

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

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

Directores:

GABRIEL LOZANO SANDOVAL (PhD)  
ELKIN ANÍBAL MONSALVE DURANGO (MEng)

Maestría en Ingeniería con énfasis en Recursos Hídricos y Medio Ambiente  
UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO



# Contenido

CAPÍTULO I : CONTEXTO

CAPÍTULO II : ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

REFERENCIAS



# CAPÍTULO I: Planteamiento del problema

El clima a nivel mundial siempre ha sido un tópico de suma importancia, sin embargo, se ha hecho necesario la integración del componente de Cambio Climático en la mayoría de las herramientas para la toma de decisiones sobre los territorios.

Son numerosos los estudios hídricos que se han realizado en el Quindío y la subzona hidrográfica Río La Vieja, no obstante, la continuidad, retroalimentación, actualización y enfoque sistémico son elementos que pocas veces se han considerado en ellos y, por ende, si bien han servido para ampliar el conocimiento en torno a la Gestión del Agua, su validez y precisión son elementos que se han perdido con el tiempo.

En este contexto, esta investigación tiene por objeto el balance hídrico en la cuenca alta y media del Río La Vieja, a través de modelos semidistribuidos usando como base la respuesta hidrológica y las demandas por actividades humanas en la subzona hidrográfica.

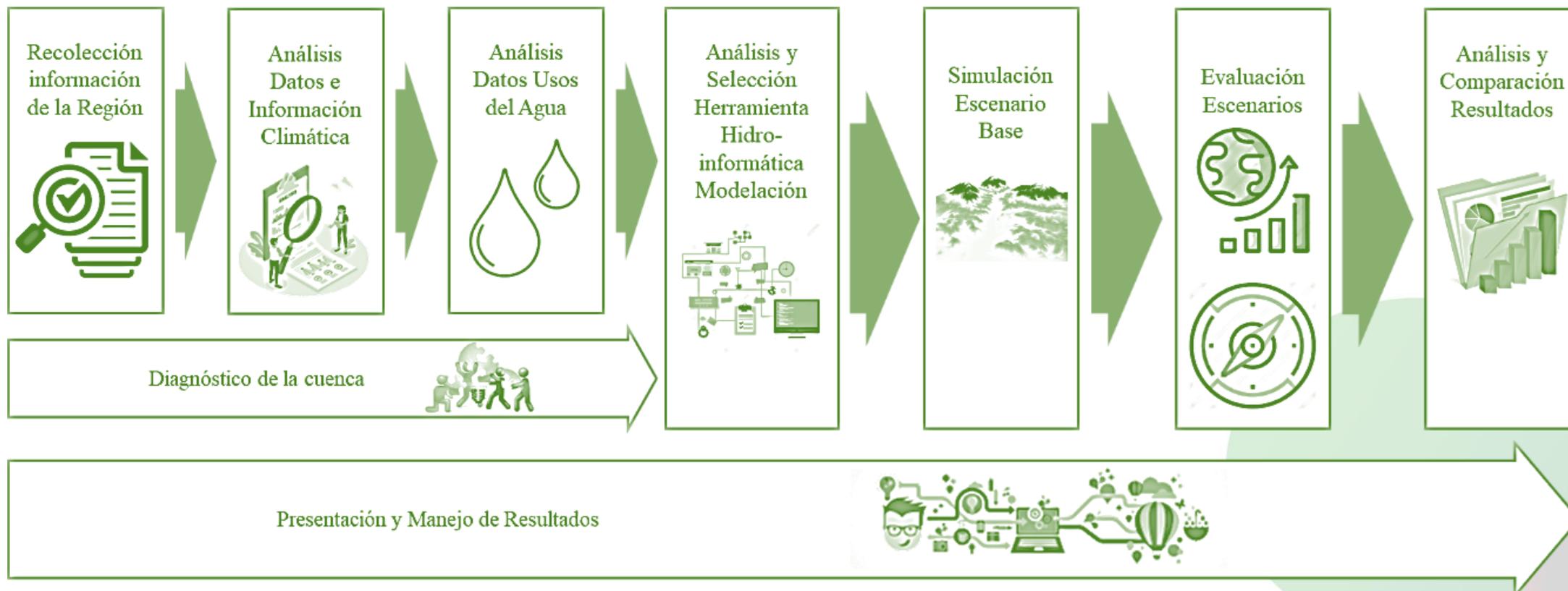


# CAPÍTULO I: Objetivos

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

- 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.

# CAPÍTULO II: Metodología



## CAPÍTULO III: Zona de estudio



La subzona hidrográfica tiene un área aproximada de 2,837 km<sup>2</sup>, la altura media es de 1,767 msnm y en general tiene un clima templado. La cuenca nace en la cordillera Central a 4,602.7 msnm y desembocando en el río Cauca a 896.6 msnm.

El río La Vieja se compone de 21 municipios, en donde 12 son del Quindío, 8 del Valle del Cauca y 1 del Municipio de Risaralda. A nivel hidrográfico según el IDEAM está identificada con el código 2612 y contiene 21 microcuencas y 28 descargas directas



## CAPÍTULO III: Recolección de datos

En total se han utilizado los registros de precipitación de 60 estaciones climáticas, 12 estaciones para los registros de temperatura y 4 estaciones para la evapotranspiración. Basados en el estudio de Rodríguez (2020).

Específicamente, del IDEAM se han obtenido series de datos de precipitación, evapotranspiración, temperatura y caudal.

La información obtenida de CENICAFE, la CRQ y la CVC corresponde a registros de precipitación y temperatura de la red de estaciones que tienen las entidades.



