

Guía para la evaluación de inversiones para empresas de prestación de servicios de acueducto.



Agosto 2023

AUTORES

Tania Santos
Nilo Lima
Yesica Rodríguez
David Zamora
Hector Angarita
David Purkey

2

STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE - SEI

COLABORADORES

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico –
CRA
Dirección Ejecutiva y Subdirección de Regulación
Director Ejecutivo Leonardo Navarro Jimenez
Experto Comisionado Diego Felipe Polanía Chacón
Subdirector de Regulación (e) Guillermo Ibarra Prado
Juan Andrés Rojano Sierra

AGRADECIMIENTOS

Aguas de Manizales S.A. E.S.P.
Empresa de Obras Sanitarias de Caldas S.A. E.S.P. - EMPOCALDAS
AQUAMANÁ E.S.P.
Empresa de Servicios Públicos de Duitama - EMPODUTAMA S.A. E.S.P.
RED VITAL PAIPA S.A E.S.P.

DOI

10.5281/zenodo.10822071

Marzo 2024

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	7
3. ASPECTOS GENERALES	7
4. METODOLOGÍA	12
4.6. Paso 1: Recolección de información.....	14
4.7. Paso 2: Caracterizar los agentes que modifican la oferta y la demanda	15
4.7.2. Dinámica poblacional.	15
4.7.3. Cambio Climático.	15
4.8. Paso 3. Elaboración de Modelos para la simulación de la dinámica hídrica en la cuenca.	16
4.9. Paso 4: Definir estrategias de gestión del agua para la cuenca	17
4.10. Paso 5. Evaluar estrategias a partir de indicadores	19
Indicador 1: Regulación hídrica: Oferta media y en condiciones de estiaje (Q95)	21
Indicador 2. Brecha entre oferta y demanda para garantizar la cobertura y continuidad en la prestación del servicio de acueducto	23
Indicador 3. Análisis de costo-efectividad	24
5 ANALISIS DEL MARCO REGULATORIO RELACIONADO CON LAS INVERSIONES AMBIENTALES ADICIONALES	25
6 REFERENCIAS.....	32
ANEXO 1: CASO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA	34
1. Cambio climático.....	35
2. Crecimiento de la población	35
Paso 3. Elaboración de modelos para la simulación de la dinámica hídrica de la cuenca: Modelo WEAP de la cuenca alta del río Chicamocha.....	35
Paso 4. Estrategias de gestión.	36
Paso 5. Evaluación de estrategias de gestión a partir de indicadores.	37
Indicador 1. Análisis del cambio en la oferta del agua	37

□ QUEBRADA SURBA.....	38
□ QUEBRADA BOYACOGUA	38
Indicador 2. Análisis Brecha: Análisis del efecto de las estrategias en la cobertura y continuidad en la prestación del servicio de acueducto.....	40
Indicador 3. Análisis de costo-efectividad	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Crecimiento poblacional para la cuenca del río Chinchiná.	15
Tabla 2. Medidas de desempeño (M) para evaluar el comportamiento de cada estrategia, al horizonte de planificación	20
Tabla 3. Análisis del indicador de Brecha para diferentes escenarios de acción, respecto a la condición actual proyectada a 2050	24
Tabla 4. Articulación del marco regulatorio para las IAAV	26
Tabla 5. Breve descripción del marco regulatorio que soporta las IAAV	29
Tabla 6. Datos de entrada para estimar la demanda agua	35
Tabla 7. Datos de entrada para simular el suministro de agua y las pérdidas en la aducción.	36
Tabla 8. Q95 de las quebradas Surba, Boyacogua y Toibita.	39
Tabla 9. Brecha (l/s) entre oferta y demanda de agua en los sistemas de suministro de agua en Duitama y Paipa, y Delta de la brecha entre la línea base al año 2050 y cada una de las estrategias	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Posibles Intervenciones para garantizar la cobertura y continuidad del servicio de acueducto.	9
Figura 2 Comparación de los beneficios de diferentes tipos de inversiones en un sistema de abastecimiento de agua.	10
Figura 3. Pasos para evaluar inversiones en un sistema de acueducto.	13
Figura 4. Información del modelo hidrológico WEAP.	17
Figura 5. Detalle de los escenarios de intervención en la cuenca del río Chinchiná.	19
Figura 6. Caudal medio diario de las cuencas abastecedoras bajo diferentes estrategias	21
Figura 7. Cambio proyectado a 2050 en el caudal medio anual	22
Figura 8. Q95 en cuencas abastecedoras para diferentes escenarios de acción	23
Figura 9. Cambio proyectado a 2050 en el caudal de estiaje.	23
Figura 10. Costo-Efectividad de acciones en (M\$/hm ³) para ΔB_{95}	25
Figura 11. Relación del marco regulatorio ambiental como soporte de las IAA	28
Figura 12. Acciones de intervención evaluadas.	37
Figura 13. Caudal medio diario bajo diferentes estrategias en la Quebrada Toibita, Municipio Paipa.	38
Figura 14. Caudal medio diario bajo diferentes estrategias en las quebradas a. Surba y b. Boyacogua, Municipio Duitama.	38
Figura 15. Cambio en el caudal de estiaje (Q95) de las diferentes estrategias respecto al caudal en la condición actual	39
Figura 16. Costo efectividad $C/\Delta B_{95}$ para los prestadores de servicio de a. Duitama y b. Paipa	41

INTRODUCCIÓN

El agua es el bien fundamental que deben asegurar los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto. La cantidad de agua que puede usarse para consumo humano de las fuentes como ríos, embalses o pozos, depende de las condiciones que limitan la oferta como el clima, la vegetación y los suelos, y por otro lado de la demanda del agua y su calidad. Por lo tanto, para asegurar la prestación del servicio público domiciliario de acueducto, se requiere asegurar la salud de los ecosistemas que proveen el agua para nuestro consumo. Cuando se alteran estos ecosistemas puede afectarse la cantidad de agua disponible, principalmente en época de estiaje, y su calidad, impactando la seguridad hídrica.

El objetivo de esta “Guía para evaluación de inversiones para empresas de prestación de servicios de acueducto” es proponer un esquema de análisis que permita comparar estrategias de inversión tendientes a garantizar la continuidad y cobertura del servicio de acueducto estándares para la prestación del servicio. En esta guía se propone una metodología para evaluar el impacto de las estrategias o acciones de restauración y conservación de los ecosistemas dentro de la prestación del servicio domiciliario de acueducto, a través de la estimación de tarifas por servicios ambientales. Entre las acciones a comparar se incluyen las inversiones ambientales adicionales, en el marco de la resolución CRA 907 de 2019, cuyos costos pueden incluirse en las tarifas que los prestadores del servicio domiciliario de acueducto cobran a sus suscriptores.

Entre los años 2019 y 2021, se realizaron dos pilotos, uno en una cuenca con ecosistemas saludables en términos generales y otro en una cuenca disturbada con una brecha oferta-demanda más estrecha. La primera correspondió a la cuenca del río Chinchiná, para la que se identificó el efecto de mantener, mejorar o recuperar los servicios hidrológicos de regulación y rendimiento hídrico, el cambio en la brecha oferta-demanda y el costo eficiencia para estrategias como inversiones ambientales, estrategias de uso eficiente y ahorro de agua, nuevas fuentes de abastecimiento y construcción de embalses. Esto mismo se realizó para la cuenca disturbada, correspondiente a la cuenca alta del río Chicamocha (en los municipios de Duitama y Paipa), debido a la escasez de agua que se experimenta en la prestación del servicio en algunos momentos del año.

A partir de estos dos casos de estudio, se planteó la “Guía para evaluación de inversiones para empresas de prestación de servicios de acueducto” que se desarrolla en este documento. Utilizando esta metodología, es posible evaluar, para cada estrategia planteada, el cambio en la brecha entre oferta y demanda, buscando asegurar la continuidad y cobertura del servicio público domiciliario de acueducto, y el costo – eficiencia de las inversiones, que pueden ser financiadas vía tarifa por el prestador del servicio público.

3. ASPECTOS GENERALES

Estudios previos en Colombia han aportado información relevante sobre los efectos de las acciones de protección y restauración en áreas de cuencas hidrográficas desde el punto de vista de la oferta hídrica en las fuentes de abastecimiento de sistemas de acueducto (Sáenz et al 2013, Cárdenas et al, 2017) o de los impactos negativos de la transformación de ecosistemas de cuencas proveedoras (Bouyaert et al, 2006). Menor atención, sin embargo, se ha prestado al análisis comparativo de los beneficios desde el punto de vista del marco tarifario, para el cual, es indispensable incorporar consideraciones de demanda y eficiencia económica comparativa de las inversiones ambientales (entiéndase en todo el documento como las obligatorias y las adicionales) respecto a otras alternativas o acciones complementarias disponibles para los prestadores del servicio domiciliario de acueducto.

A través de la metodología expuesta en este documento se pudo establecer un marco analítico para incorporar y comparar de manera objetiva los beneficios de las inversiones ambientales, algunas inversiones en infraestructura gris desde la perspectiva de los prestadores del servicio domiciliario de acueducto y medidas de uso eficiente y ahorro de agua. La descripción de las intervenciones tenidas en cuenta dentro de la metodología se describe en la Figura 1, considerando que se busca mantener el balance entre la oferta y la demanda, donde las inversiones ambientales (II) y las medidas de uso eficiente y ahorro de agua (III) están asociadas con la demanda y la nueva infraestructura (IV) con la oferta.

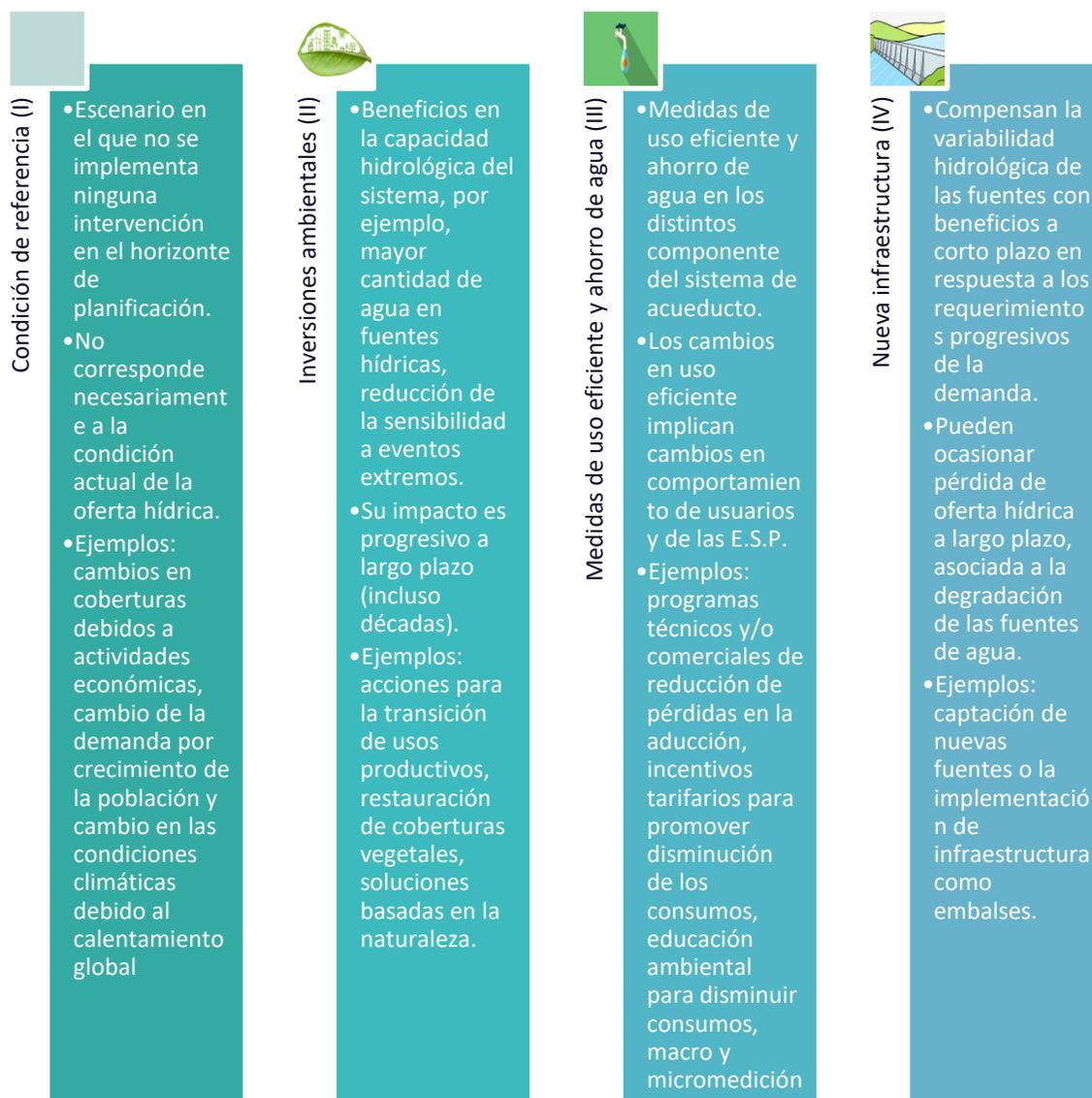


Figura 1. Posibles Intervenciones para garantizar la cobertura y continuidad del servicio de acueducto.

