

# *O Reservatório Invisível*

Estudo biofísico e econômico sobre investimentos em  
Soluções Baseadas na Natureza para segurança hídrica e  
adaptação climática no Sistema Cantareira, São Paulo, Brasil

© Scott Warren

# O Reservatório Invisível

## Prefácio

O Sistema Cantareira apresenta um grande desafio—prover água limpa e confiável para mais de sete milhões e meio de pessoas da região metropolitana de São Paulo em um cenário de rápida conversão de áreas naturais e mudanças nos padrões climáticos.

Quando os rios e represas que abastecem a região metropolitana de São Paulo secaram durante a estiagem mais recente (que também foi a pior já vista na região), o custo econômico da escassez de água foi alto. Hoje, com as mudanças climáticas continuando a afetar a região, definir como o Sistema Cantareira deve se adaptar ao aumento da frequência de estiagens continua sendo um questão de urgente debate.

### **A resposta, em parte, está na natureza.**

Como os autores de *O Reservatório Invisível* deixam claro, investir em soluções baseadas na natureza em escala oferece um caminho confiável para a saúde dos ecossistemas e, por sua vez, ajuda a moldar comunidades resilientes ao clima e com segurança hídrica no futuro.

Para entender como isso funciona, os autores

argumentam que basta olhar para o solo sob nossos pés.

Como o título desse estudo sugere, o volume de água nos córregos, rios e represas depende não só da precipitação, mas também da conexão entre a água que podemos ver (água superficial) e a água que não vemos (que é armazenada como umidade de solo e água subterrânea).

Fora do alcance dos olhos, esses “reservatórios invisíveis” ajudam a mitigar eventos extremos, reduzindo o fluxo pico durante as chuvas e aumentando os fluxos de base durante os períodos de seca.

Ainda que essa capacidade de armazenamento natural venha sendo reduzida—como tem sido o caso nas bacias de São Paulo ao longo de décadas de destruição da Mata Atlântica, planejamento territorial inadequado e a expansão urbana—ela também pode aumentar.

Os autores demonstram que o portfólio de soluções baseadas na natureza, como a restauração de vegetação nativa em áreas específicas dentro dos mananciais, a recuperação de matas ciliares, e uso das melhores práticas agrícolas—implantadas em escalas significativas (32

mil hectares), mas direcionadas a apenas uma pequena fração (~15%) da área de drenagem que alimenta a rede de abastecimento do Sistema Cantareira—pode resultar em 33% a mais água dentro do manancial em períodos de seca. É nos dias em que o nível de água nos reservatórios se reduz que ter água adicional no sistema hidrológico é mais importante.

O custo de um portfólio de soluções baseadas na natureza é significativo. A estimativa conservadora dos autores é de US \$180 milhões. Mas o retorno sobre o investimento também é importante, com uma relação custo-benefício de 1,2 considerando-se somente os benefícios sazonais relacionados à quantidade de água. Se o carbono gerado por um programa de restauração dessa escala for monetizado, a relação do custo-benefício sobe para 1,5.

Os autores ressaltam que os benefícios na qualidade da água também serão consideráveis, no entanto este estudo concentra a narrativa de soluções baseadas na natureza para segurança hídrica na quantidade. Como habilmente demonstrado nesse estudo, a natureza tem o poder de ajudar a resolver o problema de

escassez de água, mesmo que isso ainda venha sendo amplamente ignorado como uma estratégia de adaptação climática.

Precisamos atuar já para colocar esse aprendizado em ação. Prestadores de serviços de abastecimento público e suas agências reguladoras, como a SABESP e ARSESP, têm uma oportunidade única de levar esse trabalho à frente, liderando investimentos na natureza que correspondam à escala da crise climática enfrentada por São Paulo.

De fato, a adoção de soluções baseadas na natureza não se dará sem a liderança das agências reguladoras e de companhias de abastecimento de água. Com esse estudo, a SABESP e a ARSESP têm em mãos uma ferramenta para levar adiante um movimento que vêm ganhando força. Seu exemplo seguramente inspiraria outras agências reguladoras e empresas no Brasil e no mundo a buscar soluções para um clima que está em alteração.

***Daniel Schemie é Líder da Estratégia de Bacias Hidrográficas Resilientes da The Nature Conservancy***

# Estudo biofísico e econômico sobre investimentos em Soluções Baseadas na Natureza para segurança hídrica e adaptação climática no Sistema Cantareira, São Paulo, Brasil

Atualmente, mais de metade da população mundial vive em cidades. Bacias hidrográficas estão sendo degradadas em todo o mundo em função da conversão de ambientes naturais, do inadequado planejamento territorial e da expansão urbana.

Sinais de alerta relativos à segurança climática e hídrica são diversos. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU traz evidências de que eventos climáticos extremos estão se tornando mais frequentes e mais intensos. O Fórum Econômico Mundial (WEF) adverte que falhas de tomada de ação

sobre extremos climáticos e hidrológicos são classificadas entre os principais riscos à economia global, tanto em termos de probabilidade quanto de impacto.

Garantir o abastecimento adequado de água potável é um dos desafios globais mais urgentes. Estratégias convencionais focadas em intervenções de engenharia, como barragens, integração de sistemas e transferências entre bacias, têm limites para garantir a segurança hídrica, especialmente com as mudanças climáticas e a crescente demanda de água.

A adoção de soluções baseadas na natureza

(SbN) torna-se indispensável para garantir o suprimento de água no longo prazo com qualidade e em quantidade, provendo resiliência aos sistemas de abastecimento público.

A partir de uma sólida base de dados, este estudo contribui com novas evidências e análises sobre o que esperar da adoção de SbN. Com foco no Sistema Cantareira, o estudo tem por objetivo:

- modelar os benefícios hidrológicos e econômicos potenciais decorrentes de investimentos em SbN no Sistema Cantareira;
- propor a priorização de intervenções para a

proteção do Sistema Cantareira como manancial de abastecimento público;

- apoiar a coordenação e o desenvolvimento de políticas de planejamento e gestão territorial no Sistema Cantareira;
- embasar a alocação/coordenação de recursos financeiros adicionais, por meio da tarifa de água, para atingir os objetivos de proteção de todas as áreas de contribuição no Sistema Cantareira.

Segundo definição da União Internacional pela Conservação da Natureza (IUCN), as soluções baseadas na natureza são ações para proteger, gerenciar de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, que abordam os desafios sociais de forma eficaz e adaptativa, proporcionando simultaneamente benefícios ao bem-estar humano e à biodiversidade.

Para a segurança hídrica, as SbN incluem a restauração da funcionalidade de ecossistemas naturais e a adoção de boas práticas de uso do solo em áreas hidrologicamente priorizadas para reduzir os riscos hídricos.



## Por que o Sistema Cantareira?

Um dos principais sistemas de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, o Sistema Cantareira ainda guarda boas condições para servir como manancial hoje e no futuro. Localizado entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, abrange área de 220 mil hectares e é composto por quatro reservatórios interligados (Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibaia e Paiva Castro), que fornecem água para cerca de 47% da Região Metropolitana de São Paulo.

Esse território é sujeito ao uso dinâmico da terra, às políticas estaduais e municipais e a

diversas tendências sociais e econômicas. No campo natural, o Cantareira é sujeito ao regime climático e seus efeitos associados no ciclo hidrológico, refletidos na dinâmica da água sobre o relevo, a vegetação, o solo, os usos da terra, rios e os compartimentos hidrológicos subterrâneos.

A região do Sistema Cantareira é um território que pode catalisar ações em prol da segurança hídrica da Região Metropolitana de São Paulo como um grande exemplo para outros mananciais no país e para o setor de saneamento.

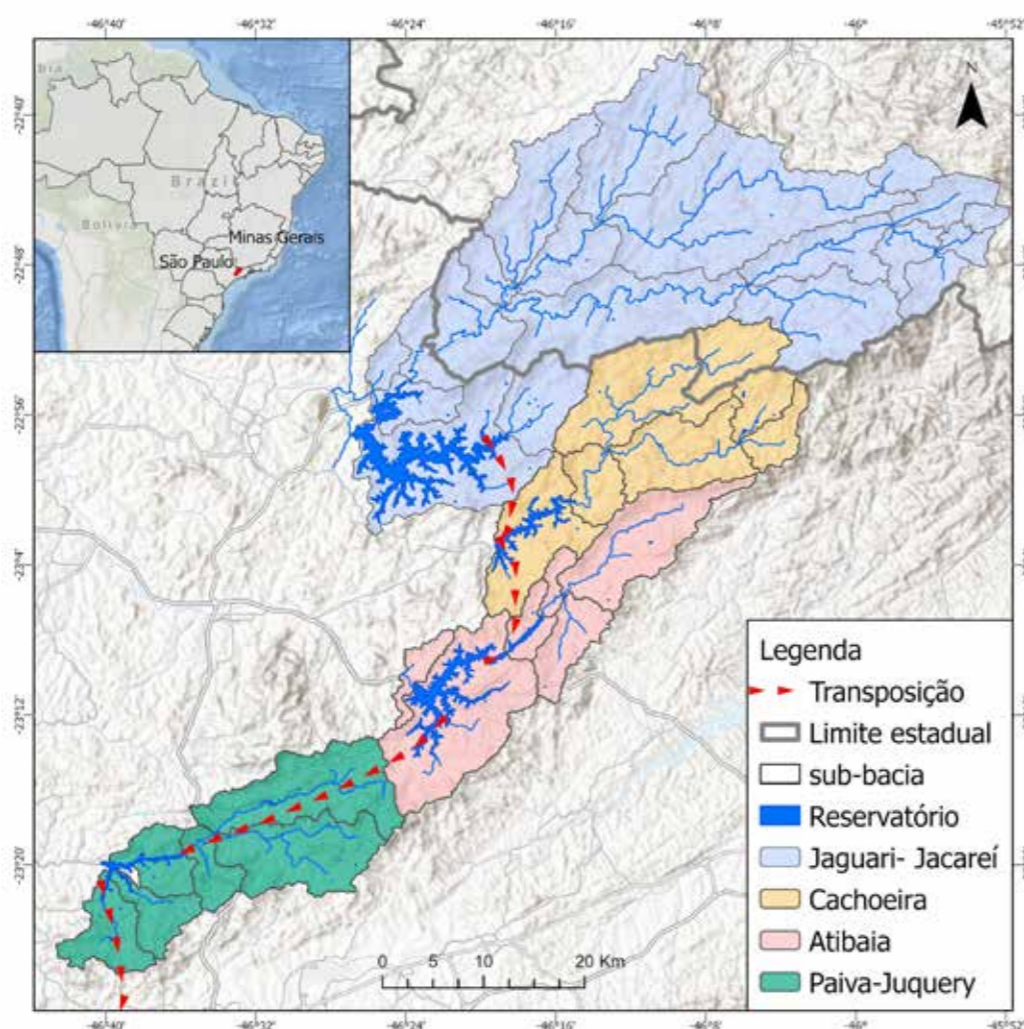


FIGURA 1 SISTEMA CANTAREIRA

Os mananciais são espaços territoriais da máxima importância para o bem-estar da sociedade e para o desenvolvimento econômico. Toda cidade, pequena ou grande, ou agrupamento humano de qualquer tamanho precisa de acesso à água.

## Colaboração institucional

Ao Sistema Cantareira é inerente o complexo desafio do planejamento e da gestão territorial envolvendo múltiplos atores. De igual maneira, é inerente a oportunidade de demonstrar o potencial do investimento e da alocação eficaz de SbN para a construção de um manancial sustentável para hoje e para o futuro.

Esforços colaborativos das partes interessadas e dos tomadores de decisão são o ponto de partida para que a conexão entre o conhecimento científico e a tomada de decisão política embase o planejamento territorial, justificando investimentos públicos e privados.

Graças a um esforço colaborativo para a elaboração deste estudo, foi possível garantir a

disponibilidade de dados qualificados, chegar a um alinhamento sobre a estrutura dos modelos hidrológicos, definir cenários alternativos de uso e cobertura da terra e promover o debate sobre os modelos, seus algoritmos, pressupostos e os resultados.

Fizeram parte desse esforço a The Nature Conservancy, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) – através da Gerência de Recursos Hídricos Metropolitanos –, a Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo (Arsp) e o Centro Nacional de Síntese Socioambiental da Universidade de Maryland (Sesync), além de outros pesquisadores e gestores públicos.

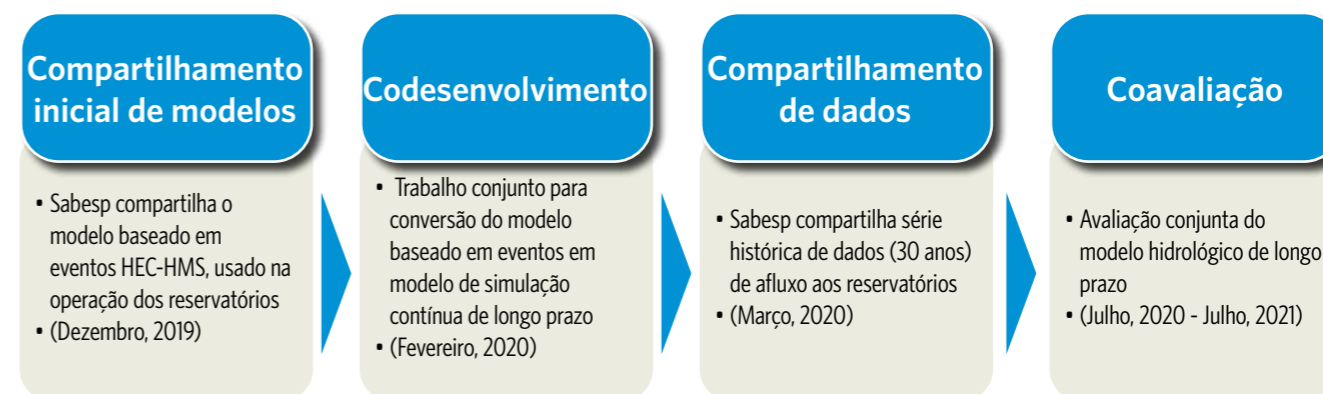


FIGURA 2: PROCESSO DE CODESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE LONGO PRAZO AO LONGO DO PROJETO, ADAPTANDO A ESTRUTURA DE MODELAGEM HIDROLÓGICA EM USO PELA SABESP



# A influência do planejamento e gestão territorial no balanço hídrico

Diferentes tipos de uso e cobertura do solo podem afetar o ciclo hidrológico e o balanço hídrico em uma bacia hidrográfica, especialmente em um manancial.

O uso de técnicas agropecuárias, o manejo florestal e a gestão fundiária em uma dada paisagem resultam em mudanças no uso e na cobertura do solo e, conseqüentemente, influenciam o tempo de retenção da água em um manancial e a capacidade de retenção de sedimentos e nutrientes.

Mudanças no uso e cobertura do solo têm implicações hidrológicas se algum dos usos da terra alterar significativamente os componentes do balanço hídrico.

A principal entrada de água em um sistema hidrológico é a precipitação. Com uma matriz de uso e cobertura da terra que contemple ações de conservação e restauração diversificadas e boas práticas agrícolas (Figura 3), essa entrada

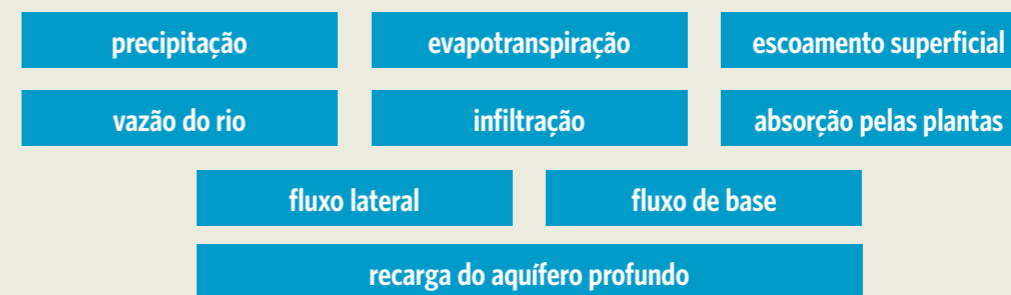
pode ser incrementada também pela captura nebular. A água que entra no sistema é captada pelas plantas e retorna à atmosfera pela evapotranspiração. O volume e o tempo de retenção de água no sistema hidrológico são incrementados se o uso e a cobertura da terra forem diversificados, ou seja, mais água é particionada no fluxo subterrâneo através do aumento da infiltração e da recarga de água no solo enquanto diminui o escoamento superficial, reduzindo a velocidade do transporte de água para jusante. Alterações também são esperadas na qualidade da água, reduzindo ou aumentando a erosão do solo e o aporte de nutrientes e poluentes.

