

El Embalse Invisible

Estudio biofísico y económico sobre inversiones en Soluciones Basada en la Naturaleza para seguridad hídrica y adaptación climática del Sistema Cantareira, São Paulo, Brazil

© Scott Warren

El embalse invisible

Prefacio

El sistema de abastecimiento de agua Cantareira tiene un gran desafío—proveer agua limpia y confiable a más de siete millones y medio de personas en la región metropolitana de São Paulo en una época de rápida conversión de áreas naturales y cambios en los padrones climáticos.

Cuando los ríos y embalses que abastecen la región metropolitana de São Paulo secan durante la sequía más reciente (que también fue la peor vista en la región), el costo económico de la escasez de agua fue muy alto. Hoy, con los cambios climáticos todavía afectando la región, definir como el sistema Cantareira debe adaptarse al aumento de las sequías sigue siendo una cuestión de debate urgente.

La respuesta, en parte, está en la naturaleza.

Como los autores de El Embalse Invisible dejan claro, invertir en escala en soluciones basadas en la naturaleza ofrece un camino confiable para la salud de los ecosistemas y, a su vez, crea futuras comunidades resilientes al clima y con seguridad hídrica.

Para entender como eso funciona, los autores dicen que basta mirar al suelo bajo nuestros pies.

Como el título de este estudio sugiere, el volumen de agua en los arroyos y embalses depende no solo de la lluvia pero también de la conexión entre el agua que podemos ver (agua de superficie) y el agua que no vemos (que es almacenada como humedad de suelo y agua subterránea).

Fuera del alcance de los ojos, esos “embalses invisibles” ayudan a mitigar eventos de flujo extremos, reduciendo el flujo pico durante las tempestades y aumentando los flujos de base durante los periodos de sequía.

Es importante resaltar que aún que esa capacidad de almacenamiento natural pueda ser reducida—como tiene sido el caso en las cuencas de São Paulo a lo largo de décadas pasada que protagonizaron la destrucción de los bosques en la cuesta Atlántica, un planeamiento territorial inadecuado y la expansión urbana—ella también pueda aumentar.

Los autores demuestran que el portfolio de soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de vegetación nativa y la recuperación de bosques de ribera en la orilla de ríos y

represas, y el uso de las mejores prácticas agrícolas—implantadas en escalas significativas (32 mil hectáreas), pero direccionadas a solo una pequeña fracción (~15%) de área de drenaje que alimenta la red de abastecimiento del sistema Cantareira—puede proveer 33% más agua en periodos de sequía. Son los días en que el nivel de la represa sigue bajando que tener agua adicional es más importante.

El costo de un portfolio de soluciones basadas en la naturaleza también es significativo. La estimación conservadora de los autores es de US \$180 millones. Pero ellos muestran que el retorno sobre el investimento también es grande, con una relación costo-beneficio de 1,2, considerándose solo los beneficios sazonales relacionados a la cantidad de agua. Si se monetiza el carbono generado por un programa de restauración de esa escala, la relación costo-beneficio sube a 2,0.

Los autores destacan que los beneficios de un agua de calidad también son enormes, que es donde se concentra la narrativa de soluciones basadas en la naturaleza para la seguridad hídrica. Pero como hábilmente muestra este

estudio, la naturaleza tiene el poder de resolver el problema de la escasez de agua, mismo que eso tenga sido ampliamente ignorado como una estrategia de adaptación climática.

Necesitamos actuar ahora para poner este aprendizaje en acción. Las agencias de servicio público y las reguladoras, como SABESP y ARSESP, tienen una oportunidad única de llevar ese trabajo adelante, defendiendo inversiones en la naturaleza correspondientes a la escala de la crisis climática enfrentada por São Paulo.

De hecho, la adopción de soluciones basadas en la naturaleza no se llevará a cabo sin el liderazgo de las agencias reguladoras y de abastecimiento de agua. Con este estudio, SABESP y ARSESP cuentan con una herramienta más para llevar a cabo el impulso ya establecido. Su ejemplo seguramente inspiraría a otras agencias de servicios públicos en Brasil y en todo el mundo en busca de soluciones para un clima cambiante.

Daniel Schemie es el Líder de Cuencas Resilientes en The Nature Conservancy

Estudio biofísico y económico sobre inversiones en Soluciones Basada en la Naturaleza para seguridad hídrica y adaptación climática del Sistema Cantareira, São Paulo, Brazil

Actualmente, más de la mitad de la población mundial vive en ciudades. Las cuencas hidrográficas se están degradando en todo el mundo debido a la conversión de los ambientes naturales, el ordenamiento territorial inadecuado y la expansión urbana.

Las señales de advertencia sobre el clima y la seguridad hídrica son diversas. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de la ONU proporciona evidencia de que los fenómenos meteorológicos extremos son cada vez más frecuentes e intensos. El Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés) también

advierte que la falta de acción sobre los extremos climáticos e hidrológicos se encuentra entre los principales riesgos para la economía mundial, tanto en términos de probabilidad como de impacto.

Garantizar el abastecimiento adecuado del agua potable es uno de los retos globales más urgentes. Las estrategias convencionales enfocadas en intervenciones de ingeniería, como represas, integración de sistemas, transferencias entre cuencas, tienen límites para garantizar la seguridad hídrica, especialmente con el cambio climático y la creciente demanda de agua.

La adopción de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) se vuelve indispensable para garantizar a largo plazo el suministro de agua en cantidad y calidad adecuada, proporcionando resiliencia a los sistemas de suministro público.

A partir de una sólida base de datos, este estudio contribuye con nuevas evidencias y análisis sobre lo que esperar de la adopción de SbN. Enfocándose en el Sistema Cantareira, el estudio tiene los objetivos de:

- Modelar los beneficios hidrológicos y económicos potenciales derivados de las inversiones en SbN en el Sistema Cantareira;

- Proponer la priorización de inversiones para proteger el Sistema Cantareira como fuente de abastecimiento público;
- Apoyar la coordinación y desarrollo de políticas de ordenamiento y gestión territorial en el Sistema Cantareira;
- Apoyar la asignación/coordinación de recursos financieros adicionales a través de la tarifa de agua para alcanzar los objetivos de protección de todas las áreas de contribución en el Sistema Cantareira.

Las soluciones basadas en la naturaleza son acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados que abordan los retos sociales de manera efectiva y adaptativa, al mismo tiempo que, brindan beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad. Para la seguridad hídrica, las SbN incluyen restauración de las funcionalidades de los ecosistemas naturales y la adopción de buenas prácticas de uso del suelo en áreas hidrológicamente priorizadas para reducir los riesgos hídricos.

¿Por qué el Sistema Cantareira?

Uno de los principales sistemas de abastecimiento de la Región Metropolitana de São Paulo, el Sistema Cantareira todavía tiene buenas condiciones para servir como fuente de agua hoy y en el futuro. Ubicado entre los estados de São Paulo y Minas Gerais, cubre un área de 220 mil hectáreas y es compuesto por cuatro embalses interconectados (Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibaia e Paiva Castro) que abastecen de agua a cerca del 47% de la Región Metropolitana de São Paulo (RMSP).

Este territorio está sujeto al uso dinámico del suelo, a las políticas estatales y municipales y

a las diversas tendencias sociales y económicas. En el campo natural, Cantareira está sujeto al régimen climático y sus efectos asociados al ciclo hidrológico, reflejados en la dinámica del agua sobre relieve, vegetación, suelo, uso de la tierra, ríos y compartimentos hidrológicos subterráneos.

La región del Sistema Cantareira es un territorio que puede catalizar acciones a favor de la seguridad hídrica en la Región Metropolitana de São Paulo como un gran ejemplo para otras fuentes de agua del país y para el sector de saneamiento.

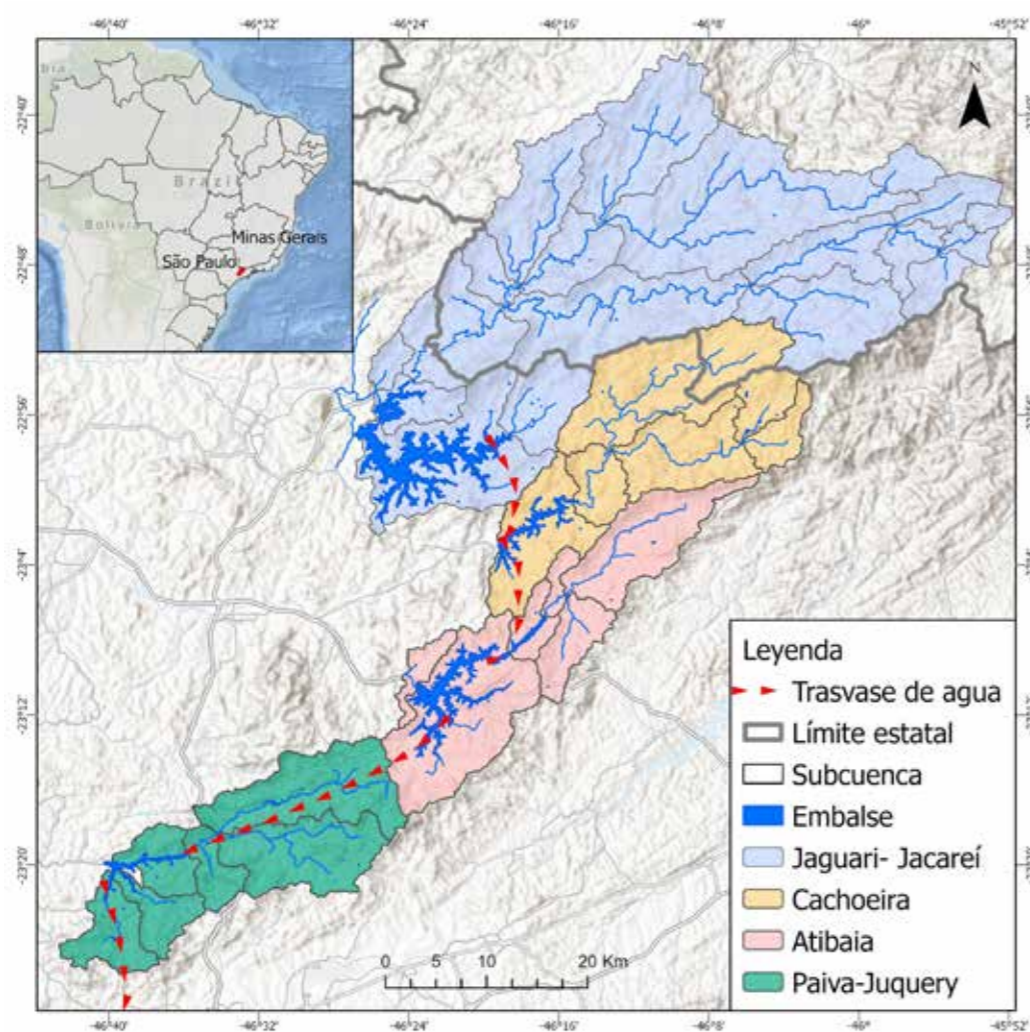


FIGURA 1 SISTEMA CANTAREIRA

Las cuencas de abastecimiento son espacios territoriales de suma importancia para el bienestar de la sociedad y para el desarrollo económico. Cada ciudad, grande o pequeña, o asentamiento humano de cualquier tamaño necesita de acceso al agua.

Colaboración institucional

Al Sistema Cantareira es inherente el complejo desafío de ordenamiento y gestión territorial que involucra a actores múltiples. Asimismo, existe una oportunidad de demostrar el potencial de inversión y asignación efectiva de SbN para la construcción de una fuente sostenible para hoy y para el futuro.

Los esfuerzos colaborativos de los actores y tomadores de decisiones son el punto de partida para la conexión entre el conocimiento científico y la toma de decisiones políticas para apoyar el ordenamiento territorial, justificando las inversiones públicas y privadas.

Gracias a un esfuerzo colaborativo para la elaboración de este estudio, fue posible garantizar

la disponibilidad de datos calificados, lograr un alineamiento sobre la estructura de los modelos hidrológicos, definir escenarios alternativos para el uso y cobertura del suelo y promover el debate sobre los modelos, sus algoritmos, supuestos y resultados.

Fueron parte integrante de este esfuerzo The Nature Conservancy, la Empresa de Saneamiento Básico del Estado de São Paulo (Sabesp) a través de la Gestión Metropolitana de Recursos Hídricos, la Agencia Reguladora de los Servicios Públicos del Estado de São Paulo – Arsesp, el Centro Nacional de Síntesis Socioambiental de la Universidad de Maryland (Sesync), además de otros investigadores y gestores públicos.



FIGURA 2 PROCESO DE CODESARROLLO DE MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA A LARGO PLAZO A LO LARGO DEL PROYECTO, ADAPTANDO EL MARCO DE MODELADO HIDROLÓGICO YA EN USO POR SABESP

La influencia del ordenamiento y gestión territorial en el balance hídrico

Diferentes tipos de uso y cobertura del suelo pueden afectar al ciclo hidrológico y el balance hídrico en una cuenca hidrográfica, en especial en una aquellas que sirven de fuente de agua potable.

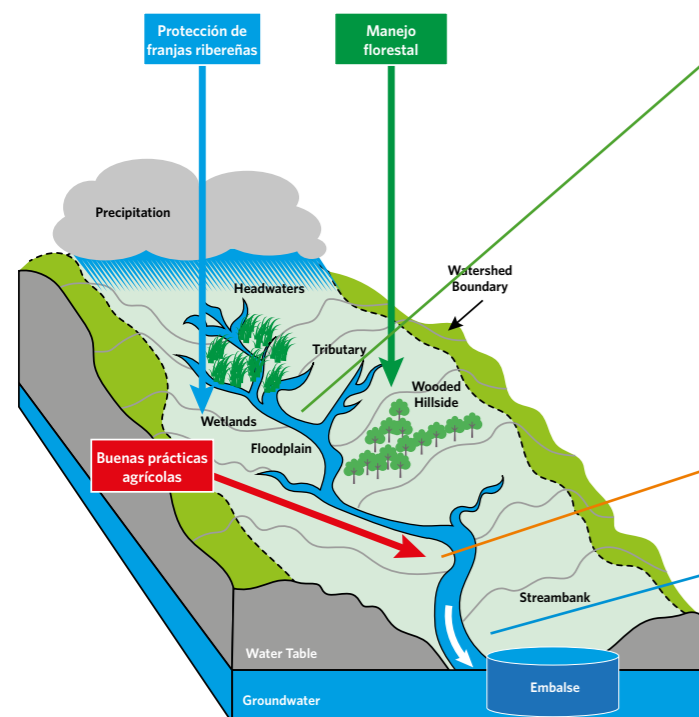
El uso de técnicas agrícolas, la gestión forestal y del suelo en un determinado paisaje provocan cambios en el uso y la cobertura de la tierra y, en consecuencia, influyen en el tiempo de retención del agua en una fuente y en la capacidad de retención de sedimentos y nutrientes.

Cambios en el uso y cobertura del suelo tienen implicaciones hidrológicas si algún de los usos del suelo altera significativamente los componentes del balance hídrico.

La principal entrada de agua en un sistema hidrológico es la precipitación. Con una matriz de uso y cobertura del suelo que incluye acciones diversificadas de conservación, restauración y buenas prácticas agrícolas (Figura 3), esta entrada puede aumentar también debido a

la captura nebular. El agua que entra en un sistema es captada por las plantas y retorna a la atmosfera por la evapotranspiración. El volumen y el tiempo de retención de agua en el sistema hidrológico aumenta si se diversifica el uso y la cobertura del suelo, es decir, se reparte más agua en el flujo de agua subterránea mediante el aumento de la infiltración y el contenido de agua del suelo, al tiempo que se reduce la escorrentía superficial, y la velocidad del agua que se transporta río abajo. También se esperan cambios en la calidad del agua, reduciendo o aumentando la erosión del suelo y el aporte de nutrientes y contaminantes.