En la Figura 2. I se representa el sistema oferta-demanda en un sistema hidrológico. El sistema tiene una capacidad hidrológica que en el tiempo se disminuye debido a los cambios en el uso del suelo debidos a las actividades económicas, el efecto de las demandas concurrentes, y si es el caso, la disminución en la precipitación relacionada con el cambio y variabilidad climática aguas arriba del punto de análisis (i.e., punto de captación del acueducto). La demanda aumenta en el tiempo debido

al crecimiento de la población (Ver Figura 2. I). La brecha que se define en el tiempo t_0 como B_0 , se hace más pequeña hasta llegar en el tiempo t_0+T_c a un momento crítico donde la demanda excede la oferta y no puede cubrirse la demanda con la capacidad hidrológica del sistema.

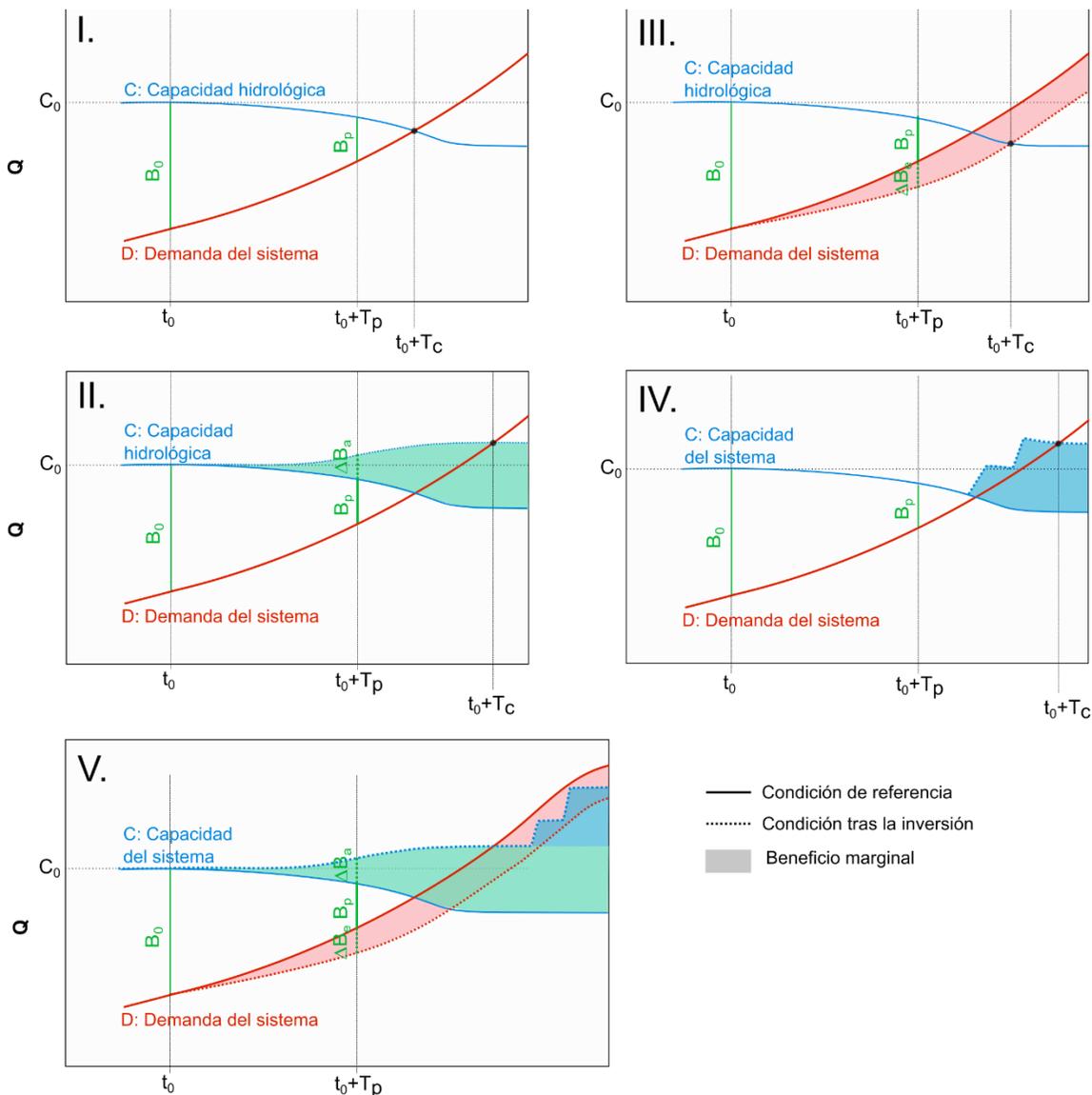


Figura 2 Comparación de los beneficios de diferentes tipos de inversiones en un sistema de abastecimiento de agua. (I). Condición de referencia (no hacer nada), (II) Inversiones ambientales (protección o restauración de fuentes, reconversión productiva), (III) Inversiones de eficiencia (i.e. reducción de pérdidas, reducción de los módulos de consumo), (IV) Inversiones en infraestructura para incrementar la oferta (fuentes complementarias, embalses, etc.) (V). Combinación de acciones

La Tabla 1 describe los impactos en la capacidad hidrológica tras la implementación de los diferentes tipos de inversiones.

Tabla 1. Impactos en la capacidad hidrológica de los diferentes tipos de inversiones.

Tipos de inversiones	Descripción
Inversiones ambientales (Figura 2. II)	La capacidad hidrológica aumenta, aumentando el caudal disponible y el tiempo donde la demanda sobrepasa la oferta también aumenta a un nuevo t_0+T_c
Inversiones de uso eficiente y ahorro de agua bajo el marco de los Programas de Uso Eficiente y Ahorro de Agua (PUEAA) (Figura 2. III)	El tiempo en que la demanda alcanza la capacidad hidrológica y se produce una escasez del recurso se desplaza hacia el lado derecho de la abscisa, hasta t_0+T_c , es decir, que se retrasa la ocurrencia de dicha escasez,
Inversiones de infraestructura para incrementar oferta (Figura 2. IV)	Se amplía la capacidad hidrológica del sistema y se desplaza el punto de equilibrio entre la demanda y la capacidad hidrológica a un tiempo t_0+T_c . En este caso, el efecto en el aumento de la capacidad hidrológica es inmediato, mientras que si se realizan las inversiones ambientales este aumento ocurre paulatinamente.
Combinación de acciones (Figura 2. V)	La capacidad hidrológica aumenta debido a las inversiones ambientales y la inclusión de nuevas fuentes de agua y construcción de embalses, y la demanda disminuye debido a la implementación de estrategias de uso eficiente y ahorro de agua y reducción de pérdidas, que implican una reducción en los rangos de consumo (esto ocurre en la realidad aunque en los modelos de los pilotos no se incluyó este componente). En consecuencia, el tiempo crítico (T_c) es más amplio que en los demás tipos de inversiones.

Como resultado de estos análisis, se plantean los siguientes indicadores para evaluar los tipos de inversiones:

- **Capacidad hidrológica (C):** Cantidad de agua que el sistema tiene disponible para el abastecimiento de agua por parte del prestador de servicio.
- **Demanda del sistema (D):** Cantidad de agua requerida por los usuarios adscritos al prestador de servicio de acueducto.
- **Brecha proyectada (B_p):** Indicador para caracterizar y comparar los diferentes tipos de acciones a partir de la brecha entre la capacidad de provisión de agua del acueducto en condición de caudal promedio y condición crítica o seca (Q_{95}) y la demanda de acueducto en el periodo proyectado. Permite establecer el nivel de seguridad con el que el sistema puede suplir la demanda proyectada en un horizonte de planificación de inversiones (T_p) e indicar la vulnerabilidad del sistema de acueducto por desabastecimiento en plazos posteriores al horizonte de planificación. De modo que, es un indicador de la continuidad de la prestación del servicio.
- **Cambio en el indicador de brecha (ΔB_p):** Indicador para medir el cambio que ocurre en la brecha proyectada entre un escenario de intervención y el escenario sin intervenciones. Este es independiente del tipo de medida o intervención en análisis (gestión de demanda u oferta) y permite comparar los beneficios de las inversiones en términos de unidades equivalentes

de capacidad o continuidad del sistema y asimilar los cambios en la oferta hídrica al horizonte de planificación. Al proporcionar unidades equivalentes de beneficio, permite implementar un Análisis de Costo Efectividad (ACE) para identificar la eficiencia relativa de los diferentes tipos de medidas.

4. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para la evaluación de intervenciones se basa en la aproximación XLRM (Purkey, 2018), el cual es un método de análisis conformado por cuatro componentes principales: Las incertidumbres exógenas (X), las estrategias de gestión (L), las relaciones o modelos (R) y las medidas de desempeño (M).

Las incertidumbres exógenas (X) están relacionadas con los factores inciertos pero que afectan el sistema hídrico *i.e.*, cambio climático o crecimiento de la población.

Las estrategias de gestión (L) constituyen las alternativas que los tomadores de decisiones consideran afectarán el estado del sistema, de tal forma que puedan mejorar o empeorar la situación actual después de su implementación.

Las relaciones o modelos (R) establecen los estados futuros como consecuencia de las estrategias seleccionadas e incertidumbres asociadas, a través de la simulación de escenarios en modelos calibrados para el estado actual.

Las medidas de desempeño (M) son indicadores que permiten evaluar y comparar entre estrategias (Lempert, et al., 2003). De esta forma, las decisiones sobre las intervenciones por realizar deberían tomarse comparando los indicadores, de tal forma que aquella que tiene mejor desempeño, debería ser la seleccionada

En la Figura 3 se presenta un esquema de la metodología propuesta. La metodología se propone por pasos, siguiendo la aproximación XLRM. En este capítulo se describen cada uno de los pasos incluidos en el esquema. En el desarrollo de cada uno de estos componentes se presenta en el recuadro como ejemplo la aplicación de la metodología en la cuenca del río Chinchiná.

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE INVERSIONES AMBIENTALES

PARA EMPRESAS
PRESTADORAS EMPRESAS DE
SERVICIOS DE ACUEDUCTO

13



Figura 3. Pasos para evaluar inversiones en un sistema de acueducto.

4.6. Paso 1: Recolección de información

Contar con información para la toma de decisiones permite por un lado entender cuál es el estado actual del sistema de provisión de agua y las demandas, y por otro lado proyectar a futuro que puede pasar si realizamos algunas inversiones respecto a la cuenca que aprovisiona el agua, el uso eficiente del agua y la infraestructura del sistema de prestación del servicio.

La información que se requiere para evaluar posibles alternativas de gestión de los recursos hídricos puede encontrarse en diferentes repositorios de información. En Colombia las instituciones públicas comparten la información a través de repositorios WEB o puede ser solicitada directamente. Algunos ejemplos de estos repositorios se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Fuentes de información en Colombia

Componente	Información requerida	Fuentes de información (ejemplos)
Oferta	<ol style="list-style-type: none"> 1. Caracterización del clima y caudales. 2. Cambio climático 3. Cartografía, Coberturas y Suelos 4. Caracterización de Acuíferos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Información climática, hidrométrica. DHIME (IDEAM) 2. Escenarios de cambio climático, acuíferos, suelos (Datos Abiertos IDEAM) 3. Información Cartográfica y suelos IGAC 4. IDEAM, Corporaciones Autónomas Ambientales Regionales (Cada uno tiene un portal WEB diferente, o debe solicitarse la información de forma escrita)
Demanda	Usuarios en la cuenca: agua superficial o subterránea Tipo de cultivos Crecimiento de la población	Demandas agua subterráneas (Datos Abiertos IDEAM) Demanda de agua (SIRH-IDEAM-requiere usuario) Crecimiento de la población (Censo Nacional de Población DANE, 2018) Cultivos y requerimiento (Censo Nacional Agropecuario DANE, 2014)
Estrategias de Gestión del agua	Intervenciones a ser evaluadas: Inversiones en infraestructura: nueva infraestructura y reducción de pérdidas. Inversiones en cambios de hábitos de consumo de agua Inversiones ambientales en cuencas: mantenimiento, restauración y protección de ecosistemas	Sistema de inversiones de agua potable y saneamiento (SINAS-Minvienda) Planes de saneamiento y manejo de vertimientos PSMV Planes de Uso Eficiente y Ahorro de Agua PUEAA Planes Maestros de Acueducto y Alcantarillado. PMAA

4.7. Paso 2: Caracterizar los agentes que modifican la oferta y la demanda

Las alteraciones que pueden afectar la oferta y la demanda en una cuenca hidrográfica están relacionadas con el crecimiento de población, el cambio de las actividades económicas que se desarrollan y las variaciones en el clima que se esperan sean más extremas debido al cambio climático.

