

# Servicios de agua potable y saneamiento resilientes en América Latina y el Caribe

Autores:

Homero Paltán

Marcello Basani

Verónica Minaya

Nicolás Rezzano

División de Agua y Saneamiento

NOTA TÉCNICA N°  
IDB-TN-01988

# Servicios de agua potable y saneamiento resilientes en América Latina y el Caribe

Autores:

Homero Paltán

Marcello Basani

Verónica Minaya

Nicolás Rezzano

Agosto 2020

Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo  
Servicios de agua potable y saneamiento resilientes en América Latina y el Caribe /  
Homero Paltán, Marcello Basani, Verónica Minaya, Nicolás Rezzano.  
p. cm. — (Nota técnica del BID ; 1988)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Water-supply-Environmental aspects-Latin America. 2. Water-supply-Environmental aspects-Caribbean Area. 3. Sanitation-Environmental aspects-Latin America. 4. Sanitation-Environmental aspects-Caribbean Area. 5. Climatic changes-Latin America. 6. Climatic changes-Caribbean Area. I. Paltán, Homero. II. Basani, Marcello. III. Minaya, Verónica. IV. Rezzano, Nicolás. V. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. VI. Serie.

IDB-TN-1988

Códigos JEL: Q25, Q54, L95, L97.

Palabras clave: Agua potable, saneamiento, resiliencia.

Edición: Erick Rivera

Los autores desean agradecer a la División de Agua y Saneamiento del BID (WSA) por el apoyo recibido. Un reconocimiento especial a los peer-reviewers Alfred Grunwaldt, Edoardo Borgomeo, Hori Tsuneki y Mauro Nalesso por sus valiosas sugerencias. Un gracias particular a Alfred y Mauro por los insumos y el trabajo de consolidación, y a Cecilia Maroñas por los insumos durante la fase de revisión.

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2020 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.





SERVICIOS DE AGUA POTABLE  
Y SANEAMIENTO RESILIENTES  
EN AMÉRICA LATINA Y  
EL CARIBE





# RESUMEN EJECUTIVO

**A**lcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, “Asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos”, requiere, entre otras cosas, de un cambio de paradigma de manejo de recursos hídricos que incluya perspectivas de incertidumbre e innovación. Para América Latina y el Caribe esto significa replantear la forma en que se manejan los servicios de agua y saneamiento y así incluir un enfoque de resiliencia para entender amenazas naturales tradicionales en conjunto con otros elementos que puedan afectar el desempeño de los sistemas regionales. Esto incluye nuevas condiciones dadas por el cambio climático, el crecimiento poblacional, los cambios de uso en el suelo u otros *shocks* globales o regionales que pudieran afectar a la región. El presente documento busca facilitar un elemento de reflexión para que diferentes actores claves involucrados en la toma de decisiones y operación de servicios de agua y saneamiento de América Latina y el Caribe conozcan y puedan implementar acciones para manejar amenazas e incertidumbres que puedan afectar a sistemas de abastecimiento de agua potable y hacerlos resilientes. El estudio presenta un enfoque basado en resiliencia y técnicas tradicionales para medir e incorporar riesgos al desempeño de los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento de la región, independientemente. Además, se describe un marco de decisiones científico de vanguardia, previamente aplicado y apropiado para tomar decisiones ante las condiciones características de las amenazas a los recursos hídricos de la región. Esto viene acompañado de una descripción de las herramientas disponibles para la modelación requerida en este proceso, en conjunto con ejemplos de sus aplicaciones.

# ÍNDICE

## INTRODUCCIÓN ..... 4

- Una región con amenazas inciertas, múltiples y cambiantes..... 6
- Eventos repentinos y sus efectos en los sistemas de agua y saneamiento..... 7
- Eventos de desenvolvimiento lento y sus efectos en los sistemas de agua y saneamiento ..... 8
- El cambio climático y su efecto en los sistemas de agua y saneamiento..... 11
- Una región amenazada por eventos combinados e indirectos ..... 15

## 1 PROCEDIMIENTOS TRADICIONALES PARA ESTIMAR Y MANEJAR INCERTIDUMBRES Y AMENAZAS ..... 16

- 1.1. Aplicación del enfoque tradicional para estimar futuros hídricos ..... 18
- 1.2. Hacia un enfoque de decisiones resilientes sobre el agua ..... 20
- 1.3. Evaluando y generando resiliencia en sistemas de abastecimiento de agua potable y saneamiento ..... 22

## 2 ESCALAMIENTO DE DECISIONES PARA SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE ..... 25

- Etapa 1. Escaneo del sistema ..... 29
- Etapa 2. Análisis inicial de vulnerabilidades ..... 30
- Etapa 3. Prueba de estrés y análisis de sensibilidades..... 31
- Etapa 4. Selección de intervenciones y estrategias ..... 31
- Herramientas para aplicación de marcos de decisiones resilientes ..... 34

## CONCLUSIONES ..... 37

## ANEXOS ..... 38

- Anexo 1. Downscaling climático ..... 39
- Anexo 2. Limitaciones del enfoque de arriba-hacia-abajo ..... 41
- Anexo 3. Generadores de clima..... 43

## REFERENCIAS..... 45

## LISTA DE FIGURAS

- 10** Figura 1. Abastecimiento de agua para la ciudad de Riohacha en número de días por semana
- 26** Figura 2. Esquema General del Árbol de Toma de Decisiones
- 27** Figura 3. Diagramas de evaluación de resiliencia del Sistema de Abastecimiento de Agua Potable de Quito
- 33** Figura 4. Daños a la infraestructura hídrica. Antes y después del terremoto de Manabí, Ecuador, 2016
- 35** Figura 5. Esquema General del HydroBID
- 42** Figura 6. Cascada de propagación de incertidumbre

## LISTA DE TABLAS

- 21** Tabla 1. Criterios claves para un enfoque de decisiones de abastecimiento y saneamiento resilientes
- 30** Tabla 2. Ejemplos de métricas de resiliencia y robustez para sistemas de agua y abastecimiento

# INTRODUCCIÓN

**E**l ODS 6 plantea la necesidad de “Asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos”. Las metas para su cumplimiento incluyen el acceso universal y equitativo al agua potable, mejorar la calidad del agua, asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua para hacer frente a los distintos usos. Igualmente, el ODS 13 plantea una acción efectiva por el clima, que contribuirá a garantizar el recurso hídrico a la luz de los impactos observados y anticipados del cambio climático sobre las fuentes de agua, a la vez que se garantiza la resiliencia climática de la infraestructura de agua y saneamiento. Para cumplir estas metas, se entiende que los servicios y sistemas de infraestructura son componentes esenciales de desarrollo que pueden ser catalizadores para cumplir este y otros ODS [Thacker et al., 2019].

En América Latina y el Caribe, sin embargo, el acceso al agua potable segura al 2017 se estimó en un 74 %; mientras que el acceso al saneamiento seguro fue de apenas 31 %<sup>1</sup>. Sin embargo, este número de igual forma puede disminuir considerablemente si se evalúa el acceso no solo en términos de conexiones instaladas, si no además en la continuidad en el servicio de agua. Así, el cumplimiento del ODS 6 requiere de una inversión significativa en los sistemas hídricos de la región (a diferentes escalas administrativas), que considere desempeños satisfactorios en el abastecimiento de agua potable y saneamiento. De igual forma, si estas inversiones son significativas, se esperaría que tengan un tiempo de vida de igual forma alto; esto implica hacer proyecciones sobre las condiciones futuras que los sistemas de abastecimiento deberán enfrentar. Sin embargo, los tomadores de decisiones generalmente se encuentran con la dificultad e imposibilidad de encontrar un solo escenario que describa óptimamente las condiciones futuras de los sistemas. Esta dificultad viene dada por las complejidades que se generan al tratar de cuantificar o acordar condiciones futuras regionales que son cambiantes e inciertas.

<sup>1</sup> <https://washdata.org/data/household#!/>



*Así, para poder alcanzar el ODS 6, los tomadores de decisiones en la región están obligados a ampliar la perspectiva tradicional de manejo de recursos hídricos.*

Tradicionalmente en América Latina y el Caribe estas incertidumbres incluyen un irregular y alto crecimiento poblacional y, por lo tanto, alteraciones en los patrones de demanda, cambios de uso del suelo en las cuencas de abastecimiento, ocurrencia e intensidad de eventos naturales (eventos extremos climáticos, fenómenos sísmicos o volcánicos, deslizamientos de tierra, etc.), entre otras. A estas amenazas tradicionales se suma la forma en que el cambio climático afecta y afectará la disponibilidad y temporalidad (estacionalidad) de los recursos hídricos que puedan disminuir la capacidad de un sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento para cumplir satisfactoriamente sus objetivos.

Así, para poder alcanzar el ODS 6, los tomadores de decisiones en la región están obligados a ampliar la perspectiva tradicional de manejo de recursos hídricos. Esto implica desarrollar, además de tecnologías y conocimientos científicos que aceleran los progresos existentes, soluciones que combinen innovación, investigación e ingenio. Sobre todo, alcanzar metas de agua y saneamiento requiere cambiar los paradigmas disciplinarios con que el agua es entendida [Sadoff et al., 2020]. En especial, el paradigma actual de manejo de agua debe reimaginarse hacia uno que sea capaz de manejar las complejidades e incertidumbres del mundo actual, considerando sus interconexiones, sorpresas inesperadas y cambios. Estas circunstancias obligan a los tomadores de decisiones y actores involucrados en el sector a describir en términos de resiliencia las inversiones esperadas, incluyendo al tradicional análisis de los indicadores de cobertura, acceso y/o costos financieros. En otras palabras, es necesario que los tomadores de decisiones, ante condiciones de amenazas que por naturaleza pueden ser inciertas, evalúen la forma en la que las inversiones e intervenciones individuales para cada sistema pudieran influir (o no) en la capacidad de recuperación de estos, y, así, mantener un desempeño satisfactorio. Además, dichas inversiones deben ser evaluadas considerando su capacidad de respuesta ante no solo eventos que son considerados como extremos o inusuales, sino también ante situaciones que no sean previstas o esperadas.

De esta forma, en esta publicación se presentan reflexiones para que diferentes actores claves involucrados en la toma de decisiones y operación de servicios de agua y saneamiento de América Latina y el Caribe conozcan y puedan implementar acciones para manejar amenazas e incertidumbres, que puedan afectar a sistemas de abastecimiento de agua potable, y de ese modo hacerlos resilientes. En las siguientes secciones se describen las principales amenazas para el desempeño de los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento de la región. Se describen, además, las técnicas tradicionales para medir e incorporar riesgos en el sector hídrico y se discuten sus limitaciones. Por esto se presenta un enfoque basado en resiliencia para entender y manejar riesgos al desempeño de sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento, independientemente de su origen y naturaleza (e.g. eventos por cambio climático, cambios en demografía y patrones de consumo, cambios de uso de suelo, o *shocks* como erupciones volcánicas y sismos). Además, se detalla un marco de decisiones científico de vanguardia, previamente aplicado, apropiado para tomar decisiones ante las condiciones características de las amenazas a recursos hídricos de la región. Esto viene acompañado de una descripción de las herramientas disponibles para numéricamente analizar los pasos requeridos en este proceso, en conjunto con ejemplos de sus aplicaciones.

## Una región con amenazas inciertas, múltiples y cambiantes

En América Latina y el Caribe, los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento enfrentan diversas amenazas que podrían afectar su funcionamiento esperado y por consiguiente la calidad y escala del servicio que prestan. Estas amenazas pueden ser divididas entre 1) aquellas que son repentinas y que causan un daño inmediato a captaciones de agua, reservorios, plantas de tratamiento, canales de conducción y otra infraestructura clave para el servicio de agua y saneamiento, y 2) aquellas que también afectan estos servicios, pero se expresan de una forma lenta, progresiva y silenciosa. Aparte, varios de estos eventos pueden verse agravados por el cambio climático.

Además, es importante notar que en muchas ocasiones estos eventos se expresan simultáneamente o, aunque no afecten directamente a un sistema de

abastecimiento de agua y saneamiento, pueden afectar otros sectores que, por su interconexión, pueden indirectamente determinar el desempeño del sector agua. Es así que alguna interrupción en los sistemas de transporte, energéticos o de telecomunicaciones puede comprometer de igual forma el servicio de abastecimiento de agua y saneamiento. En las siguientes subsecciones se detallan estos puntos.

## Eventos repentinos y sus efectos en los sistemas de agua y saneamiento

En América Latina y el Caribe, el desempeño de los sistemas de agua y saneamiento puede verse afectado por interrupciones debido principalmente a sismos, eventos volcánicos e inundaciones.