## CAPÍTULO III: Recolección de datos

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, actualizando los consumos esperados dentro de la cuenca bajo máxima capacidad de forma legal.

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

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.



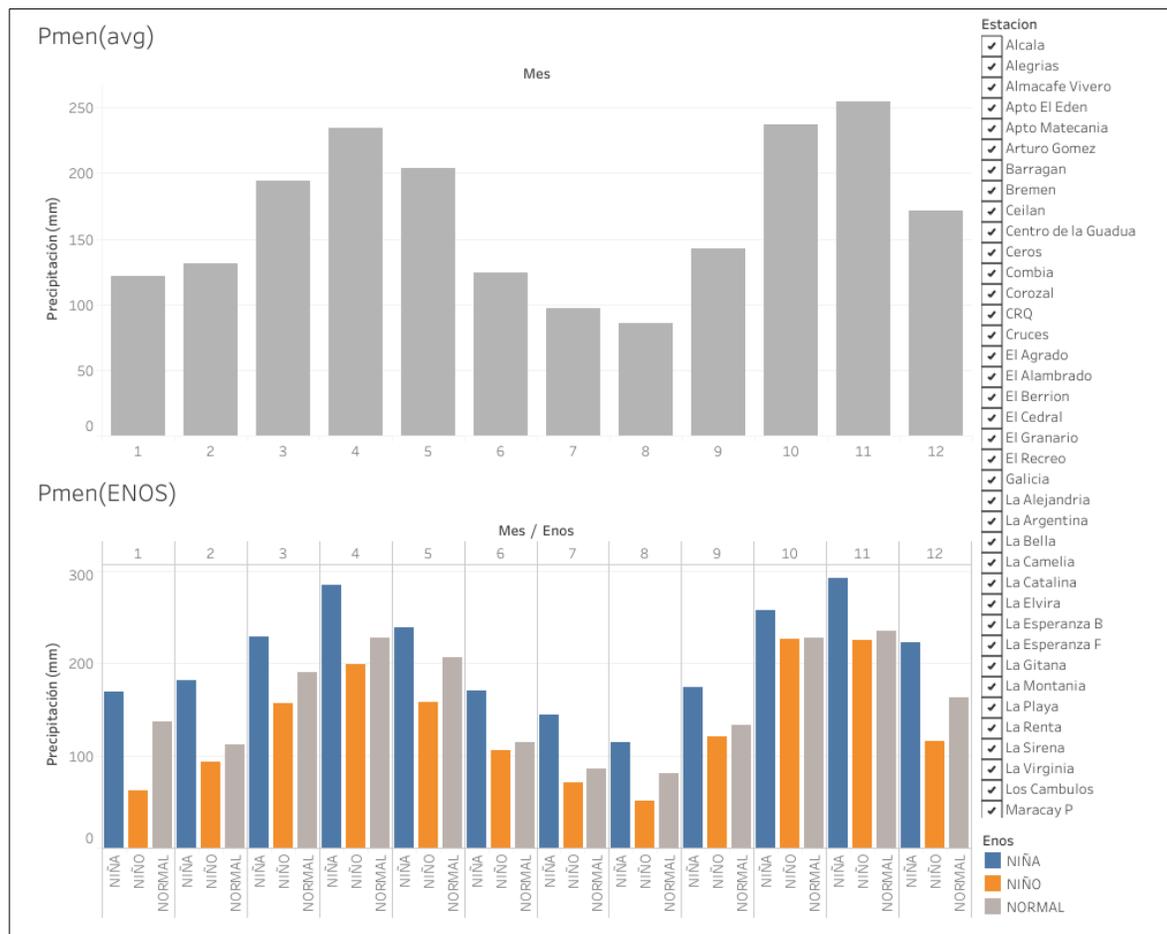
## CAPÍTULO III: Recolección de datos

La información de caudal se ha extraído de los registros mensuales desde el 1992 hasta el 2020 de la estación limnigráfica El Alambrado, con un vacío entre los años 2009 y 2013. Por lo tanto, el período de calibración del modelo ha sido de 11 años (1992 hasta 2002) y el período de validación fue de 2003 hasta 2008.

Considerando que el período de tiempo de calibración sólo alcanza los 11 años, 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 de 17 años.



# CAPÍTULO III: Precipitación Mensual Promedio



Este comportamiento muestra que la precipitación en la subzona hidrográfica del río La Vieja tiene una tendencia modal que se repite dos veces en el año, en donde los mínimos absolutos tienden a presentarse en junio y los máximos en noviembre.

Bajo esta escala el fenómeno de La Niña tiene una incidencia clara en el aumento de precipitación en la subzona comparada con los períodos Normales y Niño. Mientras que los años con influencia de El Niño muestran en promedio registros de lluvia menores a los ocurrido en meses Normales y Niña.

## CAPÍTULO III: Análisis de tendencias

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

- Sólo tres (3) estaciones (Potreros, Alcalá y La Alejandría) tienen una tendencia decreciente en las series de lluvia.
- Las estaciones Zarzal, Quebrada Nueva, Planta de Tratamiento, La Virginia, Los Cámbulos y el Aeropuerto Matecaña están cerca de presentar una tendencia significativa positiva (aumento de la precipitación), al acercarse a un valor Z mayor a 1.65.