Neste estudo, com o propósito de comparar cenários alternativos de uso e cobertura da terra no Sistema Cantareira, modelos hidrológicos foram usados para simular os potenciais efeitos de cada um desses cenários na dinâmica hídrica.



FIGURA 3: GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS E RESULTADOS AMBIENTAIS

Os componentes dos processos hidrológicos mais relevantes para a disponibilidade hídrica incluem:



Em uma área de manancial, há que se combinar diferentes interesses, coletivos e privados, com foco no planejamento e gestão territorial e visão de longuíssimo prazo.

Atividades econômicas e usos do solo que contribuam para a saúde do manancial devem ser incentivadas através das políticas públicas.

Já atividades que degradem a nobre condição de suprimento de água devem ser desincentivadas nesses espaços e promovidas em outros locais, que não em mananciais.



© Scott Warren

## Múltiplos benefícios do planejamento de paisagem

### Identificação de áreas prioritárias

Áreas úmidas  
Áreas de infiltração  
Potencial de captura nebulosa



### Manejo do solo e boas práticas

Terraceamento  
Bacias de infiltração  
Manejo de estradas rurais



### Manutenção da vegetação nativa

Restauração e conservação

Captura nebulosa/precipitação ↑

Evapotranspiração ↑

Reserva no dossel ↑

Retenção de água no solo ↑

Escoamento superficial ↓

Velocidade da água ↓

Erosão do solo ↓

Transporte de nutrientes ↓

↑  
Rendimento hídrico

↓  
Risco de inundações

↓  
Redução do risco de seca

↑  
Qualidade da água

FIGURA 4: ALTERNATIVAS DE GESTÃO DA PAISAGEM EM MANANCIAS E RESPECTIVOS BENEFÍCIOS DE QUALIDADE E QUANTIDADE DE ÁGUA

## Modelos biofísicos

As modelagens biofísicas e hidrológicas usadas neste estudo têm o propósito de subsidiar a definição de políticas de planejamento e gestão territorial de mananciais, buscando a compreensão dos efeitos em cadeia decorrentes de intervenções e seus efeitos.

Os potenciais impactos da restauração da paisagem na hidrologia de bacias hidrográficas foram simulados por meio de uma síntese de vários modelos que, conjuntamente:

- indicam os locais de intervenção com maior potencial de impacto hidrológico;
- preveem mudanças no balanço hídrico;
- simulam a hidrologia de bacias hidrográficas.

### MODELO FIESTA

Formações florestais detêm a capacidade/potencial de capturar a umidade presente no ar. O modelo FIESTA foi usado para simular o processo de interceptação e captura nebulosa, que representa um aporte adicional de água em um sistema hidrológico, além da precipitação.

A ocorrência de captura nebulosa depende de condições microclimáticas localmente específicas, como a temperatura, a altitude, a prevalência de ventos, a orientação do relevo, o padrão de cobertura da terra e a estação do ano.

O modelo FIESTA quantifica fluxos hidrológicos decorrentes da captura nebulosa em uma bacia hidrográfica e é utilizado para estimar o potencial aporte hídrico dessa fonte em decorrência do incremento na cobertura florestal na paisagem.

Ao todo, três modelos de simulação hidrológica foram utilizados para estimar os potenciais resultados de cenários alternativos de cobertura e uso da terra na dinâmica hidrológica no Sistema Cantareira.

Os três modelos foram aplicados em conjunto, de modo a representar a variabilidade espacial das condições do Sistema Cantareira e para simular diferentes processos físicos relevantes para a tomada de decisão sobre a gestão da paisagem.

Para indicar os locais mais apropriados para intervenções de restauração ou mudança do uso e cobertura da terra, foi usado, ainda, um modelo adicional, chamado RIOS.

### MODELO HEC-HMS

O modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), que já vinha sendo utilizado pela Sabesp no início deste estudo para o gerenciamento e a operação dos reservatórios do Sistema Cantareira, foi adotado para integrar o conhecimento acumulado sobre a área do estudo e seus processos hidrológicos com outras informações relevantes para a gestão hídrica de longo prazo.

Através do algoritmo Soil Moisture Accounting (SMA), o modelo foi ajustado de modo a simular o armazenamento de água tanto no período de seca como no período de chuvas, representando diferentes componentes do sistema hidrológico.

A partir de dados hidrometeorológicos, o modelo calcula o escoamento superficial da bacia, perdas por evapotranspiração (ET), infiltração, fluxo de água subterrânea e percolação profunda.

*Neste estudo, diversas técnicas de modelagem foram combinadas. Um dos cenários de intervenção de paisagem foi desenvolvido pelo modelo RIOS. As taxas de captura nebulosa foram estimadas usando a simulação oferecida pelo modelo FIESTA. Esses dados foram, então, submetidos aos modelos de simulação hidrológica HEC-HMS e SWAT para estimar os potenciais resultados na quantidade de água e os efeitos sobre a qualidade.*

### MODELO SWAT

O modelo Soil and Water Assessment Tool foi desenvolvido para estimar o balanço hídrico e é capaz de simular longos períodos. Ele utiliza atributos geoespaciais, como tipos de solo, uso e cobertura da terra, topografia e práticas de manejo de culturas, com o objetivo de prever a resposta das entradas de água no sistema, de modo semelhante ao HEC-HMS, mas com maior refinamento técnico e complexidade.

O modelo SWAT é reconhecido como um dos modelos mais completos para modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e foi estruturado usando dados disponíveis de uso e cobertura da terra, solo e dados climáticos do Sistema Cantareira.

### MODELO RIOS

O modelo Resource Investment Optimization System (RIOS) foi usado para identificar áreas prioritárias para intervenção visando ganhos hidrológicos, como o incremento na infiltração de água no solo, recarga de aquíferos superficiais e redução da sedimentação e aporte de nutrientes aos corpos d'água. Desenvolvido pelo Projeto Natural Capital (NatCap), RIOS é um software que ajuda a priorizar as áreas, atividades e alocação de recursos em processos de planejamento da paisagem e é especificamente focado em SbN. A principal função é permitir um diagnóstico inicial para identificar áreas e atividades que apresentem maior impacto nos serviços ecossistêmicos. A otimização é baseada na combinação de dados biofísicos relacionados à água subterrânea, ao fluxo de base, ao tipo de solo, relevo e cobertura do solo para definição de locais onde as intervenções têm maior probabilidade de gerar benefícios, resultando na identificação de áreas prioritárias de intervenção.



## Linha de base e cenários alternativos

*Inúmeras possibilidades de alocação de cenários alternativos para um determinado território são possíveis, e um dos objetivos da modelagem é o de identificar aqueles que tenham a maior viabilidade econômica e política ao mesmo tempo que maximizem os serviços hidrológicos desejados.*

Para esta análise, foi considerado como linha de base o uso e cobertura da terra do Sistema Cantareira gerado a partir de imagens de satélite do ano de 2018.

Já os cenários de intervenção na paisagem consistem em diferentes alocações espacialmente distribuídas de SbN como restauração de vegetação nativa, recuperação de matas ciliares em beiras de rios e reservatórios e aplicação de boas práticas agrícolas, entre outras possibilidades.

Os cenários de intervenção considerados neste estudo foram os seguintes:

**1. Mínima intervenção (MI):** considera a restauração da vegetação nativa em zonas ripárias e entorno de nascentes de acordo com os padrões mínimos definidos pelo Código Florestal Brasileiro.

**2. Intervenções expandidas (IE):** segue a mesma lógica do cenário de mínima intervenção,

porém considera faixas maiores de restauração em zonas ripárias e entorno de nascentes.

Nesses dois cenários, as áreas de pastagem sob posse da Sabesp foram consideradas restauradas. Isso representa 1.238 ha no cenário de mínima intervenção e 3.225 ha no cenário de intervenções expandidas.

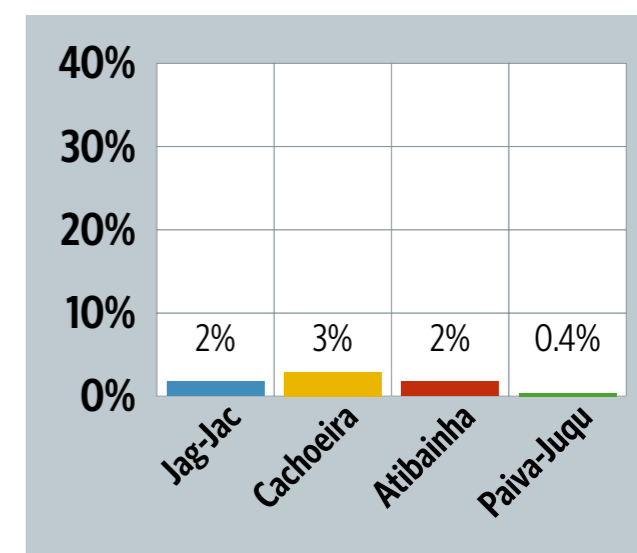
Embora esses dois cenários tomem como referência a aplicação do Código Florestal Brasileiro, este estudo não guarda qualquer relação com mecanismos ou políticas de comando e controle.

**3. Cenário customizado (RIOS):** considera as características geofísicas do Sistema Cantareira e, a partir da aplicação do modelo RIOS, define especialmente as áreas que maximizam a infiltração de água e o fluxo de base. Foi identificada uma área de 32.085 ha para intervenções distribuídas nas quatro sub-bacias.

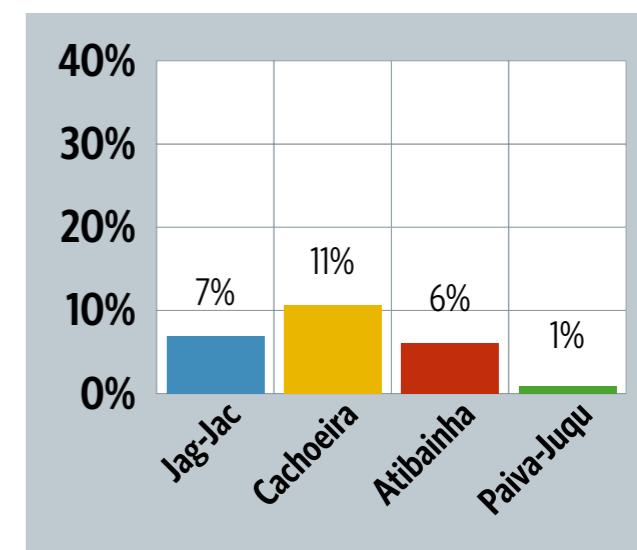
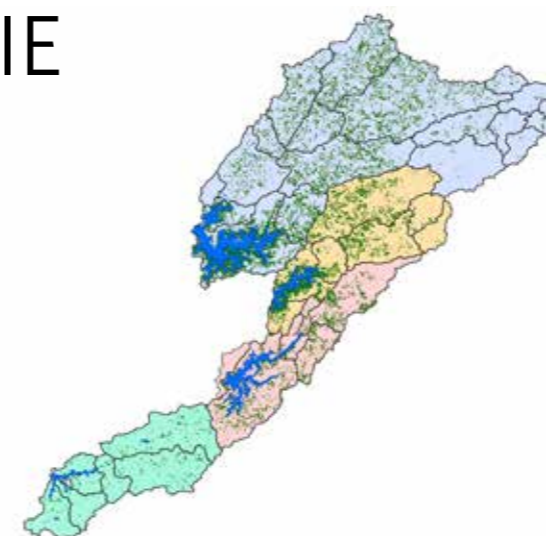
No cenário de mínima intervenção, foram consideradas as regras atuais de aplicação do Código Florestal Brasileiro para matas ciliares e nascentes, ou seja, variável de 5 a 30 metros ao longo de rios e córregos, 500 metros ao redor de reservatórios e de 15 metros no entorno de nascentes.

No cenário de intervenções expandidas, foram considerados os parâmetros do CFB anterior às alterações promovidas pela Lei 12.651/12, ou seja, faixas ripárias de 30 metros ao longo de rios e córregos, 500 metros ao redor de reservatórios e de 50 metros no entorno de nascentes.

MI



IE



RIOS

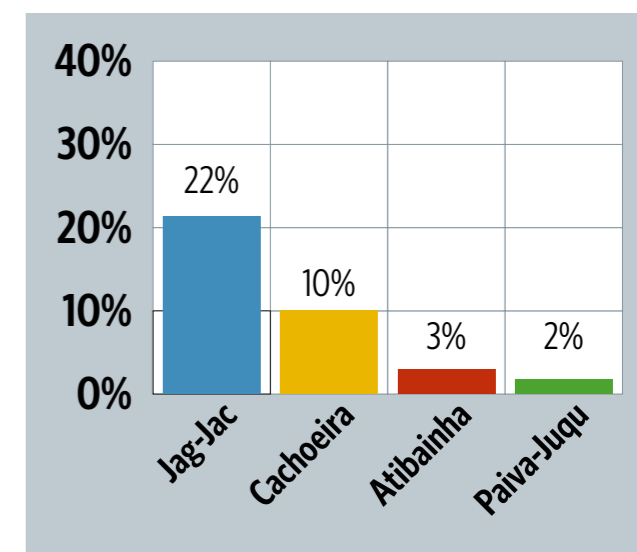
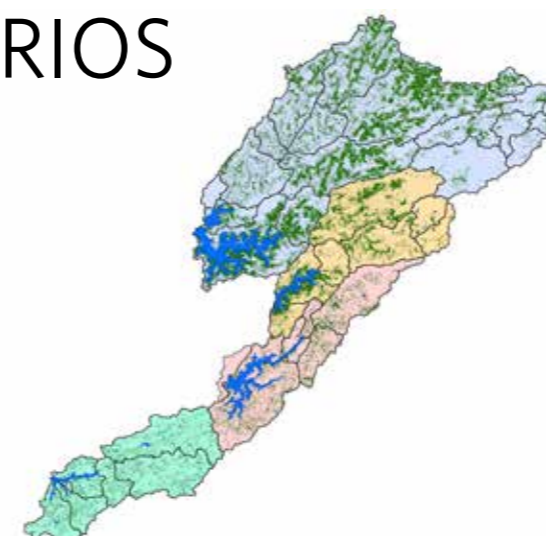


FIGURA 5: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS CENÁRIOS DE INTERVENÇÃO NO SISTEMA CANTAREIRA E QUANTIFICAÇÃO DAS INTERVENÇÕES DENTRO DE CADA SUBBACIA



# Resultados dos modelos hidrológicos

Os dois modelos hidrológicos - HEC-HMS e SWAT - utilizados para estudar a hidrologia de longo prazo do Sistema Cantareira fornecem linhas de evidência complementares para que se possa tecer inferências a respeito dos impactos hidrológicos dos cenários de intervenção na paisagem, bem como colher subsídios para tomada de decisão sobre o uso do solo e o planejamento territorial no Sistema Cantareira. A figura 6 demonstra como os resultados das linhas de base modeladas foram consistentes com a linha de base dos dados observados.