En cuanto a eventos sísmicos, las ciudades de la región ubicadas en zonas de fallas geológicas activas, como Ciudad de México o Santiago de Chile, tienen la amenaza de que el servicio de agua y saneamiento se vea interrumpido por roturas, averías o bloqueos (por deslizamiento) en la infraestructura clave para estos servicios. Por ejemplo, en la Ciudad de México, los periódicos locales reportaron que el terremoto de septiembre del 2017 dejó repentinamente a cerca de 4 millones de personas desabastecidas de agua, además de causar varias fugas que naturalmente incrementaron las pérdidas del sistema de abastecimiento. Aunque el servicio de agua paulatinamente se fue normalizando, después de un mes de la catástrofe existían aún cerca de 500 mil personas que antes del sismo tenían una conexión estable a la red de abastecimiento, pero que, hasta ese momento, dependían de camiones con tanques de agua o *pipas*. De igual forma, en Ecuador, los costos de reconstrucción en el sector agua y saneamiento por el terremoto del 16 de abril del 2016 en las provincias Manabí y Esmeraldas fueron de casi USD 270 millones<sup>2</sup>.

Igualmente, los eventos volcánicos pueden afectar los servicios de agua y abastecimiento mediante flujos piroclásticos y ceniza sobre infraestructura clave.

2 <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/08/Evaluacion-de-los-Costos-de-Reconstruccion-Resumen-Ejecutivo.pdf>

Por ejemplo, se estima que el evento eruptivo del Volcán de Fuego en Siquinalá, en Guatemala, dejó sin acceso a agua potable a las comunidades afectadas por cerca de 15 días. Otras ciudades mayores de la región que se ven amenazadas por este tipo de interrupciones incluyen, entre otras: Ciudad de Guatemala, San José de Costa Rica, Ciudad de México, Colima en México, Quito y Tolima en Colombia.

En cuanto a eventos repentinos hidrológicos, la región se ve afectada comúnmente por inundaciones. Principalmente en zonas del Caribe, los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento son también amenazados por ciclones y huracanes; estos acarrearán vientos o intensas lluvias que pueden dañar severamente la infraestructura. Por ejemplo, se estima que las pérdidas en las infraestructuras de agua y saneamiento solo en la ciudad de Kingston, Jamaica, en caso de una inundación con un periodo de retorno de 100 años ascenderían a los USD 14 millones<sup>3</sup>. Además, las inundaciones pueden cortar el acceso del personal a instalaciones clave para la operación de los sistemas.

## Eventos de desenvolvimiento lento y sus efectos en los sistemas de agua y saneamiento

Estos tipos de amenazas incluyen alteraciones en los caudales de la cuenca y otros de carácter social y demográfico que afectan la demanda de agua. En cuanto a los caudales de una cuenca, estos pueden darse por la ocurrencia de sequías y otros cambios graduales en las condiciones medias.

En cuanto a sequías, la forma en que estas pueden afectar un sistema de abastecimiento de agua y saneamiento puede ser compleja y con diversas etapas. Estos eventos tradicionalmente empiezan por anomalías en precipitación que se propagan a disminuciones en la cantidad disponible de agua superficial y, finalmente, afectan a sistemas hídricos y sociedades. Por ejemplo, la ciudad de México se vio afectada significativamente por una consecución de años secos entre 2007 y 2009, y entre 2011 y 2013, que disminuyó notablemente el nivel de agua en sus principales reservorios [Neri and Magaña, 2016]. De igual forma, al

<sup>3</sup> <https://ecapra.org/projects/probabilistic-disaster-risk-profile-jamaica-and-regional-caribbean-model>

sufrir un retraso en el comienzo de la época lluviosa, la ciudad de Lima en el 2014 tuvo que restringir el servicio de agua potable. Además, varias ciudades en el sur de Perú se vieron igual afectadas tanto en el 2014 como en el 2016, cuando dichas condiciones climatológicas se repitieron.

Por otra parte, las alteraciones en los caudales de aportación de un sistema de abastecimiento de agua y saneamiento pueden también darse por cambios en el uso del suelo o intervenciones humanas directas en el cauce natural de un afluente. Por ejemplo, en las regiones centrales de Argentina se estima que el reemplazo de pastizales por otro tipo de coberturas, como soja, impacta la variabilidad estacional de caudal disponible en las cuencas. En Brasil, además, se estima que el reemplazo de coberturas boscosas por coberturas principalmente agrícolas en los últimos años ha aumentado el caudal disponible en la época seca en hasta el 10 % [Levy et al., 2018]. Así, estos ejemplos señalan la constante sensibilidad que un sistema de abastecimiento de agua y saneamiento tiene hacia variaciones en el caudal. Esto naturalmente se traduce en dificultades para estimar la cantidad futura de que una captación o reservorio pueden causar, afectando así el desempeño de un sistema.

Finalmente, el cambio en las dinámicas poblacionales también puede representar una amenaza para el desempeño adecuado de un sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento. Por un lado, las Naciones Unidas estima que para el 2030 la región aumentará su población en cerca de 80 millones de personas (UN, 2019). Para América Latina, esto posiblemente indica una intensificación en los procesos de urbanización actuales en las ciudades principales que evidentemente representa una nueva presión para el abastecimiento de servicios básicos. Para la región, esta amenaza es más severa e incierta si se espera que estos procesos de urbanización sean informales y con poca capacidad de control. Por otra parte, en la región son cada vez más frecuentes las migraciones humanas. La actual crisis humanitaria y económica en Venezuela ha desplazado a más de 4.5 millones de personas (ACNUR, 2019). Se estima que alrededor del 80 % de estas personas se han movilizad dentro de la región; inclusive, se calcula que cerca de 1.5 millones de migrantes se encuentran en Colombia [Gil Jaramilo, 2019] (ver recuadro 1). Naturalmente, esto implica una nueva e imprevista presión a los sistemas actuales de abastecimiento de agua. De esta forma, un crecimiento poblacional no planificado, inesperado y constante podría conllevar a que varios sistemas que fueron diseñados bajo ciertas características de demanda no respondan de la misma manera ante estas condiciones de cambio.



# RECUADRO 1

## Incertidumbres poblacionales en el abastecimiento de agua a Riohacha, Colombia

El Distrito de Riohacha se encuentra ubicado en el departamento de La Guajira, en el nororiente de Colombia, y tiene una población de aproximadamente 175,000 personas. En el 2019, el BID apoyó una consultoría para revisar el plan de inversiones y proyectos a financiar para la mejora del sistema de abastecimiento de agua potable a la ciudad. Estas inversiones buscan colaborar con las nuevas estrategias operacionales de Riohacha que están en función de las nuevas fuentes de agua localizadas, con un horizonte de abastecimiento para el año 2044.

Actualmente, la continuidad del abastecimiento de la ciudad se encuentra entre 1 y 7 días a la semana, y está determinada por la sectorización de la ciudad (ver figura 1.1).



Fuente: [Gil Jaramillo, 2019]

**Figura 1.** Abastecimiento de agua para la ciudad de Riohacha en número de días por semana.

Justamente, las alternativas de mejoramiento de estos valores vienen de la mano con la implementación de un proceso de presurización secuencial de las redes de distribución, y de construcción de la infraestructura requerida y establecida para la optimización hidráulica del sistema de distribución. De igual forma, las autoridades buscan disminuir las pérdidas por fugas de agua en el sistema.

Sin embargo, uno de los principales desafíos que los tomadores de decisiones en este sistema enfrentan es la incertidumbre en las proyecciones poblacionales. Por ejemplo, en el 2005 se proyectaba que la población de la zona incrementaría en cerca de 120,000 habitantes para el 2018. Sin embargo, la diferencia real poblacional entre los dos períodos, de acuerdo con los censos, fue apenas de casi 10,000 personas, es decir un 92 % menos de lo originalmente estimado. Esto naturalmente ha llevado a preocupaciones de las autoridades en cuanto a las estimaciones poblacionales futuras para la ciudad y en cuanto a la certeza de varias estimaciones sobre la demanda de agua potable esperada en el futuro.

Por otra parte, los reportes migratorios estiman que para junio del 2019 cerca de 32,000 migrantes venezolanos se encontraban en Riohacha. Sin embargo, no es posible conocer totalmente si es que este número aumentará, disminuirá o presentará variaciones en los próximos años. Lo cierto es que representa una nueva incertidumbre para entender patrones de consumo de agua, y si es que las inversiones que se piensan realizar funcionarán de forma satisfactoria tomando en cuenta cambios poblacionales que no podemos totalmente cuantificar y entender.

Aparte de estas amenazas al desempeño adecuado de un sistema de abastecimiento de agua, consideradas quizás del tipo tradicionales, los tomadores de decisiones en recursos hídricos deben manejar los riesgos asociados a las propiedades estadísticas de las variables climáticas que representan el comportamiento del sistema climático global –considerado sobre largos períodos de tiempo– o el cambio climático [Lowe and Zealand, 2007; Hartmann et al., 2013].

## El cambio climático y su efecto en los sistemas de agua y saneamiento

Si bien históricamente la variación del clima ha respondido a ciclos naturales<sup>4</sup> que siguen ciertos patrones propios de nuestro sistema terrestre, en las últimas décadas se ha venido observando una mayor variabilidad producto del cambio climático, ocasionado por el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero de tipo antropogénico<sup>5</sup> en la atmósfera. [Qian et al., 2006; van Vuuren et al., 2011; Hartmann et al., 2013]. Desde la Revolución Industrial, se entiende que es el ser humano quien ha influenciado primariamente el sistema natural. Las observaciones y proyecciones climáticas estiman que desde 1850 a la actualidad el planeta se ha calentado cerca de +1.14 °C<sup>6</sup> y actualmente se mantiene una tasa de calentamiento de cerca 0.07 °C por año [Masson-Delmotte et al., 2018]. El impacto de este incremento principalmente afecta las características de los ciclos globales de energía y agua.

Respecto al ciclo del agua, en términos generales la evidencia de observaciones y de modelos numéricos indica que el cambio climático altera esencialmente la media y variabilidad de las variables *precipitación* y *temperatura* [Allen and Ingram, 2002; Solomon, 2007; Trenberth, 2011; Allan et al., 2014]. Los cambios en la media se refieren a alteraciones en valores totales anuales de estas variables, tanto a nivel de cuenca como a escalas regionales (varias cuencas). Por otra parte, los cambios

---

4 Los ciclos naturales del clima incluyen las oscilaciones planetarias a diversas escalas temporales y espaciales. Estas incluyen por ejemplo la Oscilación Multi-decadal de El Niño que es el principal regulador climático planetario a escalas de década, glaciaciones, ciclos solares, y otros que determinan el clima planetario a escalas en términos de siglos o milenios.

5 Es decir, emisiones de gases de efecto invernadero atribuibles a la actividad humana y generados como producto de la producción y consumo de energía a partir de combustibles fósiles.

6 <https://www.globalwarmingindex.org>

en la variabilidad indican alteraciones en la estacionalidad de estas variables y en especial en las propiedades de extremos hidrológicos [Hirabayashi et al., 2008; Prudhomme et al., 2011]. Además, particularmente para la climatología de la región, el cambio climático se cree está afectando las tendencias y características de El Niño y La Niña [Seager et al., 2019]. Así, el cambio climático constituye un elemento que potencialmente estaría alterando la frecuencia, intensidad y duración de eventos extremos como inundaciones, sequías, tormentas tropicales, entre otros.

En el sector de recursos hídricos se estima que la principal repercusión del cambio climático es la alteración de la estacionalidad de la hidrología local y regional; esta ha sido históricamente la base de la planificación hídrica [Rodríguez-Iturbe and Valdés, 2011; Stakhiv, 2011; Arnell and Lloyd-Hughes, 2014]. De igual forma, el cambio climático, mediante el aumento de temperatura, puede alterar procesos que afectan la calidad del agua. Debido a estas nuevas condiciones cambiantes, actualmente se tiene la certeza que la base o series históricas de datos, tanto de caudal como de calidad de agua, ya no son suficientes para planificar y manejar adecuadamente los recursos hídricos. Si bien esta afirmación puede ser considerada radical y debatible [Salas and Obeysekera, 2013; Montanari and Koutsoyiannis, 2014], la amenaza climática, en conjunto con otros fenómenos, levanta dudas acerca de la forma por la cual los proyectos hídricos pueden conseguir beneficios a largo plazo y a su vez un desempeño confiable [Hall and Borgomeo, 2013; Poff et al., 2015].

Además de las afectaciones del cambio climático a procesos terrestres, otras afectaciones son el aumento del nivel del mar y el calentamiento de aguas oceánicas, que podrían afectar principalmente las características de los ciclones tropicales. Por lo tanto, el cambio climático cambiaría las condiciones de amenaza en las áreas que tradicionalmente han sido afectadas por estos eventos, como el Caribe (ver recuadro 2) [IDB et al., 2019]<sup>7</sup>. Sin embargo, es importante aquí notar que para algunas regiones los ciclones tropicales son beneficiosos; este es el caso de varias regiones de México, donde estos eventos contribuyen fuertemente con la recarga de reservorios y sistemas hídricos naturales [Breña-Naranjo et al., 2015].