Estación	Z	Sign	Q
Alcalá	-1.92938006	1	-0.125
Apto. Matecaña	1.18930541	0	0.08333333
Corozal	-0.86851293	0	-0.05169912
Galicia	-1.23481102	0	-0.06896552
La Alejandría	-2.40741223	1	-0.15328112
La Argentina	1.10809732	0	0.0785014

Estación	Z	Sign	Q
Miravalles	-0.5638425	0	-0.03081671
Palmasola	0.91575009	0	0.04081633
Planta de Tto.	1.54580693	0	0.11437177
Potreros	-2.16665974	1	-0.1407823
Quebrada Nueva	1.21062016	0	0.06589147
Zarzal	1.40358995	0	0.05780347

## CAPÍTULO III: Análisis de tendencias

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, y dos estaciones muestran una tendencia al aumento, aunque no es significativo.

De las dos (2) estaciones restantes, una presenta una tendencia significativa a la disminución de la temperatura (Centro de la Guadua) y la otra (El Agrado) está muy cerca de tener una tendencia significativa (-1.62).

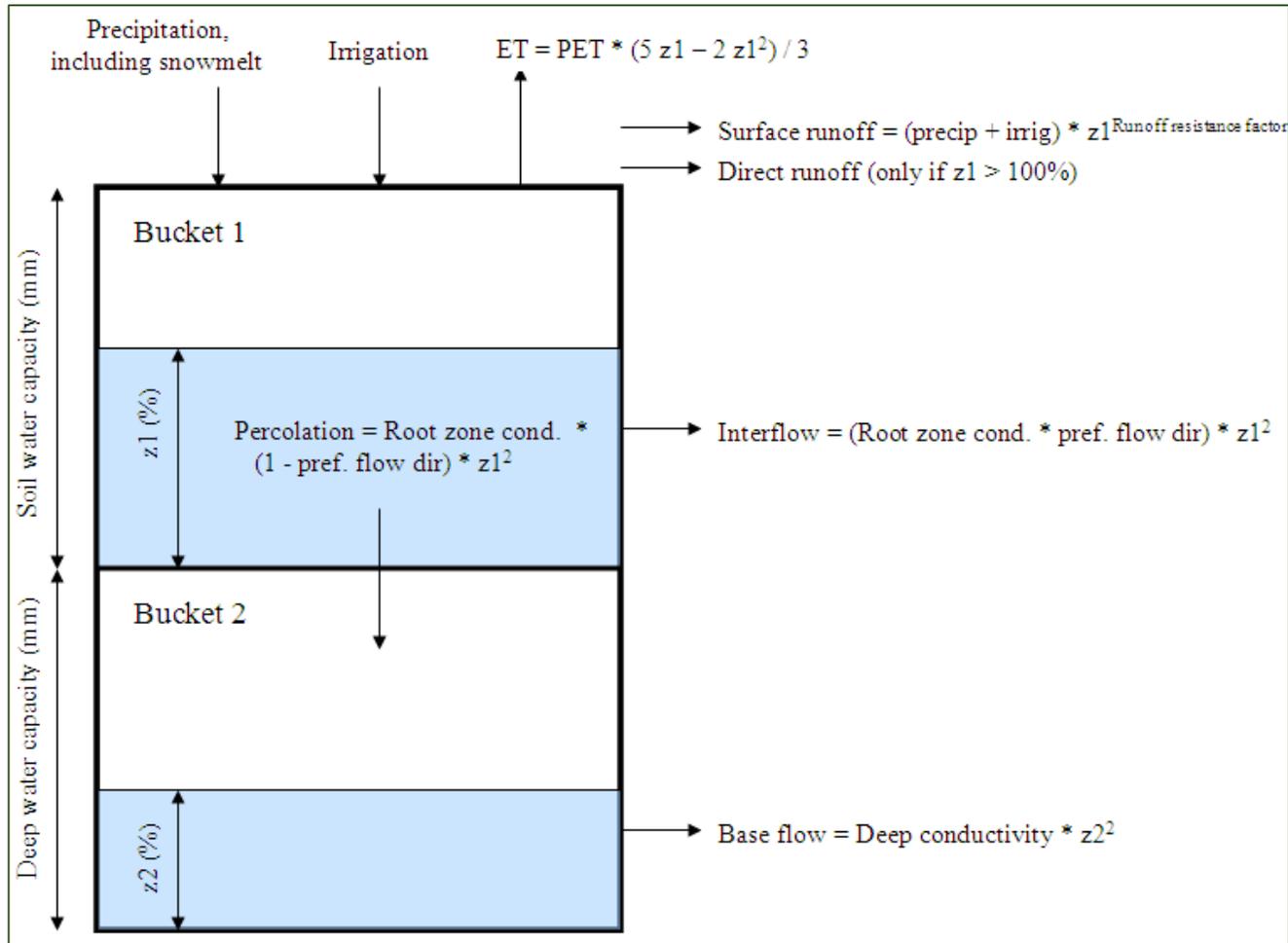
Estación	Z	Sign	Q
Apto El Edén	5.64921728	1	0.00293347
Apto Matecaña	5.61121016	1	0.00278827
Arturo Gómez	5.44594547	1	0.00264206
Barragán	6.67837889	1	0.00379152
Bremen	1.18755325	0	0.0005769
Centro de la Guadua	-2.22767194	1	-0.00115537

Estación	Z	Sign	Q
Cumbarco	1.51524817	0	0.00078191
El Agrado	-1.61719075	0	-0.00090554
El Cedral	3.33747294	1	0.00158914
La Bella	4.51696394	1	0.00241085
La Catalina	4.95638852	1	0.00234604
La Playa	4.53251561	1	0.00266681