4.7.2. Dinámica poblacional.

El crecimiento de la población genera impactos en las cuencas abastecedoras, debido a la necesidad de agua para suministrar a los habitantes tanto actuales como futuros. El crecimiento de la población puede calcularse a partir de los datos de los censos poblacionales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), proyectando la tendencia histórica o a través de métodos desarrollados para este fin como se compila en el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) i.e. Aritmético, Geométrico, Wappaus, Gráfico, Exponencial, Detallado por zonas o por densidades (MAVDT, 2003). Los valores de la población proyectada pueden variar ampliamente y no generan un pronóstico ni una predicción exacta pues el crecimiento de la población depende de la actividad social y económica que es dinámica. Debe considerarse la incertidumbre asociada a estas proyecciones, usando al menos el escenario más crítico que permita estimar la demanda de agua más alta en la cuenca.

Adicionalmente se deben analizar las actividades económicas en una región que pueden crecer y demandar mayor cantidad de agua en una cuenca hidrográfica, tanto por su actividad como por el crecimiento de la población asociado. Este cambio en la demanda puede producir un cambio en la cantidad de agua disponible y afectar al prestador de servicios de acueducto y a los otros usuarios en la cuenca. Para incorporar esta incertidumbre se recomienda analizar el crecimiento de las actividades económicas predominantes en la cuenca y determinar futuras demandas del agua, tanto en el sistema de acueducto por el incremento de la población migrante como por el uso de agua para la actividad específica.

POBLACION FUTURA EN LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y VILLAMARIA

Para esta incertidumbre, en la cuenca del río Chinchiná se plantearon dos suposiciones la primera considera la tasa de crecimiento anual histórica y la segunda la tasa de crecimiento proyectada por el DANE (DANE, 2005) usando una proyección geométrica como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 3. Crecimiento poblacional para la cuenca del río Chinchiná.

Cabecera municipal	TAC Alto (Histórico)	TAC Bajo (proyección futura)
Manizales	0.83%	0.32%
Villamaría	2.12%	1.75%

4.7.3. Cambio Climático.

La oferta del recurso hídrico depende de las características propias biofísicas entre las que se encuentra el clima. La precipitación y la temperatura presentan patrones de variabilidad con diversas escalas temporales i.e., diario, mensual, anual, decadal y por diversos fenómenos como el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). El cambio climático puede alterar tanto las condiciones medias de algunas variables relacionadas con el clima como la temperatura y la precipitación, así como los eventos extremos, exacerbando las condiciones que generan eventos amenazantes. Este tipo de

variaciones puede producir condiciones más críticas de vulnerabilidad frente al desabastecimiento para las comunidades. Los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto deben considerar la incertidumbre asociada con futuras condiciones del clima cambiante para mejorar la toma de sus decisiones y asegurar que pueden contar con el recurso.

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO USADOS EN LA CUENCA DEL RIO CHINCHINA
Para el análisis del clima más crítico futuro en la cuenca del río Chinchiná se analizaron los escenarios de cambio climático generados por el proyecto PARA-Agua en el año 2014 y el escenario promedio definido por el IDEAM en el marco de la Tercera Comunicación Nacional (IDEAM, 2016). El primer método consiste en una reducción de escala de Modelos Climáticos Globales (GCM) con método estadístico no paramétrico. Como resultado se obtuvo que existe probabilidad de aumento de los caudales hasta un 22% en los periodos secos y en el caudal medio de 20%. También se analizaron los escenarios de cambio climático proyectados por el IDEAM para el año 2011-2040 en el marco de la Tercera Comunicación Nacional y se observa un aumento en la precipitación media entre 11 y 40% en la cuenca del río Chinchiná, mostrando condiciones futuras menos críticas respecto a la oferta del agua que analizando el clima histórico. Para simular el clima histórico las series temporales medidas a través de los último 30 años se usan sin alteraciones como proyecciones del clima futuro. Por lo tanto, se analizan las estrategias considerando el clima histórico que resulta ser más crítico que el esperado debido al cambio climático en los diferentes escenarios.

4.8. Paso 3. Elaboración de Modelos para la simulación de la dinámica hídrica en la cuenca.

Determinar la disponibilidad del agua es una tarea compleja, debido a los diversos factores que determinan la dinámica de la oferta natural y los múltiples usuarios que demandan el recurso. Los modelos pueden ayudar a describir cada componente en este sistema, así como sus relaciones intrínsecas. En la presente metodología se utilizó la herramienta Water Evaluation and Planning system WEAP (www.weap21.org), que es una plataforma computacional para la modelación integrada de los factores biofísicos y socioeconómicos que determinan la disponibilidad espacial y temporal de agua en una cuenca (Yates, Sieber, et al., 2005a).

Los factores relacionados con el sistema biofísico son los que determinan la oferta de agua y su movimiento a través de una cuenca, es decir, el clima, la topografía, cobertura vegetal, la hidrología de aguas superficiales y subterráneas y los suelos.

Los factores relacionados con el sistema socioeconómico están asociados principalmente a la demanda de agua y determinan cómo se almacena, asigna y entrega el agua disponible, dentro y/o entre cuencas hidrográficas.

En WEAP la cuenca es representada como un conjunto de unidades de análisis hidrológico o *catchments*. Los balances hídricos se ejecutan a nivel de cada unidad y posteriormente se integran a través de la red de drenaje. Por lo tanto, es posible establecer los efectos acumulativos de intervenciones ubicadas aguas arriba en cualquier punto de la cuenca. En esta metodología se utiliza la herramienta WEAP para realizar una evaluación integral de las diversas soluciones que permiten a un prestador de servicio público de acueducto contar con el recurso para asegurar la calidad y eficiencia del servicio.

El balance hídrico de las cuencas de suministro de agua fue modelada con “Soil Moisture Model-SMM” de WEAP (Yates, Sieber, et al., 2005b). El SMM es un modelo semidistribuido y está conceptualizado en dos capas, una que representa la capa de suelo donde se encuentran las raíces de la vegetación y la otra que corresponde a la zona profunda del suelo. Los componentes considerados en el balance son típicos de la hidrología como la precipitación, evapotranspiración, la percolación, flujo superficial, interflujo, y flujo base. El modelo requiere de una parametrización para su correspondiente calibración que suele hacerse a partir de información sobre la cobertura de la tierra y del suelo de la cuenca.

MODELO DE GESTIÓN USADO E INFORMACIÓN REQUERIDA EN LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINA

Para el caso de estudio de la cuenca del río Chinchiná el SEI desarrolló un modelo de gestión WEAP para el periodo histórico 1990-2010 a paso de tiempo mensual, que contiene módulos de hidrología, glaciares, demanda para consumo humano y doméstico, y demanda de agua para la generación hidroeléctrica. La unidad de respuesta hidrológica ha sido delimitada con la base de datos geográfica del Plan de Manejo y Ordenación de la cuenca Chinchiná (POMCA) donde se cuenta con información de capas de microcuencas, Modelo de Elevación Digital MED (DEM por su sigla en inglés), puntos de captación, y cobertura y uso de la tierra. La escala de las entidades geográficas utilizadas es 1:25.000. En el caso de la cobertura y uso de la tierra se considera cada subclase de Corine Land Cover.

En el POMCA, en la sección de diagnóstico, existe información de variables climáticas para el periodo 1981-2010, las variables que aborda son precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar. Esta información además tiene una buena distribución espacial en la cuenca, en cuanto a la ubicación de las estaciones meteorológicas se refiere. Esta información y base de datos fue la fuente principal para la modelación hidrológica en WEAP. La regionalización de la precipitación para cada unidad de respuesta hidrológica se realizó con el uso del mapa de isoyetas generado en el POMCA. Para la regionalización de otras variables como la temperatura se realizó un análisis de correlación lineal entre la temperatura y la altitud. Mediante esta correlación se obtuvo un gradiente térmico vertical de $-0.59^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Otras fuentes de información se resumen en la Figura 4.

Demanda de agua para consumo humano y doméstico	Demanda de agua para generación hidroeléctrica	Otra información
<ul style="list-style-type: none"> •Cantidad de población en las cabeceras municipales (DANE) •Uso promedio per cápita (Aguas de Manizalez, EMPOCALDAS, AQUAMANÁ y POMCA) •Puntos de captación y microcuencas abastecedoras (POMCA) •Concesiones de agua para acueductos (CORPOCALDAS, Aguas de Manizalez, EMPOCALDAS, AQUAMANÁ) •Pérdidas en la captación y la aducción (Aguas de Manizalez EMPOCALDAS y AQUAMANÁ) 	<ul style="list-style-type: none"> •Concesiones de agua y puntos de captación (POMCA y CORPOCALDAS) •Características de las centrales hidroeléctricas (CHEC y POMCA) 	<ul style="list-style-type: none"> •Datos sobre cobertura y tipo de suelo para parametrización del modelo. •Datos para actualización de demanda de agua.

Figura 4. Información del modelo hidrológico WEAP.

4.9. Paso 4: Definir estrategias de gestión del agua para la cuenca

Las estrategias de gestión constituyen todas aquellas alternativas que permitan manejar tanto la oferta como la demanda de agua en una cuenca. Para este estudio, las estrategias de gestión son definidas desde la visión del prestador del servicio público domiciliario de acueducto, quien busca contar con disponibilidad del recurso hídrico de buena calidad de tal forma que el servicio pueda prestarse continuamente a sus suscriptores.

La definición de las estrategias de gestión del agua para la cuenca se realiza de forma conjunta con los actores interesados en el recurso hídrico en cada una de las cuencas en análisis. Algunos actores clave a considerar son las Empresa Prestadoras de Servicios (ESP), Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), Alcaldías Municipales y Gobernaciones. Vale la pena resaltar que muchas de

estas estrategias pueden estar previamente identificadas en otros instrumentos de planificación como los Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas POMCA, Planes de Uso Eficiente y Ahorro del Agua PUEAA, Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos PSMV, Planes de ordenamiento Territorial POT, Planes de gestión de las instituciones. A través de un ejercicio participativo con los diferentes actores, pueden identificarse las estrategias de gestión del agua que se consideran relevantes en la región para garantizar la prestación del servicio de acueducto incluyendo inversiones ambientales. La suma de esfuerzos de los actores en la cuenca hidrográfica de donde se toma el agua para la prestación del servicio, beneficiará a los diferentes usuarios concurrentes en la cuenca.

En este sentido, se incluyen estrategias para mejorar la *oferta hídrica y su regulación*, como la conservación y restauración de ecosistemas, estrategias en *infraestructura gris* como construcción de embalses que buscan garantizar la oferta en diversos periodos del año, y estrategias de *gestión de la demanda*, donde a través de disminución de pérdidas de agua en la captación y aducción, así como el uso eficiente y ahorro de agua pueden lograrse disminuciones en la demanda y mejorar la continuidad del servicio.

Una vez se define las estrategias, se realizan simulaciones en el modelo de gestión de los recursos hídricos. Las estrategias se comparan con la línea base o condición actual y con la proyección a 30 años incluyendo el crecimiento de la población en las cuencas, el desarrollo económico y el cambio en el clima, sin realizar inversiones ambientales en conservación, restauración o reconversión para mejorar los sistemas productivos. Este escenario muestra la condición más crítica, suponiendo que estas condiciones de desarrollo demandarán más agua en una cuenca que se está desgradando por el uso de los recursos naturales.

ESTRATEGIAS ESCOGIDAS EN LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINA.

El caso de estudio de la cuenca del río Chinchiná contempló 8 escenarios relacionados con los tipos de intervenciones a implementar. El primer escenario es la línea base, donde el estado actual y proyectado de la cuenca se analiza, sin realizar más intervenciones ambientales en la cuenca, incluyendo su degradación debido a las actividades económicas. El segundo escenario considera hipotéticamente que pasaría en la cuenca si no hubiera sido intervenida con medidas de protección de ecosistemas (sin inversiones previas) y proyectando la degradación de la cuenca. El tercer escenario corresponde a las inversiones ambientales de VivoCuenca, el cuarto contempla las inversiones del Plan de Restauración Nacional y el quinto escenario prácticas asociadas a la reconversión de prácticas agrícolas, los cuales se pueden catalogar en general como inversiones ambientales adicionales, de modo que, se pueda incluir dentro de la tarifa. En términos de estrategias asociadas con la demanda y su magnitud, se tiene el sexto escenario referente a la reducción de pérdidas en la captación y aducción, el séptimo que considera medidas para uso eficiente del agua (considerando también la instalación de macromedidores) y reducción del consumo (a través de campañas que promueven un consumo eficiente y consciente) y el octavo que incorpora nueva infraestructura. La Figura 5 resume las condiciones especiales de cada uno de los escenarios.



Figura 5. Detalle de los escenarios de intervención en la cuenca del río Chinchiná.

4.10. Paso 5. Evaluar estrategias a partir de indicadores

Los indicadores de desempeño permiten analizar y comparar el desempeño entre las diferentes acciones con el estado actual de la cuenca y en el evento que no se hubiera desarrollado ninguna acción de conservación de ecosistemas. Para este proyecto se definen tres indicadores para ser calculados en condiciones de caudal medio y para un caudal igualado o excedido el 95% del tiempo (condición seca, Q95): 1. La oferta, 2. La brecha entre la oferta y la demanda y 3. Eficiencia en las inversiones para garantizar la continuidad del servicio de acueducto:

Tabla 1. Oferta: La oferta se refiere a la suma del caudal disponible en las fuentes abastecedoras proyectado en un horizonte de 30 años. Este indicador permite establecer el cambio respecto a la oferta de agua en condición media y seca, mostrando los efectos de las inversiones en la regulación hídrica.