---

7 <https://reliefweb.int/report/bahamas/assessment-effects-and-impacts-hurricane-dorian-bahamas-executive-summary>

## RECUADRO 2

### Las Bahamas y el huracán Dorian

El 1 de septiembre del 2019, el huracán Dorian de categoría 5 impactó a Elbow Cay en la Isla Abaco, Las Bahamas, golpeando a esta isla y a la Gran Bahama por dos días; además, causando intensas precipitaciones en la región. En estas islas el daño total a la infraestructura se estimó que alcanzó los USD 2500 millones, mientras que el daño al sector social alcanzó USD 1.6 mil millones. Si bien muchos de los efectos sectoriales fueron transversales, los daños y pérdidas solamente en el sector agua y saneamiento sobrepasaron los US\$ 50 millones.

Así, diferentes elementos de la infraestructura de abastecimiento de agua fueron afectados dentro del sector hídrico. La Corporación de Agua y Alcantarillado de la Isla de Abaco (e islas adyacentes) detalló una serie de elementos que necesitaron ser reconstruidos, entre ellos se incluyen:

bombas de agua, plantas de ósmosis inversa, pozos y tuberías de transmisión. Además, se incluyó infraestructura no hídrica que es esencial para el funcionamiento del sistema de agua de las islas, como por ejemplo paneles de generación eléctrica y otros.

Por otra parte, se estiman importantes pérdidas financieras indirectas postevento por la caída en la demanda por parte del sector turístico y comercial. La duración de estas caídas se estimó que sea de 28 meses en la Isla Abaco y de 6 meses en la Gran Bahama.

Es importante considerar que cerca del 75 % de la población de las Bahamas no está conectada a la red de colección de aguas residuales, y la infraestructura existente quedó en un estado deficiente después del paso del huracán Dorian.

Fuente: IDB, 2019





Otros tipos de afectaciones del cambio climático a sistemas hídricos regionales incluyen la importante disminución de la masa total de los glaciares en la Cordillera de los Andes en las últimas décadas, observándose cambios más severos en los Andes Patagónicas y los Andes Tropicales [Dussailant et al., 2019]. Esto si bien puede en un principio aumentar el caudal disponible en los ríos de estas regiones, eventualmente puede ocasionar cambios importantes en la estacionalidad superficial de las cuencas en esta región. Por otra parte, estudios indican que Centroamérica es considerada una de las regiones más vulnerables al cambio climático como resultado de una reducción en precipitación e incrementos en temperaturas. Esto se espera que provoque no solo épocas secas más intensas, sino también pérdidas anuales importantes en el agua total disponible. Sin embargo, es aún incierto saber cómo estos cambios globales y regionales se traducirán a escala local y la forma en que afectarán al funcionamiento de sistemas e inversiones hídricas, tales como definir el nivel futuro de un cauce para así decidir la capacidad de un nuevo embalse, entender las tasas de recarga futuras de un acuífero para estimar su sustentabilidad, o si los sistemas de defensas para inundaciones actuales seguirán siendo funcionales en los próximos 25 años.

Finalmente, si bien no se conoce en su totalidad el impacto que el cambio climático podría causar en la calidad de las aguas de la región, es igualmente importante notar los vínculos que existen entre ellos. Por ejemplo, como producto del cambio en condiciones de temperatura y precipitación y su impacto en caudales, esto podría afectar la movilidad y dilución de contaminantes [Whitehead et al., 2009]. Además esto se podría ver agravado por un aumento de especies no nativas en las cuencas que se ajusten mejor a nuevas condiciones del clima. La ocurrencia de caudales bajos y la subsecuente reducción en velocidades en el cauce llevarían a tiempos de residencia más altos, lo que incrementaría el potencial de desarrollo de algas y otras especies que reducirían los niveles de oxígeno disuelto y aumentaría la eutrofización de fuentes [Michalak, 2016; Sinha et al., 2017]. Esto, en combinación con posibles aumentos en carbono orgánico disuelto en los ríos, representaría una carga extra para las plantas de tratamiento de agua de la región. Además, podría existir cambio en la tasa y dinámicas de sedimentos debido a cambios en la ocurrencia de tormentas. Sin embargo, la forma en que el cambio climático podría afectar a los sistemas hídricos regionales es todavía un tema que no se conoce en profundidad.



## Una región amenazada por eventos combinados e indirectos

Si bien los eventos que se describieron anteriormente pueden darse individualmente, en varias ocasiones estos pueden igual suceder simultáneamente o conducir a impactos indirectos en el servicio de agua y saneamiento. Por ejemplo, en ciudades del norte de Perú como Piura, las fuertes inundaciones causadas por El Niño Costero en el 2017 causaron deslaves que cortaron las vías de acceso a diversas áreas de la ciudad que no están conectadas a la red principal de agua potable, dificultando el acceso de camiones cisterna de agua a estos barrios. En otro caso, la infraestructura de abastecimiento y saneamiento de la ciudad de Buenos Aires se ve constantemente amenazada por combinaciones de inundaciones de cauces fluviales y de precipitación, además de mareas altas e intrusiones salinas. Estas situaciones naturalmente pueden verse agravadas por el cambio climático.

Si bien los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento pueden estar preparados para enfrentar estos eventos cuando suceden individualmente, una combinación de estos puede de igual forma impactar negativamente en el servicio. Además, aunque estos eventos no impliquen interrupciones, varios de los eventos detallados en estas secciones podrían producir daños en la infraestructura, desgaste de recursos y personal, causando así una reducción en la vida útil de los sistemas.



PROCEDIMIENTOS TRADICIONALES PARA ESTIMAR  
Y MANEJAR INCERTIDUMBRES Y AMENAZAS

# 1. PROCEDIMIENTOS TRADICIONALES PARA ESTIMAR Y MANEJAR INCERTIDUMBRES Y AMENAZAS

Para poder manejar el tipo de amenazas mencionadas anteriormente, los tomadores de decisiones tradicionalmente se han basado en soluciones estructurales específicas fundamentadas en factores de seguridad y utilizando condiciones de diseño [García et al., 2014; Ludwig et al., 2014]. Cuando el factor de seguridad es sobrepasado, simplemente se ejecutan ciertos planes, prácticas de buen manejo u obras específicas de rediseño o mantenimiento. Así, se pueden citar diversos tipos de inversiones de carácter estructural cuando se identifican varios escenarios de riesgo con diferente probabilidad de eventos en termino de periodos de retorno (por ejemplo, diques para proteger infraestructura crítica ante períodos de retorno de 100, 500, y 1000 años); de igual forma, se puede poner en marcha un plan de emergencia de abastecimiento cuando un terremoto o evento de desastre corta el agua a un sector de una ciudad.

En primer lugar, estas prácticas se consideran como reactivas; es decir, se espera que algún evento suceda, independientemente de su magnitud o área de impacto para poder actuar. En segundo lugar, estas prácticas generalmente se fundamentan en curvas de excedencias de pérdidas probables construidas con base en las distribuciones probabilísticas de series históricas y que se asumen que no cambian con el tiempo (proceso estacionario). Sin embargo, estas técnicas se basan justamente en la confiabilidad en que las series históricas capturen todo tipo de eventos que puedan suceder, y que además estas características se mantengan constantes y no cambien con el tiempo. Por lo tanto, estas técnicas no consideran eventos que puedan suceder y que caigan fuera de la distribución probabilística esperada. Estos eventos incluyen cambios inesperados dados por el cambio climático, migraciones humanas, situaciones sociales, crisis política y económica, pandemias e inclusive eventos sísmicos, volcánicos o de deslizamientos.



## 1.1. Aplicación del enfoque tradicional para estimar futuros hídricos

Al enfoque tradicional para la estimación de las condiciones futuras de disponibilidad de caudal se lo conoce como un proceso de arriba-hacia-abajo; y se fundamenta en el recálculo de las funciones de densidad y rediseño de factores de seguridad, utilizando información de proyecciones climáticas obtenidas por modelos de circulación global o GCM (por sus siglas en inglés). Con este enfoque, la información climática a nivel de cuenca o de proyecto se extrae con técnicas conocidas como *desescalamiento* o *downscaling* [Buytaert et al., 2010a; Simonovic, 2017]. Es decir, en este proceso se utilizan series de cadenas de procesos y modelos para ajustar las proyecciones climáticas desde una escala global a una escala regional. Con esta información *desescalada* entonces se corren modelos hidrológicos (que convierten precipitación y temperatura en caudal principalmente) y de sistemas hídricos (para poder incluir infraestructura como captaciones, reservorios, tuberías de conducción y otros, y así describir sus interdependencias y operaciones). Con base en esto, los analistas pueden obtener un escenario futuro sobre las condiciones climatológicas y de caudal de una cuenca que resuma lo que se puede esperar en períodos futuros (e.g. años 2050, 2070 o fin de siglo).

En términos generales, con este enfoque se planifica con base en la definición de un *escenario óptimo* construido sobre un limitado número de escenarios que describan las condiciones futuras climáticas (para oferta), poblacionales (para demanda) u otros de riesgo. Es decir, se establece un horizonte ideal tanto poblacional o de disponibilidad de caudal asumiendo que las condiciones que determinan la demanda, disponibilidad de agua y de riesgo se mantienen intactas según lo sugerido por las experiencias y series históricas. Si bien se pueden aplicar factores de corrección a estas estimaciones, el no considerar aspectos de variabilidad e incertidumbre puede llevar a *arrepentimientos* futuros sobre las decisiones tomadas ahora. Por ejemplo, si el crecimiento poblacional en una ciudad es mucho menor que el esperado (como el ejemplo en el recuadro 1), los tomadores de decisiones hubieran invertido en infraestructura, quizás sobredimensionada, para una demanda mucho más alta que la real. De igual forma, una empresa de agua potable y saneamiento

selecciona un escenario *óptimo* de precipitación futura calculando el promedio de varias proyecciones climáticas y realizando el proceso descrito. Sin embargo, si es que en el futuro la cuenca resulta ser más húmeda, este escenario *óptimo* habrá subestimado las condiciones; así la empresa de abastecimiento se arrepentirá si es que el proyecto se trataba de obras de embalses pequeños.

Esta situación es aún más compleja dadas las varias limitaciones que existen en los modelos actuales para estimar futuros climáticos. Estas vienen dadas desde el inicio del proceso en que se selecciona un escenario de cambio climático y se descartan otros que pueden darse (los experimentos actuales consideran cuatro tipos de escenarios climáticos que dependen de la evolución de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera). Además, los Modelos climáticos Globales (GMC) tienen sus propias limitaciones al no poder simular adecuadamente ciertos procesos físicos que conllevan a que presenten deficiencias para simular, por ejemplo, precipitación en áreas de las Costas Pacíficas de América del Sur durante un fenómeno de El Niño. A esto se le añade las incertidumbres intrínsecas que los propios modelos hidrológicos y de sistemas hídricos tienen. Una descripción detallada del enfoque de abajo-hacia-arriba y sus limitaciones se presenta en el anexo 1 y anexo 2.

Es entonces entendible que la utilidad de los GCM y de métodos que proyectan escenarios únicos tanto poblacionales como otro tipo de amenazas (sísmicos, volcánicos, aumento del nivel del mar, entre otros) son útiles para tener un buen entendimiento del contexto en que se desenvuelve un sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento, mas no para tomar decisiones a escala de cuenca y/o sistema hídrico específico (nivel de proyecto). Sin embargo, mediante la utilización de nuevas metodologías se puede aprovechar el tipo de información que este enfoque utiliza para la toma de decisiones en sistemas de agua y saneamiento. A continuación, se detalla este nuevo enfoque en donde la resiliencia es el eje central.



## 1.2. Hacia un enfoque de decisiones resilientes sobre el agua

Recientemente, los métodos de “abajo-hacia-arriba” o enfoque basados en *riesgo* han ganado popularidad como alternativa al enfoque de “arriba-hacia-abajo”. La diferencia de este enfoque es que en vez de partir de la proyección de escenarios futuros que puedan determinar el adecuado desempeño de un sistema de abastecimiento de agua y saneamiento (climáticas, poblacionales, uso de suelo, financieras, entre otras), se busca primero entender los objetivos y características propias del sistema para así identificar las condiciones que harían que este sea vulnerable y por consiguiente *falla*. Estas condiciones de fallo se las encuentra mediante la exploración exhaustiva del funcionamiento de un sistema de abastecimiento de agua y saneamiento ante un amplio número de escenarios que describan condiciones de *shock o conmoción*. Así, con este enfoque se busca diseñar medidas e intervenciones que ofrezcan un mejor desempeño ante la mayor cantidad de escenarios posibles.