En este estudio, con el propósito de comparar escenarios alternativos de uso y cobertura del suelo en el Sistema Cantareira, modelos hidrológicos fueron usados para simular los efectos potenciales de cada uno de estos escenarios en la dinámica hídrica.



Gestión territorial en manantiales (cuenca arriba)

La gestión territorial en manantiales implica diferentes combinaciones de acciones, entre ellas:

- Restauración de áreas degradadas y humedales para aumentar el almacenamiento e infiltración de agua superficial
- Conservación y restauración de vegetación nativa para aumentar el dosel, la evapotranspiración y el almacenamiento de agua en el suelo
- Buenas prácticas agrícolas para conservar el suelo y reducir la carga de contaminantes y nutrientes
- Protección de la franja ribereña de ríos y embalses retiene sedimentos y contaminantes

Efectos cuenca abajo

- Reducción de la carga de sedimentos y nutrientes
- Reducción de la carga de contaminantes
- Aumento a largo plazo de la producción anual de agua
- Atenuación de extremos hidrológicos

FIGURA 3: MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y RESULTADOS AMBIENTALES.

Los componentes de los procesos hidrológicos más relevantes para la disponibilidad hídrica incluyen:



En el área de fuente hay que combinar diferentes intereses, colectivos y privados, con enfoque en el ordenamiento y gestión territorial y visión de larguísimo plazo.

Las actividades económicas y los usos del suelo que contribuyan para la salud de la cuenca deben ser incentivados a través de las políticas públicas.

Por otro lado, las actividades que degraden la noble condición del abastecimiento de agua deben ser desalentadas en estos espacios y promovidas en lugares distintos a las fuentes de agua potable.



© Scott Warren

Múltiples beneficios de la planificación del paisaje

Identificación de áreas prioritarias

Humedales
Áreas de infiltración
Potencial de captura neblular



Buenas prácticas

Cuencas de infiltración
Terrazas
Manejo de carreteras rurales



Protección del bosque nativo

Restauración
Conservación

Captura neblular/precipitación ↑

Evapotranspiración ↑

Reserva en el dosel ↑

Retención de agua en el suelo ↑

Flujo superficial ↓

Rapidez del agua ↓

Erosión del suelo ↓

Transporte de nutrientes ↓

↑
Rendimiento hidrico

↓
Riesgo de inundaciones

↓
Riesgo de sequías

↑
Calidad del agua

FIGURA 4: ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE PAISAJE EM FUENTES Y RESPECTIVOS BENEFICIOS DE CUALIDAD Y CUANTIDAD DEL AGUA.

Modelos biofísicos

Los modelos biofísicos e hidrológicos utilizados en este estudio tienen como objetivo apoyar la definición de políticas de ordenamiento y gestión territorial de las cuencas de abastecimiento, buscando comprender los efectos en cadena resultantes de las intervenciones y sus efectos.

Los potenciales impactos de la restauración de paisaje en la hidrología fueron simuladas a través de una síntesis de varios modelos que conjuntamente:

- Indican locales de intervención con mayores potenciales de impacto hidrológico;
- Predicen cambios en el balance hídrico;
- Simulan la hidrología de cuencas hidrográficas.

MODELO FIESTA

Las formaciones forestales tienen la capacidad/potencial de capturar la humedad presente en el aire. Se utilizó el modelo FIESTA para simular el proceso de interceptación y captura nebulosa, que representa un aporte adicional de agua en un sistema hidrológico, además de la precipitación.

La ocurrencia de captura nebulosa depende de las condiciones micro climáticas locales específicas, como la temperatura, la altitud, la prevalencia del viento, la orientación del relieve, el patrón de cobertura del suelo y la estación del año.

El modelo FIESTA cuantifica flujos hidrológicos resultantes de la captura nebulosa en una cuenca hidrográfica y es usado para estimar el potencial de aporte hídrico de esta fuente en consecuencia de la cobertura forestal en el paisaje.

En total, se utilizaron tres modelos de simulación hidrológica para estimar los resultados potenciales en la dinámica hidrológica del Sistema Cantareira a partir de escenarios alternativos de cobertura y uso del suelo.

Los tres modelos fueron aplicados conjuntamente para representar la variabilidad espacial de condiciones del Sistema Cantareira y para simular diferentes procesos físicos relevantes para la toma de decisión sobre la gestión de paisajes.

Para indicar los locales más apropiados para intervenciones de restauración o cambios del uso y cobertura del suelo, fue usado un modelo adicional llamado RIOS.

MODELO HEC-HMS

El modelo HEC-HMS (Hydrologic Modeling System/Hydrologic Engineering Center), que ya estaba siendo utilizado por SABESP al inicio de este estudio para la gestión y operación de los embalses del Sistema Cantareira, fue adoptado para integrar el conocimiento acumulado sobre el área de estudios y sus procesos hídricos con otras informaciones relevantes para la gestión hídrica de largo plazo.

A través del algoritmo Soil Moisture Accounting (SMA), el modelo se ajustó para simular el almacenamiento de agua tanto en la estación seca como en la lluviosa, representando diferentes componentes del sistema hidrológico.

A partir de datos hidrometeorológicos, el modelo calcula la escorrentía superficial de la cuenca, las pérdidas por evapotranspiración (ET), la infiltración, el flujo de agua subterránea y la percolación profunda.

En este estudio se combinaron varios modelos para representar las interacciones entre cobertura de la tierra y el ciclo hidrológico. Uno de los escenarios de intervención del paisaje fue desarrollado por el modelo RIOS. Las tasas de captura nebulosa se estimaron utilizando la simulación que ofrece el modelo FIESTA. Luego, estos datos se sometieron a modelos de simulación hidrológica HEC-HMS y SWAT para estimar los resultados potenciales sobre la cantidad de agua y los efectos sobre la calidad.

MODELO SWAT

El modelo Soil and Water Assessment Tool fue desarrollado para estimar el balance hídrico y es capaz de simular largos periodos. El modelo utiliza atributos geoespaciales, como tipo de suelo, uso y cobertura de la tierra, topografía y prácticas de manejo de cultivos como objetivos de predecir la respuesta de entradas del agua en el sistema, de manera similar al HEC-HMS, pero con mayor refinamiento técnico y complejidad.

El modelo SWAT es reconocido como uno de los modelos más completos para el modelado hidrológico de cuencas hidrográficas y fue estructurado usando datos disponibles de uso y cobertura del suelo, suelo y datos climáticos del Sistema Cantareira.

MODELO RIOS

El modelo Resource Investment Optimization System - RIOS fue usado para identificar áreas prioritarias para intervención buscando beneficios hidrológicos como el aumento en la infiltración de agua en el suelo, recarga de acuíferos superficiales y reducción de la sedimentación y aporte de nutrientes a los cuerpos de agua.

Desarrollado por el Proyecto Natural Capital (NatCap), RIOS es un software que ayuda a priorizar las áreas, actividades y asignación de recursos en proceso de ordenamiento de paisaje, específicamente enfocado en Sbn. La función principal es permitir un diagnóstico inicial para identificar áreas y actividades que presentan mayor impacto en los servicios ecosistémicos. La optimización es basada en la combinación de datos biofísicos relacionados al agua subterránea, al flujo base, tipo de suelo, relieve y cobertura de la tierra para la definición de locales donde las intervenciones tienen mayor probabilidad de generar beneficios, resultando en la identificación de áreas prioritarias de intervención.

Línea de base y escenarios alternativos

Son posibles innumerables posibilidades de definición de escenarios alternativos para un territorio determinado y uno de los objetivos de la modelación es identificar aquellos que tienen mayor viabilidad económica y política, maximizando al mismo tiempo los servicios hidrológicos deseados.

Para este análisis, se consideró como línea de base el uso y cobertura del suelo del Sistema Cantareira generado a partir de imágenes de satélite del año de 2018.

Por otro lado, los escenarios de intervención paisajística consisten en distintas definiciones espacialmente distribuidas de SbN como restauración de vegetación autóctona, recuperación de bosques ribereños en los márgenes de los ríos y de los embalses y aplicación de buenas prácticas agrícolas, entre otras posibilidades.

Los escenarios de intervención considerados en este estudio fueron los siguientes:

1. Mínima intervención (MI): Considera la restauración de la vegetación nativa en las zonas ribereñas y alrededor de las nacientes de acuerdo con los estándares mínimos definidos por el Código Forestal Brasileño (CFB).

2. Intervenciones expandidas (IE): Sigue la misma lógica del escenario de mínima intervención, pero considera franjas de restauración

más grandes en las zonas ribereñas y alrededor de las nacientes.

En estos dos escenarios, las áreas de pastos de la posesión de SABESP localizados en los márgenes de los reservorios se consideraron como restauradas. Eso representa 1.238 hectáreas de mínima intervención y 3.225 hectáreas en el escenario de intervenciones ampliadas.

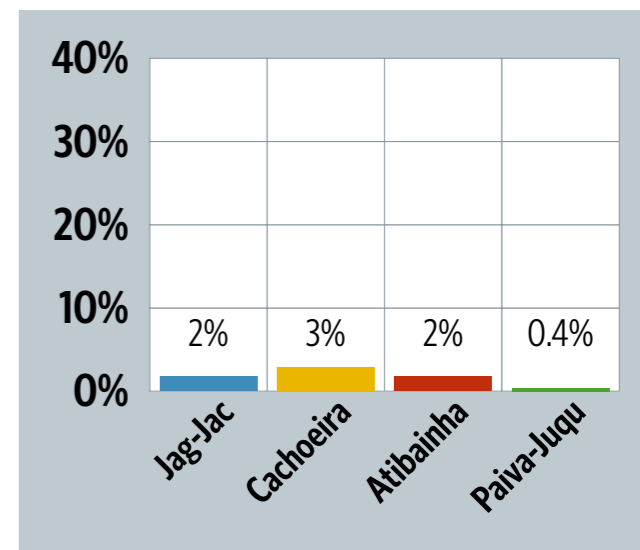
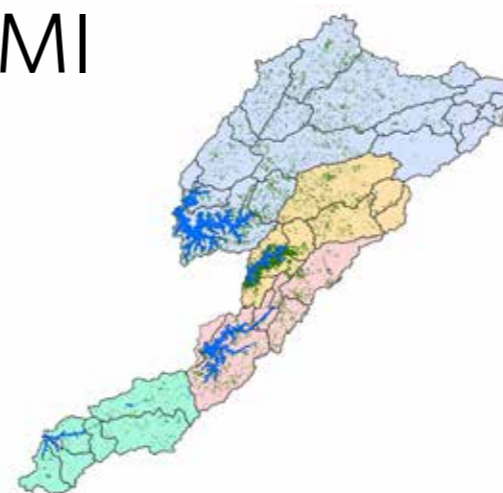
Aunque estos dos escenarios tengan como referencia la aplicación del CFB, este estudio no tiene cualquier relación con mecanismos o políticas de mando y control.

3. Escenario priorizado (RIOS): Se consideran las características geofísicas del Sistema Cantareira y, a partir de la aplicación del modelo RIOS, se define espacialmente las áreas que maximizan la infiltración de agua y el caudal base. Resultó una priorización de 32.085 hectáreas para intervenciones distribuidas en las cuatro subcuencas.

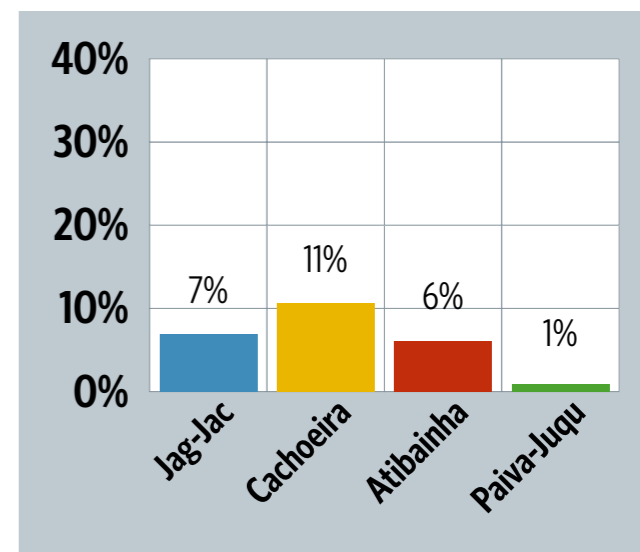
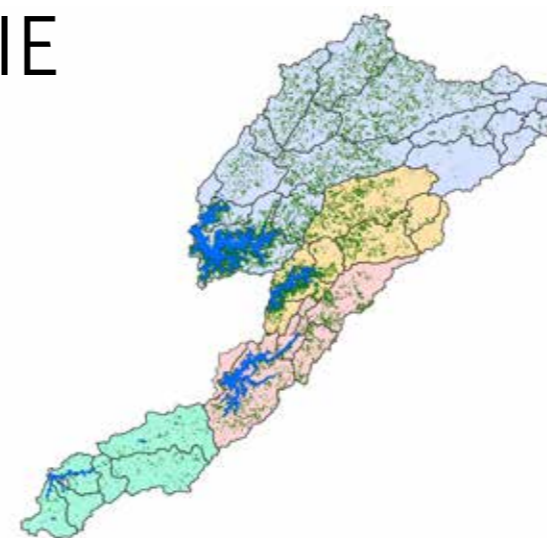
En el escenario de mínima intervención se consideraron las normas vigentes de aplicación del CFB para bosques de riberas y nacientes, es decir, variables de 5 a 30 metros a lo largo de ríos y arroyos, 500 metros alrededor de embalses y 15 metros alrededor de fuentes.

En el escenario de intervenciones ampliadas, se consideraron los parámetros del CFB anterior a los cambios promovidos por la Ley 12.651/12, es decir, franjas ribereñas de 30 metros a lo largo de ríos y arroyos, 500 metros alrededor de embalses y 50 metros alrededor de fuentes.

MI



IE



RIOS

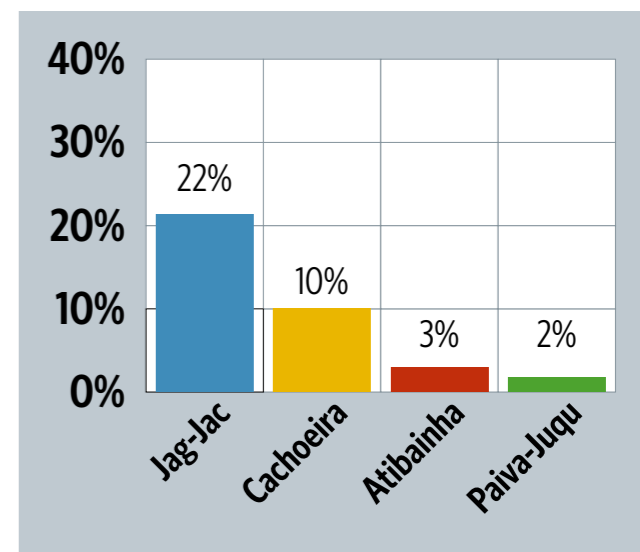
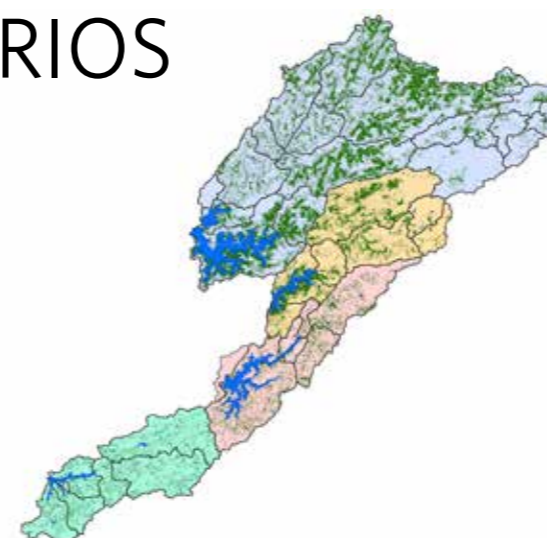


FIGURA 5: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ESCENARIOS DE INTERVENCIÓN EN EL SISTEMA CANTAREIRA Y CUANTIFICACIÓN DE LAS INTERVENCIÓNES DENTRO DE CADA SUBCUENCA

Resultados de modelos hidrológicos

Los dos modelos hidrológicos - HEC-HMS e SWAT - utilizados para estudiar la hidrología a largo plazo del Sistema Cantareira brindan líneas de evidencia complementarias para que se puedan hacer inferencias sobre los impactos hidrológicos de los escenarios de intervención en el paisaje, así como recolectar subsidios para toma de decisiones sobre el uso de suelo y el ordenamiento territorial en el Sistema Cantareira. La Figura 6 demuestra cómo los resultados de las líneas base modeladas fueron consistentes con los datos observados.