Tabla 2. Brecha: La brecha muestra la diferencia entre oferta y la demanda (disponibilidad) para cada estrategia, comparada con el escenario sin realizar acciones (disponibilidad marginal). El indicador permite establecer el beneficio de la estrategia en términos de la disponibilidad de agua. Para el caudal medio garantiza la cobertura del servicio (de los suscriptores de hoy proyectados a futuro), para el caudal bajo significa la continuidad, al incorporar los efectos de la variabilidad climática y las condiciones críticas de caudal bajo para la prestación del servicio.

Tabla 3. Eficiencia de las inversiones para garantizar la continuidad del servicio de acueducto: La eficiencia se refiere a la relación entre el costo de cada estrategia sobre su beneficio en términos de la brecha (diferencia oferta-demanda). Este indicador permite a las ESP comparar entre estrategias y priorizar acciones de acuerdo con su impacto respecto a garantizar la cobertura y la continuidad del servicio público domiciliario de acueducto.

En la

Tabla 4 se define cada indicador y su método de cálculo. Los análisis se realizan en el horizonte de planificación, correspondiente a 30 años. Se toma este periodo debido a dos razones fundamentales:

- 3 De acuerdo con estudios previos, en 30 años puede recuperarse un bosque de niebla en mosaicos en Latinoamérica, consistentes en una mezcla de áreas limpias, bosques secundarios y parches limitados residuales de bosques primarios (Rey_Benayas, et al., 2005).
- 4 Cuando se calcula el valor anualizado de las inversiones, en 30 años se observa que el pago anual no cambia drásticamente al proyectarse con un mayor horizonte de tiempo.

Tabla 4. Indicadores para evaluar el comportamiento de cada estrategia, al horizonte de planificación

Indicador	Definición	Ecuación del indicador
Oferta media Q_m	Sumatoria del caudal medio diario en las fuentes abastecedoras q_i para cada municipio.	$Q_m = \sum_i^n q_i$
Oferta 95% Q_{95}	Sumatoria del caudal igualado o excedido diario multianual en las fuentes abastecedoras q_{i95} para cada municipio.	$Q_{95} = \sum_i^n q_{i95}$
Brecha cobertura ΔB_m	Diferencia entre la capacidad hidrológica media de la acción definido como caudal medio Q_{mi} y la demanda debida a la acción D_i , y la capacidad hidrológica media del escenario sin hacer inversiones (caudal medio) Q_{m0} y la demanda sin inversiones D_0	$\Delta B_m = (Q_{mi} - D_i) - (Q_{m0} - D_0)$
Brecha confiabilidad ΔB_{95}	Diferencia entre el caudal igualado o excedido el 95% del tiempo de la acción Q_{95i} (caudal de estiaje) y la demanda de la acción D_i menos la diferencia entre el caudal igualado o excedido el 95% del tiempo del escenario sin hacer inversiones Q_{95-0} y la Demanda sin inversiones D_0	$\Delta B_{95} = (Q_{95i} - D_i) - (Q_{95-0} - D_0)$
Eficiencia de las inversiones para garantizar la cobertura del sistema $ECob$	Relación entre el costo de la implementación de cada estrategia $C\$$ y la brecha de la cobertura ΔB_m	$ECob = \frac{C\$}{\Delta B_m}$
Eficiencia de las inversiones para garantizar la confiabilidad del sistema $EConf$	Relación entre el costo de la implementación de cada estrategia $C\$$ y la brecha de la confiabilidad ΔB_{95}	$EConf = \frac{C\$}{\Delta B_{95}}$

RESULTADOS DE INDICADORES EN LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ

Indicador 1: Regulación hídrica: Oferta media y en condiciones de estiaje (Q95)

Los indicadores fueron estimados desde el modelo WEAP de la cuenca del río Chinchiná para un horizonte prospectivo de 30 años. Se presentan únicamente los resultados de clima histórico proyectado a futuro por ser el más crítico de los simulados (Figura 7). Los escenarios de cambio climático en esta cuenca estiman un aumento en la precipitación, escenario que sería menos crítico que el histórico.

En la Figura 7 pueden observarse los caudales obtenidos de las simulaciones para cada uno de los escenarios incluidos en este análisis. Se puede ver que las acciones relacionadas con la protección o restauración de ecosistemas tienen menos picos *i.e.*, caudal mínimo y máximo con menor intensidad, que las acciones del escenario *sin inversiones previas*. Las inversiones ambientales permiten mejorar la regulación hídrica del sistema, almacenando agua en el suelo y vegetación. Como consecuencia, la oferta hídrica en la cuenca aumenta cuando se realizan inversiones en infraestructura verde en condiciones críticas (e.g., sequía).

Las acciones que están relacionadas con inversiones ambientales como VivoCuenca y el Plan de Restauración Nacional (PRN) contribuyen a mejorar las condiciones ambientales de la cuenca, lo cual incide en la capacidad hidrológica. En la Figura 6 se puede observar que, por ejemplo, para la condición *sin inversiones previas* existe un incremento del caudal en la época más lluviosa en comparación con la *línea base*, y una reducción en la época menos lluviosa. Caso contrario ocurre en el escenario donde se considera las acciones como VivoCuenca y PRN, donde existe una reducción de caudales en época más lluviosa e incremento en la menos lluviosa.



Figura 6. Caudal medio diario de las cuencas abastecedoras bajo diferentes estrategias

En la Figura 7. Cambio proyectado a 2050 en el caudal medio anual. Figura 7, se observa el cambio en la caudal en la fuentes abastecedoras en el año 2050 para todas acciones simuladas en el modelos WEAP. Como resultado se observa que se espera un aumento en el caudal medio disponible en los ríos, debido a las acciones de restauración definidas por el Fondo Vivo Cuenca, el

Plan Nacional de Restauración y por la reconversión de prácticas agrícolas, que se espera mejoren la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

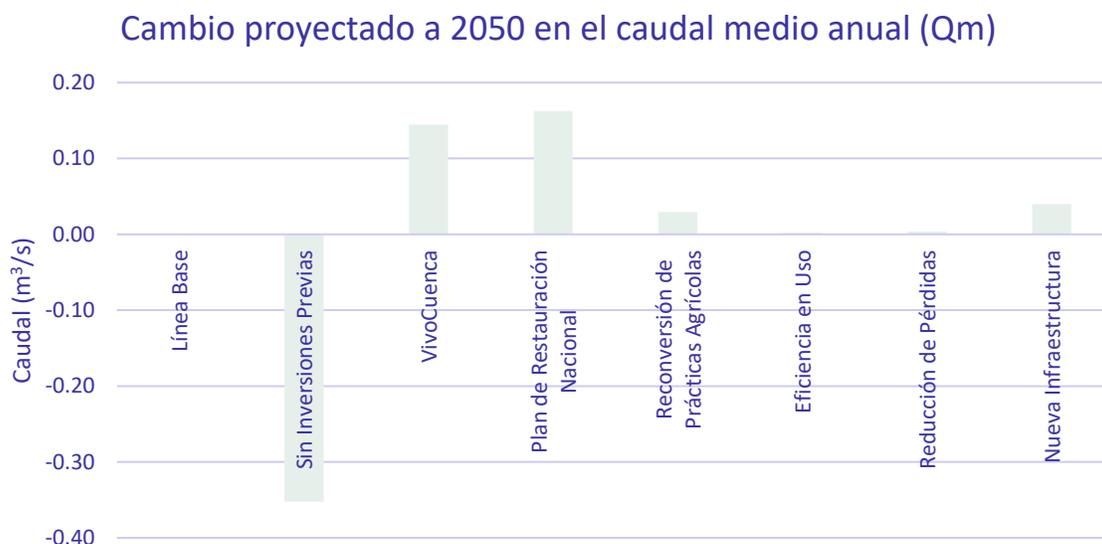


Figura 7. Cambio proyectado a 2050 en el caudal medio anual

Otro indicador importante para analizar es el Q95 debido a que muestra el caudal igualado o excedido el 95% del tiempo, es decir, el caudal esperado en condiciones críticas de estiaje. En la Figura 8 se muestra para cada acción el caudal igualado o excedido el 95% del tiempo en condiciones de clima histórico. Los resultados indican que con las inversiones ambientales se podría incrementar hasta en 0.45 m³/s respecto a la *línea base*. *Sin inversiones previas* el Q95 se podría haber reducido hasta en 1.97 m³/s en comparación a la condición actual. Lo anterior significar una diferencia de 1.58 m³/s entre el caudal sin inversiones ambientales previas y el caudal esperado por implementar el Plan Nacional de Restauración.



Figura 8. Q95 en cuencas abastecedoras para diferentes escenarios de acción

Puede observarse en la Figura 9 que, si no se hubieran realizado las acciones de conservación de vegetación en el escenario *sin inversiones previas* en la cuenca, el caudal en épocas de estiaje disponible se disminuiría en 1.13 m³/s. Gracias a estas inversiones anteriores, se cuenta con el caudal actual disponible para suministrar el servicio público domiciliario de acueducto a los municipios ubicados en esta cuenca (Manizales y Villamaría). Si se realizan mayores inversiones en restauración y/o conservación de ecosistemas se aumentará la oferta hídrica en estiaje hasta 0.45 m³/s. Las inversiones en infraestructura gris no presentarán un aumento en el caudal de estiaje disponible, esto se debe a que se está analizando los caudales disponibles en los ríos, no el caudal que se va a utilizar en el acueducto. De modo que, se asegura que se tenga suficiente agua en el río para satisfacer la demanda.

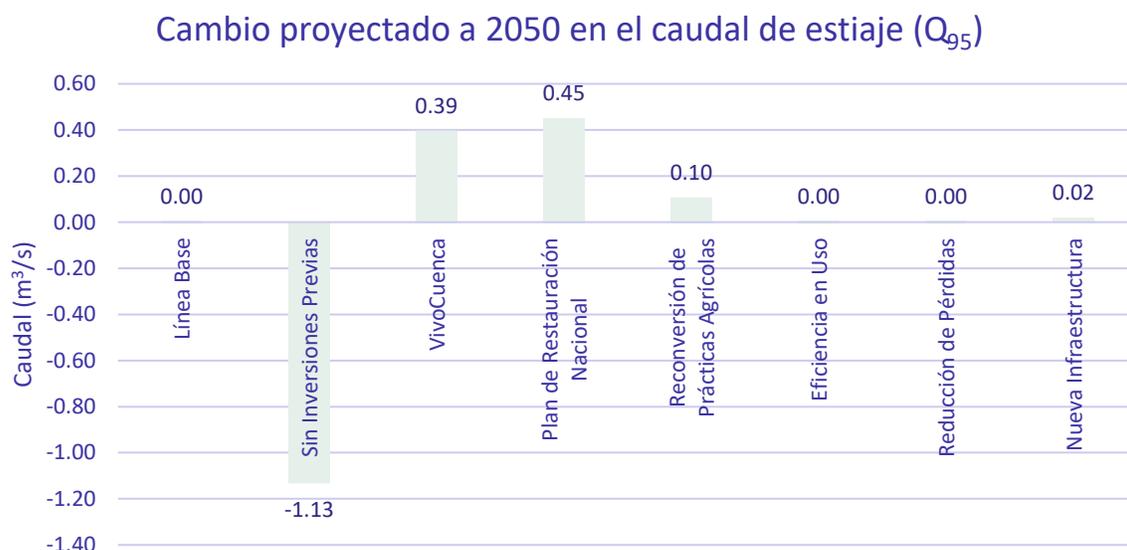


Figura 9. Cambio proyectado a 2050 en el caudal de estiaje.

Indicador 2. Brecha entre oferta y demanda para garantizar la cobertura y continuidad en la prestación del servicio de acueducto

Este indicador considera la diferencia entre la capacidad del sistema hidrológico en ofertar agua y la demanda de agua. La oferta está dada en el caso de cobertura por el caudal medio Q_m de las fuentes abastecedoras y para determinar la continuidad por el caudal igualado o excedido el 95% del tiempo Q_{95} , correspondiente a condiciones secas. La demanda proyectada hasta el año 2050 para las acciones que no intervienen en la gestión de la demanda de agua es 1.41 m³/s, en el caso de *uso eficiente de agua* es 1.27 m³/s y para *reducción de pérdidas* es 1.04 m³/s. El delta de la brecha - ΔB_p , calculado como la diferencia entre la brecha para cada estrategia menos la brecha de referencia (escenario de condición actual proyectado a 2050) se presenta en la Tabla 5.