La estimación del desempeño de sistema de abastecimiento de agua y saneamiento se basa en la delineación de métricas. Por lo tanto, inicialmente se pueden utilizar métricas tradicionales como por ejemplo desempeños financieros, cantidad de agua entregada por un reservorio, entre otros. Sin embargo, al evaluar un sistema ante un amplio y diverso número de escenarios, este enfoque permite incorporar desde el diseño o desde el inicio del proceso de planificación a la resiliencia y a otros conceptos complementarios como robustez y flexibilidad. A continuación, en la tabla 1 se señalan las claves que abarcan estos criterios:

**Tabla 1. Criterios clave para un enfoque de decisiones de abastecimiento y saneamiento resilientes.**

Concepto	Criterios claves
Resiliencia	Tiempo y capacidad de un sistema para recuperarse y/o mantener un desempeño adecuado cuando enfrenta un <i>shock</i> , conmoción o situación adversa.
Flexibilidad	Capacidad de un sistema para transformarse, ajustarse y reconfigurarse ante nuevos escenarios y condiciones para mantener un desempeño adecuado.
Robustez	Capacidad de un sistema para mantener un desempeño adecuado ante un amplio número de escenarios y condiciones.
Confiabilidad	La posibilidad de que un sistema falle.
Vulnerabilidad	Estimación de la severidad de una falla.

Fuente: Elaboración de los autores con base en las fuentes descritas en esta sección

En la actualidad existen muchos conceptos e ideas acerca de resiliencia, sobre todo en el campo de riesgos. Sin embargo, para ingeniería y una visión de sistemas integral, el concepto de **resiliencia** fue incorporado por primera vez por Hashimoto en 1982 [Hashimoto et al., 1982] quien describió la resiliencia como la capacidad (tiempo o rapidez) de un sistema de *recuperarse* después de que haya sufrido un *shock* o una condición extrema. Para complementar resiliencia, igualmente Hashimoto incorporó criterios de confiabilidad y vulnerabilidad. **Confiabilidad** se describe como la probabilidad que tiene el sistema de fallar; mientras que **vulnerabilidad** estima qué tan severas pueden ser las consecuencias de una falla.

En las últimas décadas, se ha enriquecido la definición tradicional de resiliencia para que un sistema, cuando enfrenta una situación adversa, además de tener capacidad para recuperarse, mantenga un *desempeño adecuado* (en términos de servicio, cobertura, económicos, entre otros) [Ensor et al., 2018; Grafton et al., 2019; Brown et al., 2020]. Es decir, una vez que una sequía o un terremoto golpea un sistema de abastecimiento de agua, el criterio de resiliencia busca describir no solo qué tan rápido el sistema vuelve a condiciones *adecuadas*, sino que complementariamente busca entender de qué forma ese *desempeño* se mantiene considerando acceso al agua potable en las zonas más afectadas, equidad en el acceso, reactivación económica, entre otros. Más recientemente, a resiliencia se la ha complementado con el criterio de *transformabilidad* [Hall et al., 2019]. Esto puede ser descrito como la capacidad de un sistema de ser flexible y ajustarse a una nueva configuración

o estado ante condiciones extremas o de conmoción. Es decir, se enriquece el concepto tradicional de resiliencia incluyendo además la habilidad de un sistema para ajustarse y poder mantenerse en condiciones de desempeño adecuadas.

Por ejemplo, si un reservorio enfrenta una sequía, resiliencia no significa solamente el tiempo en que este demora en volverse a llenar (lo cual puede darse por lluvias o aumentos de caudales inesperados), sino también la *flexibilidad* que el sistema tiene para cambiar las reglas de operación o ajustar la demanda. En el caso de un terremoto, si el abastecimiento de agua es interrumpido por avería de una línea principal de conducción que conecta un reservorio con una planta de tratamiento, resiliencia no solamente indica el tiempo en que una empresa de agua y abastecimiento demora en arreglar dicha línea, sino también en la capacidad que la empresa tenga para interconectar otros reservorios, implementar medidas como abastecimiento por camiones cisterna e incluso la preparación de la ciudadanía para *controlar* la demanda y mantener un desempeño adecuado.

Otro criterio complementario al de resiliencia es el de **robustez**, que se refiere al número de escenarios o la proporción ante los que un sistema mantiene su *desempeño adecuado*. Es decir, este criterio describe el desempeño medio de un sistema ante posibles escenarios climáticos, demográficos, sísmicos, volcánicos y otros. Por ejemplo, si los tomadores de decisiones y especialistas delimitan 100 posibles escenarios de demanda para una ciudad, pero determinan que el sistema rendiría adecuadamente solo ante 60 de esos, entonces tendría una robustez del 60 %.

### 1.3. Evaluando y generando resiliencia en sistemas de abastecimiento de agua potable y saneamiento

Si bien existe una diversidad de métodos para tomar decisiones “de-abajo-hacia-arriba”, todos estos comparten los fundamentos antes mencionados. Dentro de los métodos más populares se encuentran el *Enfoque de escenario neutral* [Prudhomme et al., 2010], la *Teoría de decisión con vacíos de información* y el *Escalamiento de decisiones* [Brown et al., 2012, 2015]. Siguiendo estos métodos,

*Los modelos de sistemas de agua, por otra parte, buscan describir las interacciones entre hidrología, infraestructura, y usos.*

varios estudios han explorado la respuesta de sistema de agua bajo condiciones extremas y de *shock* en áreas como los Grandes Lagos en Norteamérica, el río Saskatchewan en Canadá, el reservorio Ashokan en Nueva York o el sistema de abastecimiento de agua potable de Lima [Moody and Brown, 2012; Cristina et al., 2015; Kalra et al., 2015; Elmira et al., 2016; Hassanzadeh et al., 2016]. También estos enfoques han sido aplicados para evaluar la pertinencia de inversiones en las cuencas hídricas en Niger y Camerún [Ghile et al., 2014; Grijzen, 2014]. En un contexto más amplio, estos enfoques han sido aplicados también en Holanda para evaluar la confiabilidad y flexibilidad de varias estrategias de manejo de agua ante aumento de nivel del mar [Kwadijk et al., 2010].

De igual forma, todos estos métodos comparten el tipo de herramientas que son necesarias justamente para describir escenarios y para entender la forma en que estos afectan un sistema de abastecimiento de agua y saneamiento. En particular, estos métodos se fundamentan en la elaboración o utilización de modelos hidrológicos de sistema de agua y generadores de clima. En el caso de modelos hidrológicos, se busca esencialmente describir relaciones entre precipitación, escorrentía, caudal, agua subterránea u otros procesos hidrológicos que los tomadores de decisiones consideren relevantes. Los modelos de sistemas de agua, por otra parte, buscan describir las interacciones entre hidrología, infraestructura, y usos. Si bien la complejidad, los límites y el nivel de sofisticación de estos modelos varían dependiendo de la necesidad de los tomadores de decisiones y del tipo de sistema, estos generalmente buscan describir infraestructuras existentes (captaciones, reservorios, entre otros), principales usuarios y niveles de extracción de agua y otros. Finalmente, los generadores de clima son modelos estadísticos que crean numerosas secuencias sintéticas de variables climáticas, que mantienen las mismas propiedades estadísticas que los registros históricos usados para alimentarlos. La generación de series sintéticas así es la base para obtener un amplio número de escenarios de precipitación y temperatura.

Además, dentro de los métodos presentados anteriormente, el de escalamiento de decisiones ha ganado popularidad para entender la vulnerabilidad climática del sistema de abastecimiento de agua potable [Kalra et al., 2015]. Este método se ha utilizado ampliamente debido a la flexibilidad que tiene para ir incrementando (o no) la complejidad de las herramientas numéricas y tipo de análisis a utilizarse. Por ejemplo, una de las modificaciones que este método ha tenido es la introducción del enfoque de *resiliencia por diseño* que combina una serie de modelaciones de las interacciones humanas e hidrológicas para planificar resiliencia bajo incertidumbre [Brown et al., 2020]. Una de las principales aplicaciones de este enfoque es el proceso de planificación y priorización de inversiones para el suministro de agua potable en la Ciudad de México [St. George Freeman et al., 2020]. En el siguiente capítulo se detalla un marco de toma de decisiones que, partiendo de los conceptos del método de escalamiento de decisiones y con un enfoque resiliente, es aplicable justamente para sistemas de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe. Además, se detallan las herramientas prácticas que pueden ser utilizadas por analistas para facilitar este proceso.



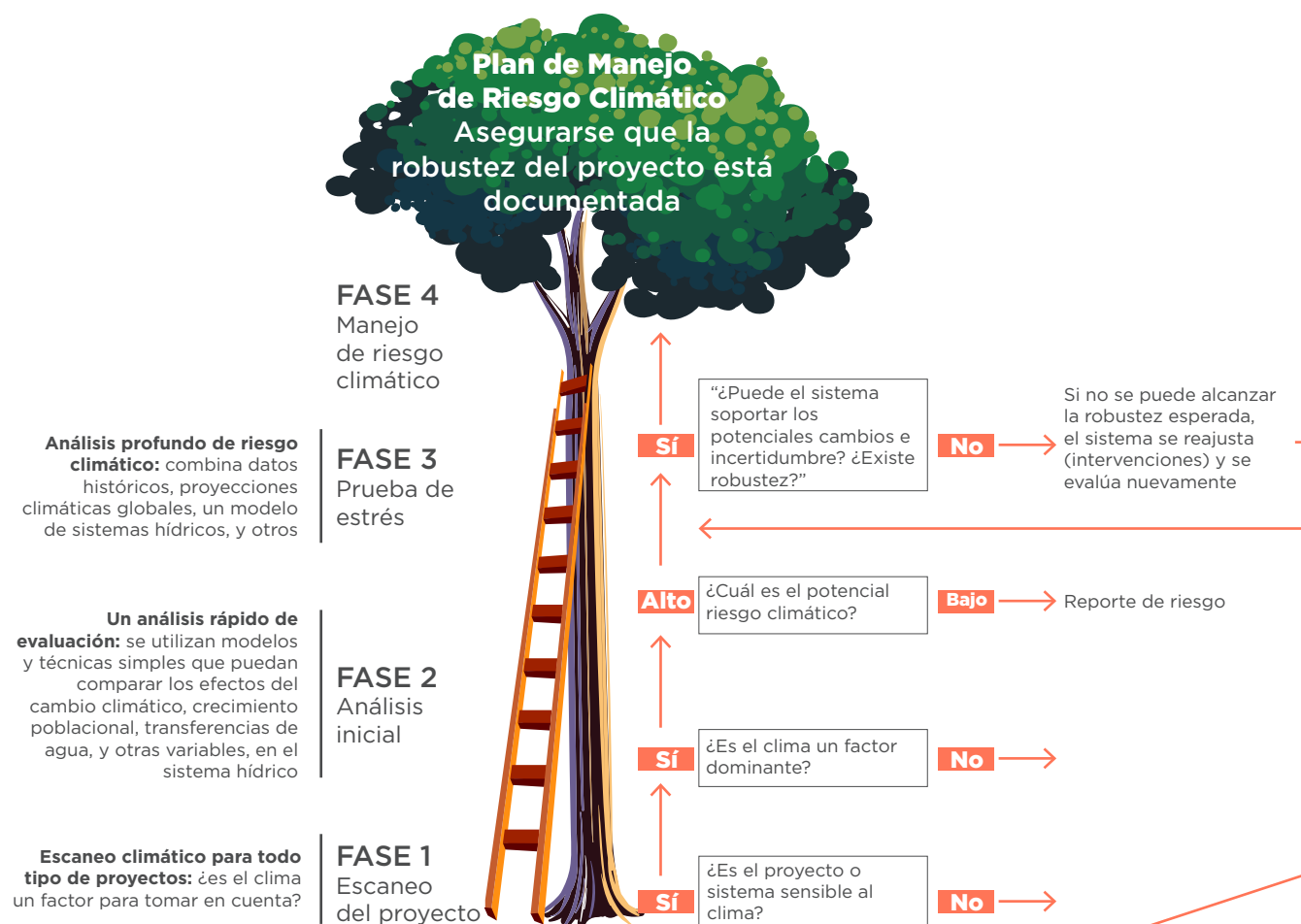


ESCALAMIENTO DE DECISIONES PARA SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE



## 2. ESCALAMIENTO DE DECISIONES PARA SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Siguiendo los principios de escalamiento y toma de decisiones resilientes, el Banco Mundial publicó en el 2016 el Árbol de Toma de Decisiones (DTF, por sus siglas en inglés). Esta es una herramienta para guiar a los tomadores de decisiones en el sector hídrico para planificar con base en la resiliencia considerando riesgos e incertidumbres. Un ejemplo de la aplicación de este marco y etapas en el sistema de abastecimiento de agua de Quito, Ecuador, es presentado en el recuadro 3. El DTF cuenta con cuatro etapas: escaneo de sistema, análisis inicial de vulnerabilidades, prueba de estrés y manejo de riesgo. Ver esquema en la siguiente figura:



**Figura 2.** Esquema General del Árbol de Toma de Decisiones.

A continuación se describen estas etapas y se especifican el tipo de herramientas y modelos que pueden ser aplicados en este contexto.