Como os modelos são caracterizados por diferentes níveis de complexidade e funcionalidade, é natural que cada um deles apresente vantagens e desvantagens. Por exemplo, o modelo HEC-HMS segue uma estrutura mais simples e requer um número relativamente menor de parâmetros para representar a hidrologia geral de uma bacia hidrográfica em resposta a diferentes cenários de intervenção; porém, os resultados gerados têm menor precisão. Ao passo que, para simular o escoamento superficial, os fluxos subterrâneos e o armazenamento de água no solo, bem como as métricas de qualidade da água, o modelo SWAT considera diferentes usos e tipos de solo dentro de uma sub-bacia, utilizando maior resolução espacial.

As modelagens foram realizadas por

sub-bacias, considerando as áreas de contribuição para cada um dos quatro reservatórios do Sistema Cantareira, da seguinte maneira:

- Sub-bacia Jaguari-Jacareí;
- Sub-bacia Cachoeira;
- Sub-bacia Atibainha;
- Sub-bacia Paiva Castro;

Ações de gestão da paisagem, como a recuperação e proteção da Mata Atlântica, podem amplificar os efeitos locais da captura nebulosa, interceptar e armazenar a água da chuva no dossel e promover a infiltração e aumentar o armazenamento de água no solo. Mudanças nesses componentes afetam o balanço hídrico geral e o tempo de retenção de água, ou seja, mais água é dividida para o fluxo de água subterrânea através do aumento da infiltração e do teor de água do solo, enquanto diminui o escoamento superficial, o que pode resultar em transporte rápido de água a jusante (figura 8).

Os resultados das modelagens relativos à qualidade de água não são explorados neste documento, privilegiando o foco no aspecto quantitativo da segurança hídrica.

O cenário RIOS, em geral, apresentou o melhor desempenho em termos de benefícios hidrológicos da quantidade de água em todas as sub-bacias.

Em comparação com os dados observados, o modelo HEC-HMS calibrado forneceu uma melhor resposta quando consideradas as vazões médias, enquanto o modelo SWAT resultou em uma melhor correlação com os extremos do hidrograma, ou seja, os picos de vazão e as vazões de estiagem (figura 7).

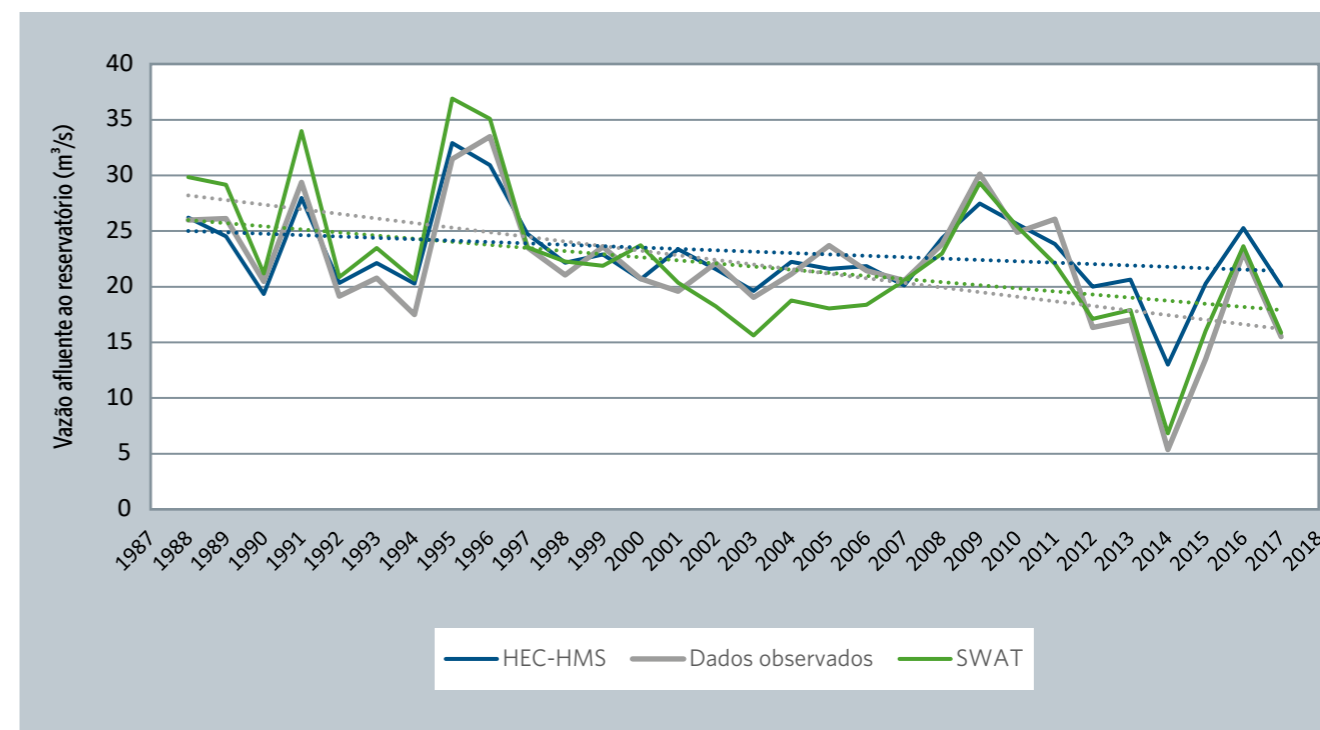


FIGURA 6: COMPARAÇÃO ENTRE AS LINHAS DE BASE DOS MODELOS CALIBRADOS E OS DADOS OBSERVADOS.

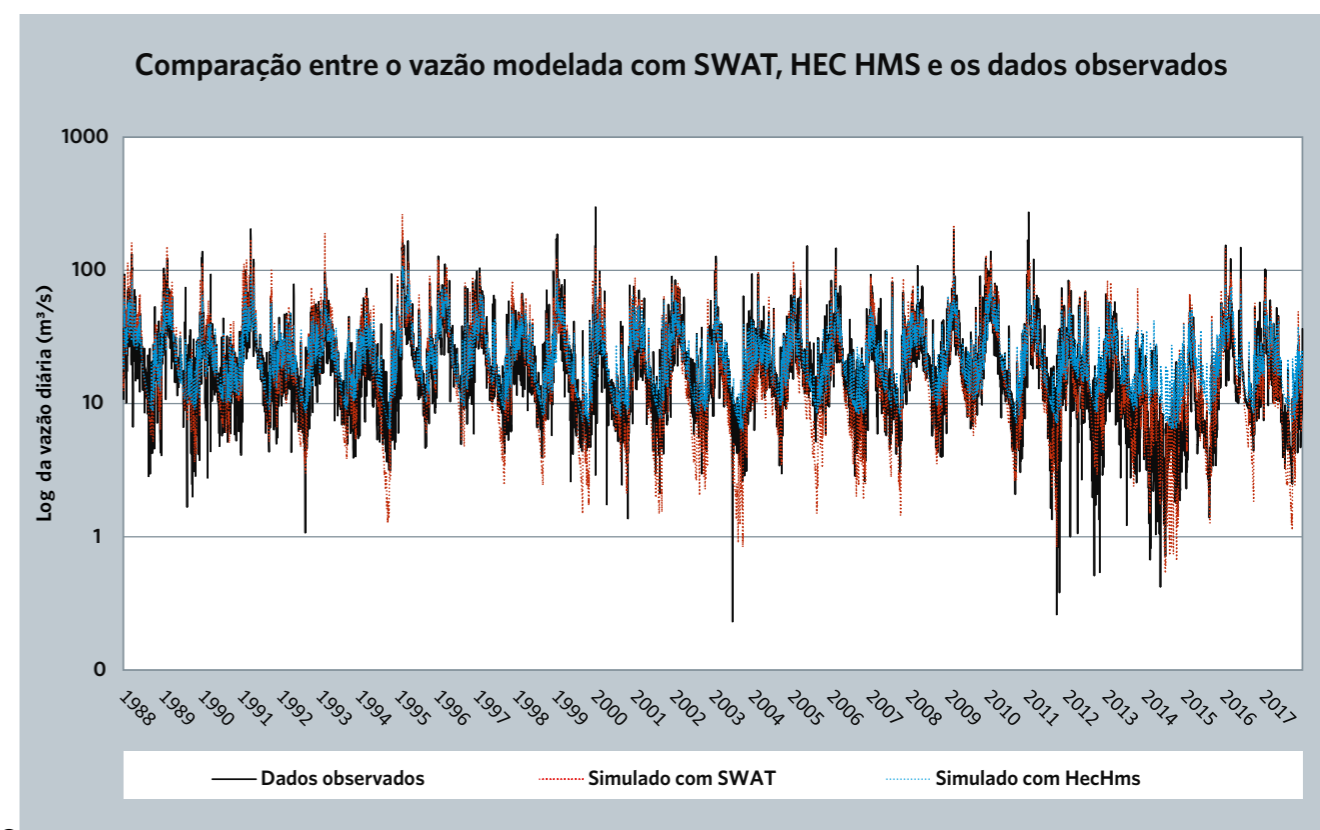


FIGURA 7: PRECISÃO DE RESPOSTA DOS MODELOS SWAT E HEC-HMS EM COMPARAÇÃO COM DADOS OBSERVADOS.

## Variáveis da modelagem hidrológica e suas correlações

# INTERVENÇÃO NA PAISAGEM

Influência no  
microclima

Precipitação  
Captura nebulosa  
Evapotranspiração

Influência no  
balanço hídrico  
superficial

Vazão  
Escoamento superficial  
Infiltração

Influência na  
hidrologia e  
armazenamento  
subsuperficial

Fluxo lateral de água  
Fluxo subterrâneo  
Aquífero (superficial e profundo)

FIGURA 8: SIMULAÇÃO DA GESTÃO DA PAISAGEM NO BALANÇO HÍDRICO USANDO COMPONENTES DO MODELO HEC-HMS E SWAT



# Resultados do modelo HEC-HMS

Os resultados da simulação com o modelo HEC-HMS, por ser esse um modelo mais simples, limitam-se a uma compreensão geral de como os cenários de intervenção interfeririam na disponibilidade de água nos reservatórios.

As vazões médias mensais foram calculadas para todo o período de simulação (1988-2018) e especificamente para os anos de seca de 2013-2015. Os resultados demonstram, em geral, um aumento na vazão dos rios com os

cenários de intervenção ao longo dos anos. Os maiores aumentos são observados na sub-bacia do Jaguari-Jacareí.

Comparando-se o período da seca de 2013-2015 com todo o período de simulação, observa-se que nesse período o incremento da vazão é maior, indicando que os cenários de intervenção têm o potencial de fornecer mais água justamente quando esta é mais escassa, durante a estação seca.

Em termos gerais, os resultados da simulação hidrológica de longo prazo do modelo HEC-HMS indicam que as atividades de restauração de vegetação nativa resultam na atenuação de eventos extremos de vazão - vazões de pico são reduzidas e vazões de estiagem são incrementadas - com melhorias marginais no rendimento anual de água.

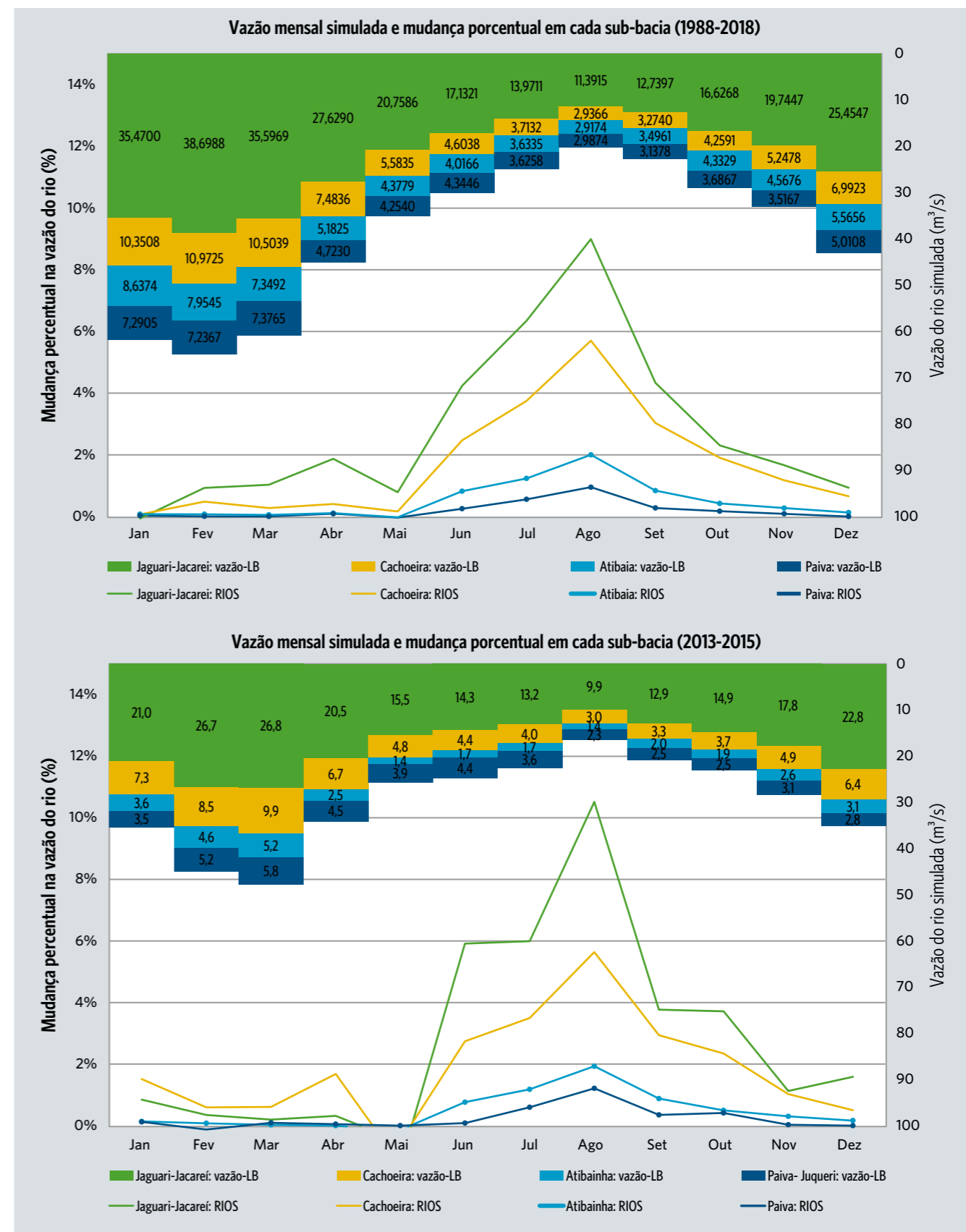
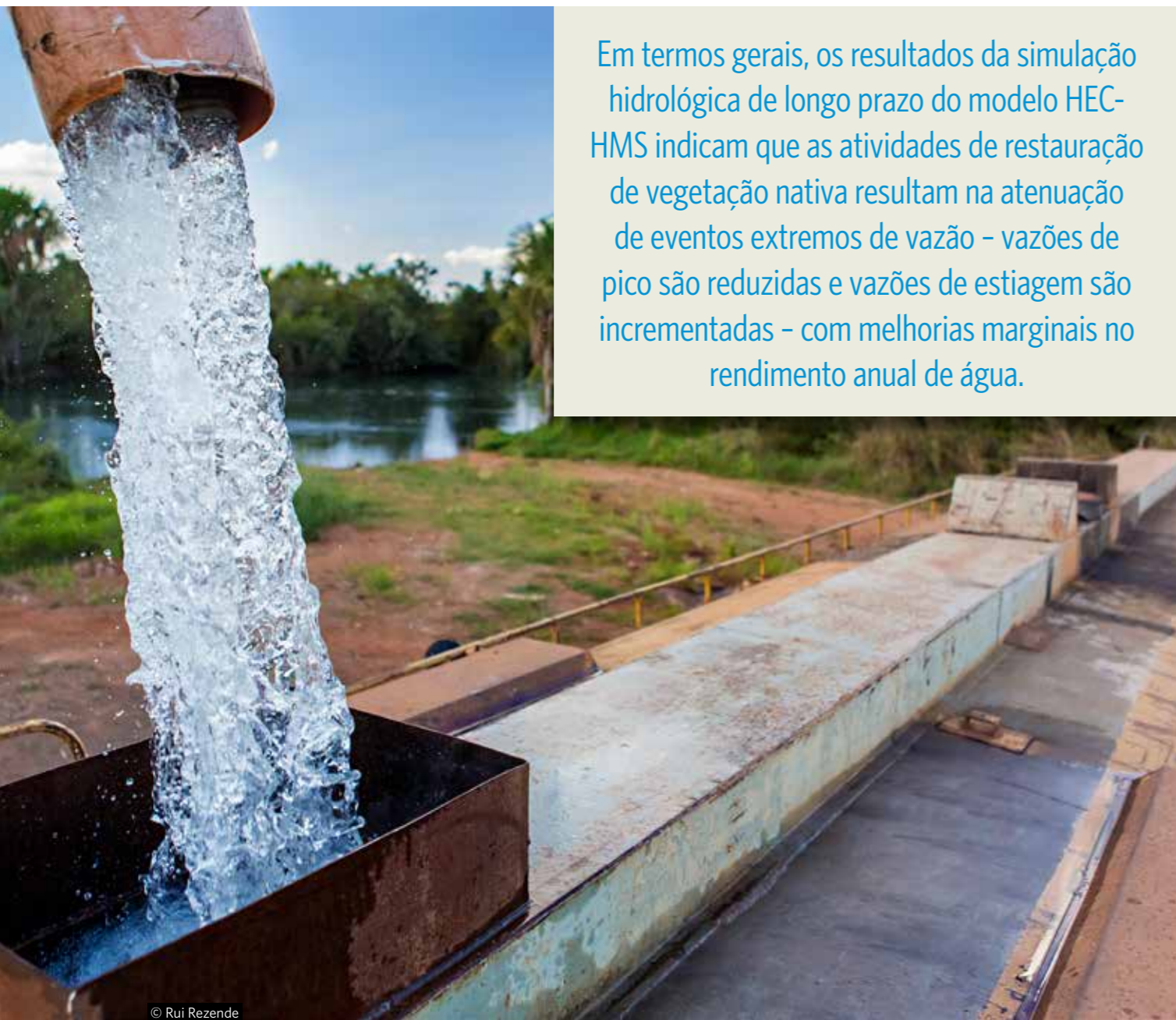