# CAPÍTULO III: Selección de herramienta hidroinformática

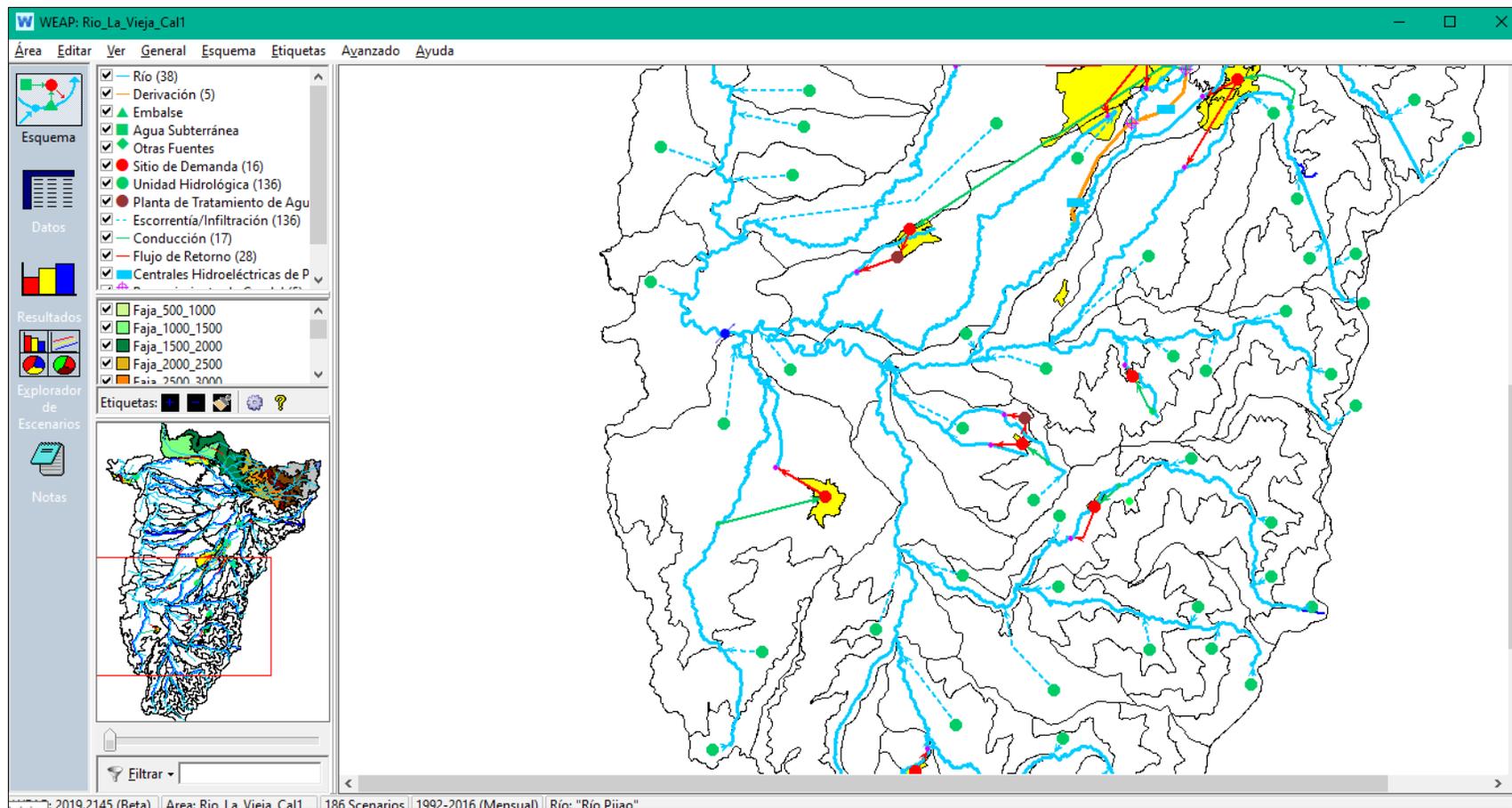
Herramienta	Modelo	Precedentes	Enfoque principal	Series datos requeridas	Alcance para trabajos futuros	Total
<b>WEAP</b>	3	5	5	4	5	22
<b>GCAM</b>	5	3	4	2	4	18
<b>TETIS</b>	5	5	3	3	3	19
<b>MOHID Land</b>	5	4	3	3	3	18
<b>HEC-HMS</b>	3	4	3	5	2	17
<b>HEC-SimRes</b>	3	3	5	5	5	21
<b>MODSIM-DSS</b>	3	3	5	4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

# CAPÍTULO III: WEAP



El diagrama conceptual y las ecuaciones que están incorporadas en el modelo de dos tanques de WEAP se denomina Método de Humedad del Suelo.

# CAPÍTULO III: Topología



# CAPÍTULO III: Composición del Modelo

Supuestos Clave

- Kc
  - Glaciares
  - Agrícola
  - Bosque
  - Café
  - Páramo
  - Zonas Urbanas
  - Pastos
  - Cuerpos Agua
  - Suelos desnudos
- FlowDirection
- Sw\_Cap
- Rootzone\_Cond
- RRF
- Z1
  - Dw\_Cap
  - Parte Alta
  - Parte Media
  - Parte Baja
- Deep\_Cond
- Z2
- Demand Sites and Catchments

Etiquetas:



Filtrar

Datos para: **Reference (1993-2016)** | Administrar Escenarios | Reporte de Expresiones de Datos

Supuestos Clave

These are user-defined variables that can be referenced elsewhere in your analysis. For mensu

Supuestos Clave	1992	1993-2016	Scale	Unit
Kc	0	0		
Glaciares	1.2	1.2		
Agrícola	0.8	0.8		
Bosque	1.08634...	1.0863459		
Café	1.1	1.1		
Páramo	0.8	0.8		
Zonas Urbanas	0.35	0.35		
Pastos	0.81763...	0.81763453		
Cuerpos Agua	1.2	1.2		
Suelos desnudos	0.9	0.9		