Como los modelos se caracterizan por diferentes niveles de complejidad y funcionalidad, es natural que cada uno de ellos tenga ventajas y desventajas. Por ejemplo, el modelo HEC-HMS sigue una estructura más simple y requiere un número relativamente menor de parámetros para representar la hidrología general de una cuenca en respuesta a diferentes escenarios de intervención, sin embargo, los resultados generados son limitados. Considerando que, para simular la escorrentía superficial, los flujos de agua subterránea, el almacenamiento de agua del suelo, así como las métricas de calidad del agua, el modelo SWAT considera diferentes usos de la tierra y tipos de suelo dentro de una subcuenca utilizando una resolución espacial más alta.

El modelaje se realizó por subcuencas, considerando las áreas de aporte para cada uno de

los cuatro embalses del Sistema Cantareira, así:

- Subcuenca Jaguari-Jacareí
- Subcuenca Cachoeira
- Subcuenca Atibainha
- Subcuenca Paiva Castro

Las acciones de manejo del paisaje, como la recuperación y protección del Bosque Atlántico, pueden amplificar los efectos locales de la captura nebular, interceptar y almacenar agua de lluvia en el dosel y promover la infiltración y aumentar el almacenamiento de agua en el suelo. Los cambios en estos componentes afectan el equilibrio hídrico general y el tiempo de retención del agua, es decir, se divide más agua en el flujo de agua subterránea a través de una mayor infiltración y contenido de agua del suelo, al tiempo que disminuye la escorrentía superficial, lo que puede resultar en un rápido transporte de agua río abajo (figura 8).

Los resultados de la modelación relativos a la calidad de agua no son explorados en este documento, privilegiando el enfoque en el aspecto cuantitativo de la seguridad hídrica

En general, el escenario RIOS presentó el mejor desempeño en términos de beneficios hidrológicos de la cantidad de agua en todas las subcuencas

En comparación con los datos observados, el modelo HEC-HMS calibrado brindó una mejor respuesta al considerar los caudales medios, mientras que el modelo SWAT representó mejor los extremos del hidrograma, es decir, los picos de caudal y los caudales de baja (Figura 7)

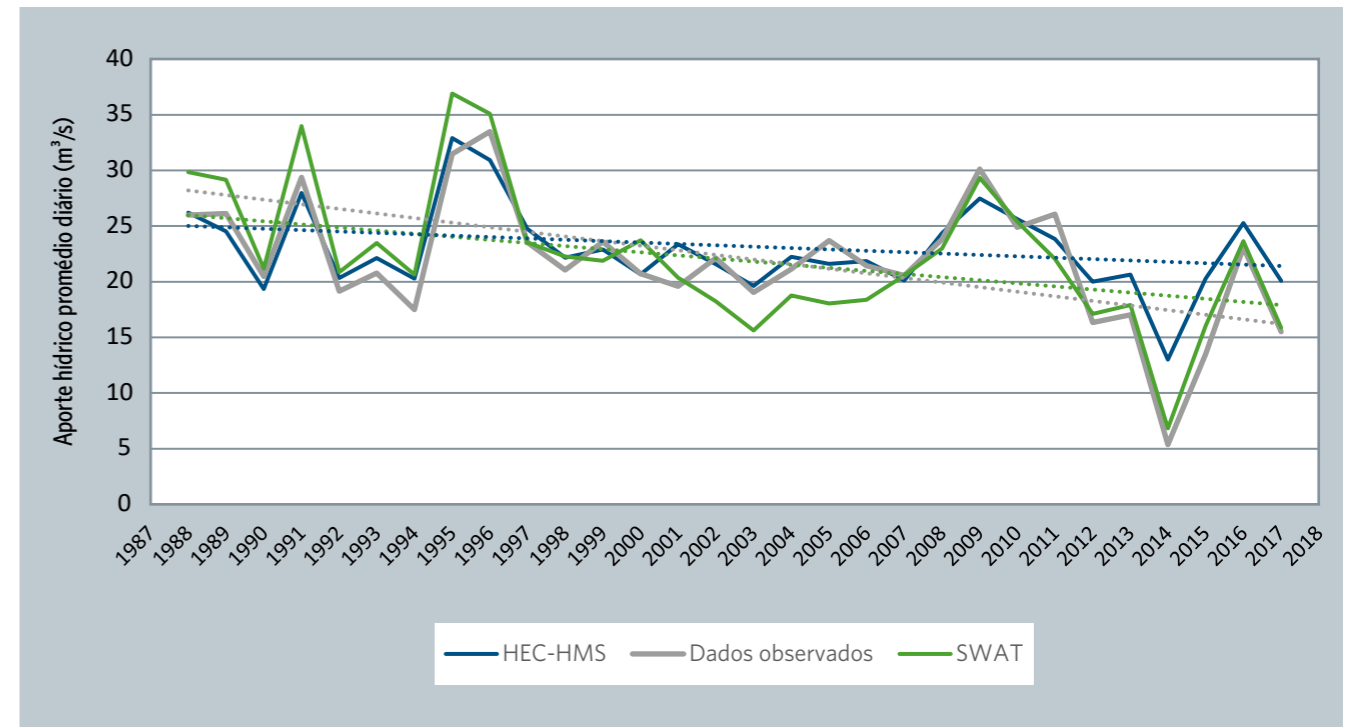


FIGURA 6: COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE LÍNEA BASIS DE LOS MODELOS CALIBRADOS Y LOS DATOS OBSERVADOS.

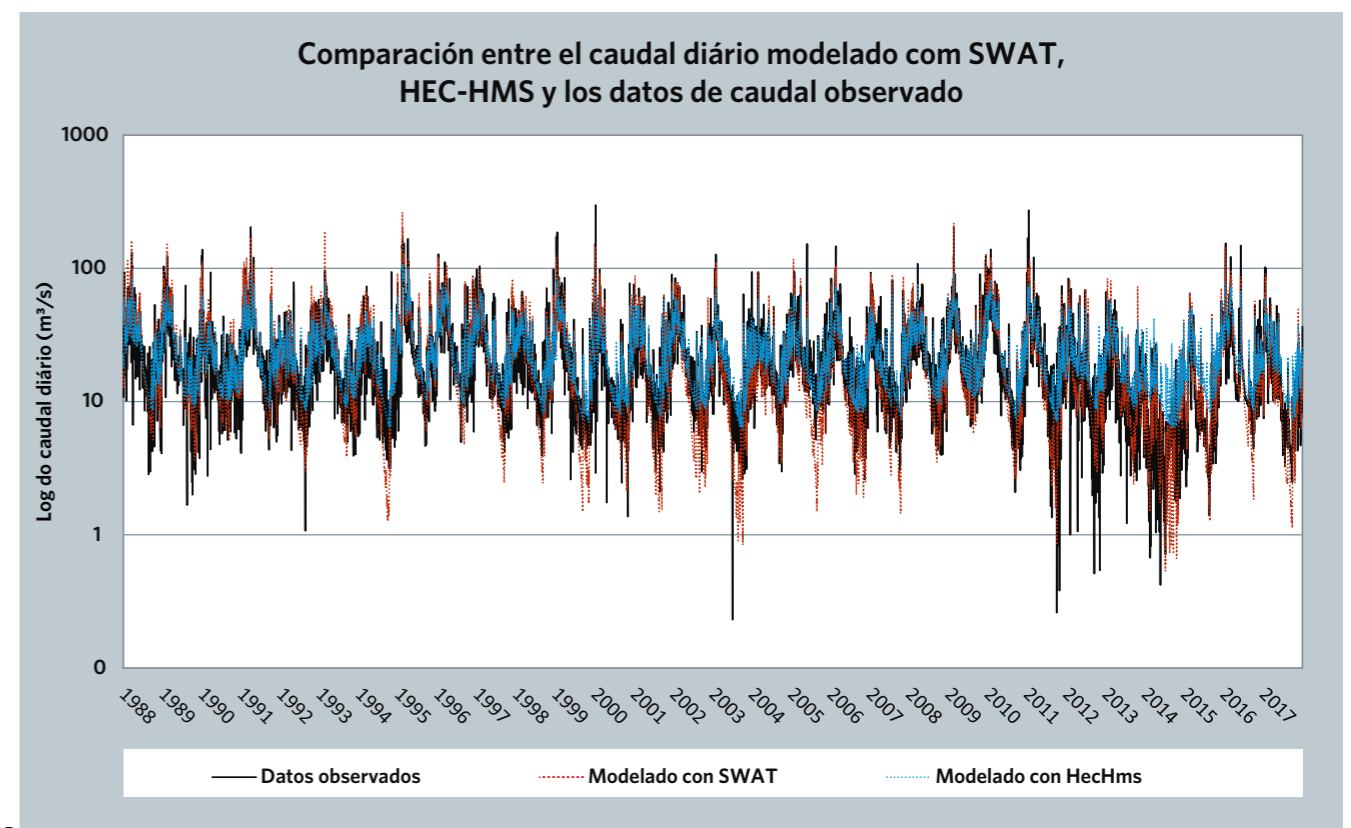


FIGURA 7: PRECISIÓN DE RESPUESTA DE LOS MODELOS SWAT Y HEC-HMS EN COMPARACIÓN CON LOS DATOS OBSERVADOS.

Variables de modelado hidrológico y sus correlaciones

INTERVENCIÓN EN EL PAISAJE

Influencia en el
microclima

Precipitación
Captura nebulosa
Evapotranspiración

Influencia en el
balance de
aguas
superficiales

Flujo
Esguerrimiento superficial
Infiltración

Influencia en la
hidrología y el
almacenamiento
subterráneo

Flujo lateral
Flujo subterráneo
Acuífero (superficial e profundo)

FIGURA 8: SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DEL PAISAJE EN EL BALANCE HÍDRICO UTILIZANDO COMPONENTES DEL MODELO HEC-HMS Y SWAT

Resultados del modelo HEC-HMS

Los resultados de la simulación con el modelo HEC-HMS, por ser este un modelo más simple, se limita a una comprensión general de como los escenarios de intervención interfieren con la disponibilidad de agua en los embalses.

Para representar el resultado se calcularon los caudales mensuales promedio para todo el periodo de simulación (1988-2018) así como para los años de sequía de 2013-2015. En general, los resultados demuestran un aumento en el caudal de los ríos en los escenarios de intervención

a lo largo de los años. Los mayores incrementos son observados en la subcuenca Jaguari-Jacareí.

Comparando el periodo de sequía de 2013-2015 con todo el periodo de simulación, se observa que en este periodo el aumento de caudal es mayor, indicando que los escenarios de intervención tienen el potencial de brindar más agua justo cuando esta es más escasa, durante la sequía.

Em términos generales, los resultados hidrológicos de largo plazo del modelo HEC-HMS indican que las actividades de restauración de vegetación autóctona resultan en la atenuación de eventos extremos de flujo - flujo de pico son reducidos y flujos de sequía son incrementados - con mejoras marginales en el rendimiento anual de agua.