FIGURA 9: VAZÃO MÉDIA MENSAL DO RIO NA LINHA DE BASE (LB) E A ALTERAÇÃO PERCENTUAL DA VAZÃO DEMONSTRADA NO CENÁRIO RIOS NAS SUB-BACIAS. (A) TODO O PERÍODO DE SIMULAÇÃO E (B) ANOS DE SECA



# Resultados do modelo SWAT

## Balço hídrico

O modelo SWAT foi calibrado para estimar o balanço hídrico diário, o que permite estimar o escoamento superficial e a infiltração de água nas camadas do solo para cada unidade de resposta hidrológica (HRU).

A Figura 10 indica os principais componentes do balanço hídrico gerados pelo modelo SWAT para o cenário de linha de base na sub-bacia Jaguari, incluindo precipitação, vazão superficial, vazão lateral, contribuição da água subterrânea

para a vazão de base, água do solo e percolação.

O armazenamento de água no solo representa a água acumulada ao longo dos anos de análise. Destaca-se que o maior volume de água dentre todos os componentes hidrológicos é a água que se acumula no solo. Mudanças no armazenamento de água no solo podem influenciar o nível freático e o movimento lateral da água para os reservatórios do Sistema Cantareira.

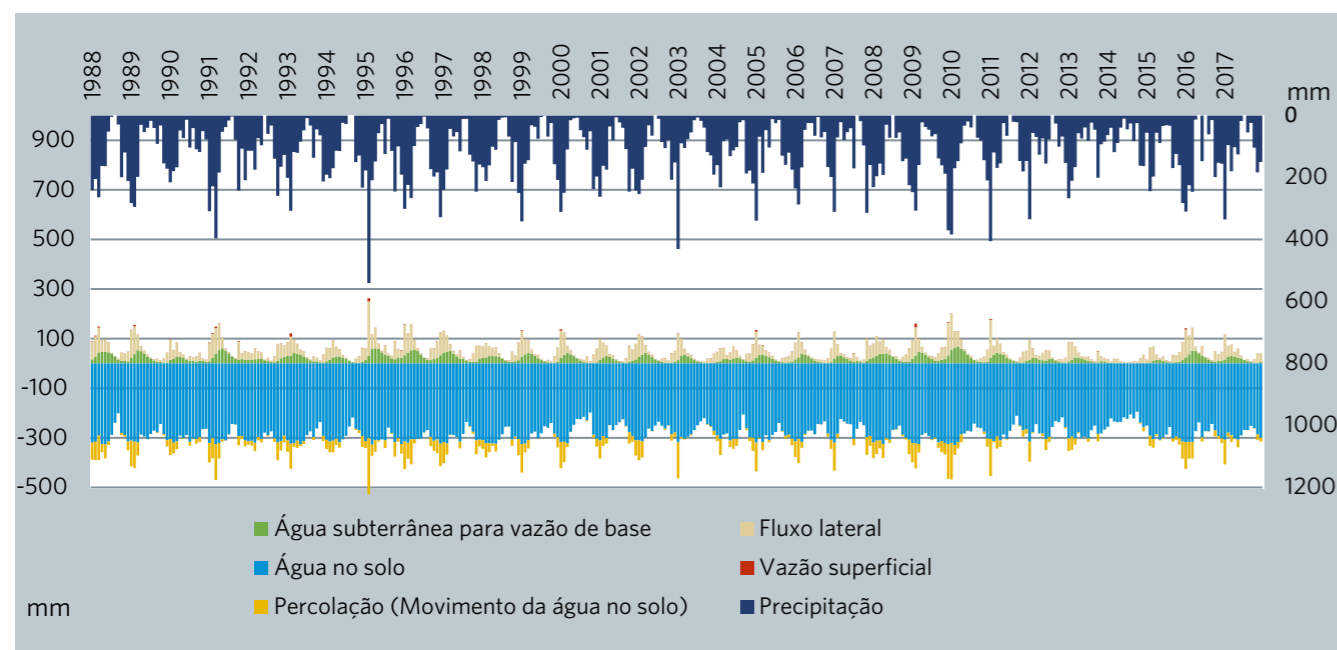


FIGURA 10: COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO NOS RESULTADOS DO MODELO SWAT PARA A LINHA DE BASE NA SUB-BACIA DO JAGUARI

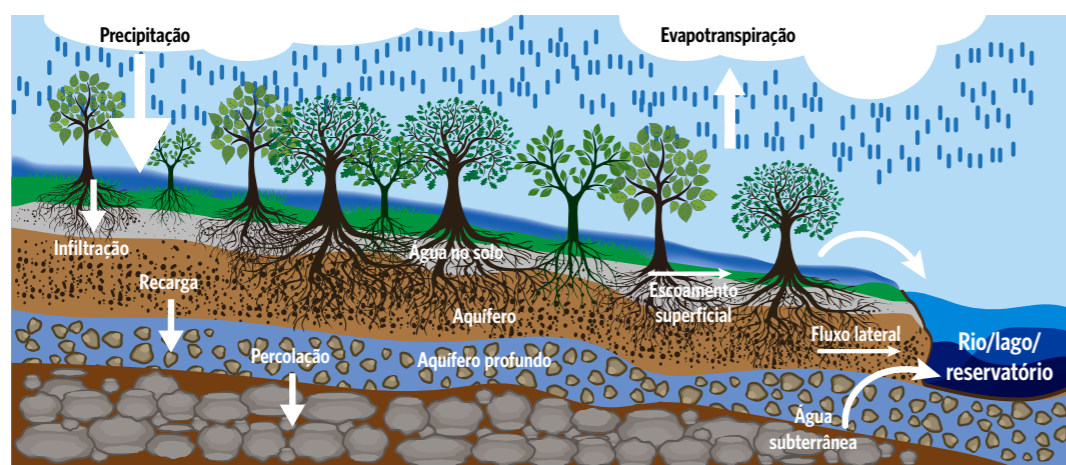


FIGURA 11: PROCESSOS RELACIONADOS À ÁGUA SUBTERRÂNEA NO MODELO SWAT.

O modelo SWAT tem a capacidade de simular vários componentes do balanço hídrico, incluindo vazão superficial, subsuperficial e subterrânea.

## Água subterrânea

O componente de água subterrânea é representado no modelo SWAT na forma de três tipos de reservatório:

- **As camadas do solo nas quais a água é armazenada e redistribuída**

Essa água está disponível para absorção pelas plantas, evaporação ou para recarga do lençol freático/aquífero livre.

- **O lençol freático ou aquífero livre**

Localizado logo abaixo do perfil do solo, é separado deste pela "zona vadosa" que recebe a água percolada das camadas mais profundas do solo. A água do lençol freático ou aquífero livre pode fluir para o corpo hídrico mais próximo na forma de contribuição de água subterrânea para a vazão de base ou pode percolar para o aquífero profundo.

- **O aquífero profundo**

A água que flui para o aquífero profundo é representada como uma contribuição de vazão para fora da bacia hidrográfica analisada.

A modelagem indica que, no Sistema Cantareira, uma grande parcela da água é armazenada nas camadas do aquífero; dessa forma, os resultados da modelagem frente aos cenários de intervenção são observados majoritariamente no componente de armazenamento do solo, ao invés da vazão superficial.

Para avaliar adequadamente essa particularidade, foram estimadas as médias mensais para cada componente hidrológico no período de seca (2013-2015). A figura 12 demonstra uma adicionalidade significativa ao balanço hídrico, em todos os meses do ano, particularmente no que se refere ao componente água no solo.

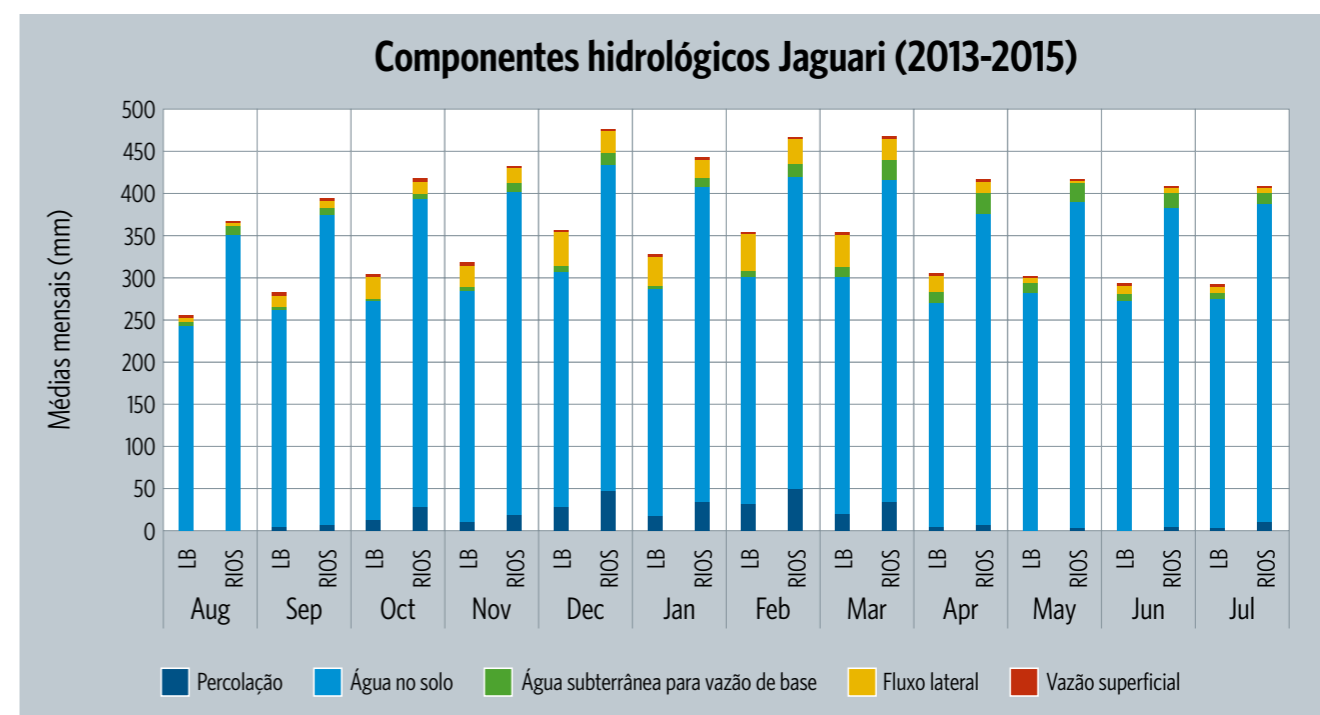


FIGURA 12: MÉDIAS MENSIS DO BALANÇO HÍDRICO SIMULADAS COM O MODELO SWAT PARA O PERÍODO DE SECA DE 2013-2015 (CENÁRIO DE LINHA DE BASE VERSUS CENÁRIO RIOS)

*Os resultados encontrados neste estudo indicam claramente que os componentes hidrológicos do solo e da água subterrânea representam o “Reservatório Invisível” do Sistema Cantareira.*

### Áreas de Recarga e Áreas de Descarga

Na modelagem SWAT a paisagem é dividida em áreas de recarga e áreas de descarga (figura 14), e os resultados são muito influenciados pela topografia onde o fluxo de água é conduzido pelo lençol freático, concentrando-se nas bacias a jusante, onde se localizam os reservatórios.

Como o cenário RIOS maximiza a recarga para os aquíferos por meio da priorização de locais específicos para o benefício hidrológico, seu efeito mais significativo será observado nas

microbacias próximas aos reservatórios, ou seja, nas bacias de descarga.

Realizando um exercício similar ao longo de todo o período de estudo, a contribuição das SbN para o balanço hídrico geral pode ser estimada.

Para tanto, a análise foi realizada observando: 1) a média de todas as sub-bacias contribuintes ao Sistema Cantareira e 2) a média somente das sub-bacias de descarga (figura 15).

