., & Law, W. (2018). Exploration of severities of rainfall and runoff extremes in ungauged catchments: A case study of Lai Chi Wo in Hong Kong, China. *Science of the Total Environment*, 634, 640-649.
- Zeldin, S. (16 de octubre de 2019). *'It's a crisis, not a change': the six Guardian language changes on climate matters [Sitio web]*. Recuperado el 24 de febrero de 2021, de The Guardian: <https://bit.ly/2MrQ193>

ANEXOS

Anexo	Formato
Anexo 1 - Registros Estaciones	.csv
Anexo 2 - Registros Precipitacion Diaria	.xlsx
Anexo 3 - Registros Precipitacion Anual	.xlsx
Anexo 4 - Registros Precipitacion Mensual	.xlsx
Anexo 5 - Registros Precipitacion Mensual Microcuencas	.csv
Anexo 6 - Registros Temperatura Diaria Completa	.xlsx
Anexo 7 - Registros Temperatura Mensual	.xlsx
Anexo 8 - Registros Evapotranspiracion Diaria	.xlsx
Anexo 9 - Poblacion Censo	.xlsx
Anexo 10 - Tendencia Precipitacion MannKendall	.pdf
Anexo 11 - Tendencia Temperatura Promedio MannKendall	.pdf
Anexo 12 - Tendencia Temperatura Maxima MannKendall	.pdf
Anexo 13 - Tendencia Temperatura Minima MannKendall	.pdf
Anexo 14 - Scripts R	Carpeta
Anexo 15 - Informacion Geografica	Carpeta
Anexo 16 - Caudal Simulado	.xlsx
Anexo 17 - Demanda No Cubierta Mensual Simulada	.xlsx
Anexo 18 - Demanda No Cubierta Simulada	.xlsx
Anexo 19 - Desviación Porcentual Anual Simulada	.xlsx
Anexo 20 - Desviacion Porcentual Mensual Simulada	.xlsx
Anexo 21 - Modelo WEAP	Carpeta