Respecto a la continuidad del sistema Q_{95} (B_{95}), para la mayoría de las acciones existe un incremento en la brecha excepto en la estrategia *sin inversiones previas*. Dicho incremento es favorable ya que se incrementa la diferencia entre oferta y demanda, el cual fluctúa entre 0.02 y 0.45 m³/s donde los valores más altos corresponden a las acciones que contemplan inversiones ambientales (VivoCuenca y Plan de Restauración Nacional) y reducción de pérdidas en la captación

y aducción. En caso de la brecha estimada para determinar la cobertura del sistema Q_m (B_m), los resultados indican también un incremento a excepción de la estrategia *sin inversiones previas*, y la acción que tiene el valor más alto es la correspondiente a la estrategia de *reducción de pérdidas*.

Tabla 5. Análisis del indicador de Brecha para diferentes escenarios de acción, respecto a la condición actual proyectada a 2050

Acción		B_{95}	B_m	ΔB_{95}	ΔB_m	
	Escenario Base	1. Referencia (Condición actual)	1.69	6.06		
		2. Sin Inversiones Previas	0.56	5.71	-1.13	-0.35
A	Inversiones Ambientales	3. VivoCuenca	2.08	6.21	0.39	0.14
		4. Plan de Restauración Nacional	2.14	6.22	0.45	0.16
		5. Reconversión Prácticas Agrícolas	1.79	6.09	0.10	0.03
B	Gestión de la demanda	6. Eficiencia en Uso	1.83	6.20	0.14	0.14
		7. Reducción de Pérdidas captación y aducción	2.07	6.44	0.38	0.37
		8. Incorporación de nuevas fuentes	1.71	6.10	0.02	0.04

En la Tabla 5 las estrategias agrupadas con la letra A: 3, 4, 5 se refieren a acciones de conservación y preservación en el área donde se localizan las captaciones del sistema de acueducto. Las estrategias agrupadas con la letra B: 6, 7, 8 están relacionadas con uso racional y eficiente del agua o gestión de la demanda o redundancia, es decir, invertir en otra captación a una fuente adicional de agua.

De acuerdo con los resultados de la brecha obtenida en la condición de referencia (1.69) comparada con la brecha *sin inversiones previas* (0.56), es posible concluir que las inversiones ambientales realizadas en años anteriores por los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto han permitido garantizar la disponibilidad de agua y disminuir la vulnerabilidad de sistema al desabastecimiento, ya que el valor de la brecha en la condición de referencia es mayor, así como las inversiones ambientales previas realizadas por CHEK (generadora de hidroenergía), los municipios y las plataformas colaborativas. El delta de la brecha para la condición de estiaje ΔB_{95} y para caudal medio ΔB_m que presenta mayor beneficio, es decir mayor caudal disponible es la estrategia Plan Nacional de restauración De modo que, la realización de las inversiones ambientales generaría los mayores impactos para cumplir con los estándares de prestación del servicio *i.e.*; cobertura y continuidad

Indicador 3. Análisis de costo-efectividad

Los resultados del Análisis Costo-Efectividad (ACE) se muestran en la Figura 10, los cuales indican que las acciones de *uso eficiente de agua* y *reducción de pérdidas en la captación y la aducción* tienen menores valores del delta de la brecha en estiaje (ΔB_{95}) en comparación con otras acciones, es decir, producen beneficios considerables a un menor costo. Cabe mencionar que la acción con el valor más alto es *reconversión de prácticas agrícolas* (1462.04 M\$/hm³).

En general, para el caso del delta de la brecha para estiaje (ΔB_{95}), las acciones de gestión de demanda (*uso eficiente del agua* y *reducción de pérdidas en la captación y la aducción*) resultan ser más favorables desde el punto de vista del costo-efectividad. Las inversiones ambientales como VivoCuenca y Plan de Restauración Nacional tienen un indicador de costo-efectividad similar a *nueva infraestructura*.

La diferencia $\Delta C-E$ entre el costo-eficiencia de las inversiones para mejorar el servicio como es el *uso eficiente de agua* o la *reducción de pérdidas en la captación y la aducción* con los costos

asociados a las obras de infraestructura verde como son las acciones de restauración propuestas por VivoCuenca o el Plan de Restauración Nacional, deberían ser cubiertas de forma concurrente con los otros usuarios del agua quienes se beneficiarían por las inversiones realizadas. Para el caso de Chinchiná la CHEC ha hecho parte de estas inversiones y recibe los beneficios contando con agua suficiente para sus actividades.

En el caso contrario, cuando las inversiones ambientales tienen mayor costo-efectividad, se justifica su inclusión en la tarifa a cobrar a los suscriptores del servicio público domiciliario de acueducto, pues los suscriptores se van a beneficiar directamente de las inversiones.

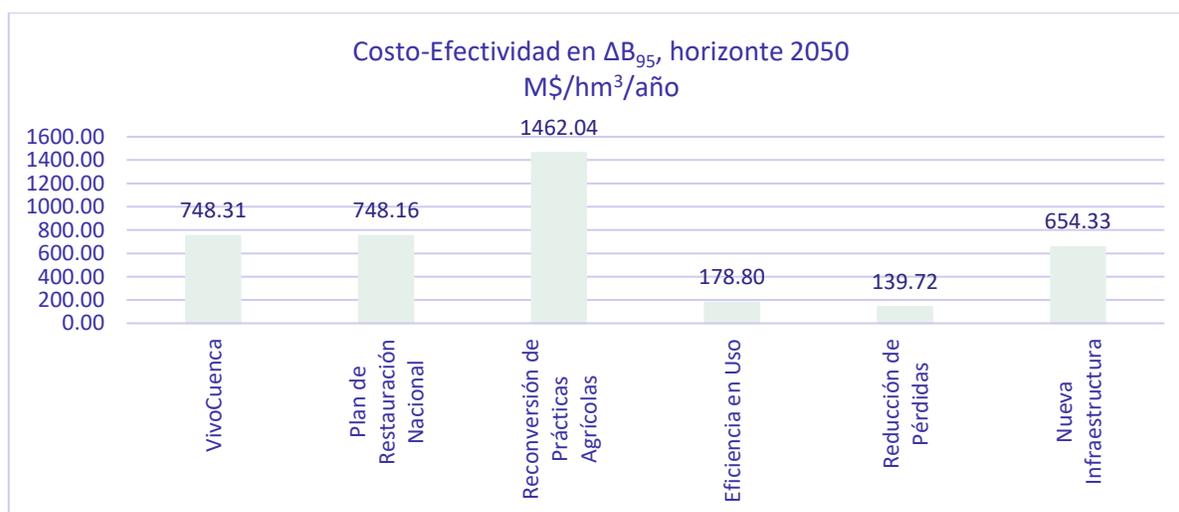


Figura 10. Costo-Efectividad de acciones en ($M\$/hm^3$) para ΔB_{95}

5 ANALISIS DEL MARCO REGULATORIO RELACIONADO CON LAS INVERSIONES AMBIENTALES ADICIONALES

En este capítulo se describe la normatividad existente que se relaciona con las Inversiones Ambientales Adicionales. Es importante considerar este marco regulatorio más amplio debido a que en este tema se integran el sector ambiental, que busca proteger los ecosistemas de las cuencas para garantizar sus servicios ecosistémicos, y el sector vivienda, que busca asegurar la prestación del servicio de acueducto y sus principios de cobertura, continuidad y eficiencia.

La Ley 99 de 1993 reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, bajo la cual se desarrolla la articulación del componente regulatorio ambiental de los prestadores de servicios. Existe también el artículo 164 de la Ley 142 de 1994, Ley marco en materia de servicios públicos domiciliarios (como el acueducto), que establece que las fórmulas tarifarias de los servicios de acueducto y alcantarillado incorporarán elementos que garanticen el cubrimiento de los costos de protección de las cuencas y fuentes de agua, transporte y tratamiento del recurso hídrico. Estos instrumentos legales tienen el objetivo de fortalecer el componente de las inversiones ambientales adicionales para los prestadores del servicio de acueducto, a partir de la inclusión de dos sectores: el ambiental, relativo a la conservación de estos activos naturales, y el sector agua, sobre la prestación del servicio y la tarifa.

La Resolución CRA 907 de 2019, regula la inclusión en la tarifa a cobrar a los suscriptores de los costos por las inversiones ambientales adicionales (IAA) para la protección de cuencas y fuentes de

agua por parte de los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto con el objetivo principal de disminuir la vulnerabilidad asociada al desabastecimiento de los sistemas de acueducto. Este marco regulatorio se enfoca en proporcionar a los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto siete posibles inversiones ambientales donde se pueden realizar las IAA y que se podría implementar desde el año 2019. Sin embargo, la Resolución CRA 923 de 2020 modificó el período de aplicación de las IAA señalando que los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto que decidan aplicarlas podrán hacerlo a partir del 1ro de julio de 2021 respecto a los costos reales incurridos entre el 1ro de enero y 30 de junio de 2020 y el 1ro de enero al 30 de junio de 2021.

Los tipos de IAA han sido definidos por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio MVCT a través de la Resolución 874 de 2018, así: i) compra y aislamiento de predios; ii) proyectos para la recarga de acuíferos; iii) restauración; iv) protección y recuperación de rondas de cuencas y fuentes abastecedoras de agua; v) monitoreo del recurso hídrico; y vi) pagos por servicios ambientales (PSA) de regulación y calidad hídrica. En la Tabla 6. Articulación del marco regulatorio para las IAA Tabla 6 se presentan las IAA y su marco regulatorio.

Tabla 6. Articulación del marco regulatorio para las IAA

Tipo IAA	Marco regulatorio
Protección de rondas	<i>En este tipo de inversión se incluyen varias actividades como: alindar zonas, crear reservas, restringir y prohibir usos y actividades, donde el Estado es dueño de los ríos y sus linderos (Decreto 1076 de 2015, Ley 1450 de 2011). Los aspectos técnicos del acotamiento de rondas, así como la priorización de estas por parte de las autoridades ambientales pueden ser consultados en la Resolución 957 de 2018.</i>
PSA y calidad del agua	<p><i>Los incentivos de los PSA basados en el costo de oportunidad, son definidos en el Decreto 953 de 2013, así como los mecanismos para articular las fuentes de financiación para la conservación de estas áreas estratégicas (Decreto 1076 de 2015). Las áreas definidas por autoridad objeto PSA deben suscribir un acuerdo voluntario con los propietarios.</i></p> <p><i>Para aquellas áreas que no estén registradas en las zonas prioritarias para implementar esta inversión, se deberá realizar los trámites para que esta área reciba el aval de la autoridad a partir de lo establecido en Decreto 1076 de 2015, Decreto 870 de 2017 (PSA y otros incentivos a la conservación), Decreto 1007 de 2018 (información para proyectos en diseño o implementados de PSA).</i></p>
Restauración*	<p><i>Cada autoridad ambiental tiene una competencia frente a la restauración, así como herramientas para la planeación y articulación con base en la Plan Nacional de Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Degradadas (PNR, 2015).</i></p> <p><i>Dentro de las actividades del PNR se encuentra: aislamiento de áreas degradadas, enriquecimiento de bosque, núcleos de vegetación en áreas abiertas, barreras en bordes de bosque, franjas protectoras de cuerpos de agua, corredores de conectividad, sistemas agroforestales y silvopastoriles, restauración pasiva en páramos y trabajo con las comunidades.</i></p>

Tipo IAA	Marco regulatorio
	<p>De esta forma, la IAA de compra y aislamiento de predios juega un rol importante en la PNR, toda vez que deben declararse áreas protegidas (Decreto 1076 de 1995 y Resolución 97 de 2017). Además, que estas áreas son de especial interés para los acueductos, ya que pueden tener el potencial de suministrar agua (Ley 1450 de 2011) o la adquisición de predios para su mantenimiento, desarrollo de obras de acueducto o para financiar esquemas de pago por servicios ambientales (Ley 99 de 1993) conforme a los reglas y lineamientos definidos en el Decreto 953 de 2013.</p>
Monitoreo	<p>El monitoreo es quizás la única inversión que permite realizar control, seguimiento y evaluación a las demás inversiones, y poder estimar sus efectos sobre el ecosistema en términos de los cambios en los flujos de materia y energía. Esta inversión apoya el desarrollo de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) (Decreto 1076 de 2015), Planes de Manejo Ambiental de una Microcuenca (PMAM), Programas de Uso Eficiente y Ahorro del agua (PUEAA, Decreto 1090 de 2018). Esta actividad es fundamental en seguimiento al estado de los páramos y a su gestión integral conforme a la Ley 1930 de 2018 y que su financiación está definida en el Decreto 644 de 2021.</p> <p>Así la información recolectada por el monitoreo hace parte de los Sistema de Información del Recurso Hídrico (Decreto 1323 de 2007) y que insumo para determinar las relaciones oferta – demanda (como los acueductos).</p>
Agua subterránea	<p>En los POMCA (Decreto 1076 de 2015) las autoridades ambientales pueden realizar la planeación de los acuíferos, pero si no están definidos en este instrumento, se elabora el plan de manejo ambiental de acuíferos que debe considerar las zonas de recarga establecidas en Ley 99 del 1993 y deberán estar articuladas dentro de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT).</p>
Infraestructura	<p>Este tipo de inversión está relacionado con varias de las otras IAA, ya que, por lo general, parte de los proyectos que se desarrollan tiene un componente de infraestructura (es decir, instalaciones, servicios y medios técnicos). Las IAA se pueden potenciar combinando infraestructura verde (es decir, sistemas que imitan procesos de transporte, almacenamiento y tratamiento como la naturaleza) con infraestructura tradicional (es decir, sistemas de conducción, de tratamiento convencional). Al respecto, PUEAA es una herramienta que permite el desarrollo de estas dos alternativas de infraestructura (Decreto 1090 de 2018). No solamente en términos de agua se pueden usar estos tipos de infraestructura sino también en los procesos de restauración (e.g., mejoramiento del suelo, cobertura), ya que se requieren de obras menores, implementación de tecnología o capacitar personas para la ejecución de los proyectos.</p>

* Compra y aislamiento de predios

Los proyectos que los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto (pequeños o grandes) formulen para realizar las IAA tienen un amplio soporte en la regulación ambiental nacional. En la Figura 11 se presenta un diagrama que permite comprender como diferentes tipos de inversión pueden estar soportados por uno o más actos administrativos. En la Tabla 7 se resume el objetivo de cada Ley, Decreto u otro acto administrativo que se presentan en la Figura 11. El beneficio de implementar inversiones ambientales adicionales puede verse en doble vía debido a que apoya la implementación de instrumentos ambientales y propende por garantizar la seguridad hídrica.