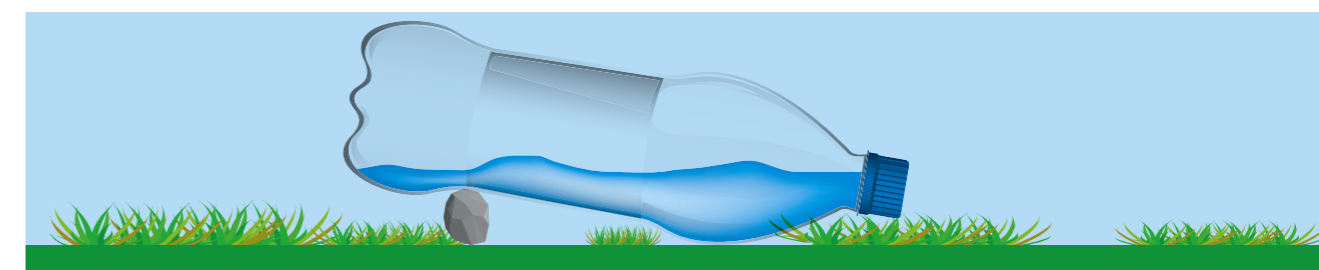
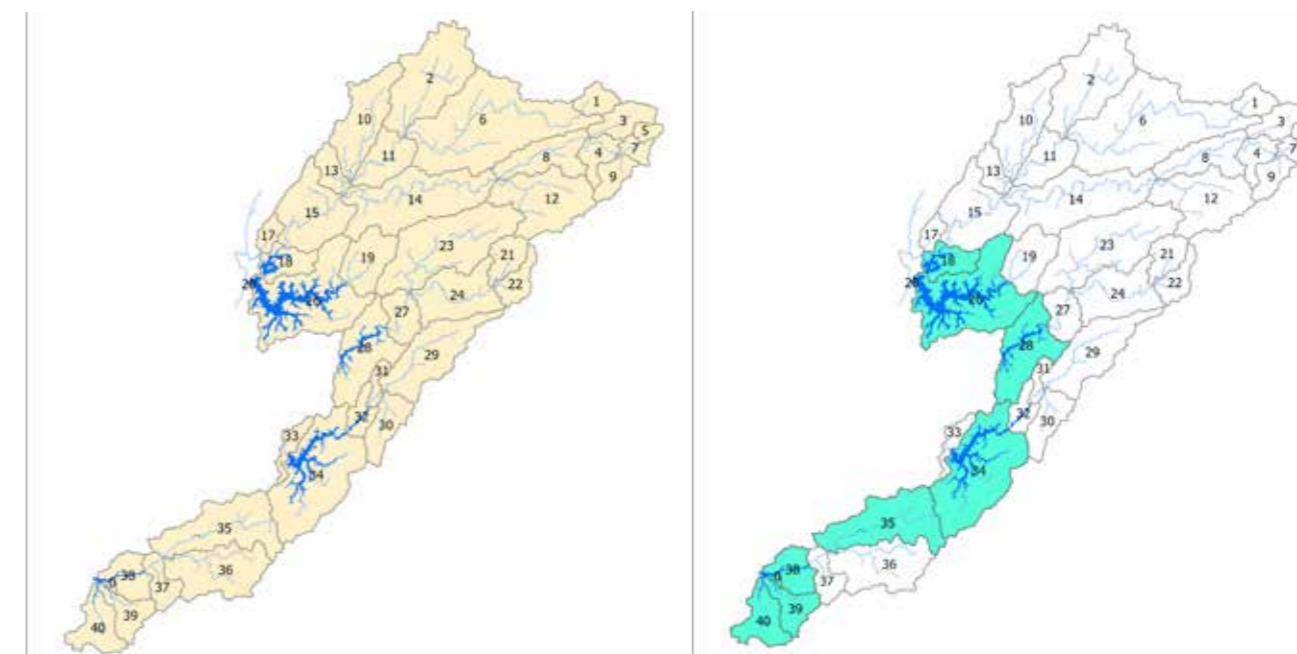


FIGURA 14: TODAS AS SUB-BACIAS CONTRIBUINTE AO SISTEMA CANTAREIRA (A) E SOMENTE AS SUB-BACIAS DE DESCARGA (B)

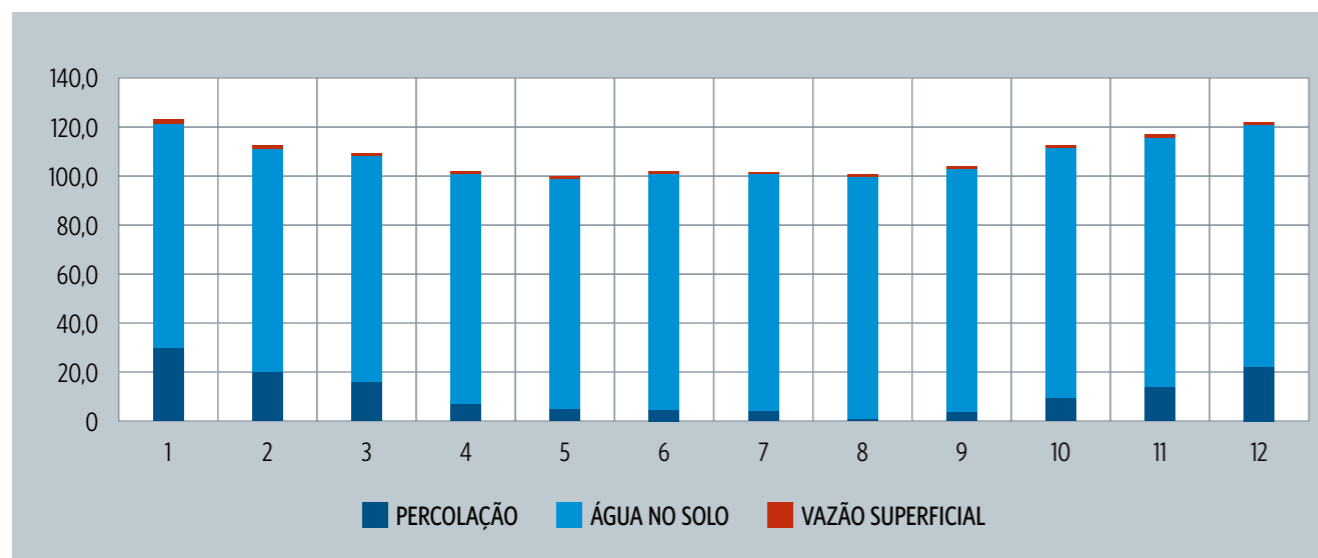


FIGURA 13: DIFERENÇA NA MÉDIA MENSAL DE PERCOLAÇÃO, ÁGUA NO SOLO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL ENTRE A LINHA DE BASE E O CENÁRIO RIOS EM MM (2013-2015).

A figura 13 apresenta a diferença entre a linha de base e o cenário customizado RIOS no balanço hídrico mensal para o período de seca, expressa em milímetros. Em média, as intervenções do cenário RIOS representam um incremento mensal de 100 mm.

Esses resultados sustentam a hipótese de que as SbN podem resultar em significativa adicionalidade de água para o balanço hídrico geral no Sistema Cantareira, aumentando o teor de umidade no solo e, conseqüentemente, a recarga do aquífero.

Por causa das limitações da modelagem, no entanto, é impossível prever a exata proporção

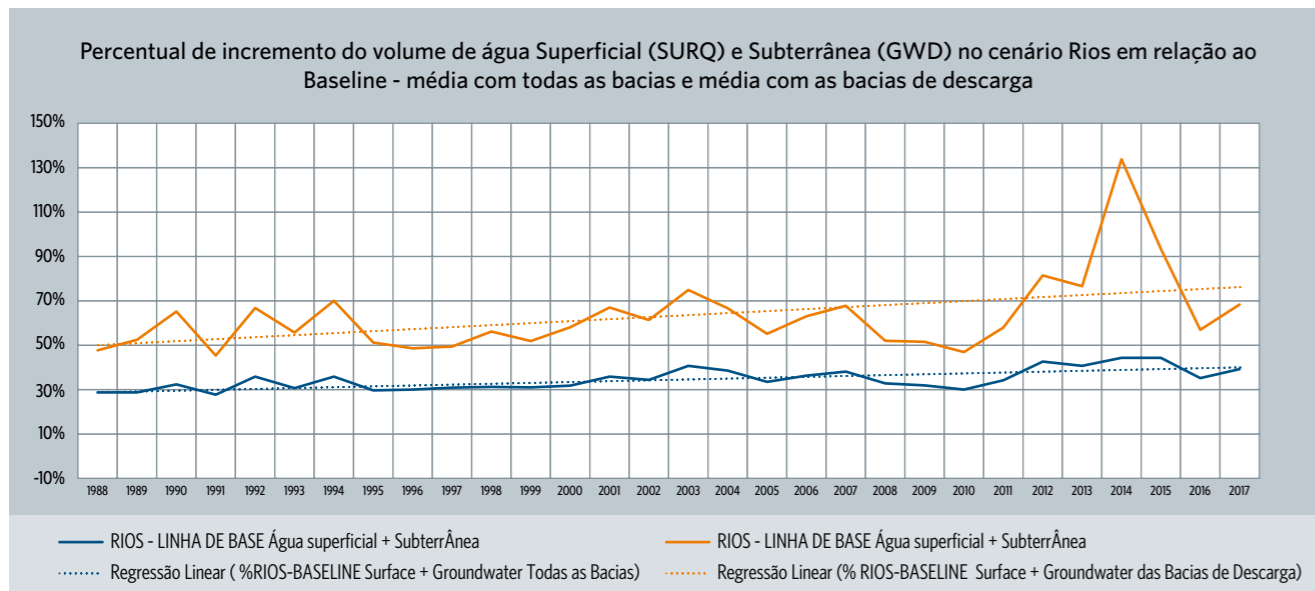
da quantidade da água que se torna parte da vazão de base versus a quantidade da água que recarrega o aquífero.

Cabe observar que o armazenamento de água no solo representa a água acumulada ao longo dos anos de análise, demonstrando que as SbN contribuem para a segurança hídrica não apenas nas sub-bacias onde estão localizados os reservatórios do Sistema Cantareira, mas também nas sub-bacias vizinhas, beneficiando o abastecimento de outros municípios, além do uso de água por atividades econômicas como a agropecuária, por exemplo.

*Se o cenário alternativo representasse o uso e a cobertura da terra predominante ao longo dos 30 anos da análise, a resposta hidrológica seria semelhante à encontrada nos resultados da modelagem.*

**Se todas as sub-bacias do Sistema Cantareira são consideradas, a análise mostra um incremento médio de 33% (206 hm<sup>3</sup>/ano) de água em todos os componentes do sistema hidrológico.**

**Se focarmos somente nas sub-bacias de descarga, a análise indica um incremento médio de 58% (ou 341hm<sup>3</sup>/ano) em todos os componentes do sistema hidrológico.**



**FIGURA 15: PERCENTUAL DE INCREMENTO DO VOLUME DE ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA NO CENÁRIO RIOS EM RELAÇÃO AO BASELINE - MÉDIA COM TODAS AS BACIAS E MÉDIA COM AS BACIAS DE DESCARGA**

A diferença entre a linha de base e o cenário RIOS é maior cada vez que a disponibilidade de água diminui. Um pico significativo dessa diferença é observado no período da maior seca registrada na história do estado de São Paulo, entre 2014 e 2015. Nestes momentos, a modelagem mostra como as soluções baseadas na natureza, particularmente durante condições climáticas extremas, podem atenuar os picos de cheias e secas, reduzindo os riscos hídricos.

## Componentes hidrológicos da vazão de água

O resultado da combinação dos componentes hidrológicos que contribuem para a vazão – quais sejam, a vazão superficial e a contribuição de água subterrânea para vazão superficial – indica um aumento significativo quando o cenário RIOS é comparado à linha de base.

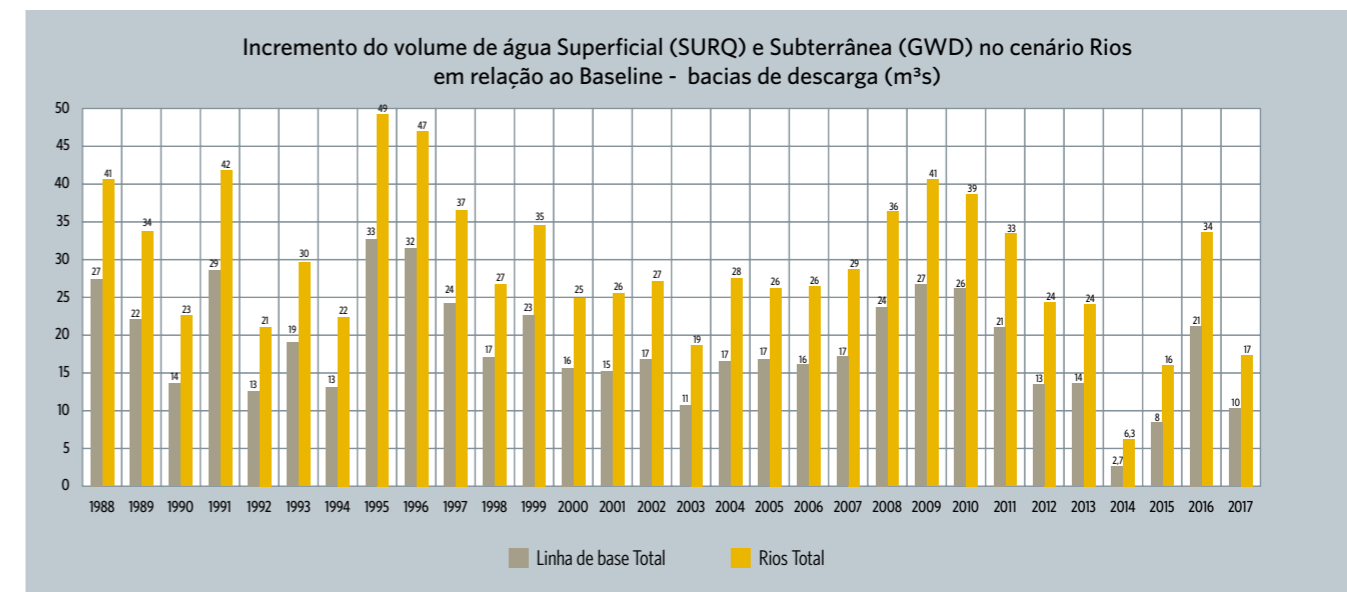
Se todas as sub-bacias contribuintes ao Sistema Cantareira são consideradas, um incremento médio de 33%, ou 206 hm<sup>3</sup>/ano, é indicado pelos resultados da modelagem.

Já se os resultados forem observados com foco somente nas sub-bacias hidrográficas de descarga, um incremento médio de 58% (ou 341hm<sup>3</sup>/ano) é indicado.

Cabe destacar o benefício específico durante os períodos de baixa disponibilidade hídrica, como é o caso da seca de 2013-2015, quando são

considerados conjuntamente esses dois componentes hidrológicos. A diferença entre a linha de base e o cenário modelado RIOS é maior cada vez que a disponibilidade de água diminui. Um pico significativo dessa diferença é observado no período de seca de 2014-2015 (figura 16).

Em termos gerais, os dois modelos indicam benefícios hidrológicos associados à implementação de SbN com vistas à segurança hídrica. Os resultados encontrados vão ao encontro da mensagem central do Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, publicado pela Unesco e intitulado “Água subterrânea: tornando visível o invisível”, que destaca que as águas subterrâneas representam aproximadamente 99% de todo o líquido água doce na Terra.



**FIGURA 16: INCREMENTO DO VOLUME DE ÁGUA SUPERFICIAL SUBTERRÂNEA NO CENÁRIO RIOS EM RELAÇÃO À LINHA DE BASE CONSIDERANDO AS BACIAS DE DESCARGA**



# Análise econômica

A partir dos resultados hidrológicos encontrados, foi realizada uma análise econômica para avaliar potenciais benefícios econômicos associados ao ganho de resiliência durante eventos de baixa disponibilidade hídrica.

Considerando que o cenário customizado RIOS obteve os melhores resultados hidrológicos com base na priorização espacial das SbN em larga escala, a análise econômica se concentrou sobre os resultados desse cenário.

# Investimentos na implantação do cenário RIOS

Os investimentos envolvidos na implantação do cenário RIOS foram estimados a partir de uma contabilização completa de custos, que foram agrupados nas seguintes categorias:

- **custos de implementação:** mão de obra e materiais no primeiro ano de implementação;
- **custos de manutenção:** mão de obra de acompanhamento e materiais necessários para a manutenção da intervenção ao longo dos anos;
- **custos de oportunidade:** compensação aos proprietários de terras que são indicadas para

restauração na forma de pagamentos por serviços ambientais;

- **custos de transação:** planejamento e organização inerentes à mobilização e engajamento de proprietários, desenvolvimento de contratos e monitoramento;
- **custos de gerenciamento:** gerenciamento de programa de proteção de mananciais.

O cenário RIOS contempla um portfólio de intervenção de 32.085 hectares, distribuídos pelas quatro sub-bacias. A estimativa de custos



## Valoração econômica do impacto da seca e da reservação de água no ambiente

das intervenções foi calculada considerando duas técnicas de restauração que se aplicam ao Sistema Cantareira, quais sejam:

- **Condução da regeneração natural ou restauração passiva:** implica no isolamento da área a ser restaurada de fatores de degradação, por exemplo, o cercamento no caso de pecuária, controle de espécies exóticas invasoras e enriquecimento somente eventual com plantio de mudas. Foi considerada essa técnica para 75% do portfólio de intervenções do cenário RIOS.
- **Restauração total ou restauração ativa:** se aplica a áreas degradadas que tenham baixo potencial de regeneração natural e implica, além das técnicas acima citadas, também o plantio intensivo de mudas selecionadas para

acelerar o processo de regeneração. Foi considerada essa técnica para 25% do portfólio de intervenções do cenário RIOS.