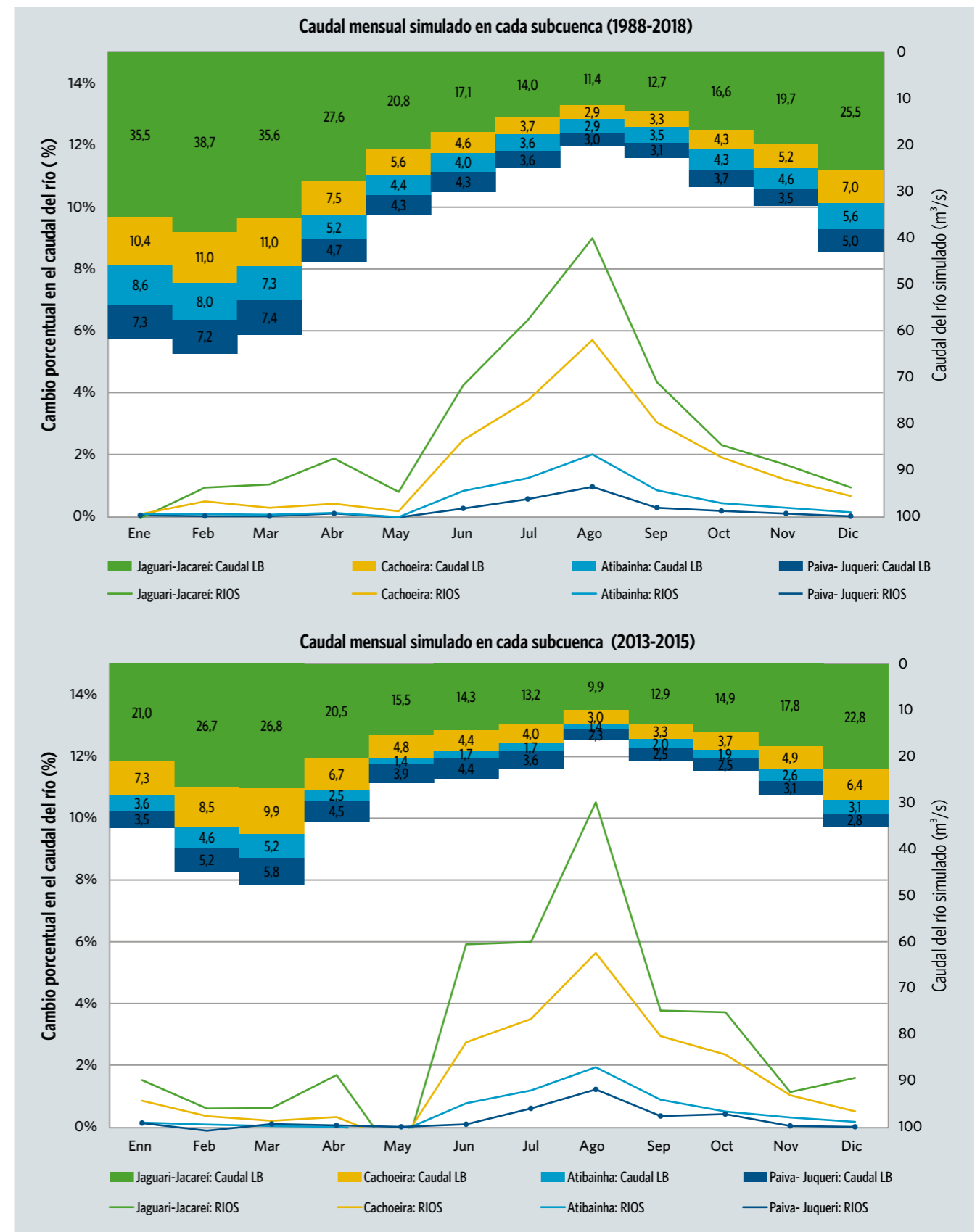
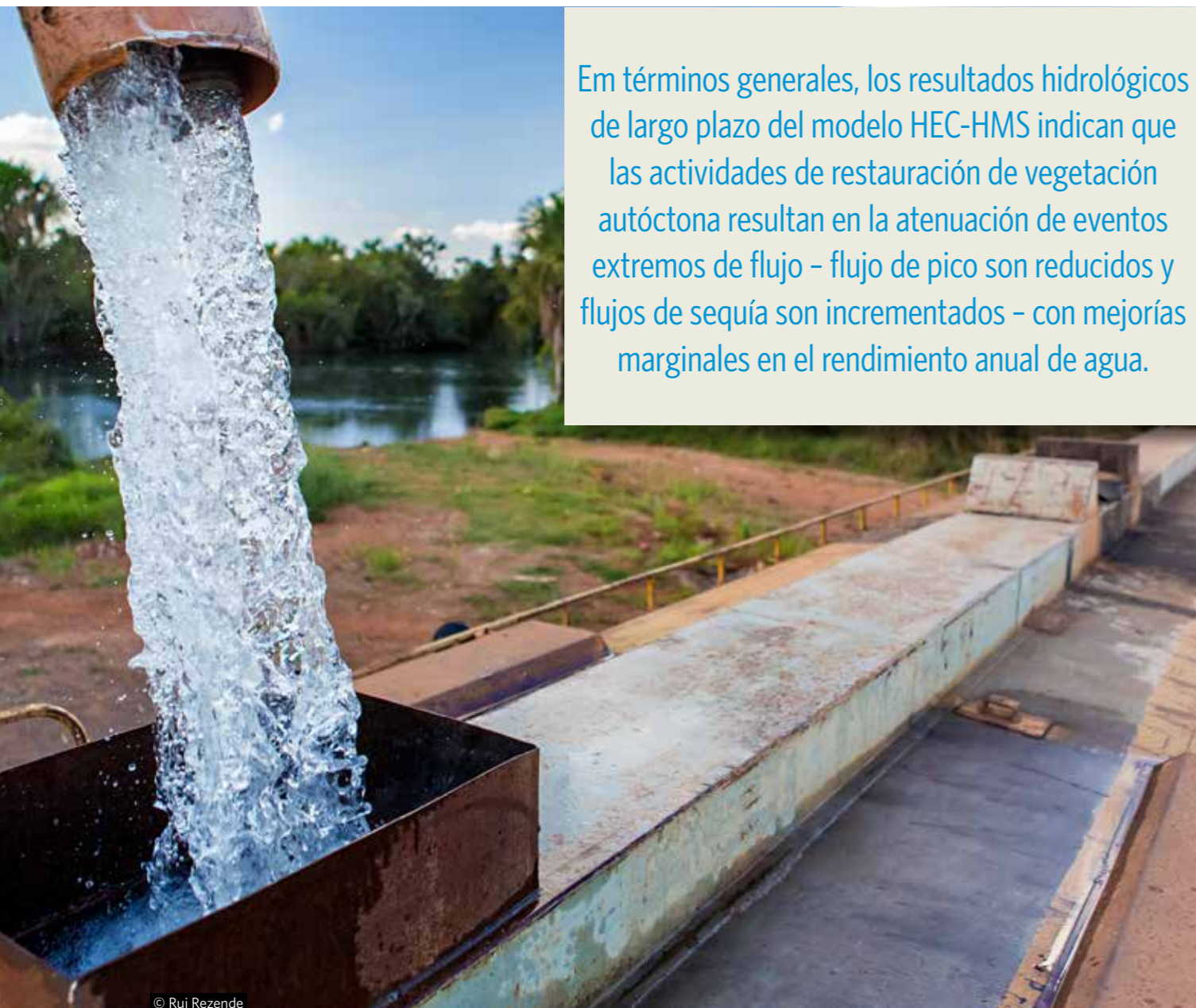


FIGURA 9: CAUDAL PROMEDIO MENSUAL DEL RÍO Y LOS CAMBIOS DEMOSTRADOS EN CADA ESCENARIO DE INTERVENCIÓN PARA (A) TODO EL PERIODO DE SIMULACIÓN Y (B) AÑOS DE SEQUÍA.

Resultados del modelo SWAT

Balance hídrico

Se calibró el modelo SWAT para estimar el balance hídrico diario, lo que permite estimar la escorrentía superficial y la infiltración de agua en las capas de suelo para cada unidad de respuesta hidrológica (HRU).

La figura 10 indica los principales componentes del balance hídrico generados por el modelo SWAT para el escenario de línea de base en la subcuenca Jaguari, incluyendo precipitación, escurrimiento superficial, flujo lateral, aporte del agua subterránea

al caudal base, agua del suelo y la percolación.

El almacenamiento de agua en el suelo representa el agua acumulada a lo largo de los años de análisis. Es de destacar que el mayor volumen de agua entre todos los componentes hidrológicos es el agua que se acumula en el suelo. Los cambios en el almacenamiento del agua del suelo pueden influir en el nivel freático y en el movimiento lateral del agua hacia los embalses del Sistema Cantareira.

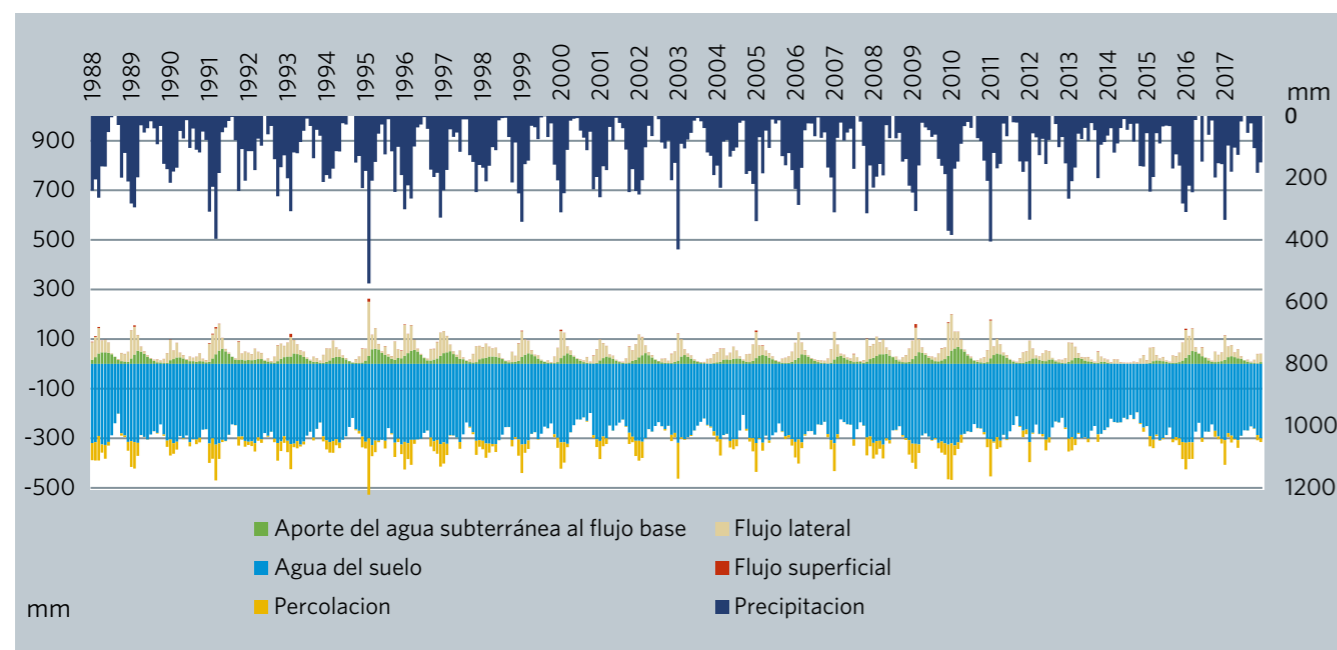


FIGURA 10: COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LOS RESULTADOS DEL MODELO SWAT PARA LA LÍNEA DE BASE EM LA SUBCUENCA DEL JAGUARI.

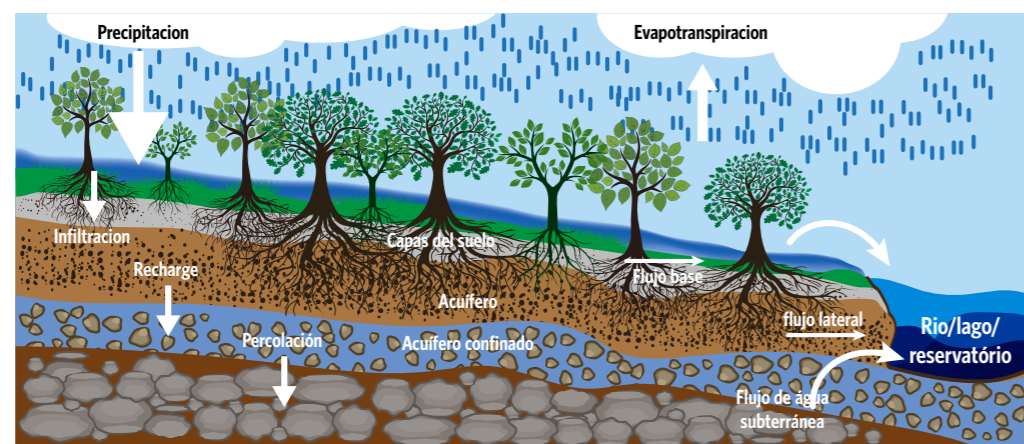


FIGURA 11: PROCESOS RELACIONADOS A EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL MODELO SWAT.

El modelo SWAT tiene la capacidad de simular varios componentes del balance hídrico, incluyendo flujo superficial, subsuperficial y subterráneo.

Agua subterránea

El componente de agua subterránea se representa en el modelo SWAT en forma de tres tipos de tanques

- **Las capas del suelo en las que se almacena y redistribuye el agua:** Esta agua está disponible para la absorción por las plantas, evaporación o recarga del acuífero subterráneo/libre
- **Acuífero subterráneo/libre:** Ubicado justo debajo del perfil del suelo, está separado por la zona vadosa que recibe el agua filtrada desde las capas más profundas del suelo. El agua del acuífero subterráneo o libre puede fluir hacia el cuerpo de agua más cercano como contribución al caudal base, o puede filtrarse hacia el acuífero profundo.
- **Acuífero profundo:** El agua que fluye hacia el acuífero profundo se representa como un

aporte de flujo fuera de la cuenca hidrográfica analizada

La modelación indica que en el Sistema Cantareira gran parte del agua se almacena en las capas del acuífero y suelo, por lo que los resultados de la modelación frente a los escenarios de intervención se observan mayoritariamente en el componente de almacenamiento del suelo, en lugar del flujo superficial.

Para evaluar adecuadamente esta particularidad, se estimaron promedios mensuales para cada componente hidrológico en el período de sequía (2013-2015). La Figura 19 demuestra una adicionalidad significativa en el balance hídrico en todos los meses del año, particularmente con respecto al componente de agua en el suelo.

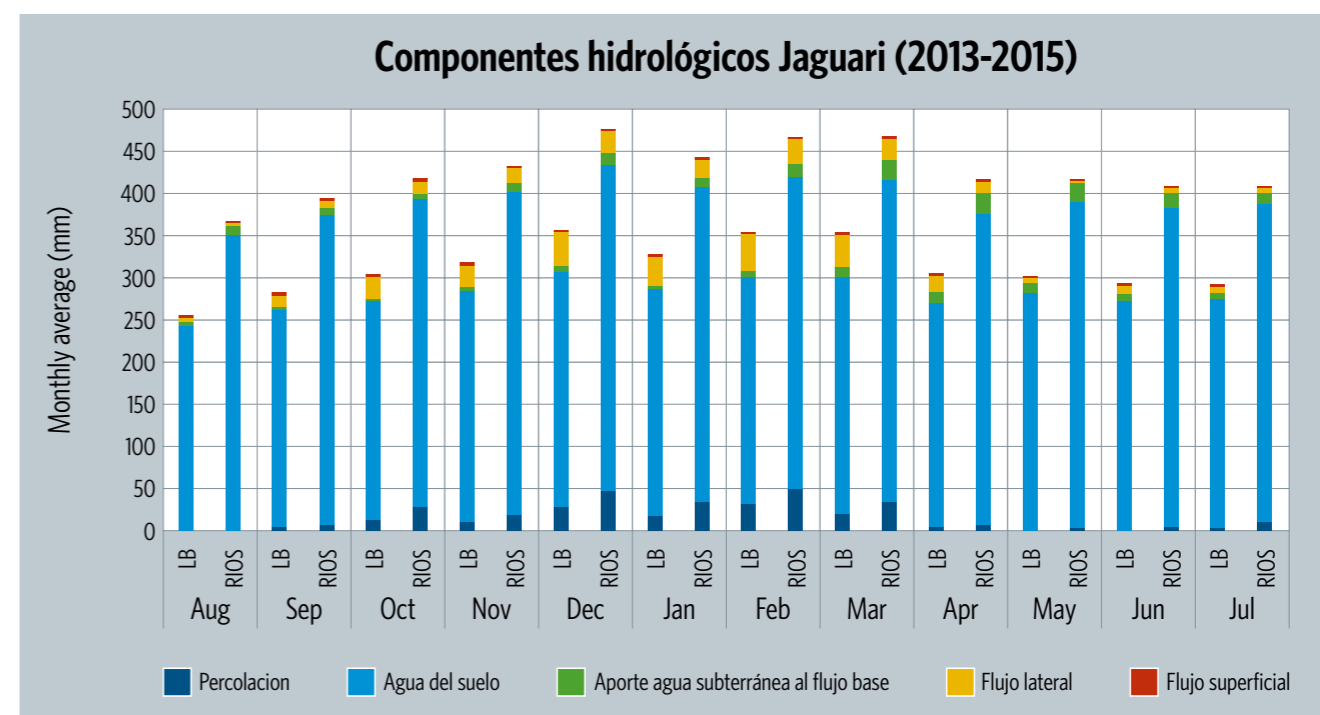


FIGURA 12: PROMEDIOS MENSUALES DEL BALANCE HÍDRICO SIMULADO CON EL MODELO SWAT PARA EL PERÍODO DE SEQUÍA 2013-2015 (LÍNEA BASE VERSUS ESCENARIO RÍOS).

Los resultados encontrados en este estudio indican claramente que los componentes hidrológicos del suelo y del agua subterránea representan el “Embalse Invisible” del Sistema Cantareira.

Áreas de Recarga y Áreas de Descarga

En el modelado SWAT, el paisaje se divide en áreas de recarga y descarga (figura 14), y los resultados están muy influenciados por la topografía donde el flujo de agua es impulsado por manto freático, concentrándose en las cuencas aguas abajo, donde se ubican los embalses.

Como el escenario RIOS maximiza la recarga de los acuíferos al priorizar lugares específicos para el beneficio hidrológico, su efecto más significativo se observará en las microcuencas

cercanas a los embalses, es decir, las cuencas de descarga.

Al realizar un ejercicio similar durante todo el período de estudio, se puede estimar la contribución de SbN al balance hídrico general.

Por lo tanto, el análisis se realizó observando: 1) el promedio de todas las subcuencas que contribuyen al Sistema Cantareira y, 2) el promedio de solo las subcuencas de descarga (Figura 15).