En la Figura 11, se ha incluido la infraestructura (que puede ser *dura* constituida por los elementos materiales o físicos, y *blanda* relacionada con capital humano y las organizaciones sociales) como una inversión que de manera implícita está relacionada con la mayoría de las inversiones. Por otra parte, se ha consolidado restauración y compra de predios en un solo tipo de inversión: restauración. En el contorno del diagrama se presentan los tipos de IAA que se distinguen por diferentes colores y de afuera hacia dentro en los círculos, se describe el componente regulatorio que pasa de lo general a lo específico. En la parte central de diagrama aparecen leyes, decretos y resoluciones, y en el borde de cada uno un diagrama tipo dona con n particiones que relacionan los tipos de inversiones que estos soportan a través de los colores (i.e., las inversiones que se presentan en el contorno del gráfico)

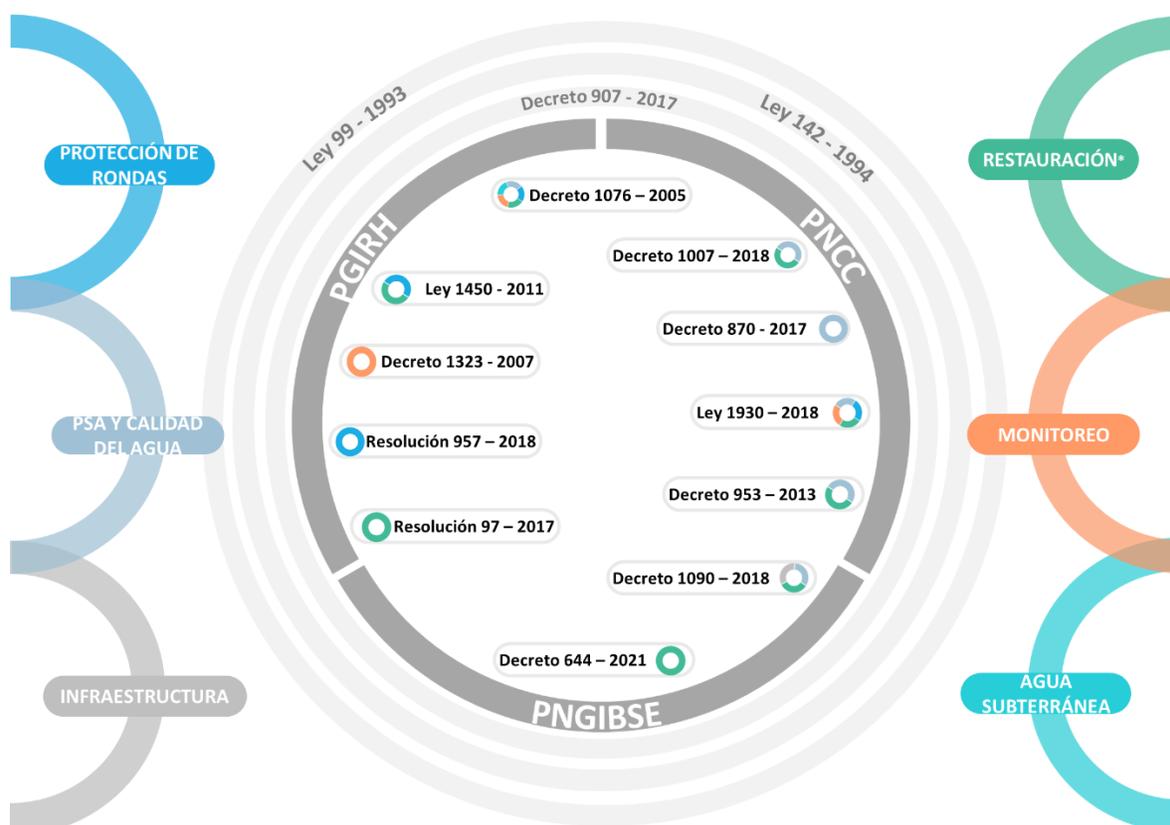


Figura 11. Relación del marco regulatorio ambiental como soporte de las IAA

Tabla 7. Breve descripción del marco regulatorio que soporta las IAA

Acto administrativo	Entidad	Descripción
Resolución 907 de 2015	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico	Por la cual se modifican y adicionan unos artículos a las Resoluciones CRA 688 de 2014 y CRA 825 de 2017. 23 de diciembre.
Decreto 1090 de 2018	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones. 28 de junio.
Ley 142 de 1994	Congreso de Colombia	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. 11 de julio.
Decreto 1076 de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por medio de la cual se expide el Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible. 26 de mayo.
Resolución 97 de 2005	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la cual se crea el Registro Único de Ecosistemas y Áreas Ambientales y se adoptan otras disposiciones. 24 de enero.
Decreto 953 de 2013	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011. 17 de mayo.
Ley 99 de 1993	Congreso de Colombia	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. 22 de diciembre.

Acto administrativo	Entidad	Descripción
Decreto 1323 de 2007	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico, SIRH. 19 de abril.
Decreto 870 de 2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por el cual se establece el Pago por Servicios Ambientales y otros incentivos a la conservación. 25 de mayo.
Decreto 1007 de 2018	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por el cual se modifica el Capítulo 8 del Título 9 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la reglamentación de los componentes generales del incentivo de pago por servicios ambientales y la adquisición y mantenimiento de predios en áreas y ecosistemas estratégicos que tratan el Decreto Ley 870 de 2017 y los artículos 108 y 111 de Ley 99 de 1993, modificados por los artículos 174 de la Ley 1753 de 2015 y 210 de la Ley 1450 de 2011, respectivamente. 14 de junio.
Decreto 644 de 2021	Presidencia de la República de Colombia	Por el cual se sustituyen los artículos 2.2.9.2.1.4. y 2.2.9.2.1.5., se adiciona un párrafo al artículo 2.2.9.2.1.3. y se adiciona el artículo 2.2.9.2.1.8.A. del Decreto 1076 de 2015, en lo relacionado con la financiación y destinación de recursos para la gestión integral de los páramos en Colombia. 16 de junio.
Resolución 431 de 2020	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Por la cual se adopta el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Sectorial (PIGCCS), del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. 31 de agosto.
Ley 1930 de 2018	Congreso de Colombia	Por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia. 27 de julio.
Resolución 957 de 2018	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la cual se adopta la Guía técnica de criterios para acotamiento de rondas hídricas en Colombia y se dictan otras disposiciones.
Ley 1450 de 2011	Congreso de Colombia	Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014. 16 de junio.

6 REFERENCIAS

Buytaert W, Céleri R, De Bièvre B, Cisneros F, Wyseure G, Deckers J, Hofstede R, Human impact on the hydrology of the Andean páramos, *Earth-Science Reviews*, 79; 1–2, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>.

Cárdenas, MF, Tobón, C, Buytaert, W. Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes*. 2017; 31: 4440– 4449. <https://doi.org/10.1002/hyp.11374>

CORPOCALDAS, 2016. *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Chinchiná, Manizales: s.n.*

CRA, 2014. *Resolución CRA 688 de 2014. Por el cual se establece la metodología tarifaria para las personas prestadoras de servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado con más de 5000 suscriptores en el área urbana, Bogotá: s.n.*

DANE, 2005. *Censo nacional, Bogotá: s.n.*

Daza-Torres, M. C., Hernandez_Florez, F. & Triana, F. A., 2014. Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo de Sumapaz, Colombia. *Revista Fac.Nac. Agron. Medellín*, 67(1), pp. 7189-7200.

IDEAM, 2016. *NUEVOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO PARA COLOMBIA 2011 - 2100. HERRAMIENTAS CIENTIFICAS PARA LA TOMA DE DECISIONES. Estudio Técnico Completo. Bogotá: s.n.*

IDEAM, 2018. *Evaluación Nacional del Agua ENA, Bogotá: s.n.*

Ken M, F. y otros, 2018. Physical and Chemical Connectivity of Streams and Riparian Wetlands to Downstream Waters: A Synthesis. *JAWRA*, March, 54(2), pp. 323-345.

Lempert, R. J., Popper, S. . W. & Bankes, S. C., 2003. *Shaping the Next One Hundred Years: New methods for quantitative, long-term policy analysis, RAND*. Santa Monica, CA.: s.n.

MAVDT, 2003. *RAS, Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico, s.l.: s.n.*

Rey_Benayas, J. M., Mansourian, S., Vallauri, D. & Dudley, N., 2005. Restoring Forest After Land Abandonment. En: s.l.:s.n., pp. 356-360.

Yates, D., Sieber, J., Pukey, D. & Huber-Lee, A., 2005. WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), pp. 487-500.

Sáenz, L., & Mulligan, M. (2013). The role of Cloud Affected Forests (CAFs) on water inputs to dams. *Ecosystem Services*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.005>

Resolución 907 de 2015 [Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico]. Por la cual se modifican y adicionan unos artículos a las Resoluciones CRA 688 de 2014 y CRA 825 de 2017. 23 de diciembre.

Decreto 1090 de 2018 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones. 28 de junio.

Ley 142 de 1994 [Congreso de Colombia]. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. 11 de julio.

Decreto 1076 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por medio de la cual se expide el Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible. 26 de mayo.

Resolución 97 de 2005 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se crea el Registro Único de Ecosistemas y Áreas Ambientales y se adoptan otras disposiciones. 24 de enero.

Decreto 953 de 2013 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011. 17 de mayo.

Ley 99 de 1993 [Congreso de Colombia]. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. 22 de diciembre.

Decreto 1323 de 2007 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico, SIRH. 19 de abril.

Decreto 870 de 2017 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por el cual se establece el Pago por Servicios Ambientales y otros incentivos a la conservación. 25 de mayo.

Decreto 1007 de 2018 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por el cual se modifica el Capítulo 8 del Título 9 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la reglamentación de los componentes generales del incentivo de pago por servicios ambientales y la adquisición y mantenimiento de predios en áreas y ecosistemas estratégicos que tratan el Decreto Ley 870 de 2017 y los artículos 108 y 111 de Ley 99 de 1993, modificados por los artículos 174 de la Ley 1753 de 2015 y 210 de la Ley 1450 de 2011, respectivamente. 14 de junio.

Decreto 644 de 2021 [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se sustituyen los artículos 2.2.9.2.1.4. y 2.2.9.2.1.5., se adiciona un párrafo al artículo 2.2.9.2.1.3. y se adiciona el artículo 2.2.9.2.1.8.A. del Decreto 1076 de 2015, en lo relacionado con la financiación y destinación de recursos para la gestión integral de los páramos en Colombia. 16 de junio.

Resolución 431 de 2020 [Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio]. Por la cual se adopta el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Sectorial (PIGCCS), del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. 31 de agosto.

Ley 1930 de 2018 [Congreso de Colombia]. Por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia. 27 de julio.

Resolución 957 de 2018 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se adopta la Guía técnica de criterios para acotamiento de rondas hídricas en Colombia y se dictan otras disposiciones.

Ley 1450 de 2011 [Congreso de Colombia]. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014. 16 de junio.

Plan Nacional de Restauración (PNR): restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas. 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Ospina Arango, Olga Lucia; Vanegas Pinzón, Silvia; Escobar Niño, Gonzalo Alberto; Ramírez, Wilson; Sánchez, John Jair. ISBN: 978-958-8901-02-2.

ANEXO 1: CASO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA

Un ejemplo de aplicación de la metodología se realizó en la cuenca alta del río Chicamocha, donde las condiciones de disponibilidad del recursos hídrico son más complejas que en el caso de río Chinchiná. En este anexo, se sigue paso a paso la metodología propuesta y puede guiar el uso de esta herramienta a los prestadores de servicios públicos.

Paso 1. Recopilación de información oferta y demanda

En este caso de estudio se uso la siguiente información con las fuentes de información que se citan en la Tabla 8

Tabla 8. Información utilizada en el caso de estudio y fuentes de información.