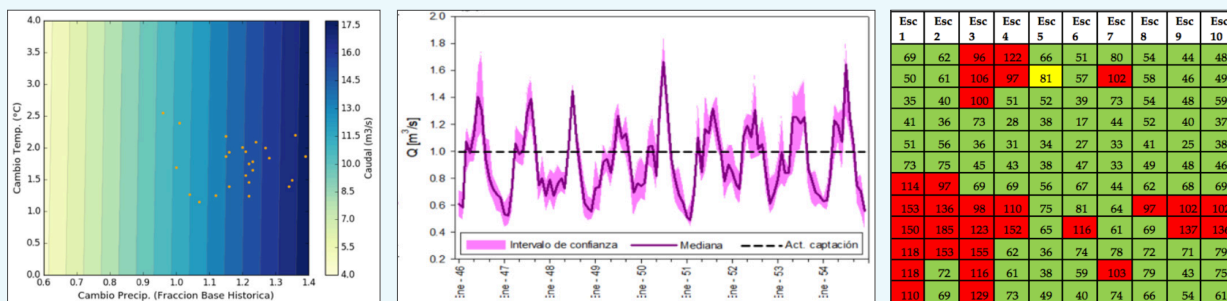
# RECUADRO 3

## Incrementando la resiliencia del sistema de abastecimiento de agua de Quito, Ecuador

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) alcanzó en el 2017 una población aproximada de 2,700,000 habitantes. Recientemente se ha transformado en la ciudad más poblada del Ecuador con una tasa de crecimiento de cerca del 2.20 % anual; se espera que la demanda de servicios continúe intensificándose. Sin embargo, debido a su ubicación, su sistema de abastecimiento se encuentra expuesto a diversas amenazas naturales. Entre ellas resaltan la serie de volcanes que lo rodean (Pichincha, Cotopaxi y Cayambe) y las características geológicas del Valle Interandino que representan un considerable peligro sísmico.

Un ejercicio del BID para evaluar e incrementar la resiliencia multidimensional del Sistema de Abastecimiento de Agua del DMQ conllevó inicialmente el análisis

de la sensibilidad inicial del caudal de los subsistemas (o microcuencas) de aportación a cambios en precipitación y temperatura. En la figura 3.1(a) se muestra que las variaciones en caudal en un subsistema son sensibles a cambios en la precipitación. Disminuciones estacionales de la precipitación en -20 % reducirán el caudal disponible en alrededor del 30 % (de -10 m<sup>3</sup>/s a -7 m<sup>3</sup>/s). Este tipo de gráficas permite justamente visualizar el rol que juegan la temperatura y la precipitación en caudales. Es decir, ayuda a explorar la elasticidad del caudal a estas (u otras) variables. Sin embargo, este subsistema es robusto en varias de las proyecciones de los GCM utilizados en el experimento climático global CMIP5. En este caso, los caudales fueron obtenidos utilizando el modelo HydroBID.



Fuente: Elaboración de los autores con base de proyecto previo

**Figura 3.** Diagramas de evaluación de resiliencia del sistema de abastecimiento de agua potable de Quito

a) Mapa de respuesta climática en meses secos de las microcuencas en uno de los subsistemas de abastecimiento de agua de Quito. (b) Desempeño de una Microcuenca del Sistema de Abastecimiento ante estrés climático. (c) Semaforización de representación de desempeño de un subsistema que indica resiliencia. Cada celda representa la proporción de caudal en una microcuenca que se captaría ante cada escenario climático. En este estudio los escenarios son escenarios climáticos generados sintéticamente.

Para capturar las características de desempeño de los subsistemas, se obtuvieron series sintéticas (~150) aplicando el modelo WeaGETS, que describen escenarios de clima. Además, se definió como criterio de desempeño el promedio anual de agua captada a nivel de microcuenca, indicando así que este umbral representa lo que el subsistema debe seguir abasteciendo para mantener condiciones satisfactorias. La figura 3.2 (b) muestra el resultado de estresar este subsistema, donde presenta una probabilidad del 75 % de no cumplir su criterio de desempeño ante un cambio climático.

De igual forma, mediante un análisis de redes, incorporando características físicas de la infraestructura, se lograron determinar los elementos del sistema que son vulnerables a eventos volcánicos y sísmicos para entender las implicaciones en el sistema si es que estos tuvieran conmociones. Se realizó mediante la asignación de pesos a cada elemento del sistema, tomando en cuenta su rol

hidráulico dentro del mismo. Además, la resiliencia del sistema se describió con base en un sistema de semaforización que representa las probabilidades de que un subsistema falle. En el ejemplo de la figura 3.1 (c) en verde son los meses en que el subsistema logra abastecer de agua según la demanda histórica y así se desempeña adecuadamente (no falla) ante varios escenarios de conmoción climática; en amarillo, cuando el subsistema cumple sus criterios de desempeño, aunque compromete los caudales ecológicos; y en rojo, cuando un subsistema falla al no cumplir sus criterios de desempeño. Así, por ejemplo, en el escenario 2, el subsistema tarda cerca de 4 meses en recuperar su desempeño adecuado.

Finalmente, este ejercicio sirvió para calificar sobre un puntaje de 10 el nivel de resiliencia y robustez de las microcuencas de aportación ante eventos climáticos, sísmicos y volcánicos. Este puntaje fue resumido en un valor único para todo el sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad.



## Etapa 1

### 2.1. Escaneo del sistema

Es la etapa inicial donde se busca principalmente entender las características de un sistema de abastecimiento de agua y definir el significado y umbrales de *desempeño adecuado* para dicho sistema. De esta forma, se puede comenzar recolectando información existente y con una participación intensiva de los actores del sistema, mapear las características físicas de demanda, sociales e institucionales del mismo. Por lo tanto, es importante contar con la mayor cantidad de actores locales que ayuden a delinear de mejor forma una esquematización de los elementos, vínculos, conexiones y otras características principales del sistema. En esta etapa se buscan las principales opciones de intervención o planes existentes, y se hace un listado de las condiciones presentes o futuras que se creen que podrían afectar el *desempeño adecuado* del sistema. Con estos criterios y umbrales definidos, se construyen las métricas iniciales de resiliencia, robustez y otras como las métricas presentadas y descritas en la tabla 1. Aquí, justamente se busca incorporar además otro tipo de métricas (o elementos cualitativos) que permitan evaluar resiliencia en comparación con criterios sociales, de equidad, ambientales, financieros, para así mantener una visión multicriterio de manejo de recursos hídricos. De igual forma, los tomadores de decisiones pueden mantener una flexibilidad y justamente acordar en más de un criterio para describir estas métricas (por ejemplo, utilizar más de una definición de *robustez* para evaluar su rendimiento ante diferentes contextos). A continuación, en la tabla 2, se presentan algunos ejemplos para métricas de resiliencia, robustez y confiabilidad:



**Tabla 2. Ejemplos de métricas de resiliencia, robustez y confiabilidad para sistemas de agua y abastecimiento**

Métrica	Ejemplos
Resiliencia	i) Número de días en que un sistema de abastecimiento de agua recupera sus niveles adecuados de entrega después de un sismo. ii) Número de días en que una planta de tratamiento vuelve a mantener sus niveles operativos óptimos después de un evento inesperado de ocurrencia de algas y eutroficación.
Robustez	ii) Porcentaje de escenarios de cambio climático en que un reservorio mantiene sus niveles de agua por encima de un nivel dado de agua. ii) Porcentaje de escenarios de crecimiento poblacional en que un sistema de abastecimiento logra cumplir con sus entregas de agua. iii) Porcentaje de escenarios de sequías en que un sistema logra mantener su servicio de abastecimiento.
Confiabilidad	i) Número de días en que un reservorio satisfactoriamente entrega agua hacia una planta de tratamiento. ii) Porcentaje de días en que un sistema satisfactoriamente entrega sus metas de entrega a una ciudad.

Fuente: Elaboración de los autores con base en el material referenciado en esta sección.

## Etapa 2.

### 2.2. Análisis inicial de vulnerabilidades

Esta etapa busca tener una primera caracterización cuantitativa de cuáles son los condicionantes más relevantes para determinar el *desempeño adecuado* del sistema. Se busca hacer unas primeras relaciones y conexiones entre aspectos demográficos, económicos, de cambio de uso de suelo u otros elementos identificados en la etapa anterior que se cree que afectan a un sistema de abastecimiento de agua. Además, se pueden ir descartando aquellas incertidumbres que no influyen de manera importante al desempeño del sistema de abastecimiento.

## Etapa 3.

### 2.3. Prueba de estrés y análisis de sensibilidades

Enseguida se realiza una prueba de análisis de estrés para aquellos elementos que mayormente determinan el desempeño de un sistema (seleccionados en la etapa anterior). La prueba de estrés es una prueba donde se somete al sistema a un amplio número de posibles escenarios para entender bajo cuáles condiciones dicho sistema típicamente *fallaría*. En este caso, los escenarios son obtenidos por series estocásticas de las variables que han sido seleccionadas (por ejemplo, precipitación, crecimiento poblacional, aceleraciones sísmicas u otras). Justamente, al expandir el número de series y obtener un amplio rango de escenarios es que se busca captar condiciones futuras o de posible riesgo que los métodos tradicionales (como GCM u otros) no pudieran detectar. De esta forma, el amplio número de series sintéticas son utilizadas para *estresar* al sistema y caracterizar los escenarios en los que el sistema no se desempeñaría adecuadamente. El sistema **falla** cuando, en un escenario, el sistema de abastecimiento no cumple las métricas o criterios de desempeño que fueron anteriormente definidos. Además, esta caracterización puede cuantificar la forma en que el sistema se recupera después un *shock* o conmoción (resiliencia) o el número de escenarios en que el sistema sigue rindiendo adecuadamente (robustez).

## Etapa 4.

### 2.4. Selección de intervenciones y estrategias

Una vez que se caracteriza la forma en que un sistema de abastecimiento de agua y saneamiento pudiera fallar, finalmente en esta etapa se estima la forma en que las intervenciones, estrategias, e inversiones mejorarían (o no) las métricas de desempeño identificadas anteriormente. En esta etapa se busca identificar aquellas estrategias que reducen de mejor manera las vulnerabilidades intrínsecas de un sistema, que pueden incluir nuevas infraestructuras (gris o natural), modificaciones al sistema, nuevos procedimientos operacionales, programas de manejo del recurso hídrico, entre otros.

Estas modificaciones son incorporadas en el modelo del sistema desarrollado en la etapa anterior, y se vuelve a someter a *estrés* al nuevo sistema. En consecuencia, se vuelve a obtener una caracterización de los criterios de desempeño del sistema (i.e. resiliencia, robustez, u otros). En esta etapa es importante comparar las pérdidas y ganancias que el sistema obtiene con cada intervención; por ejemplo, una inversión puede aumentar considerablemente la cantidad de agua que el sistema entrega teniendo una robustez mediana, pero puede resultar en una resiliencia baja. De igual forma una inversión puede generar altos valores de resiliencia y robustez, pero tener altos costos financieros o generar altos conflictos sociales. Es decir, la incorporación de criterios de resiliencia aquí debe verse dentro de un contexto que involucre otros criterios igualmente relevantes para los tomadores de decisiones como financieros, sociales, ambientales y otros (ver ejemplo de recuadro 4 [Sanabria, 2016]).

# RECUADRO 4

## Incorporando criterios de resiliencia en cartera de inversiones posteventos naturales

En las últimas décadas la provincia de Manabí en Ecuador ha enfrentado diversos eventos naturales, incluyendo inundaciones por el fenómeno de El Niño (1997-1998) y el más reciente terremoto de magnitud 7.8 que aparte de las considerables pérdidas humanas causó cerca de 300 millones de dólares en pérdidas en la infraestructura (figura 4.1). Además, el sismo causó una caída en el porcentaje de cobertura de agua potable del 66 % a cerca del 26 % y en la cobertura de alcantarillado del 60 % a casi 45 %. En respuesta el Gobierno del Ecuador con apoyo del BID ha propuesto diversos proyectos de agua y saneamiento en las zonas afectadas.

En este sentido, aparte de una evaluación de factibilidad de las propuestas, se buscó generar propuestas que incorporen criterios de resiliencia en estas inversiones. Las métricas de resiliencia en este caso fueron entendidas como: i) un menor tiempo de

pérdida de funcionalidad del servicio; ii) una mejor recuperación de otras actividades (sociales y económicas).