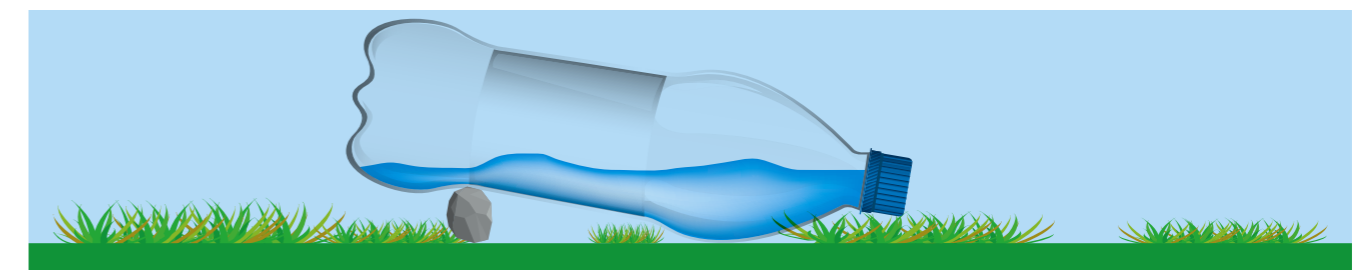
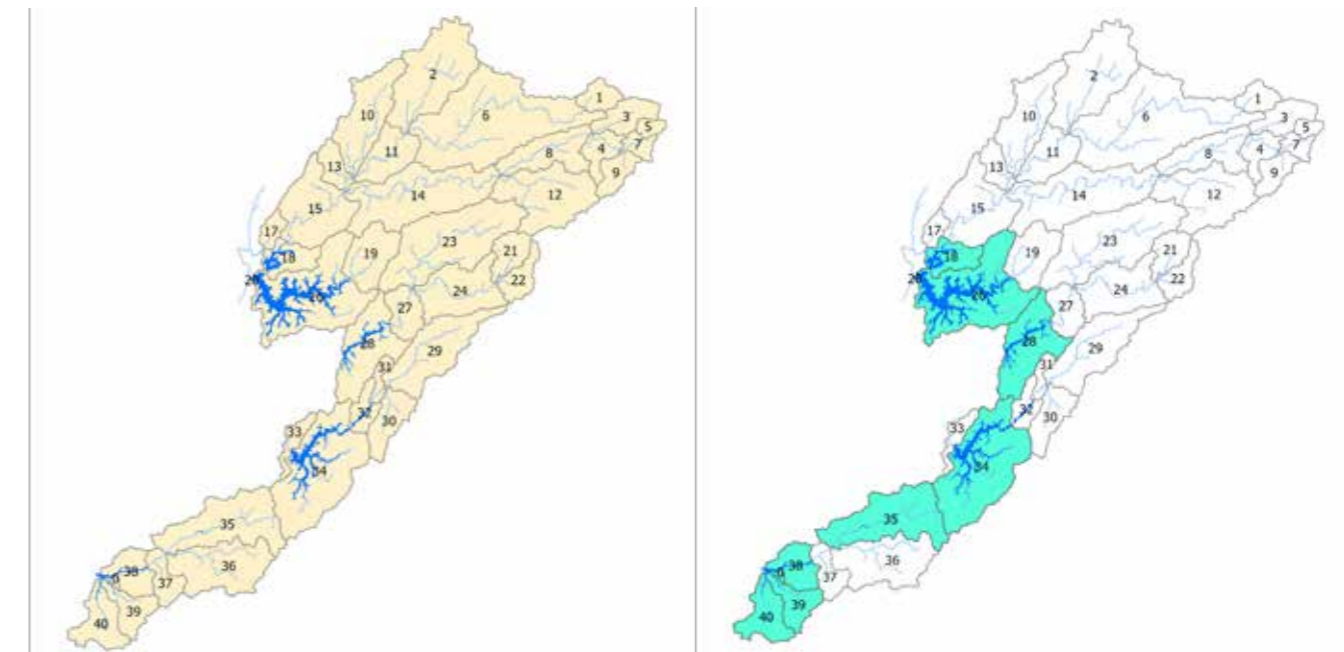


FIGURA 14: TODAS LAS SUBCUENCAS QUE CONTRIBUYEN AL SISTEMA CANTAREIRA (A) Y SOLO LAS SUBCUENCAS DE DESCARGA (B)

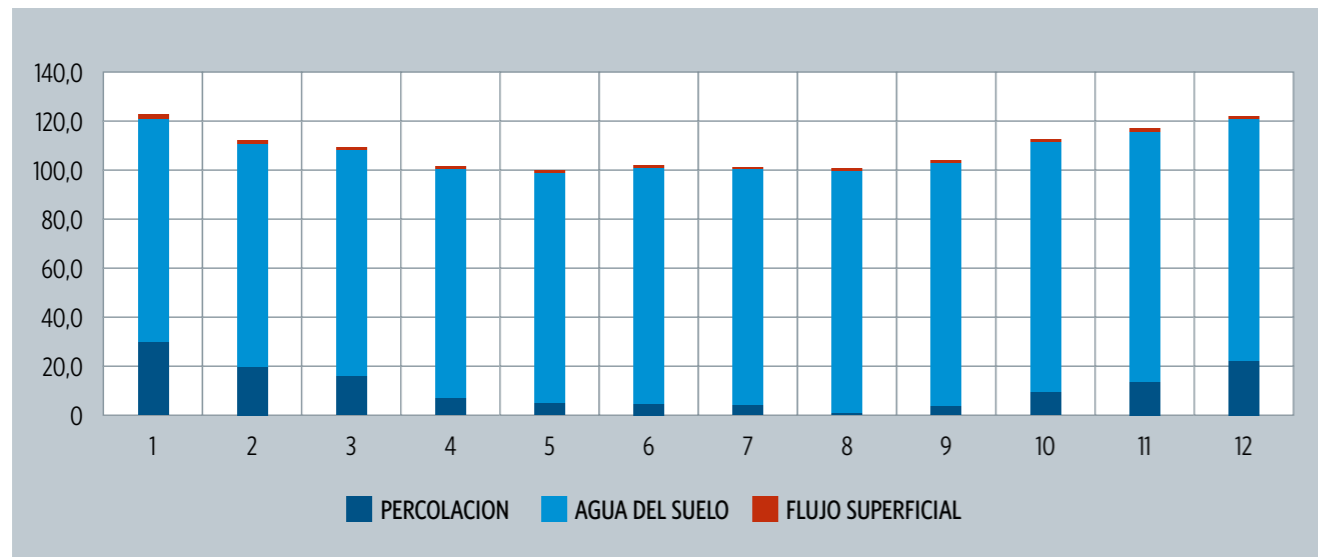


FIGURA 13: DIFERENCIA EN EL PROMEDIO MENSUAL DE PERCOLACIÓN, AGUA DEL SUELO Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL ENTRE LA LÍNEA BASE Y EL ESCENARIO RIOS EN MM (2013-2015).

La Figura 13 muestra la diferencia entre la línea de base y el escenario RIOS en el balance hídrico mensual para el período de sequía, expresado en milímetros. En promedio, las intervenciones en el escenario RIOS representan un incremento mensual de 100 mm

Estos resultados apoyan la hipótesis de que SbN puede resultar en agua adicional significativa para el balance hídrico general en el Sistema Cantareira, aumentando el contenido de humedad del suelo y, en consecuencia, la recarga del acuífero.

Sin embargo, debido a las limitaciones del

modelo, es imposible predecir la relación exacta entre la cantidad de agua que se convierte en parte del balance base y la cantidad de agua que recarga el acuífero.

Vale la pena señalar que el almacenamiento de agua en el suelo representa el agua acumulada a lo largo de los años de análisis, lo que demuestra que el SbN contribuye a la seguridad hídrica no solo en las subcuencas vecinas que benefician el abastecimiento de otros municipios además del aprovechamiento del agua por actividades económicas como la agricultura, por ejemplo.

Si el escenario alternativo representara el uso del suelo y la cobertura del suelo predominantes durante los 30 años del análisis, la respuesta hidrológica sería similar a la encontrada en los resultados del modelo.

Si se consideran todas las subcuencas del Sistema Cantareira, el análisis muestra un incremento promedio del 33% (206 hm³/año) de agua en todos los componentes del sistema hidrológico.

Si nos enfocamos solo en las subcuencas de descarga, el análisis indica un aumento promedio del 58% (o 341hm³/año) en todos los componentes del sistema hidrológico.

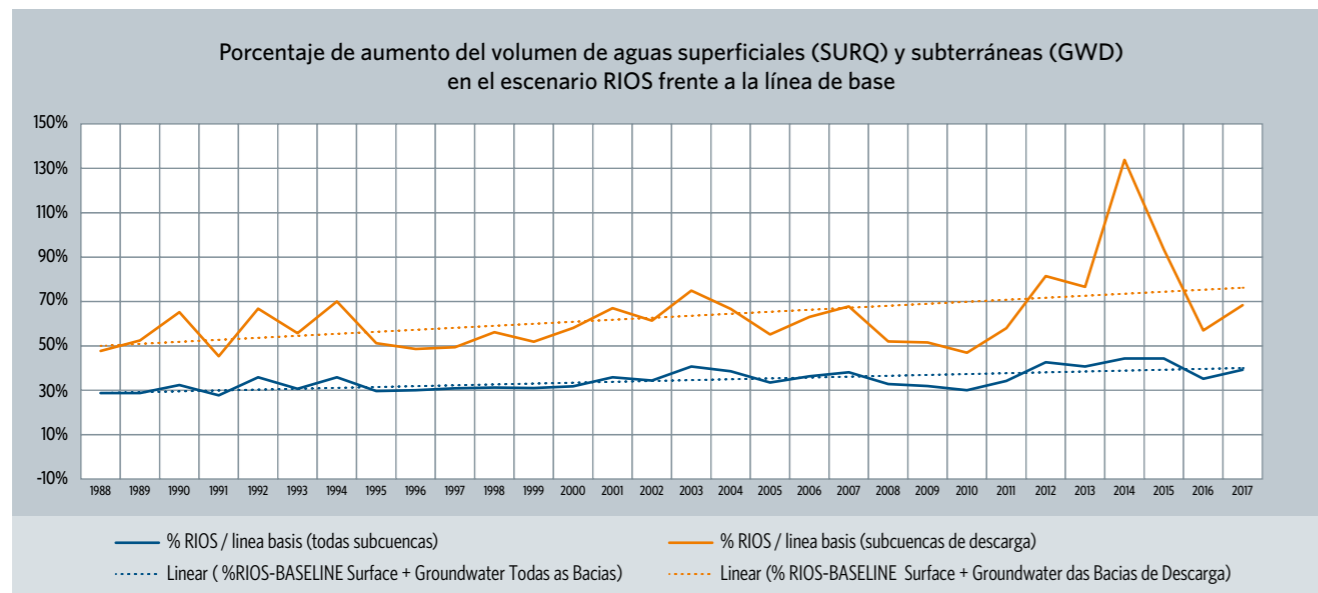


FIGURA 15: PORCENTAJE DE AUMENTO DEL VOLUMEN DE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA EN EL ESCENARIO RIOS CON RELACIÓN A LA LÍNEA BASE - PROMEDIO CON TODAS LAS CUENCAS Y PROMEDIO CON LAS CUENCAS DE DESCARGA

La diferencia entre la línea de base y el escenario RIOS es mayor cada vez que disminuye la disponibilidad de agua. Un pico significativo de esta diferencia se observa en el período de la mayor sequía registrada en la historia del estado de São Paulo, entre 2014 y 2015. En esos momentos, el modelado muestra cómo las soluciones basadas en la naturaleza, particularmente durante condiciones climáticas extremas, puede atenuar los picos de inundaciones y sequías, reduciendo los riesgos hídricos.

Componentes hidrológicos del flujo de agua

El resultado de la combinación de los componentes hidrológicos que contribuyen al flujo, es decir, el escurrimiento superficial y la contribución de las aguas subterráneas al escurrimiento superficial, indica un aumento significativo cuando se compara el escenario RIOS con la línea base.

Si se consideran todas las subcuencas contribuyentes al Sistema Cantareira, los resultados de la modelación indican un aumento promedio del 33% o 206 hm³/año. Si los resultados se observan con un enfoque solo en las subcuencas de descarga, se indica un aumento promedio del 58% (o 341hm³/año).

Vale la pena señalar el beneficio específico durante los períodos de baja disponibilidad de agua, como la sequía de 2013-2015, cuando

estos dos componentes hidrológicos se consideran juntos. La diferencia entre la línea base y el escenario RIOS modelado es mayor cada vez que disminuye la disponibilidad de agua. Un pico significativo de esta diferencia se observa en el período de sequía de 2014-2015 (figura 16).

En términos generales, los dos modelos indican beneficios hidrológicos asociados a la implementación del SbN con miras a la seguridad hídrica. Los resultados encontrados están en línea con el mensaje central del Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos, publicado por la UNESCO titulado "Aguas Subterráneas: Haciendo Visible lo Invisible", que destaca que las aguas subterráneas representan aproximadamente el 99% de toda el agua dulce líquida en la Tierra.

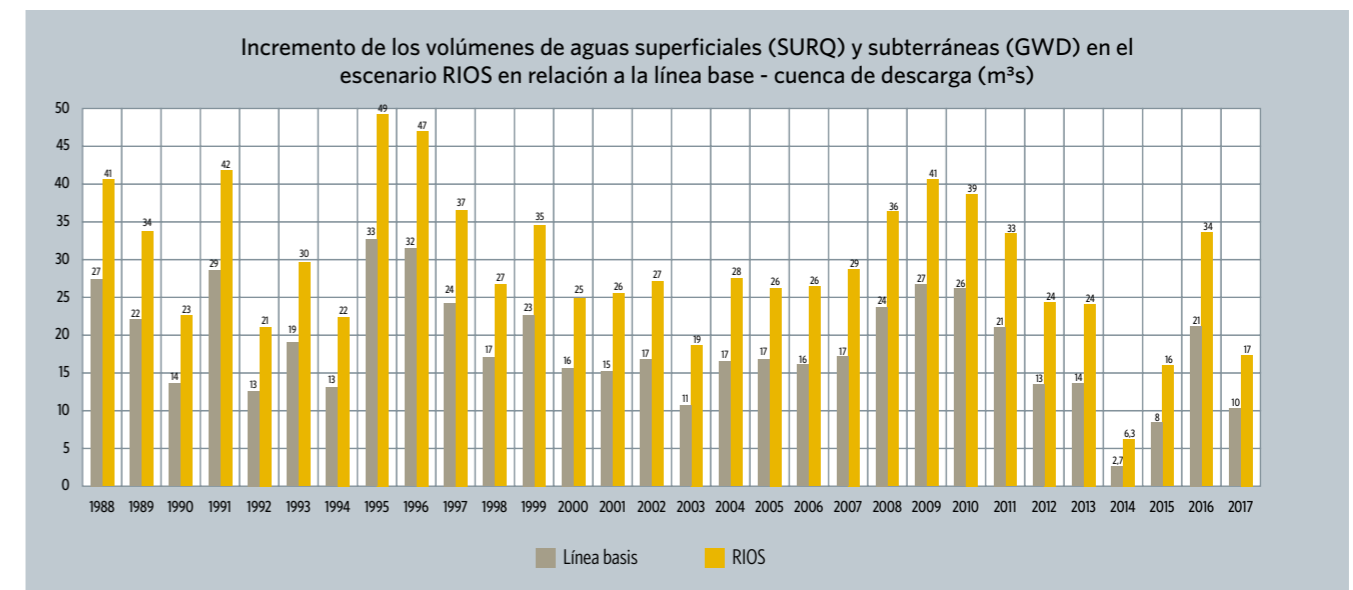


FIGURA 16: AUMENTO DEL VOLUMEN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS SUPERFICIALES EN EL ESCENARIO RIOS EN RELACIÓN A LA LÍNEA BASE CONSIDERANDO LAS CUENCAS DE DESCARGA

Análisis económico

Con base en los resultados hidrológicos encontrados, se llevó a cabo un análisis económico para evaluar las posibles consecuencias económicas asociadas con los beneficios en resiliencia durante eventos de baja disponibilidad de agua.