Gráfico | Tabla | Notas | History | Elaboración



Filtrar

Supuestos Clave

- Armenia
- Calarca
- Salento
- Circacia
- Filandia
- Tebaída
- Cordoba
- Buenavista
- Pijao
- Genova
- Caicedonia
- Montenegro
- Quimbaya
- Pereira
- Cartago
- QND\_01\_4000
  - Suelos al descubierto
  - Paramo
  - Centros poblados
  - Cultivos generales
  - Café

Etiquetas:



Filtrar

Datos para: **Reference (1993-2016)** | Administrar Escenarios | Reporte de Expresiones de Datos

Uso del Agua | Pérdida y Reuso | Manejo de la Demanda | Calidad del Agua | Costo | Prioridad | Avanzado

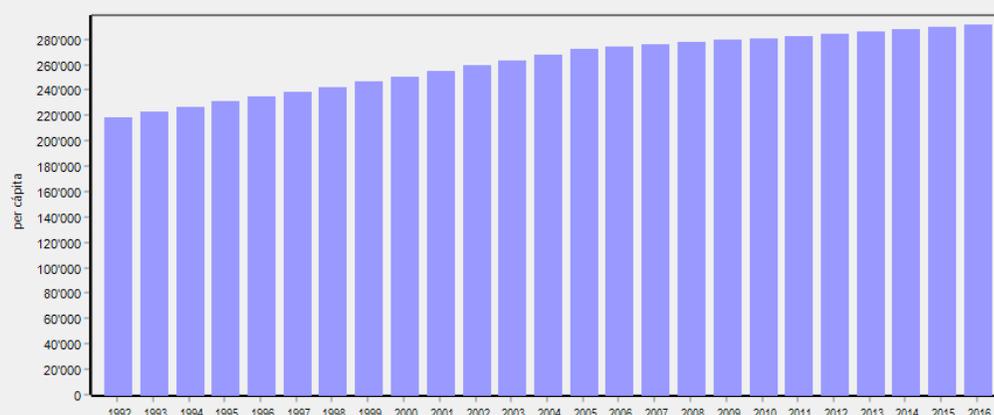
Nivel de Actividad Anual | Tasa Anual de Uso del Agua | Variación Mensual | Consumo

Nivel de actividad anual impulsada por la demanda, como el área usada para la agricultura, la población que consume agua para fines domésticos o producción industrial. [Ayuda](#)

Demand Sites and Catchment	1992	1993-2016	Scale	Unit
Armenia	ReadFr...	ReadFromFile(Demandas\Poblacion_Armenia.csv)		per cá...

Gráfico | Tabla | Notas | History | Elaboración

Nivel de Actividad Anual



Y=0 3-D Log Grp

# CAPÍTULO III: Calibración y Validación del Modelo (PEST)

El Alambrado		
1992 - 2002	2003 - 2007	1992 - 2007
0.71	0.43	0.56

Cartago		
1992 - 2002	2003 - 2007	1992 - 2007
0.75	0.41	0.54

Coeficiente 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

Calibración usando PEST.

Conjunto de Calibración: Corrida1

Parámetros a Calibrar

Parameter	Lower Bound	Upper Bound	Initial Value
Suelos desnudos kc	0.6	0.9	0.7
Glaciares	0.8	1.2	1
Pastos Kc	0.7	1	0.8

+ Agregar    Editar    - Eliminar

Observaciones para Calibrar con

Medidores de Caudal: Esta\_Limnigrafica\_Alambrado

Embalses (con datos observados): None defined

Lagunas (con datos de capa de nieve): None

años: Selected

Meses: All

Opciones

Escenario a Calibrar: Calibracion\_1

Modificar los parámetros también en las Cuentas Corrientes

Normalizar los datos de observación

Ejecutar PEST después de crear los archivos PEST de entrada

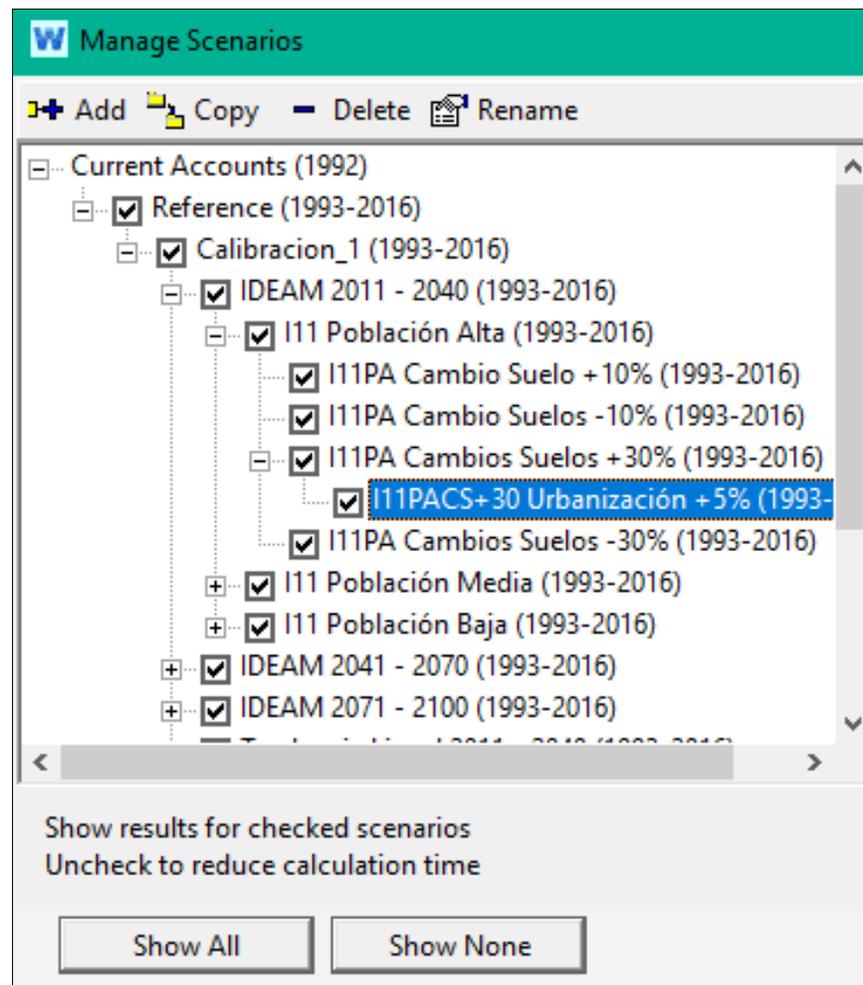
? Help    Build Files and Run PEST    X Cerrar