Os custos médios por hectare do ciclo de vida do programa foram estimados em R\$ 22.700 por hectare para as atividades de condução da regeneração e em R\$ 34.980 por hectare para a restauração total. Custos anuais de gerenciamento do programa são adicionados ao longo do período de 35 anos.

Considerando as premissas adotadas para implementação do cenário RIOS, o custo total de um programa de proteção do Sistema Cantareira foi estimado em R\$ 845 milhões em valores nominais, o que representa um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 645 milhões à uma taxa de desconto social de 4,36%.

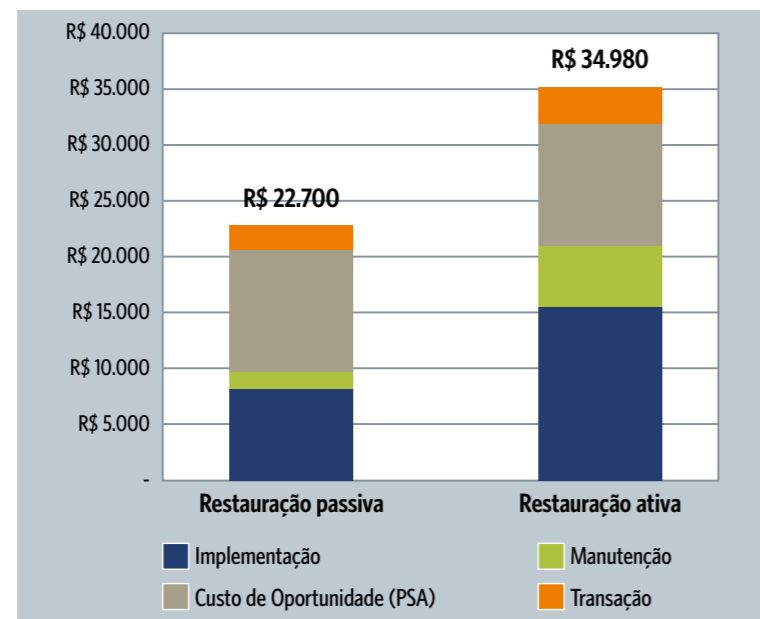


FIGURA 17: CUSTOS DE RESTAURAÇÃO POR HECTARE

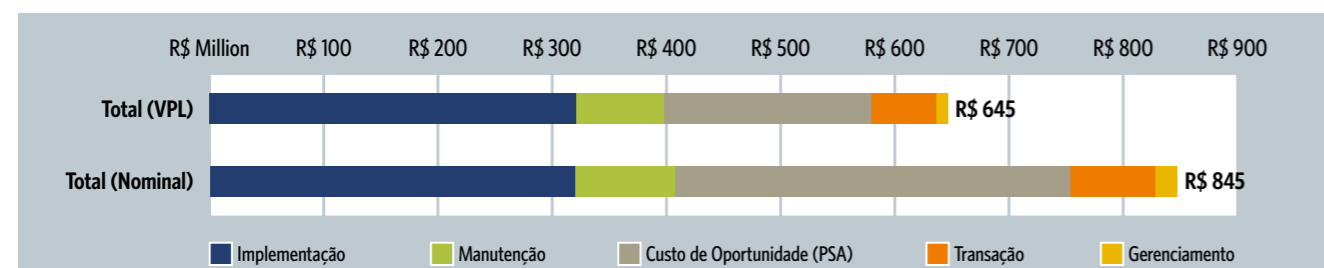


FIGURA 18: CUSTOS TOTAIS DO CICLO DE VIDA DA IMPLANTAÇÃO EM VALORES NOMINAIS E EM VPL (EM R\$ MILHÕES)

*A perda de Valor Adicionado Bruto (VAB) da indústria foi estimada em cerca de R\$ 1,08 bilhão. Já a perda dos serviços de água e esgoto foi estimada em R\$ 526,8 milhões.*

Para valorar os benefícios econômicos da reservação de água no ambiente com a implementação do cenário RIOS, estimou-se o custo da crise hídrica ocorrida no Sistema Cantareira de 2014-2015. Para tal, foram considerados na modelagem econômica dois componentes representativos do excedente de renda dos municípios atendidos pelo Sistema Cantareira:

- a perda de Valor Adicionado Bruto (VAB) da indústria;
- a perda no Valor Adicionado Líquido (VAL) de abastecimento de água e tratamento de esgoto.

Para estimar a perda econômica durante a crise hídrica, um cenário contrafactual é idealizado, considerando o comportamento da curva do VAB da indústria entre 2002 e 2013 e da curva VAL de abastecimento de água e tratamento de esgoto entre 2008 e 2013. Com uma equação de regressão, é realizada a projeção de ambos os parâmetros para 2014 e 2015, sem restrição hídrica. A diferença entre os dados projetados e observados representa a perda econômica resultante da crise hídrica, ou seja, o custo da seca (CS).



*A perda econômica total associada à crise hídrica no período 2014-2015 foi estimada em R\$ 1,6 bilhão*



## As Soluções Baseadas na Natureza e o potencial de mitigação de perdas econômicas

Os resultados encontrados neste estudo indicam que, se o cenário RIOS representasse o uso e cobertura do solo prevalente durante os 30 anos anteriores ao contexto da crise hídrica, ter-se-iam evitado perdas da ordem de 27% no VAB da indústria e de 28% no VAL do setor de água e esgoto.

Com o cenário RIOS, estima-se que os benefícios associados às SbN seriam da ordem de R\$ 294,98 milhões em perdas econômicas evitadas no VAB da indústria e de R\$ 148,9 milhões resultantes de perdas econômicas evitadas no VAL do

setor de abastecimento de água e esgoto.

Segundo essa avaliação, as perdas econômicas evitadas totalizariam R\$ 443,9 milhões, representando uma redução de 28% no custo econômico total da seca.

Essa análise indica que o investimento em SbN tem aplicação para mitigar os impactos econômicos da escassez de água associada e, portanto, deve ser considerado na alocação de investimentos no Sistema Cantareira e nos processos de planejamento territorial e definição de políticas públicas.

*A perda econômica evitada com SbN totalizaria R\$ 443,9 milhões, representando uma redução de 28% no custo econômico da seca.*

## Monetização dos benefícios

A estimativa completa de benefícios requer a projeção dos resultados para o ciclo de vida completo do programa, estipulado em 35 anos.

Três etapas foram seguidas para a realização dessa projeção:

- **Atualização monetária com base no IPCA:** As perdas econômicas evitadas de R\$ 443,9 milhões, em 2015, no cenário RIOS foram ajustadas pelo IPCA acumulado até dezembro de 2021 para R\$ 610 milhões.
- **Período de recorrência de seca:** Um fator de incidência de 1/10 anos foi adotado para refletir a probabilidade de se experimentar perdas semelhantes a 2014-2015 uma vez a cada período de dez anos.
- **Curva de realização de benefícios:** A restauração de ecossistemas com técnicas de

restauração florestal consideradas neste estudo demanda tempo para que a plena funcionalidade hidrológica e seus resultados de segurança hídrica sejam alcançados. Foi assumido que os benefícios da restauração do ecossistema atingem maturidade ecossistêmica/hidrológica até o 8º ano, no caso de restauração total, e até o 12º ano, no caso da condução da regeneração natural.

Conjuntamente, essas três etapas geram um **valor total estimado para o horizonte de 35 anos de R\$ 1.793 milhões (valor nominal) ou R\$ 789 milhões (VPL) para os benefícios econômicos associados à disponibilidade adicional de água durante os períodos de seca** potencialmente proporcionados no cenário RIOS.

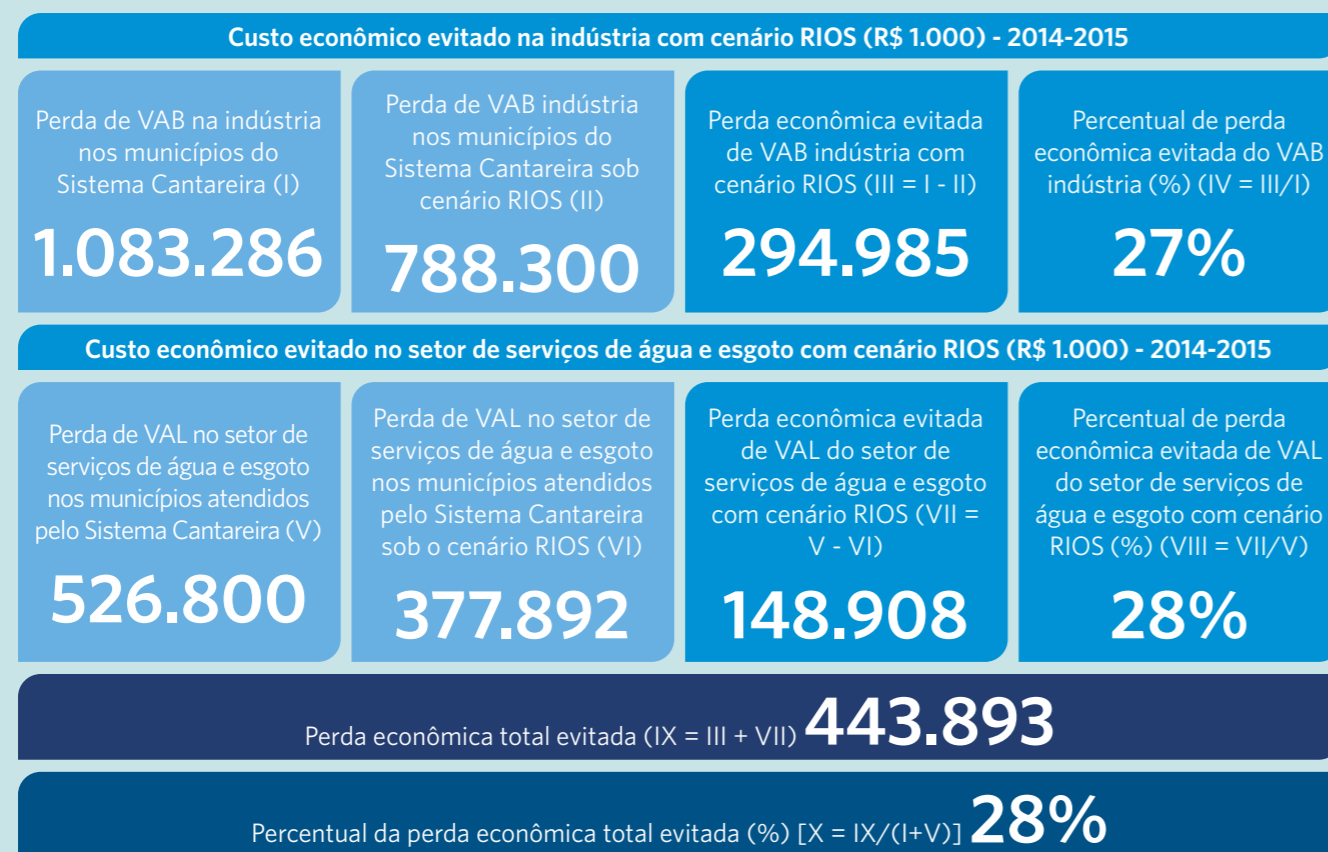


TABELA 1: RESUMO DAS PERDAS ECONÔMICAS MITIGADAS NO VAB DA INDÚSTRIA E NA RECEITA DO SETOR DE ABASTECIMENTO SOB O CENÁRIO RIOS.

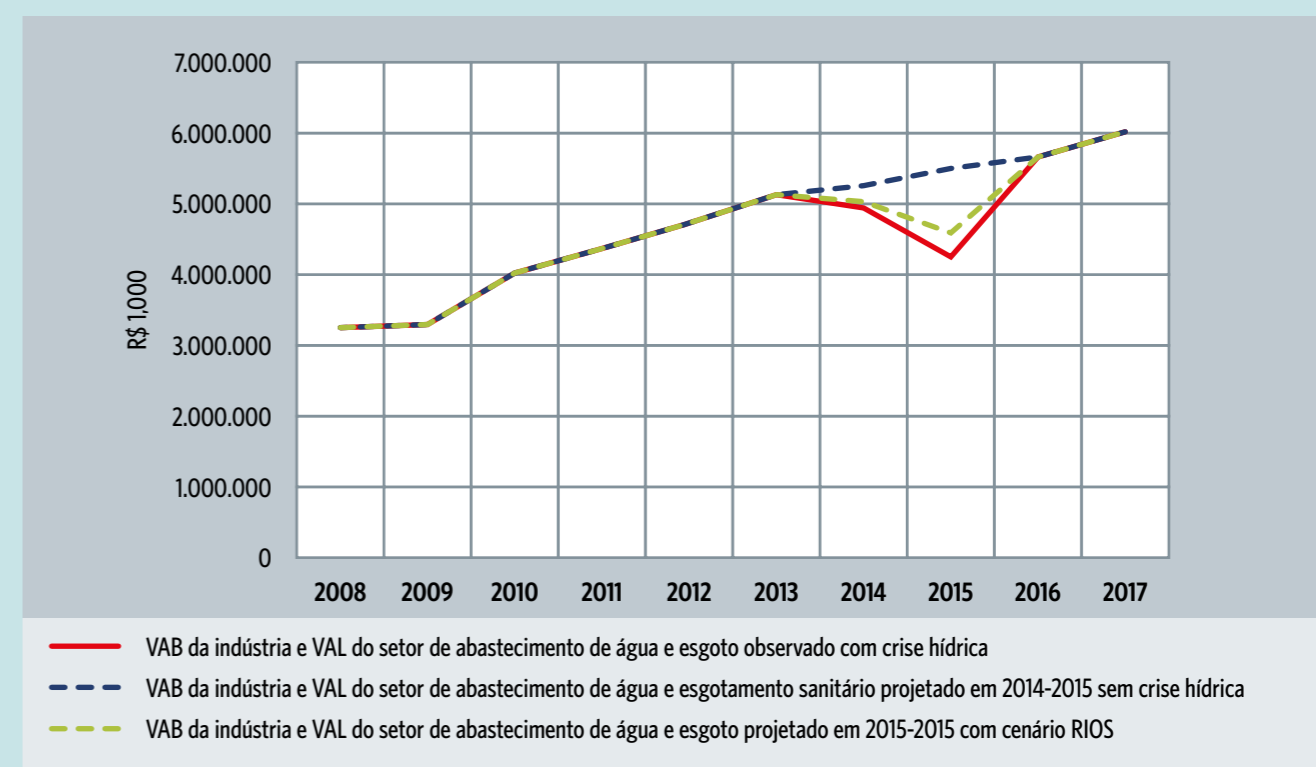


FIGURA 19: PERFORMANCE ECONÔMICA (OBSERVADA X PROJETADA) DO VAB INDUSTRIAL E DAS RECEITAS DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA



## Análise financeira de custo-benefício

A análise custo-benefício (ACB) tem por objetivo incluir os benefícios ambientais no escopo da análise econômica. Investimentos em SbN geram benefícios associados a serviços ambientais que não são internalizados pelo mercado, como a regulação hidrológica e a retenção de sedimentos.

Exceção pode ser feita ao mercado relativo à remoção de carbono da atmosfera decorrente das atividades de restauração florestal. Como esse mercado já tem mostrado concretude, especialmente no mercado voluntário de carbono, seu potencial foi considerado parte de um fluxo de caixa de projeto.