Componente	Información requerida	Fuentes de información (ejemplos)
Oferta	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización del clima y caudales. • Cambio climático • Cartografía, Coberturas y Suelos • Caracterización de Acuíferos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Información climática, hidrométrica. DHIME (IDEAM) 2. Escenarios de cambio climático, tercera comunicación nacional IDEAM (Datos Abiertos IDEAM) 3. Información Cartográfica y suelos IGAC, CORPOBOYACA 4. IDEAM, CORPOBOYACÁ
Demanda	<p>Usuarios en la cuenca: agua superficial o subterránea</p> <p>Tipo de cultivos</p> <p>Crecimiento de la población</p>	<p>Demandas usuarios del agua CORPOBOYACÁ.</p> <p>Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de Duitama S.A E.S.P Empoduitama.</p> <p>Red Vital Paipa S.A. E.S.P</p> <p>Crecimiento de la población (Censo Nacional de Población DANE, 2018)</p> <p>Cultivos y requerimiento (Censo Nacional Agropecuario DANE, 2014)</p>
Estrategias de Gestión del agua	<p>Intervenciones a ser evaluadas:</p> <p>Inversiones en infraestructura: nueva infraestructura y reducción de pérdidas.</p> <p>Inversiones en cambios de hábitos de consumo de agua</p> <p>Inversiones ambientales en cuencas: mantenimiento,</p>	<p>Superintendencia de servicios públicos</p> <p>Planes de saneamiento y manejo de vertimientos PSMV</p> <p>Planes de Uso Eficiente y Ahorro de Agua PUEAA</p> <p>Planes Maestros de Acueducto y Alcantarillado. PMAA</p>

	restauración y protección de ecosistemas	
--	--	--

Paso 2. Identificación de agentes que modifican la oferta y la demanda

Las incertidumbres que se analizan en este caso de estudio son cambio climático y crecimiento de la población. Los escenarios más críticos fueron incorporados en el análisis.

1. Cambio climático

En este modelos se utilizaron los escenarios de cambio climático desarrollados por IDEAM en el marco de la 3 comunicación nacional ([Datos Abiertos IDEAM](#)).

2. Crecimiento de la población

La demanda de agua fue modelada en WEAP a paso de tiempo diario para la cabecera municipal de Duitama y Paipa. Para ello se utilizó la información de población y consumo resumida en la Tabla 9, considerando que, en Duitama, el suministro de agua está a cargo de *EMPODUITAMA SA E.S.P.* y en *Paipa por Red Vital Paipa SA E.S.P.*

Tabla 9. Datos de entrada para estimar la demanda agua

Variable	Duitama	Paipa
Población (2015)	102,519	18,950
Población flotante (2015)	27,496	13,000
Tasa de crecimiento (%)	0.45	1.64
Dotación per cápita (l/(hab*día))	120	120
Pérdidas en distribución (%)	37.5	40

Paso 3. Elaboración de modelos para la simulación de la dinámica hídrica de la cuenca: Modelo WEAP de la cuenca alta del río Chicamocha.

El modelo WEAP desarrollado para el análisis en la cuenca alta del río Chicamocha, tiene un periodo de simulación desde 1980 a 2015, con paso de tiempo diario. Los datos climáticos usados son precipitación, temperatura media, humedad relativa, velocidad de vientos y brillo solar; las últimas cuatro variables el SMM estima la evapotranspiración de referencia con el método de Penman-Monteith (Maidment, 1993). Los datos fueron recopilados de la base de datos del IDEAM. La precipitación se interpoló usando el método “Minimum Curvature” en el software Surfer®. Como resultado de la interpolación se generó un producto grillado en formato NetCDF. Similar procedimiento se hizo para la temperatura media, pero la interpolación consideró la altitud informada por un Modelo Digital de Elevación (DEM), esto con el fin de capturar el gradiente térmico predominante en la región. Para el resto de las variables (humedad relativa, velocidad de viento y brillo solar) se adoptó la estación más próxima a las cuencas de suministro, debido a la limitada disponibilidad de datos tanto espacial como temporal.

Para la calibración del SMM se usaron los registros de caudales medidos en las estaciones de IDEAM. Los parámetros del SMM fueron calibrados manualmente con valores iniciales definidos de acuerdo con las características de tipo de cobertura vegetal.

La información de la demanda de agua y pérdidas en la captación y aducción de los municipios Duitama y Paipa fue suministrada por las correspondientes empresas prestadoras de servicios públicos y se consolida en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos de entrada para simular el suministro de agua y las pérdidas en la captación y aducción.

Sitio de demanda	Fuente	Concesión (l/s)	Pérdidas (%)
Duitama	Quebrada Surba	335.48	6.3
	Quebrada Boyacogua	24.82	7.8
	Aguas subterráneas	81.5	9.2
	Río Chicamocha	71	8
Paipa	Quebrada Toibita	43	11
	Río Chicamocha	23.9	11

Paso 4. Estrategias de gestión.

Las estrategias de gestión definidas en esta evaluación responden a las opciones de decisiones disponibles de acuerdo con las características actuales de las cuencas abastecedoras, la demanda del agua y el estado del sistema. Respecto a las inversiones ambientales, en el POMCA se ha establecido un área importante para la restauración de las cuencas abastecedoras, buscando reemplazar las coberturas actuales de pastos y cultivos permanentes y transitorios, por bosques.

En este caso se evaluaron 6 escenarios de estrategias para la cuenca. La estrategia 1 corresponde a la *línea base o condición actual* con la población proyectada al 2020 y con la climatología del periodo 1980-2015. El resto de las estrategias fueron evaluadas con la población proyectada hasta el año 2050 y con la climatología del periodo 1980-2015 y corresponden a la *línea base proyectada*, *las inversiones POMCA*, *reducción de pérdidas en captación y aducción*, *medidas para el uso eficiente de agua y reducción de la dotación* y la incorporación de *nueva infraestructura*. Sus descripciones se detallan en la Figura 12.

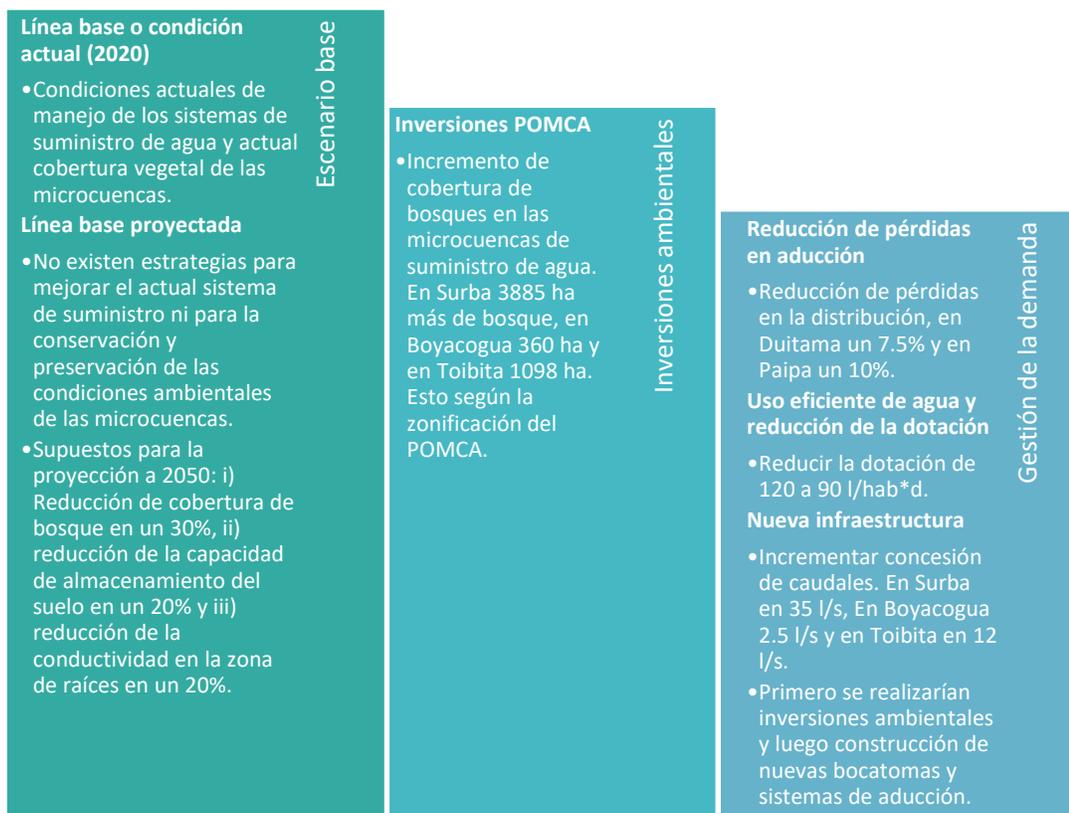


Figura 12. Acciones de intervención evaluadas.

Para determinar el costo de las inversiones ambientales se utilizó información de la Corporación Autónoma de Boyacá, CORPOBOYACA, de acuerdo con la resolución No 0622 del 26 de abril de 2021, *por medio de la cual se actualiza el valor promedio de los costos de establecimiento, aislamiento y mantenimiento de un árbol plantado, para la ejecución de proyectos de reforestación que se adelanten como medida de compensación en la jurisdicción de CORPOBOYACA.*

Los costos de las obras de infraestructura gris se obtienen a partir de presupuestos de obras para redes a pagar por precios unitarios (SECOP).

La estrategia 5 se adiciona en el análisis de costo-beneficio, con el ánimo de restar las inversiones que se espera se realicen en el POMCA en las cuencas abastecedoras para la restauración de los ecosistemas de acuerdo con la zonificación, de tal forma que las inversiones concurrentes no se dupliquen en este indicador. El presupuesto total definido en el POMCA para reforestación es restado de forma proporcional de acuerdo con el área en cada microcuenca que debe restauración, respecto al área total para restauración establecida en el POMCA.

Paso 5. Evaluación de estrategias de gestión a partir de indicadores.

Indicador 1. Análisis del cambio en la oferta del agua

Se analizaron las quebradas que suministran el agua a los acueductos de Paipa y Duitama, para identificar el efecto que tiene la implementación de las diferentes estrategias sobre el caudal disponible y su regulación. En la Figura 13 pueden observarse los caudales medios diarios en la

cuenca de la quebrada Toibita para la condición donde la cuenca se ve degradada por continuar las prácticas actuales agrícolas y pecuarias, proyectada al año 2050 y para la estrategia 3, donde se realiza el cambio de las coberturas actuales con cultivos y pastos a bosques, de acuerdo con la zonificación proyectada del POMCA.

Se evidencia que la regulación en la cuenca se mejoraría al disminuir los eventos extremos de caudales máximos y aumentar el caudal almacenado en la cuenca, lo que produce un incremento de los caudales mínimos en época de estiaje. El mismo efecto puede observarse en la Figura 14 para las quebradas Surba y Boyacogua, para los dos escenarios analizados: proyección al año 2050 continuando con el manejo actual y en el año 2050 aplicando el cambio de cobertura y restauración de ecosistemas del POMCA.

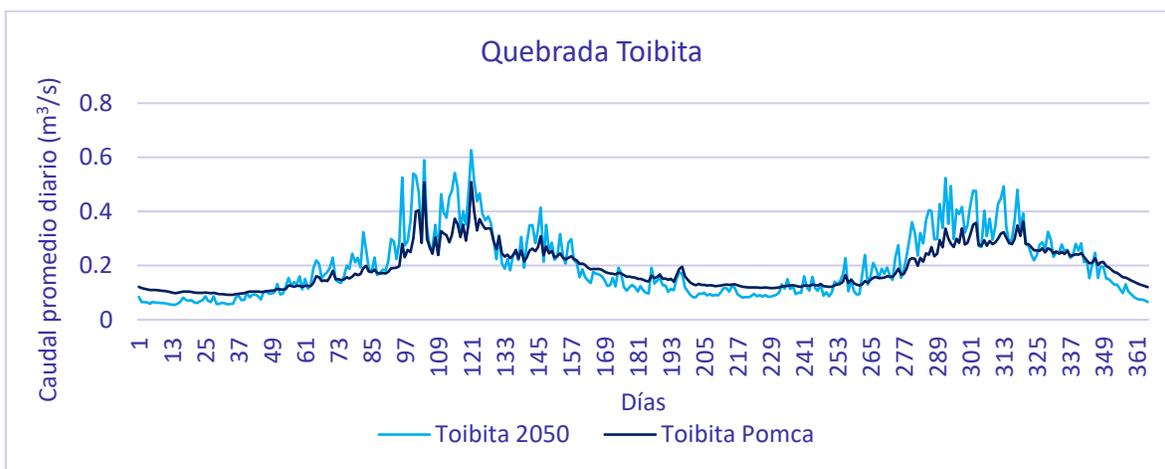
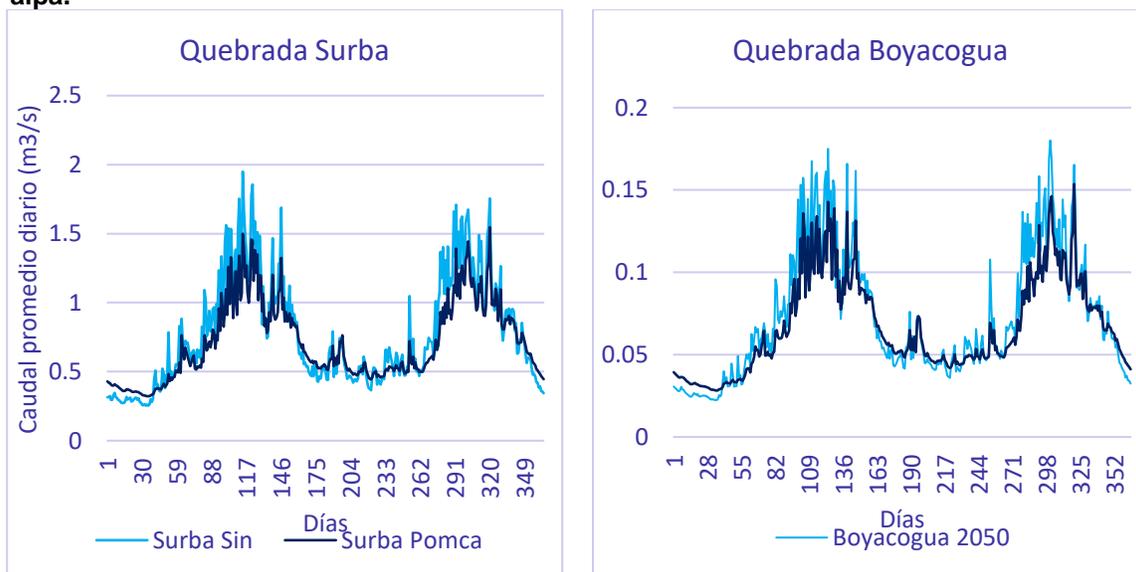