## CAPÍTULO III: Configuración de Escenarios (C.C.)

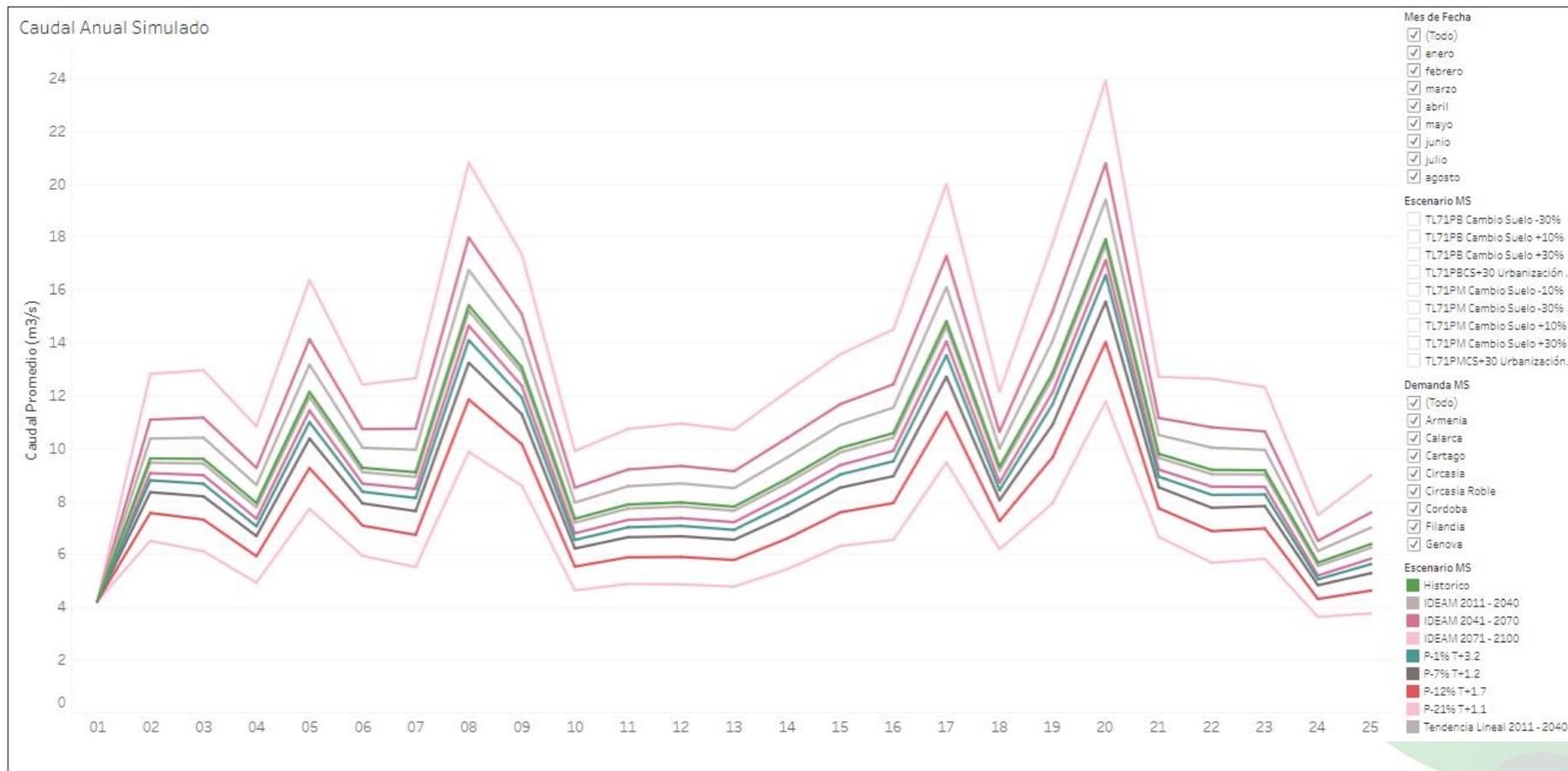
- Según los escenarios del IPCC (2014), SEI, y otros (2014) establecieron que son cinco (5) las tendencias representativas para la subzona hidrográfica del río La Vieja, en donde 4 representan una reducción de la precipitación del 1% al 21% junto con incrementos de temperatura entre 1.2°C y 3.2°C, y 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.