Se determinó que la incorporación de criterios de resiliencia en Manabí debe partir de una transversalización del enfoque de riesgo en todo el ciclo del proyecto: desde la conceptualización hasta la puesta en marcha. Además, se calculó que implementando medidas (principalmente enfocadas a refuerzos, cambios de materiales y construcción de planta de tratamiento) que incrementan la resiliencia de los proyectos a eventos sísmicos e inundaciones, aumentaría el costo del proyecto en cerca del 10 % del total. Sin embargo, en este análisis se determinó que la incorporación de dichas medidas serían costo-efectivas, demostrando la necesidad de evaluar los criterios de resiliencia dentro de un contexto general [Sanabria, 2016].



**Figura 4.** Daños a la infraestructura hídrica. Antes y después del terremoto de Manabí, Ecuador, 2016

## 4.5. Herramientas para aplicación de marcos de decisiones resilientes

La ejecución del marco del Árbol de Toma de Decisiones (dentro del contexto de escalamiento de decisiones), o cualquier otro método para desarrollar resiliencia desde abajo-hacia-arriba, necesita de modelos y técnicas que describan un sistema de abastecimiento de agua y saneamiento. Según lo mencionado en la primera etapa donde se realiza el diagnóstico inicial del sistema, es necesario contar con información sobre las características hidrológicas, de uso, y de infraestructura del sistema. Generalmente esta información se puede recolectar mediante información secundaria. Sin embargo, en muchos casos la información hidroclimatológica puede ser insuficiente, defectuosa o inexistente. Para esto se puede acudir a obtener registros de observaciones satelitales o de datos de reanálisis climatológico<sup>8</sup>. Un ejemplo de esto incluye la información de precipitación del proyecto CHIRPS<sup>9</sup> para precipitación o MODIS<sup>10</sup> para temperatura. De igual forma, los analistas pueden tener una primera impresión de contexto, de las condiciones climatológicas futuras accediendo a bases de datos de GCM tradicionales, como la proporcionada por el Banco Mundial<sup>11</sup>.

Así, esta información puede conectarse con un modelo hidrológico para simular escorrentía y entender las tendencias históricas, y obtener así una primera contextualización de las condiciones futuras del sistema de un abastecimiento de agua y saneamiento.

Para esto, en caso de que no se cuente con modelos ya implementados en la región o sistema de análisis, se puede acudir a diferentes tipos de modelos hidrológicos abiertos. Modelos como HydroBID<sup>12</sup> presentan una poderosa herramienta para tomadores de decisiones y analistas para evaluar relaciones empíricas entre precipitación, caudal y otras características iniciales (ver recuadro 5).

8 Reanálisis se refiere al proceso de obtener series de tiempo históricas o presentes para entender el cambio de las condiciones atmosféricas (y climatológicas), oceánicas y superficiales a escala global. En este proceso se combinan mediciones disponibles con modelos numéricos y técnicas de asimilación numérica para generar, en formatos grilla-dos (o *raster*), estos estimados de forma consistente, ininterrumpida y uniforme a nivel global.

9 <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>

10 <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>

11 <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>

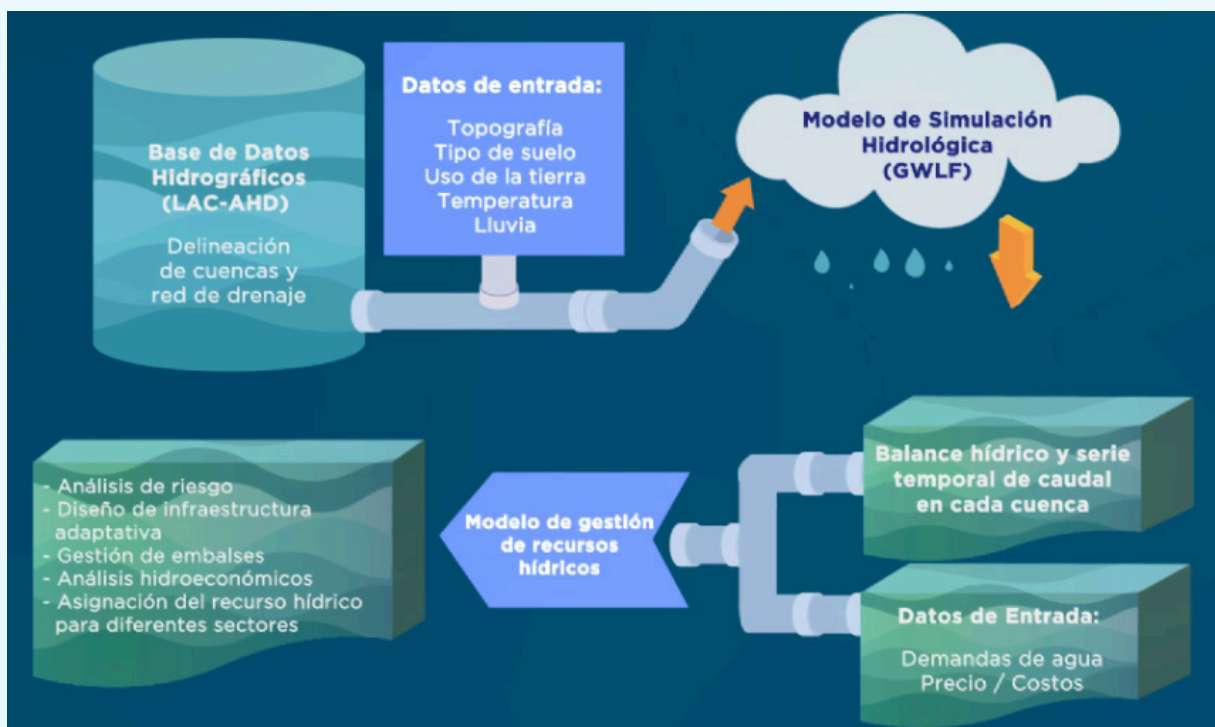
12 <http://hydrobidlac.org>

# RECUADRO 5

## Modelo HydroBID

El modelo HydroBID fue desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo con el objetivo de simular y cuantificar de una manera integrada la hidrología y la gestión de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe bajo escenarios de cambio (climático, de uso de suelo, de infraestructura, y otros) [Moreda, 2014; Nalesso, 2014]. De los recientes estudios donde se ha utilizado esta plataforma se destacan: a) el Análisis del impacto del fenómeno de El Niño en la cuenca de Chancay-Lambayeque, Perú; b) la Identificación de dinámicas de sedimentos en el río Bermejo, Argentina; y c) el Análisis de inversiones en la cuenca del río Chalpi

[Nalesso, 2014; Moreda et al., 2016b, 2016a]. Este modelo cuenta con la ventaja de que es relativamente sencillo de utilizar; tiene una base de datos hidrográficos que contiene más de 300,000 cuencas delineadas y cauces fluviales a lo largo de la región. La información base requerida es: series de datos de precipitación y temperatura, además de series de caudales para la calibración y validación del modelo. En general, este es un modelo de lluvia-escorrentía basado en la formulación Generalized Watershed Loading Factor (GWLF). A continuación, en la figura 5 se presenta un esquema sobre su configuración:



Fuente: Imagen tomada de <http://hydrobidlac.org>

**Figura 5.** Esquema General del HydroBID.



Enseguida, para poder describir las dinámicas de uso de agua e infraestructura, se utilizan modelos de sistemas hídricos. Un modelo popularmente utilizado y que es gratuito para investigadores y agencias en países en vías de desarrollo es WEAP<sup>13</sup>. Recientemente, HydroBID ha incorporado módulos para describir calidad de agua además de demandas, pudiendo también ser utilizado para estos propósitos. De igual forma, en caso de necesitar describir sistemas más complejos o los tomadores de decisiones requieran entender procesos y más detalles, los analistas pueden desarrollar su propio modelo del sistema de agua y saneamiento en lenguajes de programación, como por ejemplo Python, Matlab, RStudio, entre otros.

Finalmente, el componente técnico de estos procesos incluye además la generación de series sintéticas para poder correr los modelos hidrológicos y de sistemas [Semenov and Porter, 1995; Mavromatis and Hansen, 2001; Wheeler et al., 2005]. En general, para esto se utilizan modelos estadísticos que crean numerosas secuencias sintéticas de variables que mantienen las mismas propiedades estadísticas que los registros históricos usados para alimentarlos. Para la generación de series de precipitación y temperatura, las series sintéticas usualmente se generan utilizando generadores de clima (ver anexo 3 sobre los principales tipos generadores de clima). De esta forma, los generadores de clima y las series sintéticas que estos producen buscan ampliar el conocimiento de las condiciones históricas de una locación. Es decir, ayudan a revelar escenarios que estadísticamente podrían darse (o que quizás se han dado), pero que no fueron capturados directamente por las series históricas utilizadas de entrada. Las series sintéticas además pueden ser potencializadas si es que se combinan con los resultados de modelos climáticos para, además, ampliar el conocimiento de las condiciones climatológicas futuras y generar proyecciones climáticas de alta resolución (ver [Wilks, 1992, 2009; SEMENOV and BARROW, 1997; Pruski and Nearing, 2002]). De igual forma, los usuarios y tomadores de decisiones pueden incorporar series que describan escenarios o situaciones que ellos quisieran simular (por ejemplo, alguna condición de sequía histórica o situación de cambio de demanda hipotética).

---

<sup>13</sup> <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/weap/>.

# CONCLUSIONES

Las reflexiones y ejemplos presentados en este documento ilustran la necesidad de América Latina y el Caribe de incorporar un enfoque de resiliencia para la toma de decisiones en sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento. Esta necesidad, según lo revisado, viene dada no solamente por los peligros naturales que típicamente amenazan a la región, sino por complejidades que son difíciles e inciertas para predecir a escala local. Estos incluyen amenazas por cambio climático, sequías y otros que puedan afectar la oferta de agua o movimientos migratorios, urbanización rápida y cambio de uso del suelo, entre otros que además puedan cambiar patrones de demanda. Estos también incluyen *shocks* globales imprevistos y que son inciertos de predecir y estimar, y con implicaciones nacionales o locales en sectores clave como el agua. Esto incluye, entre otros, conflictos civiles, crisis financieras, o pandemias (con impacto por ejemplo en cadenas de abastecimiento de productos clave o mayor presión para una empresa local para satisfacer requerimientos de agua y saneamiento).

La nueva perspectiva de resiliencia indicada aquí busca que los tomadores de decisiones regionales en agua y saneamiento en vez de predecir condiciones futuras generales para poder actuar a nivel local busquen primero entender los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento como sistemas únicos y con vulnerabilidades locales; para así entender las condiciones en que estos sistemas fallarían, independientemente de lo que cause el fallo. De esta forma se podrán diseñar soluciones flexibles y proactivas ante no un solo escenario, sino ante diversos escenarios que podrían afectar al sistema.

La generación de sistemas de agua potable y saneamiento resilientes, entre otras cosas, es una necesidad estratégica para que la región pueda alcanzar y mantener la seguridad hídrica independientemente de los futuros climáticos, demográficos u otros que puedan darse. Además, se estima que al incorporar un enfoque de resiliencia el beneficio neto promedio de invertir en infraestructura resiliente en países de bajos y medianos ingresos es de 4 USD por cada 1 USD invertido [Hallegatte et al., 2019]. De ese modo, la prevención y anticipación de condiciones cambiantes, tanto en la oferta como en la demanda, conlleva también a beneficios financieros y a inversiones más inteligentes.

Sin embargo, es importante mencionar que en la práctica es quizás muy difícil generar una intervención o estrategia con una resiliencia perfecta para un sistema (o del 100 %). Para esto, la resiliencia debe entrar en el contexto donde existan otras métricas que permitan evaluar un sistema o inversión. Estas pueden incluir robustez, desempeños de agua, confiabilidad del sistema, costos financieros, indicadores ambientales, equidad, conflictividad social de la intervención, entre otros. Por ejemplo, una estrategia puede ser altamente resiliente, confiable, y robusta, pero además ser financieramente costosa y puede causar importantes conflictos sociales. A diferencia de otra alternativa que puede no ser *tan* resiliente, pero puede ser financieramente más barata y sin causar conflictos sociales. Es decir, es imprescindible poner a la resiliencia dentro de un contexto donde se equilibre con otras métricas importantes, y poder preguntarse: ¿hasta qué punto estamos dispuestos a *pagar* por incrementar la resiliencia? De aquí, entonces, la clave es estar consciente del margen de resiliencia que no quedaría cubierto.

Para llegar a estas etapas es importante contar con un protocolo de decisiones y herramientas de modelación, como las descritas en este documento, que permitan describir un sistema de abastecimiento y saneamiento y que posibilite la evaluación multicriterio de intervenciones. Naturalmente, este proceso necesita de una participación de tomadores de decisiones, técnicos, organizaciones, actores y otros actores que participen dentro de los sistemas. Alrededor de este enfoque, una empresa puede generar resiliencia a nivel local, pero además puede contribuir a que las empresas sean agentes para cumplir metas nacionales y regionales de seguridad hídrica, saneamiento, desarrollo sustentable y de adaptación al cambio climático.