Considerando que el escenario personalizado RIOS obtuvo los mejores resultados hidrológicos basados en la priorización espacial del SbN de gran escala, el análisis económico se centró en los resultados de este escenario.

Inversiones en la implantación de escenarios RIOS

Las inversiones involucradas en la implementación del escenario RIOS se estimaron a partir de una contabilidad de costos completa que se agruparon en las siguientes categorías:

- **Costos de implementación:** mano de obra y materiales en el primer año de implementación
- **Costos de mantenimiento:** mano de obra de seguimiento y materiales necesarios para mantener la intervención a lo largo de los años
- **Costos de oportunidad:** compensación a los propietarios de tierras designadas para la restauración en forma de pagos por servicios

ambientales.

- **Costos de transición:** planificación y organización inherentes a la movilización y participación de los propietarios, el desarrollo de contratos y el monitoreo
- **Costos de gestión:** gestión del programa de protección de cuencas hidrográficas

El escenario RIOS contempla una cartera de intervención de 32.085 hectáreas repartidas en las cuatro subcuencas. La estimación de costos de las intervenciones se calculó considerando



dos técnicas de restauración que se aplican al Sistema Cantareira, a saber:

- **Manejo de regeneración natural o restauración pasiva:** implica el aislamiento del área a restaurar de factores de degradación, por ejemplo, el cercado, en el caso de la ganadería, control de especies exóticas invasoras y enriquecimiento solo ocasional con la siembra de plántulas. Esta técnica fue considerada para el 75% de la cartera de intervenciones en el escenario RIOS.
- **Restauración asistida o activa:** se aplica a áreas degradadas que tienen un bajo potencial de regeneración natural e implica, además de las técnicas mencionadas anteriormente, también la plantación intensiva de plántulas seleccionadas para acelerar el proceso de

regeneración. Esta técnica fue considerada para el 25% de la cartera de intervenciones en el escenario RIOS.

Los costos promedio por hectárea del ciclo de vida del programa se estimaron en \$6,343 por hectárea para las actividades manejo de la regeneración y en \$9,774 por hectárea para la restauración activa. Los costos anuales de gestión del programa se agregan durante el período de 35 años.

El costo total de un programa de protección para el Sistema Cantareira se estimó en \$236 millones, o \$180 millones en Valor Actual Neto (VAN). Se utilizó una tasa de descuento social del 4,36 % para estimar los valores netos actuales de costos y beneficios.

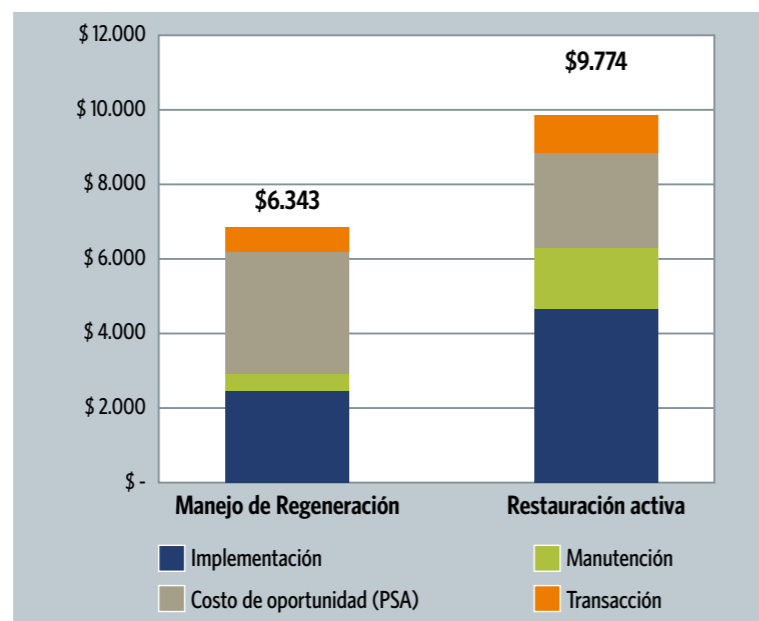


FIGURA 17: COSTOS DE RESTAURACIÓN POR HECTÁREA

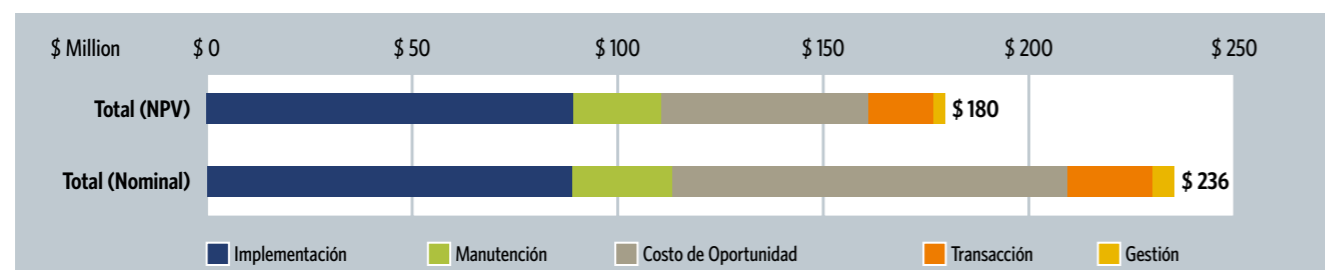


FIGURA 18: COSTOS TOTALES DEL CICLO DE VIDA DE LA IMPLEMENTACIÓN EN VALOR NOMINAL Y VPN (EN \$ MILLONES)

Evaluación económica del impacto de la sequía y la reserva de agua en el medio ambiente

La pérdida de VAB de la industria se estimó en \$ 302.6 millones. La pérdida de los servicios de agua y alcantarillado fue estimada en \$ 147.2 millones.

Para evaluar los beneficios económicos del almacenamiento de agua en el medio ambiente con la implementación del escenario RIOS, se estimó el costo de la crisis hídrica que ocurrió en el Sistema Cantareira en el período 2014-2015. Para ello, en la modelación económica se consideraron dos componentes representativos del excedente de ingresos de los municipios atendidos por el Sistema Cantareira:

- la pérdida del Valor Agregado Bruto (VAB) de la industria, y
- la pérdida del Valor Agregado Neto (VAN) de abastecimiento de agua y tratamiento de

aguas residuales.

Para estimar la pérdida económica durante la crisis del agua, se diseña un escenario contrafactual considerando el comportamiento de la curva VAB de la industria entre 2002 y 2013 y la curva VAN de abastecimiento de agua y tratamiento de aguas residuales entre 2008 y 2013. Con una ecuación de regresión, ambos parámetros son proyectado para 2014 y 2015, sin restricción de agua. La diferencia entre los datos proyectados y observados representa la pérdida económica resultante de la crisis del agua, es decir, el costo de sequía (DC).



La pérdida económica total asociada a la crisis de agua en el periodo de 2014-2015 se estimó en \$ 450 millones

Soluciones basadas en la naturaleza y el potencial para mitigar pérdidas económicas

Los resultados encontrados en este estudio indican que, si el escenario RIOS representara el uso de cobertura del suelo predominantes durante los 30 años previos al contexto de la crisis del agua, se evitarían las pérdidas en 27% del VAB de la industria y 28% en el VAN del sector de agua y alcantarillado.

Se estima que con escenarios RIOS los beneficios asociados al SbN serían del orden de \$82.4 millones en pérdidas económicas evitadas en el VAB de la industria y de \$41.6 millones resultantes de pérdidas económicas evitadas en el VAN del

sector de abastecimiento del agua y alcantarillado.

De acuerdo con esa evaluación, las pérdidas económicas evitadas totalizarían \$124 millones, lo que representa una reducción del 28% en el costo económico total de la sequía.

Este análisis indica que la inversión en SbN tiene aplicación para mitigar los impactos económicos de la escasez de agua asociada y, por lo tanto, debe ser considerada en la asignación de inversiones en el Sistema Cantareira y en los procesos de ordenamiento territorial y definición de políticas públicas.

La pérdida económica evitada con SbN totalizaría \$124 millones, lo que representa una reducción del 28% en el costo económico de la sequía.

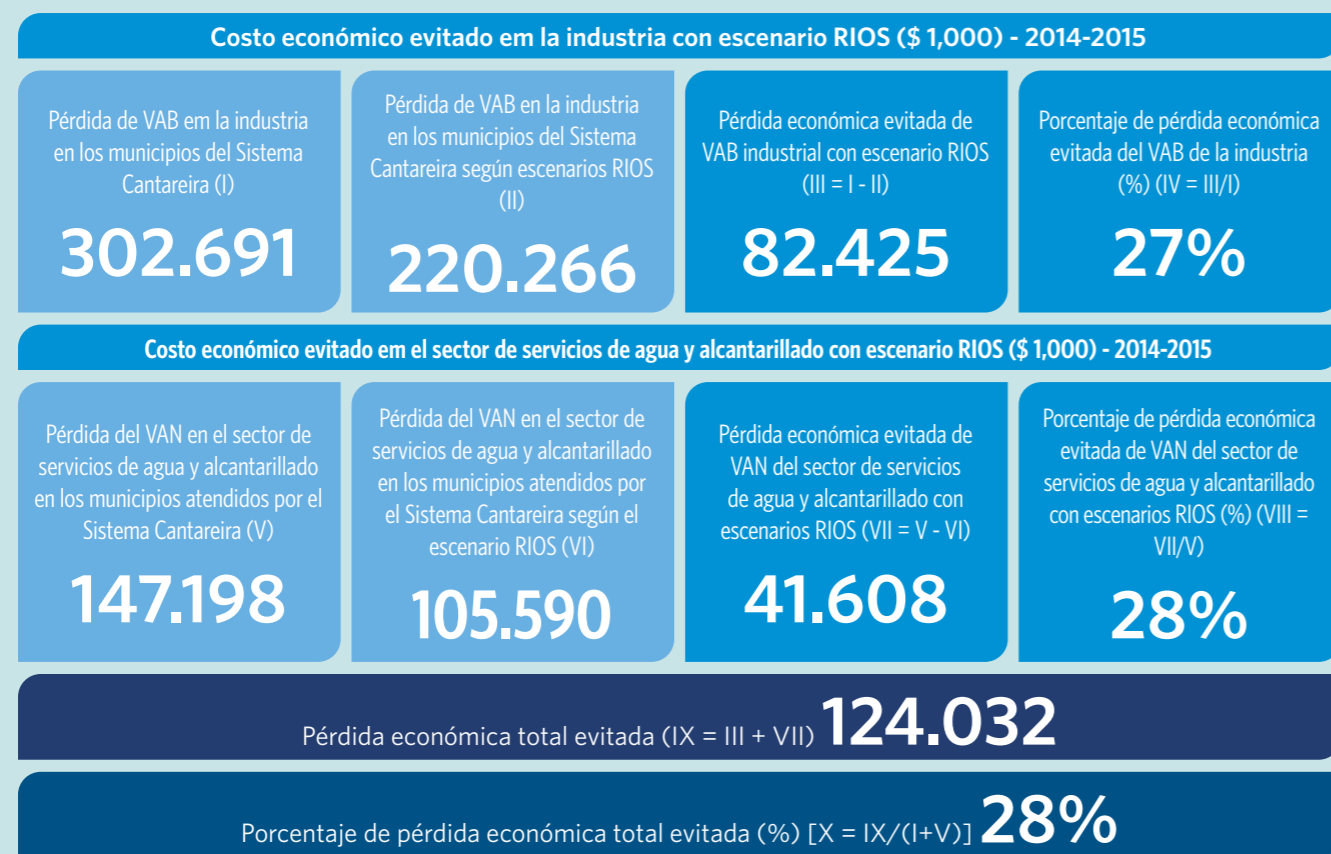


TABLA 1: RESUMEN DE LAS PÉRDIDAS ECONÓMICAS MITIGADAS EN EL VAB DE LA INDUSTRIA Y EN LOS INGRESOS DEL SECTOR DE ABASTECIMIENTO BAJO EL ESCENARIO RIOS.

Monetización general de beneficios

La estimación completa del beneficio requiere proyectar resultados para el ciclo de vida completo del programa, fijado en 35 años.

Se siguieron tres pasos para llevar a cabo esta proyección:

- **Ajuste monetario basado en el IPCA :** Las pérdidas económicas evitadas de \$ 124 millones en 2015 en el escenario RIOS fueron ajustadas por el IPCA acumulado hasta diciembre de 2021, para \$ 170.4 millones.
- **Período de recurrencia de la sequía:** Se adoptó un factor de incidencia de 1/10 años para reflejar la probabilidad de experimentar pérdidas similares a las de 2014-2015 una vez cada diez años.
- **Curva de realización de beneficios:** Restaurar ecosistemas con técnicas de restauración

forestal consideradas en este estudio lleva tiempo para lograr la funcionalidad hidrológica completa y los resultados de seguridad hídrica. Se asumió que los beneficios de la restauración de ecosistemas alcanzan la madurez hidrológica/ecosistémica en el año 8 en el caso de una restauración asistida, y hasta el año 12 en el caso de realizar una regeneración natural.

Juntas, estas tres etapas generan **un valor total estimado para el horizonte de 35 años de \$ 500.8 millones (valor nominal) o \$ 220.4 millones (VAN) por los beneficios económicos asociados a la disponibilidad adicional de agua durante los períodos de sequía** potencialmente proporcionados en el escenario RIOS.

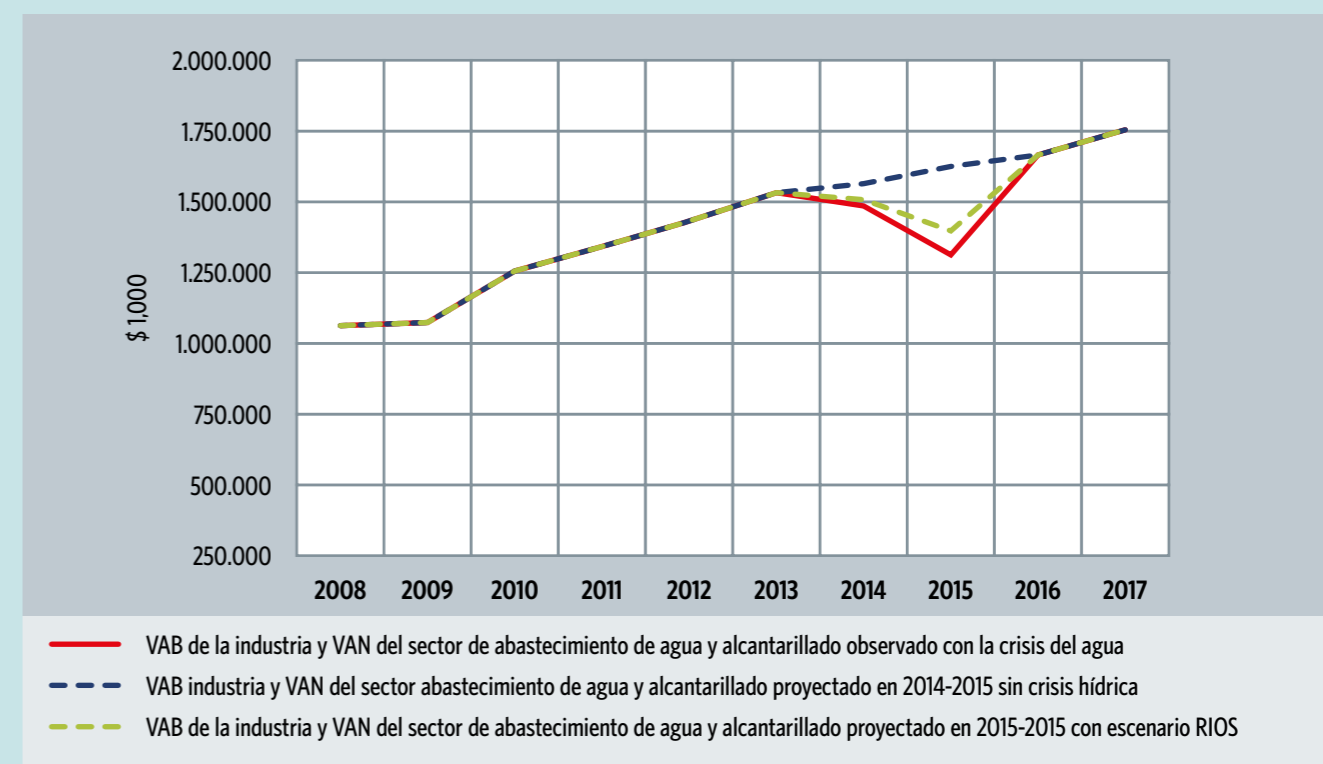


FIGURA 19: DESEMPEÑO ECONÓMICO (OBSERVADO VS. PROYECTADO) DEL VAB INDUSTRIAL Y DE LOS INGRESOS POR SUMINISTRO DE AGUA.