## CAPÍTULO III: Configuración de Escenarios

- A cada uno de los escenarios del C.C. se le sumó 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.
- 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 (basado en los objetivos del PIGCC), a +/-30% del área de cultivo/páramo y +5% del área urbana (escenario optimista y pesimista).

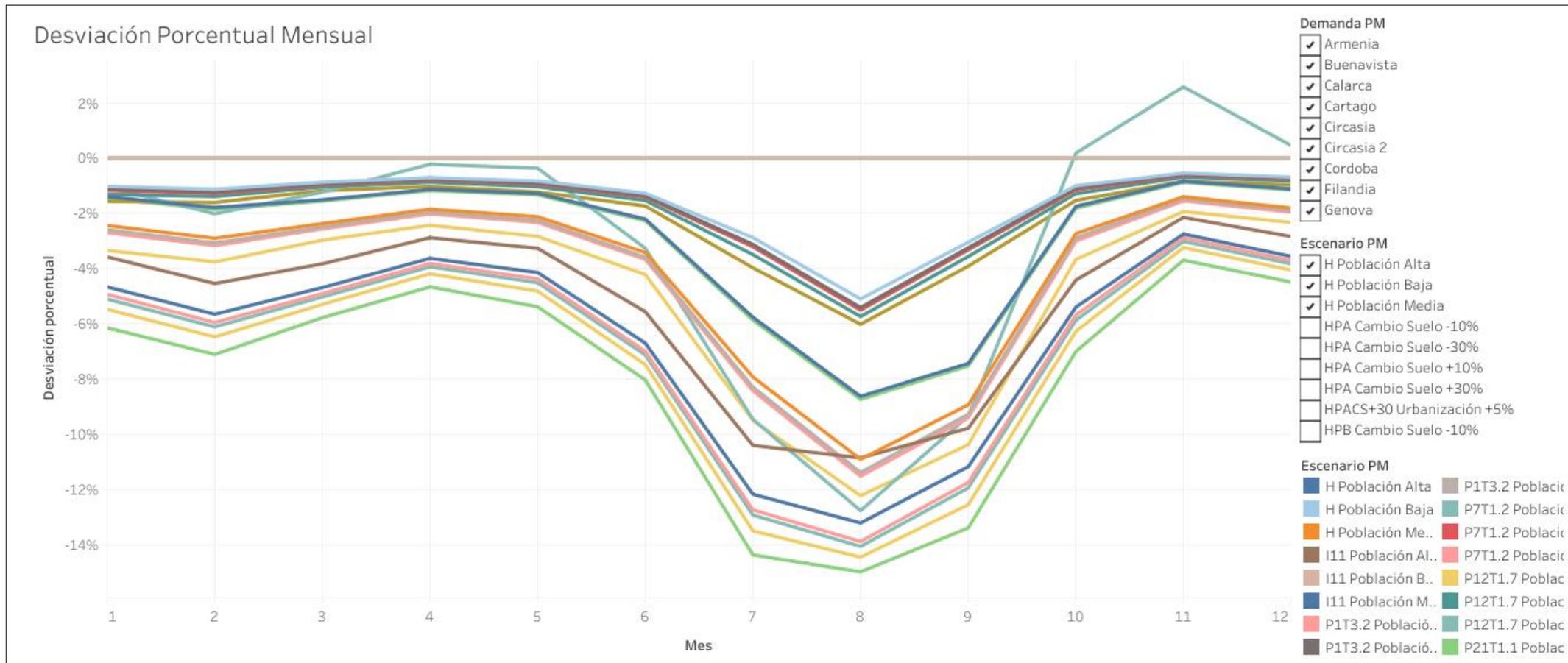


# CAPÍTULO III: Caudal promedio anual bajo C.C.



Accesible desde <https://tabsoft.co/3itnfCq>

# CAPÍTULO III: Variación del Caudal bajo cambios de población



Accesible desde <https://tabsoft.co/3itnfCq>



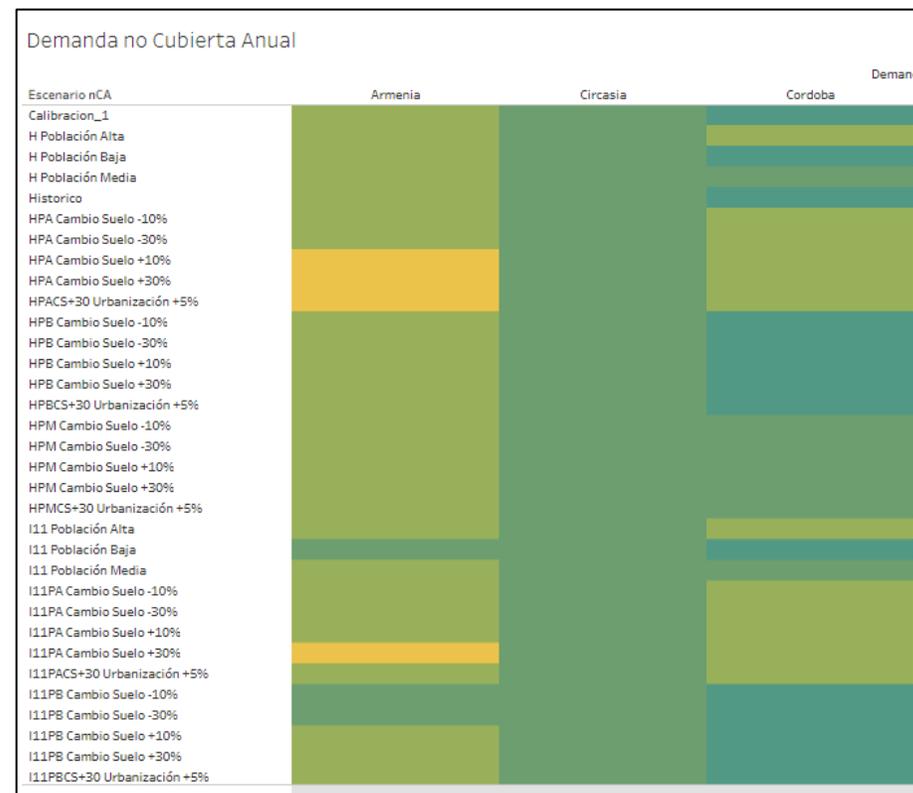
## CAPÍTULO III: Variación del Caudal bajo cambios de cobertura