# ANEXOS

## Anexo 1. Downscaling climático.

De esta forma, la toma de decisiones de *arriba-hacia-abajo* parte de la selección de escenarios de trayectorias de concentraciones representativas (RCP, por sus siglas en inglés), o factores que determinan los cambios en el sistema meteorológico del planeta en términos de incremento en la temperatura global. Las trayectorias RCP describen, como su nombre lo indica, diferentes trayectorias para el fin del siglo de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI). Actualmente el IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, por sus siglas en inglés) ha determinado cuatro trayectorias: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, donde cada uno determina diferentes niveles de severidad. Estas trayectorias representan un escenario de cambio climático y por consiguiente se identifican con una característica única de concentración de GEI.

A partir de la elección de una trayectoria de concentración de GEI, tomando un horizonte de tiempo determinado, se utilizan modelos climáticos globales o regionales (GCM o RCM, por sus siglas en inglés) para extraer las variables meteorológicas de mayor relevancia para la hidrología: precipitación y temperatura [Liston et al., 1994; Groves et al., 2008; Buytaert et al., 2010b; Slingo and Palmer, 2011; Ludwig et al., 2014]. Estos modelos, por su parte, buscan describir la circulación atmosférica considerando componentes oceánicos, superficiales-terrestres, hielo marino, entre otros a escala global o regional. Existen en la actualidad alrededor 29 modelos globales, desarrollados por diferentes grupos de investigación, y a pesar de que todos comparten entendimientos fundamentales de los ciclos naturales globales, cada uno de ellos difiere en la forma en que discretizan procesos menos entendidos. En otras palabras, cada modelo tiene niveles de precisión y exactitud propios para representar los fenómenos físicos que simula [Maraun et al., 2010; Chen et al., 2011; Jones and Thornton, 2013; Simonovic, 2017]. Además, estos modelos al correr a escalas globales tienen resoluciones espaciales de cerca de -150 km (aunque existen algunos modelos regionales a -25 km).

Por lo tanto, en el proceso de *dowscaling*, las principales variables meteorológicas de estos modelos de relevancia para la hidrología, tales como la temperatura y la precipitación, son proyectadas a un mayor nivel de detalle geográfico. Es así como dichas variables pueden ser reducidas a, por ejemplo, -1 km, con el fin de entender mejor la naturaleza del impacto de cambio climático a nivel de cuenca. Para este propósito, actualmente se utilizan técnicas dinámicas o estadísticas cuyas complejidades, eficiencias y nivel de incertidumbre difiere para cada aplicación y características de la cuenca [Wood et al., 2004; Buytaert et al., 2010b; Maraun et al., 2010; Gutmann et al., 2014].

Ya a nivel de cuenca y con estos nuevos datos verificados, en conjunto con información de suelos y tipo de cobertura, se corren modelos hidrológicos para obtener respuestas locales de escorrentía y caudal. Así, finalmente, correr modelos de sistemas y de ese modo simular el manejo de infraestructura hídrica. De aquí, contando con series de tiempo *futuras*, los tomadores de decisiones pueden delinear medidas para incorporar los riesgos climáticos estimados en sus planes u operaciones [Hay et al., 2000; Gudmundsson et al., 2012; Ludwig et al., 2014; Clark et al., 2016].



## Anexo 2. Limitaciones del enfoque de arriba-hacia-abajo

En el proceso de *downscaling*, cada uno de los pasos, indicados anteriormente, introduce un nivel de incertidumbre que se va acumulando y propagando desde la selección de escenarios climáticos futuros hasta la toma de decisiones [García et al., 2014]. Una primera limitación viene dada cuando se selecciona un escenario futuro RCP; inmediatamente se descartan los otros tres que podrían suceder. Es decir, se desestima la posibilidad de que otros escenarios puedan ocurrir [Ghile et al., 2014; Ludwig et al., 2014; Herman et al., 2015]. Es decir, existe aquí ya una primera fuente de incertidumbre que es dada por la selección del escenario futuro de concentración de gases: ¿qué pasa si seleccionamos y planificamos para el escenario RCP4.5, pero posteriormente se da un escenario más parecido a RCP6.5? ¿O si sucede un escenario que más se parece a un promedio de estos?

De igual forma, los GCM cuentan con incertidumbres propias y que están relacionadas con las parametrizaciones utilizadas para representar procesos físicos como, por ejemplo, el rol de las nubes en el sistema climático o la simulación de procesos subterráneos de agua. A esto se le añaden las incertidumbres estructurales que los modelos hidrológicos y los modelos hidráulicos poseen. Por otra parte, tanto los modelos GCM como el proceso descrito aquí es computacionalmente costoso y extenso, por lo que limita la obtención de un rango suficientemente amplio de escenarios que permita capturar la incertidumbre en cualquiera de las etapas. El proceso de *downscaling* en la práctica muchas veces obliga a procesar y obtener un número limitado de escenarios futuros del estado de la cuenca o sistema hidráulico.

Es decir, al utilizar este enfoque tradicional para incorporar el cambio climático en recursos hídricos, los tomadores de decisiones frecuentemente enfrentan un limitado número de escenarios, o seleccionan un escenario futuro óptimo, que además es altamente incierto [Jensen and Wu, 2016; Maier et al., 2016]. Una representación de la cascada de propagación de incertidumbre es así presentada en la figura 6.

## La cascaca de la incertidumbre



## La evolución de incertidumbre



Figura 6. Cascada de propagación de incertidumbre

Fuente: [Wilby and Dessai, 2010]

## Anexo 3. Generadores de clima

Los principales generadores de clima abiertos son: Weather GENERator (WGEN) [Richardson, 1981], CLimate GENERator (CLIGEN) [Nicks and Gander, 1994; Nicks et al., 1995], Ecole de technologie superieure Weather Generator (WeaGETS) [Chen et al., 2014] el Long Ashton Research Station-Weather Generator (LARSWG) [SEMENOV and BARROW, 1997], y MarkSIM [Jones and Thornton, 2013]. Estos han sido ampliamente utilizados para generar series de tiempo en estudios de impacto. Sin embargo, sus características difieren para la simulación de temperatura y precipitación. Dentro de estos los comúnmente utilizados tanto por su facilidad de uso como acceso libre son WGEN, WeaGETS y MarkSIM.

WGEN es uno de los principales generadores que se han utilizado por ya casi tres décadas. Una ventaja principal de WGEN es que necesita pocos parámetros (precipitación y temperatura) para generar secuencias climáticas. Este modelo genera magnitudes mediante la utilización de valores aleatorios para invertir una función probabilística de densidad. Además, WGEN simula ocurrencia de series secas y húmedas usando una cadena de Markov de primer orden de dos estados (seco y húmedo). Si bien WGEN muestra cierta persistencia de eventos extremos largos, una desventaja de este método es que tiene poca memoria de eventos raramente muy largos (como una sequía muy pronunciada y perdurable), debido a que se utilizan datos diarios para correr las cadenas de Markov de primer orden [Semenov et al., 1998; Katz et al., 2003].

WeaGETS ha sido recientemente desarrollado para refinar las representaciones de precipitación de WGEN, la ventaja es que WeaGETS está basado y desarrollado en Matlab y, por lo tanto, su distribución es libre (aunque Matlab en sí requiere del pago de una licencia). Para complementar WGEN, este modelo introduce cadenas de Markov de primer, segundo y tercer orden para generar ocurrencias y cuatro distribuciones (exponencial, gamma, normal-alterada y exponencial mixta) para cuantificar precipitación.

Finalmente, MarkSIM es un proyecto que busca generar información sintética climática de una coordenada específica a nivel global. MarkSIM utiliza un algoritmo para realizar interpolaciones bicúbicas tomando en cuenta los 16 puntos más

cercanos con información disponible. De esta forma se puede obtener información de hasta -1 km de resolución espacial. Este generador de clima usa 720 tipos de clima a nivel mundial para calcular coeficientes de cadenas de Markov de tercer orden para generar precipitación. Así que para un sitio indicado se utilizan resultados de modelos GCM para generar información, y aunque si bien ha sido desarrollado para aplicaciones agrícolas, es una herramienta prometedora para generar series sintéticas de cambio climático a una alta resolución espacial.

# 7. REFERENCIAS

- Allan, R. P., C. Liu, M. Zahn, D. a. Lavers, E. Koukouvagias, and A. Bodas-Salcedo (2014), Physically Consistent Responses of the Global Atmospheric Hydrological Cycle in Models and Observations, *Surv. Geophys.*, 35(3), 533-552, doi:10.1007/s10712-012-9213-z.
- Allen, M. R., and W. J. Ingram (2002), Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle, *Nature*, 419(6903), 224-232.
- Arnell, N. W., and B. Lloyd-Hughes (2014), The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios, *Clim. Change*, 122(1-2), 127-140, doi:10.1007/s10584-013-0948-4.
- Breña-Naranjo, J. A., A. Pedrozo-Acuña, O. Pozos-Estrada, S. A. Jiménez-López, and M. R. López-López (2015), The contribution of tropical cyclones to rainfall in Mexico, *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, 83, 111-122.
- Brown, C., Y. Ghile, M. Laverty, and K. Li (2012), Decision scaling: Linking bottom up vulnerability analysis with climate projections in the water sector, *Water Resour. Res.*, 48(9).
- Brown, C., F. Boltz, S. Freeman, J. Tront, and D. Rodriguez (2020), Resilience by design: A deep uncertainty approach for water systems in a changing world, *Water Secur.*, 9, 100051, doi:https://doi.org/10.1016/j.wasec.2019.100051.
- Brown, C. M., J. R. Lund, X. Cai, P. M. Reed, E. A. Zagona, A. Ostfeld, J. Hall, G. W. Characklis, W. Yu, and L. Brekke (2015), The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management, *Water Resour. Res.*, 51, 6110-6124, doi:10.1002/2015WR017114.Received.
- Buytaert, W., M. Vuille, A. Dewulf, R. Urrutia, A. Karmalkar, and R. Céleri (2010a), Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(7), 1247-1258, doi:10.5194/hess-14-1247-2010.
- Buytaert, W., M. Vuille, a. Dewulf, R. Urrutia, a. Karmalkar, and R. C??lleri (2010b), Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(7), 1247-1258, doi:10.5194/hess-14-1247-2010.
- Chen, J., F. P. Brissette, and R. Leconte (2011), Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology, *J. Hydrol.*, 401(3-4), 190-202.



- Chen, J., X. J. Zhang, and F. P. Brissette (2014), Assessing scale effects for statistically downscaling precipitation with GPCP model, *Int. J. Climatol.*, 34(3), 708–727, doi:10.1002/joc.3717.
- Clark, M. P., R. L. Wilby, E. D. Gutmann, J. A. Vano, S. Gangopadhyay, A. W. Wood, H. J. Fowler, C. Prudhomme, J. R. Arnold, and L. D. Brekke (2016), Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts of Climate Change, *Curr. Clim. Chang. Reports*, 2(2), 55–64, doi:10.1007/s40641-016-0034-x.
- Cristina, M., T. D. D., and S. C. G. (2015), Hydrologic Sensitivity to Climate and Land Use Changes in the Santiam River Basin, Oregon, *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, 51(2), 400–420, doi:10.1111/jawr.12256.
- Dussaillant, I., E. Berthier, F. Brun, M. Masiokas, R. Hugonnet, V. Favier, A. Rabatel, P. Pitte, and L. Ruiz (2019), Two decades of glacier mass loss along the Andes, *Nat. Geosci.*, 12(10), 802–808.
- Elmira, H., E. Amin, W. Howard, G. Patricia, and N. Ali (2016), Integrating Supply Uncertainties from Stochastic Modeling into Integrated Water Resource Management: Case Study of the Saskatchewan River Basin, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 142(2), 5015006, doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000581.
- Ensor, J., J. Forrester, and N. Matin (2018), Bringing rights into resilience: revealing complexities of climate risks and social conflict, *Disasters*, 42, S287–S305.
- García, L. E., J. H. Matthews, D. J. Rodriguez, M. Wijnen, K. N. DiFrancesco, and P. Ray (2014), Beyond downscaling: a bottom-up approach to climate adaptation for water resources management,
- St. George Freeman, S. et al. (2020), Resilience by design in Mexico City: A participatory human-hydrologic systems approach, *Water Secur.*, 9, 100053, doi:https://doi.org/10.1016/j.wasec.2019.100053.
- Ghile, Y. B., M. Ü. Taner, C. Brown, J. G. Grijzen, and A. Talbi (2014), Bottom-up climate risk assessment of infrastructure investment in the Niger River Basin, *Clim. Change*, 122(1), 97–110, doi:10.1007/s10584-013-1008-9.
- Gil Jaramilo, J. C. (2019), *Consultoría de apoyo técnico para la revisión del plan de inversiones y proyectos a financiar para la mejora del sistema de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Riohacha, La Guajira.*
- Grafton, R. Q., L. Doyen, C. Béné, E. Borgomeo, K. Brooks, L. Chu, G. S. Cumming, J. Dixon, S. Dovers, and D. Garrick (2019), Realizing resilience for decision-making, *Nat. Sustain.*, 2(10), 907–913.
- Grijzen, J. (2014), Understanding the impact of climate change on hydropower: the case of Cameroon,