Análisis Costo-Beneficio

El análisis costo-beneficio (ACB) tiene el objetivo de incluir los beneficios ambientales en el escopo del análisis económico. Inversiones en SbN generan beneficios asociados a servicios ambientales que no son internalizados en el mercado, como la regulación hidrológica y la retención de sedimentos.

Se puede hacer una excepción para el mercado con respecto a la remoción de carbono de la atmósfera como resultado de las actividades de restauración forestal. Como este mercado ya ha mostrado viabilidad, especialmente en el mercado voluntario de carbono, su potencial fue considerado como parte de un flujo de caja del proyecto.

Se consideraron tres escenarios de beneficios económicos:

- Beneficio de almacenamiento de agua estimado a partir del costo de la crisis hídrica y del supuesto de recurrencia del evento de sequía en uno a cada diez años, con el objetivo de orientar la toma de decisiones bajo la perspectiva de ganancia públicas y privadas aumentando a su vez la resiliencia de la fuente en caso de escasez de agua.
- Beneficio del almacenamiento de agua con los ingresos potenciales de los créditos de carbono certificados y la comercialización en el mercado voluntario para orientar la toma de decisiones desde la perspectiva de ganancias públicas y privadas al aumentar la resiliencia de la fuente en casos de escasez de agua.
- Beneficio de almacenamiento de agua con el costo social de carbono como proxy del beneficio social relacionado al secuestro de carbono para orientar la toma de decisiones bajo la perspectiva general del bienestar social.

En cuanto al escenario de beneficio de almacenamiento de agua, el **escenario RIOS** presentó

un VPN estimado de \$40 millones (beneficios de \$220 millones versus costos de \$180 millones), lo que representa **una relación costo-beneficio de 1,2**.

El escenario de **beneficio con almacenamiento de agua y carbono**, considerando el supuesto de un precio promedio del carbono de US\$ 7,69 y emisión de crédito cada cinco años por un período de 35 años, el escenario SbN presentó un **VPN estimado en 84 millones** (beneficios de R\$ 264 millones versus costos de R\$ 180 millones), lo que representa **una relación costo-beneficio de 1,4**.

Considerando el beneficio con el almacenamiento de agua y el costo social del carbono de US\$24, el escenario SbN presentó un VPN en \$177 millones (beneficios de \$ 357 millones versus costos de \$ 180 millones), lo que representa una relación costo-beneficio de 2,0.



Los resultados económicos muestran que para todos los escenarios de inclusión de beneficios asociados con una mayor resiliencia del agua y la mitigación del cambio climático, la restauración en el sistema Cantareira tiene viabilidad económica positiva.

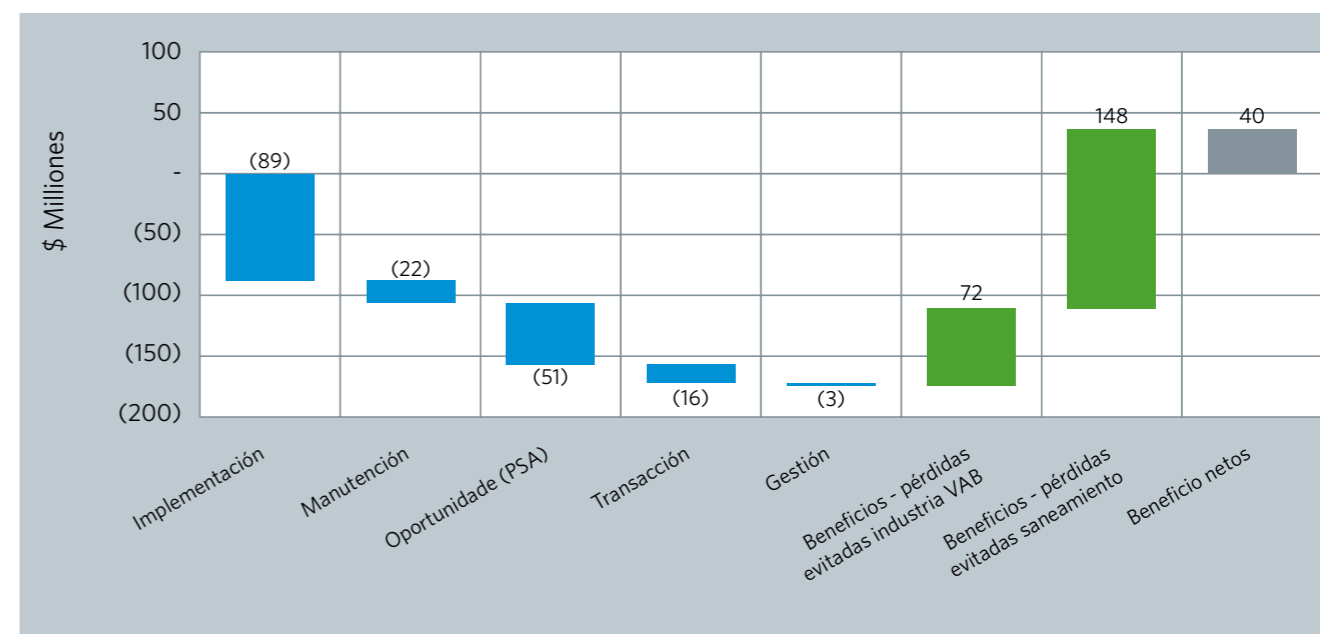


FIGURA 20: VPN DEL ESCENARIO SBN PARA EL CICLO DE VIDA COMPLETO DE 30 AÑOS, CONSIDERANDO EL BENEFICIO DE ALMACENAMIENTO DE AGUA

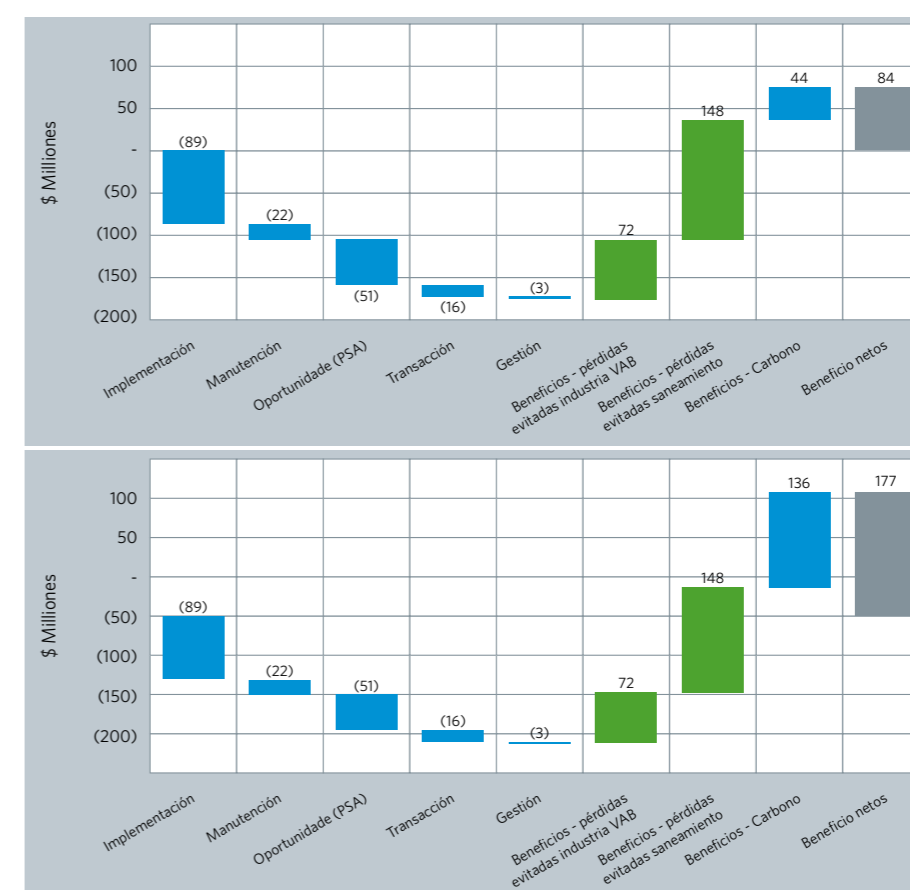


FIGURA 21: VPN DEL ESCENARIO SBN PARA EL CICLO DE VIDA COMPLETO DE 30 AÑOS, CONSIDERÁNDOSE EL PRECIO PROMEDIO DE CARBONO (IZDA.) Y CONSIDERÁNDOSE EL COSTO SOCIAL DEL CARBONO (DCHA.)

Supuestos, co-beneficios e incertidumbres

Como un análisis de esta naturaleza está sujeto a varias incertidumbres implícitas a su complejidad, a lo largo del desarrollo del estudio

prevaleció siempre la opción de adoptar supuestos conservadores, buscando evitar resultados sobreestimados.

Periodo de recurrencia de la sequía

El período de recurrencia de la sequía determina con qué frecuencia se evitan las pérdidas económicas relacionadas con la sequía debido a la implementación del escenario RIOS. Se adoptó una tasa de incidencia de un evento cada diez años.

Según la Cuarta Comunicación Nacional de Brasil a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, las evidencias apuntan claramente a un aumento de los fenómenos meteorológicos extremos, incluido

tanto un aumento de la intensidad de las precipitaciones como de la intensidad de la sequía (Brasil, 2021).

Considerando la creciente demanda de suministro público debido a la expansión de la población, la urbanización y el crecimiento del uso industrial, el grado de impacto económico para futuros eventos de sequía tiende a ser proporcionalmente mayor, abriendo el margen de retorno de la inversión en SbN en el Sistema Cantareira.

Tasa de descuento social (TDS)

El análisis de costo-beneficio de proyectos relacionados con factores climáticos y/o ecosistémicos depende en gran medida del enfoque que se adopte para la tasa de descuento a largo plazo. Para las inversiones públicas a largo plazo, como los programas de protección de fuentes de agua, a menudo se utilizan tasas de descuento social que representan cómo la sociedad en su conjunto ven el valor del bienestar presente y futuro (Arrow et al. 2014). Moore et al. (2020) evaluaron TDS para 17 países de América Latina y estiman un TDS ajustado para Brasil en 4,36%.

Elegimos usar esta tasa para ajustar los costos y beneficios al VPN.

Como otros autores sugieren diferentes valores, y considerando la naturaleza de la seguridad hídrica que promueven las SbN, que en principio beneficia a todas las esferas de la sociedad y tiende a ser permanente en el tiempo, se elaboró un análisis de sensibilidad. La **tabla 2** muestra el ACB general para el VPN como una función de diferentes combinaciones de recurrencia de sequía y tasas de descuento. Las combinaciones que resultan en un VPN > 1.0 están resaltadas en verde.

Co-beneficios

El análisis económico presentado abordó específicamente la disponibilidad de agua en situaciones de sequía y consideró la eliminación potencial de carbono solamente como una posible contribución financiera. Sin embargo,

la cartera de SbN contemplada en el escenario RIOS (al igual que en los demás escenarios alternativos) también tiene el potencial de generar otros beneficios adicionales relevantes para la seguridad hídrica.

Adaptación y mitigación de efectos climáticos

Ambos modelos hidrológicos indican que los escenarios de SbN dan como resultado la atenuación de eventos hidrológicos extremos: caudales pico y caudales de baja. Los eventos de caudales pico también son causas importantes de pérdidas económicas relacionadas con daños a la infraestructura, propiedades, impactos negativos en la salud pública, pérdidas de

suelo relacionadas con la erosión y sedimentación de cuerpos de agua/embalses, entre otros. La evaluación económica de tales impactos es relevante y debería contribuir positivamente al aumento del VPN en el ACB, pero no fue abordado en este estudio, siendo un área para explorar en futuras investigaciones.

Calidad de agua

Otro beneficio adicional de seguridad hídrica que se espera de los escenarios alternativos con SbN está relacionado con la calidad del agua. El modelo SWAT estructurado para este estudio también es adecuado para estimar los resultados potenciales de la calidad del agua, incluidos los aportes de sedimentos y nutrientes. Un estudio anterior ya exploró las posibles mejoras en la calidad del agua y sus impactos económicos relacionados con la reducción de la sedimentación y

las cargas de nutrientes en el Sistema Cantareira (WRI, 2018), por lo que se optó por centrarse solo en aspectos de cantidad/disponibilidad de agua en el estudio actual.

Los resultados de calidad del agua generados en este estudio, sin embargo, se basaron en una base de datos actualizada y más amplia, lo que permitiría una revisión del estudio anterior. Estos resultados están disponibles y se pueden utilizar para revisar análisis económicos anteriores.

Otros co-beneficios

Además de los resultados de seguridad hídrica, las carteras de SbN analizadas en este

estudio también generan beneficios adicionales que pueden tenerse en cuenta en un ACB.

Relación Beneficio / Costo: Valor Presente Neto (VPN)						
Tasa de Descuento Social	Periodo de recurrencia de sequía					
		5	10	15	20	25
2,0%		3,3	1,7	1,1	0,8	0,7
2,5%		3,1	1,6	1,0	0,8	0,6
3,0%		2,9	1,5	1,0	0,7	0,6
4,5%		2,4	1,2	0,8	0,6	0,5
5,0%		2,3	1,1	0,8	0,6	0,5
5,5%		2,1	1,1	0,7	0,5	0,4
6,0%		2,0	1,0	0,7	0,5	0,4

TABLA 2: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL ACB PARA PERÍODO DE RECURRENCIA DE SEQUÍA Y TASAS DE DESCUENTO.

Buenas prácticas de manejo y alternativas adicionales de uso y cobertura del suelo: el estudio también exploró la estimación de los beneficios potenciales derivados de la adopción de buenas prácticas agrícolas como uno de los escenarios alternativos con SbN. Se optó por no incluirlo en el análisis económico como una forma de evitar un nivel adicional de complejidad, sin embargo, el escenario de mejores prácticas también indica beneficios tanto en la calidad del agua como en la disponibilidad de agua en el suelo. Se puede suponer que una combinación de intervenciones de SbN, incluida la protección y restauración del bosque nativo, la implementación de sistemas agroforestales, la adopción de prácticas de conservación del suelo, como terrazas y rotación de pastos, resultaría en una mayor seguridad hídrica para el Sistema Cantareira. Además, una matriz variada de SbN

tiene mayor factibilidad técnica y política de implementación.