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

## CAPÍTULO III: Demanda no cubierta

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 todos los períodos de tiempo considerados.
- Circasia, Quimbaya y La Tebaida tienen una tendencia al déficit hídrico.
- El municipio de Salento tiene una vulnerabilidad alta cuando se presenta reducción en la precipitación para las proyecciones de 2071 a 2100 [Población Alta].
- Para el municipio de Córdoba se ha observado que la fuente hídrica de abastecimiento es capaz de suplir las demandas de agua hasta el 2040.
- A escala mensual, en general no se presentan problemas de demanda no cubierta en las temporadas húmedas.

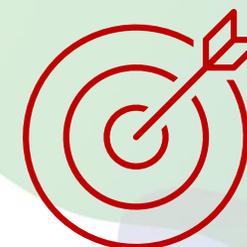


## CAPÍTULO IV: Conclusiones

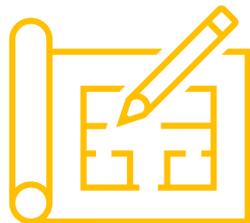
La implementación del sistema topológico desarrollado por SEI, y otros (2014) ha sido exitoso, demostrando así que es viable la reutilización de sistemas topológicos para realizar nuevas investigaciones con distribuciones espaciales y/o temporales distintos a las iniciales.

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.

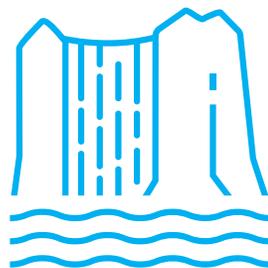
A partir de las métricas utilizadas se puede establecer que los parámetros determinados en los *Supuestos Clave* son apropiados para el modelo y con base en estos se pueden proyectar y analizar los escenarios bajo condiciones de Cambio Climático.



## CAPÍTULO IV: Conclusiones



Los escenarios representativos utilizados son el **registro histórico** (estacionario); las **proyecciones del IDEAM**; la **tendencia lineal**; y las **proyecciones del IPCC** seleccionadas por el SEI, y otros (2014).



Los escenarios de Cambio Climático estudiados son consecuentes con la relación hidrológica que existe entre la precipitación y el caudal.



Se ha observado que la temperatura no es una variable representativa para la disponibilidad de agua, siendo atribuible a que la subzona hidrográfica es de montaña y no tiene cuerpo lóticos de gran extensión.

## CAPÍTULO IV: Conclusiones

Para los escenarios que consideran cambios en la cobertura del suelo, se ha observado que en la temporada seca:

- Un aumento del 10 % en los cultivos representa en promedio una reducción del 1.85 % del caudal base;
- Un aumento del 30 % en 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 4.00 %;
- Un aumento del 10% de bosques y páramos representan un 1.00% más que el caudal base y;
- Un aumento del 30% tiende a aumentar el caudal en un 3.20%.

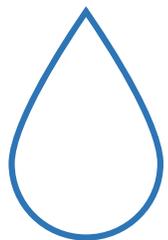
El análisis de demanda no cubierta, sin considerar el caudal ecológico, ha mostrado que Armenia, Circasia, Quimbaya y La Tebaida están en déficit hídrico para todos los escenarios, en donde sólo los escenarios con tendencias al alza de la precipitación tienen caudales cercanos o un poco menores a los demandados.



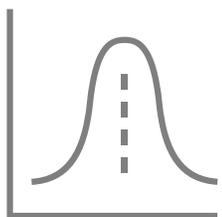
## CAPÍTULO IV: Conclusiones



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]).



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.

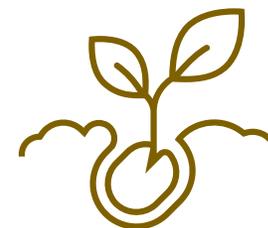


La variación modal del caudal indica que en la parte media y alta de la subzona hidrográfica río La Vieja la escasez hídrica es producto de la distribución temporal del agua y no de la cantidad que circula anualmente

## CAPÍTULO IV: Conclusiones

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).

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.



## CAPÍTULO IV: Trabajos Futuros

- Robustecer el modelo actual con la evolución de la cobertura de suelos en la cuenca y/o mayor densidad de registros hidroclicmáticos, 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 a escala de subcuencas de la zona hidrográfica con el fin de mejorar la precisión y resolución del modelo.
- Simular los registros de caudal mensual en el período de tiempo 2009 – 2013 en la estación El Alambrado para la calibración de modelos lluvia-escorrentía futuros.

# Referencias

- 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 decrecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes*, 7-22.
- 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.
- 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.
- 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
- SEI, EIS, CIDERA, CINARA, A&A, CARDER, [...] IDEAM. (2014). *Construcción de capacidades bajo escenarios de 22 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.





UNIVERSIDAD  
DEL QUINDÍO



UNIVERSIDAD  
DEL QUINDÍO

**¡Muchas gracias!**