- Groves, D. G., D. Yates, and C. Tebaldi (2008), Developing and applying uncertain global climate change projections for regional water management planning, *Water Resour. Res.*, 44(12), doi:10.1029/2008wr006964.
- Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen, and T. Engen-Skaugen (2012), Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations-a comparison of methods, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(9), 3383.
- Gutmann, E., T. Pruitt, M. P. Clark, L. Brekke, J. R. Arnold, D. A. Raff, and R. M. Rasmussen (2014), An intercomparison of statistical downscaling methods used for water resource assessments in the United States, *Water Resour. Res.*, 50(9), 7167-7186.
- Hall, J., and E. Borgomeo (2013), Risk-based principles for defining and managing water security Subject Areas ;,
- Hall, J. W., E. Borgomeo, A. Bruce, M. Di Mauro, and M. Mortazavi-Naeini (2019), Resilience of Water Resource Systems: Lessons from England, *Water Secur.*, 8, 100052, doi:https://doi.org/10.1016/j.wasec.2019.100052.
- Hallegatte, S., J. Rentschler, and J. Rozenberg (2019), Resilient Infrastructure: A Lifeline for Sustainable Development.
- Hartmann, D. L., A. M. G. K. Tank, and M. Rusticucci (2013), IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, *IPCC, AR5*, 31-39.
- Hashimoto, T., J. R. Stedinger, and D. P. Loucks (1982), Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation, *Water Resour. Res.*, 18(1), 14-20.
- Hassanzadeh, E., A. Elshorbagy, H. Wheeler, and P. Gober (2016), A risk-based framework for water resource management under changing water availability, policy options, and irrigation expansion, *Adv. Water Resour.*, 94, 291-306, doi:https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.018.
- Hay, L. E., R. L. Wilby, and G. H. Leavesley (2000), A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States<sup>1</sup>, *Jawra J. Am. Water Resour. Assoc.*, 36(2), 387-397, doi:10.1111/j.1752-1688.2000.tb04276.x.
- Herman, J., P. Reed, H. Zeff, and G. Characklis (2015), How Should Robustness Be Defined for Water Systems Planning under Change?, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 141(10), 4015012, doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000509.
- Hirabayashi, Y., S. Kanae, S. Emori, T. Oki, and M. Kimoto (2008), Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate, *Hydrol. Sci. J.*, 53(4), 754-772, doi:10.1623/hysj.53.4.754.

- IDB, ECLAC, and PAHO (2019), *Assessment of the Effects and Impacts of HURRICANE DORIAN in THE BAHAMAS*.
- Imbach, P., L. Molina, B. Locatelli, O. Roupsard, G. Mahé, R. Neilson, L. Corrales, M. Scholze, and P. Ciais (2012), Modeling potential equilibrium states of vegetation and terrestrial water cycle of Mesoamerica under climate change scenarios, *J. Hydrometeorol.*, *13*(2), 665–680.
- Jensen, O., and X. Wu (2016), Embracing Uncertainty in Policy-Making: The Case of the Water Sector, *Policy Soc.*, *35*(2), 115–123, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.polsoc.2016.07.002.
- Jones, P. G., and P. K. Thornton (2013), Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications, *Agric. Syst.*, *114*(Supplement C), 1–5, doi:https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.08.002.
- Kalra, N., D. G. Groves, L. Bonzanigo, E. M. Perez, C. Ramos, C. Brandon, and I. Rodriguez Cabanillas (2015), Robust decision-making in the water sector: a strategy for implementing Lima's long-term water resources master plan,
- Katz, R. W., M. B. Parlange, and C. Tebaldi (2003), Stochastic Modeling of the Effects of Large-Scale Circulation on Daily Weather in the Southeastern U.S., *Clim. Change*, *60*(1), 189–216, doi:10.1023/A:1026054330406.
- Kwadijk, J. C. J. et al. (2010), Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: A case study in the Netherlands, *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.*, *1*(5), 729–740, doi:10.1002/wcc.64.
- Levy, M. C., A. V Lopes, A. Cohn, L. G. Larsen, and S. E. Thompson (2018), Land use change increases streamflow across the arc of deforestation in Brazil, *Geophys. Res. Lett.*, *45*(8), 3520–3530.
- Liston, G. E., Y. C. Sud, and E. F. Wood (1994), Evaluating GCM land surface hydrology parameterizations by computing river discharges using a runoff routing model: Application to the Mississippi basin, *J. Appl. Meteorol.*, *33*(3), 394–405.
- Lowe, D. C., and N. Zealand (2007), Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, *Change*, *30*(22), 129–234, doi:10.1103/PhysRevB.77.220407.
- Ludwig, F., E. van Slobbe, and W. Cofino (2014), Climate change adaptation and Integrated Water Resource Management in the water sector, *J. Hydrol.*, *518*(PB), 235–242, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.08.010.
- Maier, H. R., J. H. A. Guillaume, H. van Delden, G. A. Riddell, M. Haasnoot, and J. H. Kwakkel (2016), An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation: How do they fit together?, *Environ. Model. Softw.*, *81*, 154–164, doi:https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.03.014.

- Maraun, D., A. Ireson, F. Wetterhall, S. Bachner, E. Kendon, H. W. Rust, V. K. C. Venema, M. Widmann, R. E. Chandler, and C. J. Onof (2010), Statistical downscaling and modelling of precipitation. Bridging the gap between dynamical models and the end users, *Rev Geophys*, 48, RG3003.
- Masson-Delmotte, V. et al. (2018), *IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global*, Geneva, Switzerland.
- Mavromatis, T., and J. W. Hansen (2001), Interannual variability characteristics and simulated crop response of four stochastic weather generators, *Agric. For. Meteorol.*, 109(4), 283–296.
- Michalak, A. M. (2016), Study role of climate change in extreme threats to water quality, *Nature*, 535(7612), 349–350.
- Montanari, A., and D. Koutsoyiannis (2014), Modeling and mitigating natural hazards: Stationarity is immortal!, *Water Resour. Res.*, 50(12), 9748–9756.
- Moody, P., and C. Brown (2012), Modeling stakeholder defined climate risk on the Upper Great Lakes, *Water Resour. Res.*, 48(10), doi:10.1029/2012WR012497.
- Moreda, F. (2014), Modeling the Impact of Climate Change on Flows of the Rio Piura Using Hydro-BID, *IDB Proj. RG-T2343. RTI Int.*, 3040, 22194–27709.
- Moreda, F., P. Coli Valdes Dausa, B. Lord, and J. Corrales (2016a), *Hydro-BID Case Study No. 4: Application of Hydro-BID in Bermejo River Basin to Quantify Sediment Loads, Argentina*, Inter-American Development Bank.
- Moreda, F., F. Miralles-Wilhelm, and R. M. Castillo (2016b), Technical Note 2 . Hydro-BID: An Integrated System for Modeling Impacts of Climate Change on Water Resources, *RTI Int.*
- Nalesso, M. (2014), Hydro-BID, *Banco Interam. Desarro.*
- Neri, C., and V. Magaña (2016), Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico, *Weather. Clim. Soc.*, 8(2), 95–110.
- Nosetto, M. D., E. G. Jobbágy, A. B. Brizuela, and R. B. Jackson (2012), The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 154, 2–11.
- Poff, N. L. et al. (2015), Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling, *Nat. Clim. Chang.*, 6(September), 1–23, doi:10.1038/nclimate2765.

- Prudhomme, C., R. L. Wilby, S. Crooks, A. L. Kay, and N. S. Reynard (2010), Scenario-neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk, *J. Hydrol.*, 390(3-4), 198-209.
- Prudhomme, C., S. Parry, J. Hannaford, D. B. Clark, S. Hagemann, and F. Voss (2011), How well do large-scale models reproduce regional hydrological extremes in Europe?, *J. Hydrometeorol.*, 12(6), 1181-1204.
- Pruski, F. F., and M. A. Nearing (2002), Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations, *Water Resour. Res.*, 38(12), 11-34, doi:10.1029/2001WR000493.
- Qian, T., A. Dai, K. E. Trenberth, and K. W. Oleson (2006), Simulation of Global Land Surface Conditions from 1948 to 2004. Part I: Forcing Data and Evaluations, *J. Hydrometeorol.*, 7(5), 953-975, doi:10.1175/JHM540.1.
- Rauscher, S. A., F. Giorgi, N. S. Diffenbaugh, and A. Seth (2008), Extension and intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century, *Clim. Dyn.*, 31(5), 551-571.
- Richardson, C. W. (1981), Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation, *Water Resour. Res.*, 17(1), 182-190, doi:10.1029/WR017i001p00182.
- Rodríguez-Iturbe, I., and J. B. Valdés (2011), Uncertainty and Climate Variability in the Design and Operation of Water Resources Projects: Examples and Case Studies,
- Rossi, N., L. DeCristofaro, S. Steinschneider, C. Brown, and R. Palmer (2016), Potential Impacts of Changes in Climate on Turbidity in New York City's Ashokan Reservoir, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 142(3), 4015066, doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000614.
- Sadoff, C. W., E. Borgomeo, and S. Uhlenbrook (2020), Rethinking water for SDG 6, *Nat. Sustain.*, doi:10.1038/s41893-020-0530-9.
- Salas, J. D., and J. Obeysekera (2013), Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events, *J. Hydrol. Eng.*, 19(3), 554-568.
- Sanabria, L. (2016), *Proyectos de Rehabilitación y Reconstrucción en las Áreas Afectadas por el Terremoto del 16 de Abril 2016*.
- Seager, R., M. Cane, N. Henderson, D.-E. Lee, R. Abernathey, and H. Zhang (2019), Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases, *Nat. Clim. Chang.*, 9(7), 517-522.
- Semenov, M. A., and J. R. Porter (1995), Climatic variability and the modelling of crop yields, *Agric. For. Meteorol.*, 73(3), 265-283.



- Semenov, M. A., R. J. Brooks, and E. M. Barrow (1998), Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates, *Clim. Res.*, 10(2), 95-107.
- SEMENOV, M. A., and E. M. BARROW (1997), USE OF A STOCHASTIC WEATHER GENERATOR IN THE DEVELOPMENT OF CLIMATE CHANGE SCENARIOS, *Clim. Change*, 35(4), 397-414, doi:10.1023/A:1005342632279.
- Simonovic, S. P. (2017), Bringing Future Climatic Change into Water Resources Management Practice Today, *Water Resour. Manag.*, 31(10), 2933-2950, doi:10.1007/s11269-017-1704-8.
- Sinha, E., A. M. Michalak, and V. Balaji (2017), Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes, *Science (80-. )*, 357(6349), 405 LP - 408, doi:10.1126/science.aan2409.
- Slingo, J., and T. Palmer (2011), Uncertainty in weather and climate prediction, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 369(October), 4751-4767, doi:10.1098/rsta.2011.0161.
- Solomon, S. (2007), *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*, Cambridge university press.
- Stakhiv, E. Z. (2011), Pragmatic approaches for water management under climate change uncertainty, *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, 47(6), 1183-1196.
- Thacker, S., D. Adshead, M. Fay, S. Hallegatte, M. Harvey, H. Meller, N. O'Regan, J. Rozenberg, G. Watkins, and J. W. Hall (2019), Infrastructure for sustainable development, *Nat. Sustain.*, 2(4), 324.
- Trenberth, K. E. (2011), Changes in precipitation with climate change, *Clim. Res.*, 47(1-2), 123-138, doi:10.3354/cr00953.
- van Vuuren, D. P. et al. (2011), The representative concentration pathways: an overview, *Clim. Change*, 109(1), 5, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- Wheater, H. S., R. E. Chandler, C. J. Onof, V. S. Isham, E. Bellone, C. Yang, D. Lekkas, G. Lourmas, and M.-L. Segond (2005), Spatial-temporal rainfall modelling for flood risk estimation, *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 19(6), 403-416.
- Whitehead, P. G., R. L. Wilby, R. W. Battarbee, M. Kernan, and A. J. Wade (2009), A review of the potential impacts of climate change on surface water quality, *Hydrol. Sci. J.*, 54(1), 101-123.
- Wilks, D. S. (1992), Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies, *Clim. Change*, 22(1), 67-84, doi:10.1007/BF00143344.



Wilks, D. S. (2009), A gridded multisite weather generator and synchronization to observed weather data, *Water Resour. Res.*, 45(10), n/a-n/a, doi:10.1029/2009WR007902.

Wood, A. W., L. R. Leung, V. Sridhar, and D. P. Lettenmaier (2004), Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, *Clim. Change*, 62(1-3), 189-216.