Três cenários de benefícios econômicos foram considerados:

- Benefício de armazenamento de água estimado a partir do custo da crise hídrica e da premissa de recorrência de evento de seca em 1 a cada 10 anos, para orientar a tomada de decisão sob a perspectiva dos ganhos públicos e privados com o aumento da resiliência do manancial em casos de escassez hídrica.
- Benefício de armazenamento de água com a receita potencial de crédito de carbono certificado e comercialização no mercado voluntário, para orientar a tomada de decisão sob a perspectiva dos ganhos públicos e privados com o aumento da resiliência do manancial em casos de escassez hídrica.
- Benefício de armazenamento de água com o custo social do carbono como *proxy* do benefício social relacionado ao sequestro de carbono, para orientar a tomada de decisão sob a perspectiva geral de bem-estar social.

Em relação ao cenário do benefício com o armazenamento de água, o **cenário RIOS**

**apresentou um VPL estimado em R\$ 144 milhões** (benefícios de R\$ 789 milhões versus custos de R\$ 645 milhões), o que representa uma **relação custo-benefício de 1,2**.

O cenário do **benefício com o armazenamento de água e carbono**, considerando a premissa do preço médio do carbono de US\$ 7,69 e de emissão de crédito a cada 5 anos, pelo período de 35 anos, o cenário SbN apresentou um **VPL estimado em R\$ 301 milhões** (benefícios de R\$ 945 milhões versus custos de R\$ 645 milhões), o que representa uma **relação custo-benefício de 1,5**.

Considerando o benefício com o armazenamento de água e o custo social do carbono de US\$ 24, o cenário SbN apresentou um VPL estimado em R\$ 632 milhões (benefícios de R\$ 1,3 bilhão versus custos de R\$ 645 milhões), o que representa uma relação custo-benefício de 2,0.



*Os resultados econômicos demonstram que, em todos os cenários de inclusão dos benefícios associados ao aumento de resiliência hídrica e de mitigação de mudanças climáticas, a restauração no Sistema Cantareira apresenta viabilidade econômica positiva.*

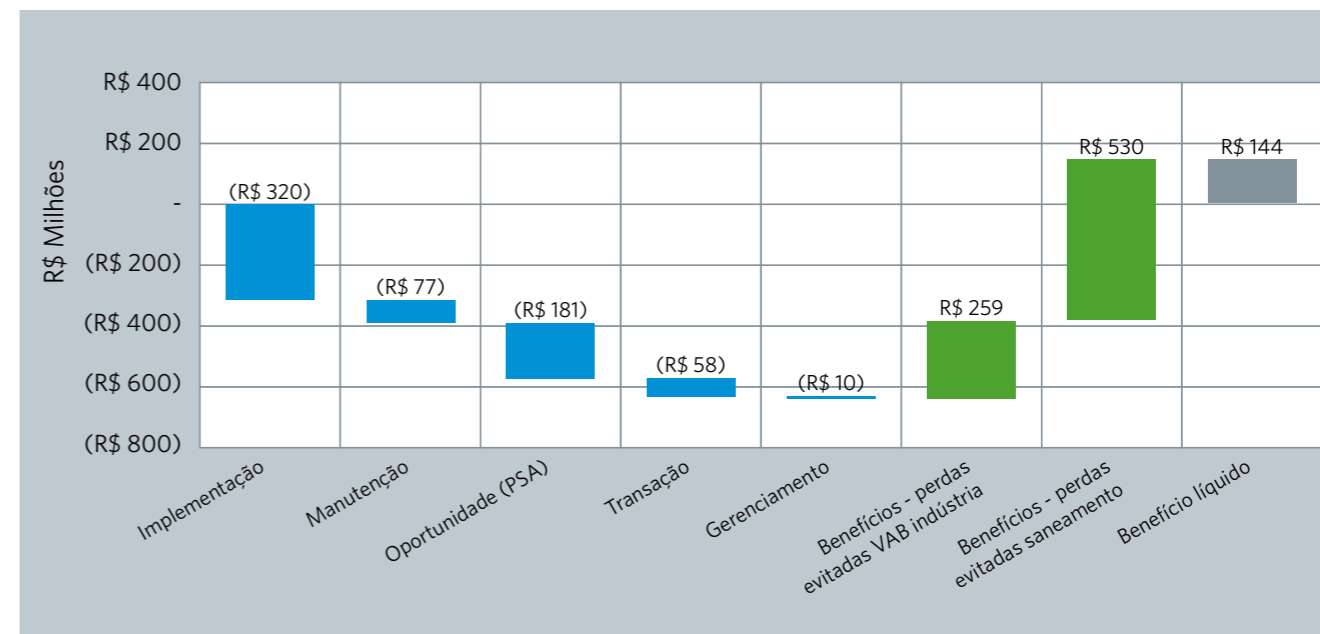


FIGURA 20: VPL DO CENÁRIO SBN PARA O CICLO DE VIDA COMPLETO DE 30 ANOS, CONSIDERANDO O BENEFÍCIO DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA

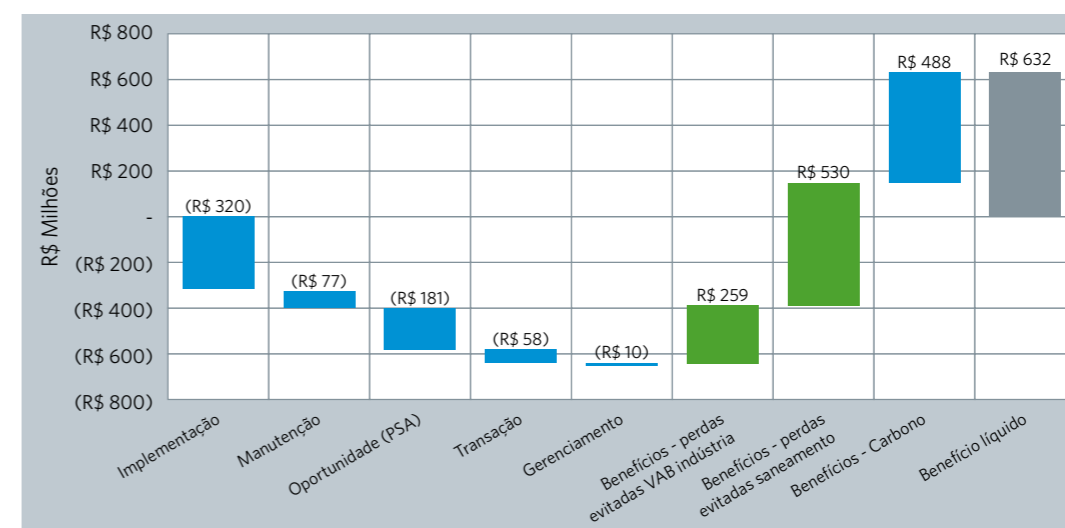
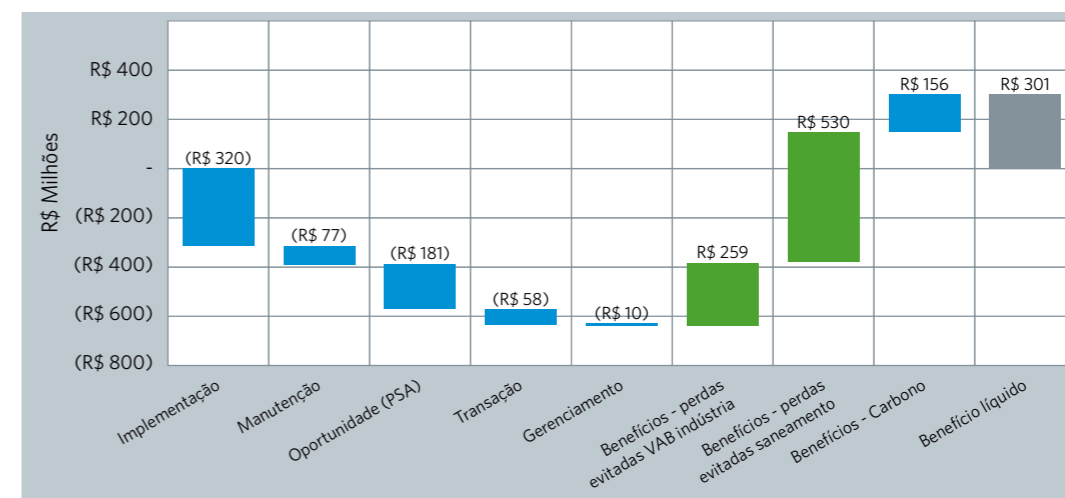


FIGURA 21: VPL DO CENÁRIO SBN PARA O CICLO DE VIDA COMPLETO DE 30 ANOS, CONSIDERANDO O PREÇO MÉDIO DO CARBONO (21.A) E CONSIDERANDO O CUSTO SOCIAL DO CARBONO (21.B.)

## Premissas, cobenefícios e incertezas

Como uma análise dessa natureza está sujeita a diversas incertezas implícitas à complexidade da mesma, ao longo do desenvolvimento do

estudo prevaleceu sempre a opção pela adoção de premissas conservadoras, buscando-se evitar resultados superestimados.

## Período de recorrência da seca

O período de recorrência da seca determina com que frequência as perdas econômicas relacionadas à seca são evitadas pela implementação do cenário RIOS. Foi adotada uma taxa de incidência de 1 evento a cada 10 anos.

De acordo com a Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, as evidências apontam claramente para um aumento de eventos climáticos extremos, incluindo o aumento tanto da intensidade de eventos de

precipitação quanto da intensidade de eventos de estiagem (Brasil, 2021).

Considerando a crescente demanda de abastecimento público causada pela expansão da população, urbanização e crescimento no uso industrial, o grau de impacto econômico para eventos futuros de estiagem tende a ser proporcionalmente mais alto, abrindo a margem de retorno do investimento em SbN no Sistema Cantareira.

## Taxa de desconto social (TDS)

A análise de custo-benefício de projetos relacionados a fatores climáticos e/ou ecossistêmicos depende em grande parte de que abordagem é dada à taxa de desconto de longo prazo. Para investimentos públicos de longa duração, como é o caso de programas de proteção de mananciais, geralmente são usadas taxas de desconto social que representam como a sociedade como um todo observa o valor do bem-estar presente e futuro (Arrow et al. 2014). Moore et al. (2020) avaliaram TDS para dezessete países latino-americanos e estimam uma TDS ajustada ao Brasil em 4,36%. Optou-se por usar essa taxa para o

ajuste de custos e benefícios ao VPL.

Como outros autores sugerem valores diferentes, e considerando a natureza da segurança hídrica promovida pelas SbN, que em princípio beneficia todas as esferas da sociedade e tende a ser permanente ao longo do tempo, foi elaborada uma análise de sensibilidade. A **tabela 2** demonstra a ACB geral para o VPL como uma função de diferentes combinações de recorrência de secas e taxas de desconto. As combinações que resultam em VPL > 1,0 são destacadas em verde.

## Cobenefícios

A análise econômica apresentada abordou especificamente a disponibilidade de água em situações de estiagem e considerou o potencial de remoção de carbono somente como potencial aporte financeiro. No entanto, o portfólio de

SbN contemplado no cenário RIOS, assim como nos demais cenários alternativos, também tem o potencial de geração de outros benefícios adicionais relevantes para a segurança hídrica.

## Adaptação e mitigação de efeitos climáticos

Ambos os modelos hidrológicos indicam que os cenários com SbN resultam na atenuação de eventos hidrológicos extremos – vazões de pico e vazões de estiagem. Eventos de pico de vazão também são importantes causas de perdas econômicas relativas a danos à infraestrutura, a imóveis, impactos negativos na saúde pública e

perdas de solo relacionadas à erosão e assoreamento de corpos de água/reservatórios, entre outros. A avaliação econômica de tais impactos é relevante e deve contribuir positivamente para o incremento do VPL na ACB, mas não foi abordada neste estudo, sendo uma área a ser explorada em pesquisas futuras.

## Qualidade de água

Outro benefício adicional à segurança hídrica esperado dos cenários alternativos com SbN é relacionado à qualidade da água. O modelo SWAT estruturado para este estudo também é adequado para estimar potenciais resultados de qualidade de água, incluindo aportes de sedimentos e nutrientes. Estudo realizado anteriormente já explorou potenciais melhorias na qualidade da água e seus impactos econômicos relacionados à redução da sedimentação e

de cargas de nutrientes no Sistema Cantareira (WRI, 2018), portanto se optou por focar somente os aspectos de quantidade/disponibilidade de água no presente estudo.

Os resultados da qualidade da água gerados neste estudo, no entanto, contaram com um banco de dados atualizado e mais amplo, o que permitiria uma revisão do estudo anterior. Esses resultados estão disponíveis e podem ser usados para a revisão da análise econômica anterior.

## Outros cobenefícios

Além dos resultados de segurança hídrica, os portfólios de SbN analisados neste estudo também geram benefícios adicionais, que podem ser

tomados em conta em uma ACB.

**Boas práticas de gestão e alternativas adicionais de uso e cobertura do solo:** o estudo também

Razão Benefício/Custo: Valor Presente Líquido (VPL)						
Taxa de desconto social	Período de recorrência da seca					
		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

TABELA 2: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CBA PARA O PERÍODO DE RECORRÊNCIA DA SECA E TAXAS DE DESCONTO.



explorou a estimativa dos benefícios potenciais decorrentes da adoção de boas práticas agrícolas como um dos cenários alternativos com SbN. Optou-se por não incluir na análise econômica como forma de evitar um nível adicional de complexidade; no entanto, o cenário de boas práticas também indica benefícios tanto na qualidade de água quanto na disponibilidade de água no solo. Pode-se assumir que uma combinação de intervenções de SbN, incluindo a proteção e restauração de vegetação nativa, a implantação de sistemas agroflorestais e a adoção de práticas de conservação do solo como terraceamento e rotação de pastagens, resultaria em incremento de segurança hídrica para o Sistema Cantareira. Além disso, uma matriz variada de SbN possui maior viabilidade técnica e política para implementação.

**Outros benefícios socioeconômicos:** os resultados do modelo SWAT demonstram a importância

da água no solo e da água subterrânea que alimenta os corpos hídricos como resultados da adoção das SbN. Do aumento da água no solo são esperados impactos positivos também sobre a rentabilidade da pecuária e da agricultura, caso essas atividades sejam realizadas com técnicas que aproveitem os serviços ecossistêmicos, como práticas de pastejo rotacionado, em vez do pastejo convencional de baixa tecnologia, e a adoção de sistemas agroflorestais. Benefícios socioeconômicos são daí esperados, uma vez que proprietários de terras teriam melhores condições de produção, incremento de renda e de qualidade de vida. Se adequadamente incentivadas e gerenciadas, tais práticas não apenas tiram proveito de uma melhor condição hidrológica, mas também retroalimentam a infiltração de água na bacia hidrográfica, levando a uma maior segurança hídrica.

## Incertezas

O processo de calibração de um modelo hidrológico implica ajustes de parâmetros biofísicos para as características ambientais locais e exige dados de entrada de boa qualidade em longo prazo. Neste estudo, foram utilizados os melhores dados disponíveis no momento (dados observados de longo prazo acumulados ao longo de 30 anos), e a parametrização foi testada à exaustão, de modo a garantir que cada modelo forneça os resultados mais precisos possíveis. Resultados dos modelos devem ser interpretados com base em comparações entre as linhas de base modeladas e os cenários contrafactuais modelados. Portanto, toda conclusão deve ser compreendida como uma simulação do mundo

real, e não como uma indicação definitiva e inequívoca do comportamento hidrológico esperado de cenários alternativos.

As projeções climáticas atuais indicam que mudanças substanciais devem ser esperadas no futuro próximo. De acordo com a Comunicação Nacional Brasileira à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, um aumento de eventos extremos de precipitação, lado a lado com uma diminuição geral da precipitação anual e aumento de dias secos consecutivos, é projetado para a Região Sudeste do Brasil (Brasil, 2021). Isso adiciona uma camada de incerteza que deve ser levada em consideração ao analisar os resultados da modelagem.