Otros beneficios socioeconómicos: los resultados del modelo SWAT demuestran la importancia de las aguas superficiales y las aguas subterráneas que alimentan los cuerpos de agua como resultado de la adopción de SbN. También se esperan impactos positivos del aumento de agua superficial sobre la rentabilidad de la ganadería y la agricultura, si estas actividades se realizan con técnicas que aprovechen los servicios ecosistémicos, como prácticas de pastoreo rotativo en lugar del pastoreo convencional de baja tecnología y la adopción de sistemas agroforestales. De esto se esperan beneficios socioeconómicos, ya que los propietarios tendrían mejores condiciones de producción, mayores ingresos y calidad de vida. Si se fomentan y gestionan adecuadamente, tales prácticas, no solo se beneficiarán de una mejor

condición hidrológica, sino que también, favorecerán la infiltración del agua en la cuenca, lo que

conduce a una mayor seguridad hídrica.

Incertidumbres

El proceso de calibración de un modelo hidrológico implica ajustes de los parámetros biofísicos a las características ambientales locales y requiere datos de entrada de buena calidad a largo plazo. En este estudio, se utilizaron los mejores datos disponibles en ese momento (datos observados a largo plazo acumulados durante 30 años) y la parametrización se probó exhaustivamente para garantizar que cada modelo proporcione los resultados más precisos posibles. Los resultados del modelo deben interpretarse en función de las comparaciones entre las líneas de base modeladas y los escenarios contrafactuales modelados. Por lo tanto, cualquier conclusión debe entenderse como una simulación del mundo real y no como una indicación definitiva

e inequívoca del comportamiento hidrológico esperado de escenarios alternativos.

Las proyecciones climáticas actuales indican que se esperan cambios sustanciales en un futuro cercano. Según la Comunicación Nacional de Brasil a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se proyecta un aumento de los eventos de precipitación extrema, junto con una disminución general de la precipitación anual y un aumento de los días secos consecutivos para la región sureste del país (Brasil, 2021). Esto agrega una capa de incertidumbre que debe tenerse en cuenta al analizar los resultados del modelo.



© Scott Warren

Implicaciones para la política pública

Soluciones basadas en la naturaleza y la adaptación a los cambios climáticos

Los resultados de este estudio contribuyen para el desarrollo de políticas públicas de seguridad hídrica para fuentes de abastecimiento público. Tal referencia viene en el sentido de presentar alternativas frente a la necesidad de adaptación a los cambios climáticos que se han previsto y ya experimentado.

La planificación y gestión de sistemas de abastecimiento de agua son basados en padrones hidrológicos históricos para definición de gradientes de variación. Sin embargo, el uso de series temporales también debe tener en cuenta la incertidumbre sobre cómo cambiarán los sistemas hidrológicos en condiciones climáticas variables. Las SbN representan una de las for-

totalmente de acuerdo o resisten al espectro de probabilidades de los resultados que surgen de SbN (Cassin y Matthews, 2021). Los resultados presentados en este estudio contribuyen a la comprensión de las incertidumbres implícitas en la aplicación de SbN para la seguridad hídrica en el Sistema Cantareira, y sobre las diferentes posibilidades de posibles beneficios.

Además de las peculiaridades que diferencian a las SbN de las soluciones que brinda la infraestructura convencional, algunos retos para su plena adopción residen en las propias políticas existentes, en los arreglos institucionales ya establecidos y, naturalmente, en el equilibrio de fuerzas políticas e intereses prevalecientes.

Las decisiones políticas sobre la gestión del agua deben tomarse con urgencia, aunque bajo incertidumbres.

mas de adaptarse a dichos cambios y mitigar sus efectos.

Em comparación con la infraestructura convencional, el plazo para que los beneficios de las SbN sean alcanzados sigue un padrón distinto, menos previsible, para que una etapa de funcionalidad ecosistémica sea alcanzada. El lapso entre la inversión y la percepción de los beneficios puede representar una barrera para convencer a los gerentes y tomadores de decisiones que, en general, tienden a buscar resultados rápidos (Browder et al., 2019).

La inseguridad surge cuando las partes interesadas y los tomadores de decisiones no están

El enfoque centrado exclusivamente en la infraestructura convencional está muy arraigado en ciertos contextos profesionales, como la ingeniería en el sector del saneamiento, y termina moldeando las prácticas institucionales, dificultando la innovación. Dichos sesgos se ven exacerbados por barreras cognitivas, como una percepción minimizada de los riesgos climáticos y la inseguridad en la toma de decisiones bajo incertidumbre, obstáculos adicionales para adoptar acciones de adaptación al cambio climático (OCDE, 2020).

Coordinación técnica y política

Invertir en la protección de fuentes con un enfoque en la seguridad hídrica implica una complejidad de políticas y requisitos de coordinación considerables. El desafío de la articulación implica la interconexión entre las políticas públicas, el sector de saneamiento y la regulación, las empresas locales, las administraciones municipales, estatales y en ocasiones federales, entre otras instancias y actores con sus intereses específicos, claros o velados.

La noción de roles compartidos y la necesidad de una amplia base de apoyo político, técnico y financiero son esenciales para el éxito a largo plazo de esta iniciativa y deben reflejarse en las políticas públicas. Además de una sólida base científica, como la que ofrece este estudio y otros, la planificación y la gestión eficaz del uso del suelo requieren una articulación refinada entre los diversos actores. Rol coordinador que ejerce esencialmente la política pública.

Es necesario un reequilibrio entre las políticas para fomentar las actividades económicas acordes a la necesidad de seguridad hídrica y las políticas para desalentar las actividades no deseadas en el contexto de una fuente de abastecimiento.



© Clara Angeleas



Coordinación de inversiones y ordenamiento territorial em fuentes de agua o (de abastecimiento)

Este estudio proporciona una valoración económica asumiendo una situación hipotética en la que una única fuente de financiación soporta las inversiones necesarias. Sin embargo, llevar a cabo un programa permanente de protección de fuentes de agua involucra recursos de financiamiento múltiples y sinérgicas.

En este caso se destaca la regulación del saneamiento, por el papel fundamental que juega para qué el sector sanitario tome la delantera en invertir en la protección de las fuentes de donde capta agua. Esta inversión, una vez reconocida como un componente natural de los costos operativos de saneamiento y debidamente

La gestión territorial es un rol inherente a la política pública y puede impactar la rentabilidad de determinadas actividades económicas.

Se deben incentivar actividades que traigan oportunidades de desarrollo a los municipios y propietarios que albergan fuentes de agua, acordes a la demanda de seguridad hídrica.

considerada en la composición de la tarifa de agua, brinda una base sólida para un financiamiento sostenible a largo plazo. Este es el caso de ARSESP frente a SABESP y otras concesionarias que operan en el estado de São Paulo.

Las administraciones estatales y municipales, por su parte, son las encargadas de coordinar las políticas de gestión territorial. En consecuencia, la integración de inversiones en escala en la gestión territorial de fuentes de abastecimiento exige la creación y coordinación de políticas nuevas y específicamente diseñadas.

A modo de ejemplo, el análisis del uso de suelo y cambio de cobertura realizado en este estudio muestra un ligero aumento en la tendencia de expansión de la silvicultura en el Sistema Cantareira en los últimos años. Como actividad intensiva en agua, la expansión de la silvicultura debe ser monitoreada para garantizar

que el crecimiento del sector no represente una amenaza para el balance hídrico general en el Sistema Cantareira.

Otro cambio en el uso y cobertura del suelo evidente en los municipios del Sistema Cantareira es la expansión del desarrollo urbano y la subdivisión de tierras, que también requiere una supervisión y control activo a través de una planificación adecuada por parte de los municipios. En el caso de São Paulo, es imperativo actuar preventivamente para evitar la pérdida de calidad en el Sistema Cantareira, como en el caso del Sistema Guarapiranga/Billings.

La promoción de actividades económicas específicas que beneficien la economía de los municipios y se encuadren en las vocaciones económicas locales y regionales, sin perjuicio del noble papel de un territorio de fuente, es un objetivo para alcanzar.

Conclusiones y recomendaciones

Dada la creciente evidencia de que los eventos climáticos extremos plantean un desafío de adaptación para las ciudades de todo el mundo, garantizar la seguridad hídrica para el bienestar de las personas y el desarrollo económico se vuelve cada vez más urgente.

Reconociendo que tal desafío representa un problema complejo de gestión territorial, económica, social y política, este estudio exploró cómo las SbN puede contribuir a la seguridad hídrica en el Sistema Cantareira como una medida complementaria a las inversiones en infraestructura convencional ya realizadas.

Al brindar perspectivas técnicas sobre los procesos hidrológicos, los impactos económicos y las implicaciones políticas, los resultados presentados aquí demuestran que invertir en la protección de fuentes de agua tiene un impacto positivo en la seguridad hídrica.

El estudio concluye que una cuidadosa priorización espacial basada en criterios hidrológicos específicos ofrece los mejores resultados para la seguridad hídrica. La atenuación de los caudales

Al comparar el comportamiento hidrológico de los escenarios con SbN contra la línea base entre la época lluviosa y seca, se evidencia claramente el “efecto esponja”, caracterizado por el almacenamiento de agua en el suelo y manto freático durante la época lluviosa, y su retorno paulatino en forma de caudal base a los cuerpos hídricos en la estación seca.

El estudio contribuye a la noción de que la protección de fuentes a largo plazo es factible cuando se combinan múltiples fuentes de financiamiento sinérgicas, incluidas las políticas públicas diseñadas específicamente para este propósito.

Teniendo en cuenta la especificidad de una fuente de abastecimiento pública frente a cualquier otra cuenca hidrográfica, es necesario un enfoque de política específica para estos territorios, además de la participación de otros actores.

El sector de saneamiento – de competencia de los municipios – así como su regulación, merecen ser destacados. Como este sector es responsable del abastecimiento de agua a la población y parte de las actividades económicas, su viabilidad eco-

Al fomentar usos del suelo que promuevan la seguridad hídrica, los municipios y la administración estatal comparten un papel en el impulso de las políticas existentes y en la creación de nuevas políticas específicas para promover una mejor gestión del suministro de agua. La complejidad de tal coordinación de políticas no es despreciable,

pero a medida que los eventos extremos como las sequías, las inundaciones y su impacto económico asolan repetidamente las ciudades y la economía, más y más tomadores de decisiones estarán dispuestos a considerar y experimentar con soluciones no convencionales, según sea el caso de las SbN.

Los componentes hidrológicos agua superficial y agua subterránea pueden ser definidos como el “embalse invisible” del Sistema Cantareira.

picos y caudales de seca, se evidenció mediante los modelos hidrológicos utilizados.

Los resultados muestran una reversión de la tendencia de disminución de la disponibilidad de agua, observada durante los últimos 30 años, lo que indica el aumento potencial de la disponibilidad de agua a partir de la adopción de SbN.

Las SbN contribuyen de manera incremental a promover la seguridad hídrica, aumentando el tiempo de almacenamiento de agua en las subcuencas que componen el Sistema Cantareira, aumentando el volumen de agua contenida en el suelo y en el manto freático a lo largo del año y mejorando la recarga de agua a los cuerpos hídricos en la sequía.

nómica se ve amenazada si no existe resiliencia de los sistemas de abastecimiento frente al cambio climático.

Por lo tanto, el sector de saneamiento juega un papel de liderazgo natural al involucrar a otros actores y fuerzas políticas, como las administraciones municipales, estatales e incluso el sector privado.

El involucramiento de los municipios sigue poco después, ya que la mayoría de las SbN se implementan en su territorio, además, los municipios tienen la capilaridad para movilizar e involucrar a los propietarios que, en última instancia, son los responsables de la decisión sobre el cambio de uso de suelo.



© Adriano Gambarini

Agradecimientos

Los autores agradecen las contribuciones de varias personas e instituciones que contribuyeron a este estudio. En particular, a Mara Ramos, Suely Matsuguma, Emerson Martins Moreira y Giovana Bevilacqua Frota de la Empresa de Saneamiento Básico del Estado de São Paulo (Sabesp), por proporcionar los datos autorizados por la empresa. Rodolfo Gustavo Ferreras y Alessandro Silva de Oliveira, de la Agencia Reguladora de los Servicios Públicos del Estado de São Paulo (ARSESP), por su acompañamiento constante a lo largo del desarrollo de este trabajo y por sus aportes durante las discusiones técnicas. para el doctor. Margaret Palmer, Directora del Centro Nacional de Síntesis Socioambiental (SESYNC), por albergar el programa de posdoctorado que posibilitó la colaboración institucional que dio como resultado este producto. A mis colegas del World Resources Institute (WRI), Rafael Feltran-Barbieri, por los aportes técnicos en el análisis económico y Suzanne Ozment por la articulación que hizo posible la

colaboración entre TNC, SESYNC y WRI. Carlos Andres Rogéliz Prada y Jorge León por sus colaboraciones técnicas en el campo de la hidrología y Fernando Cesário, Especialista en Carbono de TNC. También agradecemos a los financiadores, Fundación Tinker, por el apoyo financiero que permitió llevar a cabo este estudio; el programa Partnerships for Forests, financiado por la Foreign Commonwealth and Development Office (FCDO) del Reino Unido, que apoyó parte de este trabajo; y la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua - Esta publicación está cofinanciada por la Iniciativa Internacional de Protección del Clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU) a través del Banco Interamericano de Desarrollo que actúa como administrador dentro de La Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua. Las opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de IKI, BMU o BID, su Junta Directiva o los países que representan.

Sobre los autores

Se Jong Cho - Pos-Doutoranda - The National Socio-Environmental Synthesis Center/University of Maryland - email: se.j.cho@gmail.com

Eileen Andrea Porras Acosta - Especialista em Água Doce - TNC Brasil - email: eacosta@TNC.ORG

Claudio Klemz - Especialista em Políticas para Água - TNC Brasil - email: cklemz@tnc.org

Justus Raepple - Especialista em Finanças - TNC Global - email: justus.raepple@tnc.org

Bruna Stein Ciasca - Economista - TNC Brasil - email: bruna.ciasca@TNC.ORG

Samuel Roiphe Barreto - Gerente do Programa de Água Doce - TNC Brasil - email: sbarreto@tnc.org

Henrique Bracale - Coordenador do Fundo de Água de São Paulo - TNC Brasil - email: hbracale@tnc.org

Sobre a TNC

Sobre a TNC Brasil A The Nature Conservancy(TNC) é uma organização global de conservação ambiental dedicada à proteção das terras e águas das quais toda a vida depende. Guiada pela ciência, a TNC cria soluções locais inovadoras para os principais desafios do mundo, de forma que a natureza e as pessoas possam prosperar juntas. Trabalhando em 76 países, a organização utiliza uma abordagem colaborativa, que envolve comunidades locais, governos, setor privado e a sociedade civil. No Brasil, onde atua há mais de 30 anos, o trabalho da TNC concentra-se em solucionar os complexos desafios de conservação da Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica a partir de uma abordagem sistêmica, com foco na implementação e geração de impacto, para mitigar as mudanças climáticas e a perda da biodiversidade. Saiba mais em www.tnc.org.br.

Sobre SESYNC

El centro de investigación National Socio-Environmental Synthesis Center (SESYNC) promueve la conexión entre las ciencias naturales y las ciencias sociales brindando apoyo para la toma de decisiones a favor de la solución de problemas en la interfaz hombre-ambiente. Con el apoyo financiero de la Fundación Nacional de Ciencias, a través de la Universidad de Maryland, SESYNC abrió sus puertas en 2011. Desde el principio, hemos buscado promover la colaboración interdisciplinaria que conduzca a descubrimientos científicos innovadores. Durante 10 años, SESYNC ha fomentado la investigación y el aprendizaje que busca comprender la estructura, el funcionamiento y la sostenibilidad de los sistemas sociales y ambientales en conjunto.



El informe técnico completo del que se extrajo la información para esta versión ejecutiva se puede acceder en: www.tnc.org.br



Fomentado por el:



en virtud de una resolución del Parlamento de la República Federal de Alemania