Figura 13. Caudal medio diario bajo diferentes estrategias en la Quebrada Toibita, Municipio Paipa.



- Quebrada Surba
- Quebrada Boyacogua

Figura 14. Caudal medio diario bajo diferentes estrategias en las quebradas a. Surba y b. Boyacogua, Municipio Duitama.

Para la evaluación de los caudales mínimos se consideró el percentil 95 (Q95) del caudal diario simulado para el periodo 2020-2050. En la Tabla 11 se muestran los valores correspondientes a las tres quebradas en análisis (Surba, Boyacogua y Toibita). De acuerdo con los resultados es evidente que las inversiones ambientales podrían generar una mejor regulación del ciclo hidrológico, específicamente en el incremento de los caudales mínimos que son muy importantes para garantizar la continuidad de los sistemas de agua en época seca. Los incrementos en los caudales mínimos generan una oportunidad para incrementar la concesión de agua, la cual fue evaluada en la estrategia 6.

Tabla 11. Q95 de las quebradas Surba, Boyacogua y Toibita.

Estrategia	Q95 Surba (l/s)	Q95 Boyacogua (l/s)	Q95 Toibita (l/s)
Línea base actual (2020)	202.2	19.4	51.9
Línea base proyectada (2050)	Reducción en 33.8	Reducción en 2.9	Reducción en 17.5
Inversiones POMCA	Incremento en 35.9	Incremento en 35.9	Incremento en 12

El cambio en el caudal de estiaje (caudal igualado o excedido el 95 % del tiempo) en las tres cuencas (Toibita, Boyacogua y Surba) se presenta en la Figura 15, para todas las estrategias comparadas con el caudal actual. El caudal disponible en estas cuencas aumentaría en más de 50 l/s para esta condición crítica. Respecto a la regulación de los caudales puede observarse claramente el efecto positivo de las inversiones ambientales de POMCA, permitiendo mejorar la continuidad del servicio público domiciliario de acueducto, al contar con más recurso en los momentos críticos de caudal.

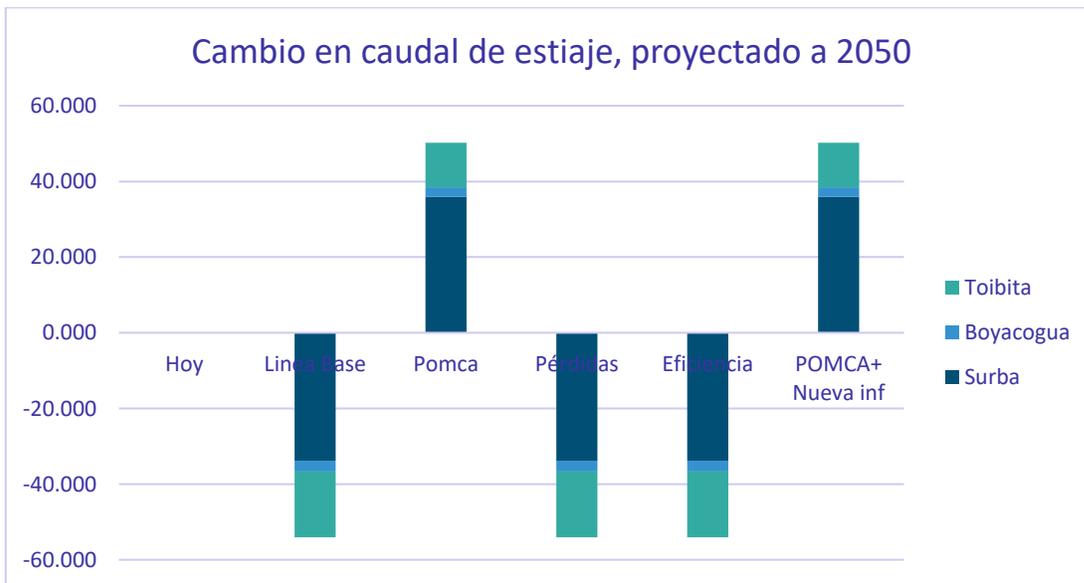


Figura 15. Cambio en el caudal de estiaje (Q95) de las diferentes estrategias respecto al caudal en la condición actual

Indicador 2. Análisis Brecha: Análisis del efecto de las estrategias en la cobertura y continuidad en la prestación del servicio de acueducto.

Los resultados de la brecha entre la oferta y demanda de agua se muestran en la Tabla 7. La brecha se presenta en términos de valores promedio (caudal medio-demanda) y críticos (Q95-demanda). La brecha para caudal de estiaje Q95 se constituye en un indicador muy importante, ya que se refiere al valor en condiciones de sequía. De acuerdo con los resultados, en Duitama la brecha promedio presenta valores muy bajos, en la mayoría de las estrategias es menor a 1 l/s excepto en la evaluación para la *línea base proyectada* al año 2050 donde se tiene 1.72 l/s. Estos números cambian drásticamente para la condición de brecha para el caudal de estiaje: en la *línea base proyectada* en el año 2050 podría ser 50.9 l/s y solo para la estrategia donde se disminuye el consumo de 120 l/día a 90 l/día la brecha sería 0. En Paipa, la brecha promedio para la *línea base* es igual a 12.5 l/s mientras que en la condición máxima es 20 l/s. En el resto de las estrategias de acuerdo con la brecha máxima estos varían entre 35.6 y 55.2 l/s, donde para la línea base proyectada al 2050 se tiene el valor más alto y para la estrategia de disminución del consumo promedio de 120 l/día a 90 l/día el más bajo.

El mayor beneficio entre las alternativas comparadas se produce cuando se logra disminuir el consumo de los usuarios de 120 l/día a 90 l/día. La siguiente estrategia donde se obtiene el mayor beneficio, es decir, que se disminuye más la brecha entre la oferta y la demanda es la estrategia de restauración de ecosistemas, siguiendo la zonificación del POMCA.

Tabla 12. Brecha (l/s) entre oferta y demanda de agua en los sistemas de suministro de agua en Duitama y Paipa, y Delta de la brecha entre la línea base al año 2050 y cada una de las estrategias

Tipo de estrategia	Estrategia	Duitama				Paipa			
		B _m	B ₉₅	ΔB _m	ΔB ₉₅	B _m	B ₉₅	ΔB _m	ΔB ₉₅
Actual	Hoy (2020)	-0.01	-8.53			-12.46	-19.96		
	Línea Base (2050)	-1.72	-50.90	0.00	0.00	-43.24	-55.19	0.00	0.00
Inversiones Ambientales	POMCA	-0.04	-16.88	1.68	34.02	-42.70	-46.03	0.54	9.16
	POMCA+Nueva infraestructura	-0.04	-16.88	1.68	34.02	-36.36	-46.03	6.88	9.16
Gestión de la demanda	Pérdidas	-0.37	-31.65	1.35	19.25	-37.38	-51.32	5.86	3.87
	Eficiencia	0.00	0.00	1.72	50.90	-23.64	-35.58	19.60	19.60

Indicador 3. Análisis de costo-efectividad

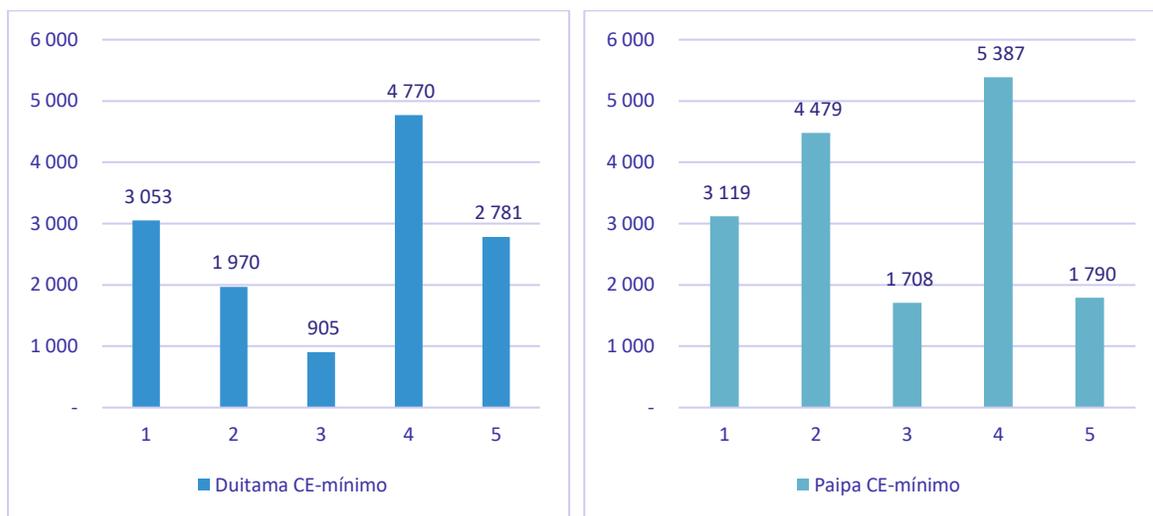
El indicador de costo-efectividad muestra cuales estrategias permiten lograr el mayor beneficio respecto a disminuir la brecha entre la oferta y la demanda, comparada con la *línea base proyectada* al año 2050, con el menor costo posible. En la Figura 16 se presenta el análisis para los municipios Duitama y Paipa, en el caso extremo de caudal de estiaje (Q95). En el gráfico, la mejor opción es aquella que tiene menor costo y mayor beneficio, es decir, la barra más baja.

En los dos casos, la alternativa más costo-eficiente es la disminución del consumo de cada usuario de 120 l/hab*día a 90 l/hab*día. Esta alternativa implica además de un mejoramiento en la infraestructura para la micromedición, campañas de educación ambiental y estímulos tarifarios y tributarios que permitan la reducción efectiva en el consumo de agua.

La siguiente alternativa más costo efectiva para Paipa es la restauración de ecosistemas basada en la reforestación en las cuencas abastecedoras del sistema de acueducto. Esta alternativa incluye las inversiones concurrentes que se realizan en las microcuencas como parte de la ejecución del

POMCA. En Duitama, antes de las inversiones ambientales es más costo-eficiente para el prestador del servicio, la disminución de pérdidas en la bocatoma y la aducción del sistema.

En los dos casos la alternativa menos costo-eficiente es la inversión en bocatomas y sistemas de aducción que permitan un mayor transporte de agua desde estas fuentes hídricas. Sin embargo, los sistemas de acueducto tienen mayores demandas que oferta, así que estas inversiones ambientales permiten disminuir el déficit de agua en época de sequía en 11.7 l/s desde Toibita, 2.6 l/s desde Boyacogua y 35.9 l/s desde Surba. Una combinación de alternativas, donde se disminuyan los consumos por individuo, las pérdidas y donde las inversiones ambientales permitan ampliar la oferta hídrica en época de estiaje parece ser una solución más completa y acertada para la gestión del recurso hídrico.



• **Duitama**

• **Paipa**

1. POMCA	2. Disminución Pérdidas	3. Eficiente consumo de agua (120 a 90 l/hab*día)	4. POMCA+Nueva infraestructura	5. Inversiones ambientales concurrentes
----------	-------------------------	---	--------------------------------	---

Figura 16. Costo efectividad C/ΔB₉₅ para los prestadores de servicio de a. Duitama y b. Paipa