# Implicações para a política pública

## Soluções Baseadas na Natureza e adaptação a mudanças climáticas

Os resultados deste estudo contribuem para o desenvolvimento de políticas de segurança hídrica voltadas a mananciais de abastecimento público. Tal subsídio vem no sentido de apresentar alternativas frente à necessidade de adaptação às mudanças climáticas que têm sido previstas e já vivenciadas.

O planejamento e o gerenciamento de sistemas de abastecimento de água são baseados em padrões hidrológicos históricos para a definição de gradientes de variação. No entanto, o uso de séries históricas precisa considerar também as incertezas sobre como os sistemas hidrológicos mudarão em condições de clima variáveis. As SbN representam um dos caminhos para a

concordância ou resistem às incertezas inerentes ao espectro de probabilidades de resultados advindos das SbN (Cassin e Matthews, 2021). Os resultados apresentados neste estudo contribuem para o entendimento acerca das incertezas implícitas na aplicação das SbN para a segurança hídrica no Sistema Cantareira e sobre as diversas possibilidades de benefícios possíveis.

Além das peculiaridades que diferenciam as SbN das soluções providas pela infraestrutura convencional, alguns desafios para sua plena adoção residem nas próprias políticas já existentes, nos arranjos institucionais já estabelecidos e, naturalmente, no balanço de forças políticas e interesses prevalentes.

*Decisões políticas sobre a gestão da água precisam ser tomadas com urgência, ainda que sob incerteza.*

adaptação a tais mudanças e a mitigação de seus efeitos.

Em comparação com a infraestrutura convencional, o prazo para que os benefícios das SbN sejam alcançados segue um padrão distinto, menos previsível, para que um estágio de funcionalidade ecossistêmica seja alcançado. O lapso de tempo entre o investimento e a percepção dos benefícios pode representar uma barreira para o convencimento de gestores e tomadores de decisão, que, em geral, tendem a almejar resultados rápidos (Browder et al., 2019).

Insegurança emerge quando partes interessadas e tomadores de decisão não atingem plena

A abordagem exclusivamente voltada para infraestrutura convencional é profundamente enraizada em certos contextos profissionais, como é o caso da engenharia no setor de saneamento, e acaba por moldar as práticas institucionais, dificultando a inovação. Tais vieses são agravados por barreiras cognitivas, como uma percepção minimizada dos riscos climáticos e a insegurança relativa à tomada de decisão sob incerteza, obstáculos adicionais para a adoção de ações de adaptação às mudanças climáticas (OCDE, 2020).

## Coordenação técnica e política

Investir na proteção de mananciais com foco na segurança hídrica implica considerável complexidade política e requisitos de coordenação. O desafio de articulação envolve a interconexão entre políticas públicas, o setor de saneamento e a regulação, negócios locais, administrações municipais, estadual e, por vezes, federal, entre outras instâncias e partes interessadas, com seus interesses específicos, claros ou velados.

A noção de papéis compartilhados e a

necessidade de ampla base de apoio político, técnico e financeiro são essenciais para o sucesso dessa iniciativa em longo prazo e precisam estar refletidas nas políticas públicas. Além de uma base científica sólida, como a oferecida por este estudo e outros, o planejamento e a efetiva gestão do uso da terra exigem refinada articulação entre as várias partes interessadas – papel de coordenação que é essencialmente exercido pela política pública.

*Um reequilíbrio entre políticas de incentivo a atividades econômicas alinhadas com a necessidade de segurança hídrica e políticas de desincentivo a atividades indesejadas no contexto de um manancial se faz necessário.*



© Clara Angeleas





## Coordenação de investimentos e planejamento territorial em mananciais

Este estudo fornece uma avaliação econômica assumindo uma situação hipotética na qual uma única fonte de financiamento arca com os investimentos necessários. Entretanto, a condução de um programa permanente de proteção de mananciais envolve fontes de financiamento múltiplas e sinérgicas.

Destaca-se, neste caso, a regulação do saneamento, em função do papel fundamental que ela exerce para que o setor de saneamento assuma a liderança no investimento na proteção dos mananciais dos quais capta água. Esse investimento, uma vez reconhecido como componente natural dos custos operacionais do saneamento

*A gestão territorial é um papel inerente à política pública e pode impactar a rentabilidade de determinadas atividades econômicas.*

*Atividades que tragam oportunidades de desenvolvimento para os municípios e para os proprietários de terras que abrigam mananciais, em alinhamento com a demanda por segurança hídrica, devem ser incentivadas.*

e devidamente considerado na composição tarifária da água, fornece uma base sólida de financiamento sustentável no longo prazo. Esse é o caso de Arsesp frente à Sabesp e outras concessionárias atuantes no Estado de São Paulo.

As administrações estaduais e municipais, por outro lado, têm a responsabilidade de coordenar políticas de gestão territorial. Resulta que a integração de investimentos em escala na gestão territorial de mananciais demanda a criação e coordenação de políticas novas e especificamente projetadas.

Como exemplo, a análise de uso da terra e mudança de cobertura feita neste estudo denota um ligeiro aumento na tendência de expansão da silvicultura no Sistema Cantareira, nos últimos anos. Como uma atividade de uso de água intensivo, a expansão da silvicultura deve ser monitorada para garantir que o crescimento do setor

não passe a representar ameaça ao equilíbrio hídrico geral no Sistema Cantareira.

Outra mudança de uso e cobertura da terra em andamento nos municípios do Sistema Cantareira é a expansão do desenvolvimento urbano e o parcelamento do solo, que também requer supervisão e controle ativos por meio de um planejamento adequado por parte dos municípios. Para o caso de São Paulo, atuar preventivamente de modo a evitar a perda da qualidade do Sistema Cantareira, como aconteceu no caso do Sistema Guarapiranga/Billings, é imperativo.

A promoção de atividades econômicas específicas que beneficiam a economia dos municípios e se enquadrem nas vocações econômicas locais e regionais, sem prejuízo ao nobre papel de um território de manancial, é um objetivo a ser alcançado.



## Conclusões e recomendações

Dada a evidência crescente de que eventos climáticos extremos impõem um desafio de adaptação para cidades em todo o mundo, garantir segurança hídrica para o bem-estar das pessoas e para o desenvolvimento econômico torna-se cada vez mais urgente.

Reconhecendo que tal desafio representa um problema complexo de gestão territorial, econômica, social e política, este estudo explorou como as SbN podem contribuir para a segurança hídrica no Sistema Cantareira como medida complementar aos investimentos em infraestrutura convencionais já realizados.

Ao fornecer perspectivas técnicas sobre os processos hidrológicos, impactos econômicos e implicações políticas, os resultados aqui apresentados demonstram que o investimento na proteção de mananciais tem impacto positivo para a segurança hídrica.

O estudo conclui que uma criteriosa priorização espacial, embasada em critérios hidrológicos específicos, oferece os melhores resultados para a segurança hídrica. A atenuação de vazões de

dos cenários com SbN frente à linha de base entre as estações chuvosa e seca, fica claramente evidenciado o “efeito esponja”, caracterizado pelo armazenamento de água no solo e no lençol freático durante a estação chuvosa e seu retorno gradual, na forma de vazão superficial, aos corpos hídricos na estação seca.

O estudo contribui para a noção de que a proteção de mananciais em longo prazo é viável quando diversas fontes de financiamento, múltiplas e sinérgicas, são combinadas, incluindo políticas públicas especificamente concebidas para esse fim.

Considerando a especificidade de um manancial de abastecimento público em oposição a qualquer outra bacia hidrográfica, é necessária uma abordagem política específica para esses territórios, além do envolvimento de outras partes interessadas.

O setor de saneamento – sob a jurisdição dos municípios –, bem como sua regulação, merece destaque. Sendo esse o setor responsável pelo fornecimento de água para a população e para

Ao fomentar usos do solo que promovam a segurança hídrica, municípios e a administração estadual compartilham um papel na condução das políticas existentes e na criação de novas políticas específicas para promover a melhor gestão de mananciais de abastecimento. A complexidade de tal coordenação política não

é negligenciável, mas, à medida que eventos extremos como secas e enchentes e seu impacto econômico repetidamente afligem as cidades e a economia, mais e mais tomadores de decisão se disporão a considerar e a experimentar soluções não convencionais, como é o caso das SbN.

*Os componentes hidrológicos água do solo e água subterrânea podem ser definidos como o “reservatório invisível” do Sistema Cantareira.*

pico e de vazões de estiagem foi evidenciada pelos modelos hidrológicos utilizados.

Os resultados mostram uma reversão da tendência de diminuição da disponibilidade de água, observada ao longo dos últimos 30 anos, indicando o potencial aumento da disponibilidade hídrica a partir da adoção das SbN.

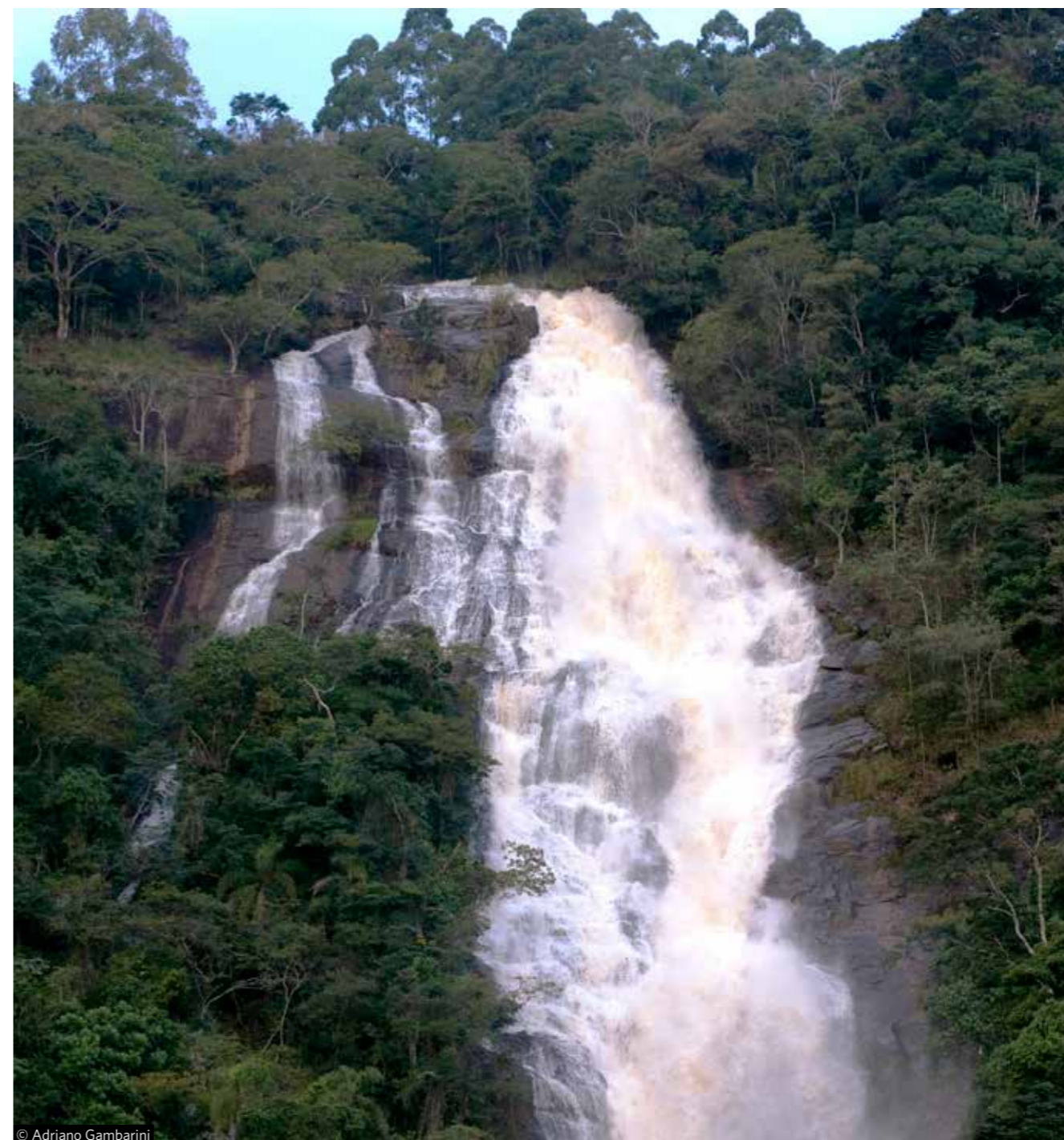
As SbN trazem uma contribuição incremental na promoção da segurança hídrica, aumentando o tempo de retenção de água nas sub-bacias que compõem o Sistema Cantareira, aumentando o volume de água contida no solo e no lençol freático durante todo o ano e melhorando a recarga de água para os corpos hídricos na estação seca.

Ao se comparar o comportamento hidrológico

parte das atividades econômicas, sua viabilidade econômica é ameaçada se não houver resiliência dos sistemas de abastecimento frente às mudanças climáticas.

O setor de saneamento exerce, portanto, um papel de liderança natural para envolver outros atores e forças políticas, como as administrações municipais e estaduais e mesmo o setor privado.

O envolvimento de municípios vem logo em seguida, uma vez que a maior parte das SbN são implantadas no seu território; além disso, os municípios têm a capilaridade para mobilizar e envolver os proprietários de terra, a quem, em última análise, cabe a decisão sobre a mudança do uso do solo.



© Adriano Gambarini



## Agradecimentos

Os autores agradecem a contribuição de diversas pessoas e instituições que colaboraram para este estudo. Com destaque para Mara Ramos, Suely Matsuguma, Emerson Martins Moreira e Giovana Bevilacqua Frota da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), pelo fornecimento de dados autorizados pela empresa. A Rodolfo Gustavo Ferreras e Alessandro Silva de Oliveira, da Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo (ARSESP), pelo constante acompanhamento ao longo do desenvolvimento deste trabalho e pelas contribuições ao longo das discussões técnicas. À Dra. Margaret Palmer, Diretora do National Socio-Environmental Synthesis Center (SESYNC), por hospedar o programa de pós-doutorado que possibilitou a colaboração institucional que resultou neste produto. Aos colegas do World Resources Institute (WRI), Rafael Feltran-Barbieri, pelas contribuições técnicas nas análises econômicas e Suzanne Ozment pela articulação que tornou possível a

colaboração entre TNC, SESYNC e WRI. Carlos Andres Rogéliz Prada, Jorge León pelas colaborações técnicas no campo da hidrologia e Fernando Cesário, Especialista em Carbono da TNC. Também agradecemos aos financiadores, Fundação Tinker, pelo suporte financeiro que permitiu a realização deste estudo; ao programa Partnerships for Forests, financiado pelo UK Foreign Commonwealth and Development Office (FCDO). Esta publicação é cofinanciada pela International Climate Protection Initiative (IKI) do Ministério Federal do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) por meio do Banco Interamericano de Desenvolvimento, que atua como administrador da Aliança de Fundos de Água da América Latina. As opiniões expressas nesta publicação são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente as opiniões do IKI, BMU ou BID, seu Conselho de Administração ou os países que representam.

## Sobre os 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](http://www.tnc.org.br).

## Sobre o SESYNC

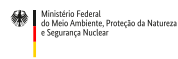
O centro de pesquisa National Socio-Environmental Synthesis Center (SESYNC) promove a conexão entre as ciências naturais e as ciências sociais provendo subsídios para a tomada de decisão em favor da solução de problemas na interface homem-ambiente. A partir do suporte financeiro da Fundação Nacional de Ciência, através da Universidade de Maryland, o SESYNC abriu suas portas em 2011. Desde o início, buscamos promover a colaboração interdisciplinar que leve a descobertas científicas inovadoras. Por 10 anos, o SESYNC incentivou a pesquisa e o aprendizado que busquem compreender a estrutura, o funcionamento e a sustentabilidade de sistemas sociais e ambientais em conjunto.



**O relatório técnico completo do qual foram extraídas as informações para esta versão executiva pode ser acessado em: [www.tnc.org.br](http://www.tnc.org.br)**



Com o apoio do



com base em uma decisão do Parlamento Alemão