

# El agua



# Capítulo 4. El agua

## Autores y colaboradores

### Autor principal de coordinación federal

**Ariane O. Pinson**, US Army Corps of Engineers

### Autor principal del capítulo

**Elizabeth A. Payton**, University of Colorado Boulder, Western Water Assessment

### Autores del capítulo

**Tirusew Asefa**, Tampa Bay Water

**Laura E. Condon**, University of Arizona

**Lesley-Ann L. Dupigny-Giroux**, University of Vermont

**Benjamin L. Harding**, Lynker

**Julie Kiang**, US Geological Survey

**Deborah H. Lee**, NOAA Great Lakes Environmental Research Laboratory

**Stephanie A. McAfee**, University of Nevada, Reno

**Justin M. Pflug**, University of Maryland, College Park, Earth System Science Interdisciplinary Center

**Imtiaz Rangwala**, University of Colorado Boulder, North Central Climate Adaptation Science Center

**Heather J. Tanana**, University of Utah, S.J. Quinney College of Law

**Daniel B. Wright**, University of Wisconsin-Madison

### Colaboradores técnicos

**Frances V. Davenport**, Colorado State University

**Andrea L. Taylor**, Indian Health Service

### Editor revisor

**Beth M. Haley**, Boston University, School of Public Health

### Arte de apertura de capítulo

**Jon Bradham**

### Cita recomendada

Payton, E.A., A.O. Pinson, T. Asefa, L.E. Condon, L.-A.L. Dupigny-Giroux, B.L. Harding, J. Kiang, D.H. Lee, S.A. McAfee, J.M. Pflug, I. Rangwala, H.J. Tanana, and D.B. Wright, 2023: Cap. 4. El agua. En: *La Quinta Evaluación Nacional del Clima*. Crimmins, A.R., C.W. Avery, D.R. Easterling, K.E. Kunkel, B.C. Stewart, and T.K. Maycock, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH4.ES>

# Índice de Contenidos

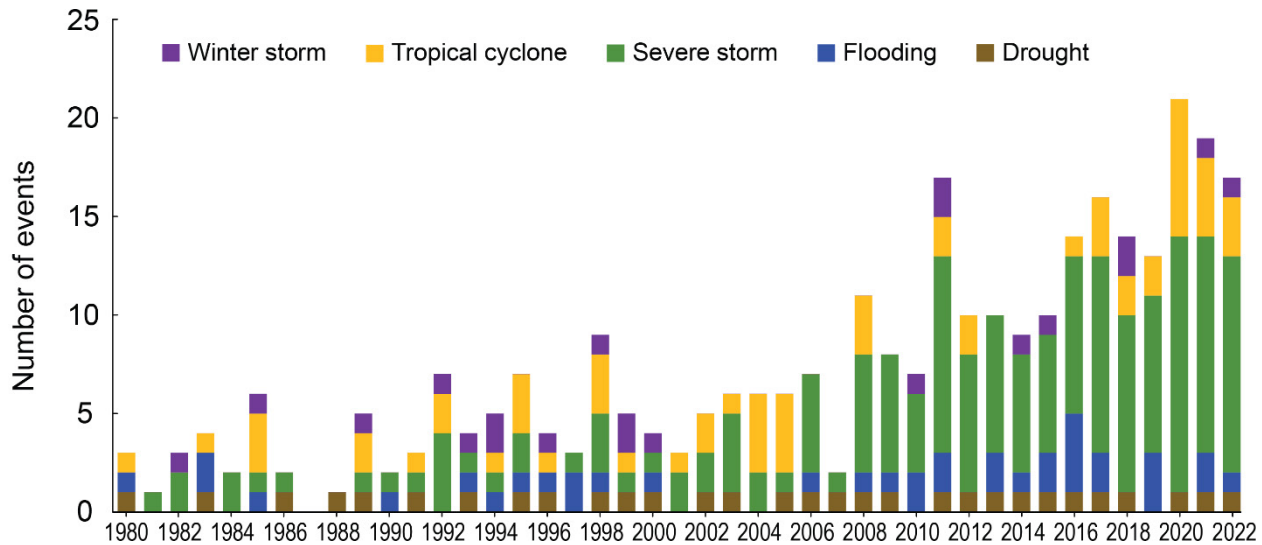
<b>Introducción .....</b>	<b>4</b>
<b>Mensaje clave 4.1</b>	
<b>El cambio climático seguirá provocando profundos cambios en el ciclo del agua.....</b>	<b>6</b>
Cambios en las precipitaciones .....	7
Cambios en la evapotranspiración.....	7
Cambios en la nieve y los glaciares .....	8
Cambios en la humedad del suelo .....	9
Cambios en las aguas subterráneas.....	10
Cambios en la escorrentía .....	11
Eventos extremos: inundaciones y sequías.....	12
Recuadro 4.1. Sequía de Nieve entre Washington y California 2015.....	15
<b>Mensaje clave 4.2</b>	
<b>Los cambios en el ciclo del agua afectarán todas las comunidades, con impactos desproporcionados para algunas .....</b>	<b>17</b>
Impacto de las inundaciones .....	17
Impactos de la sequía .....	19
Impactos desproporcionados.....	20
Recuadro 4.2. Cambio climático, inundaciones urbanas y desigualdad .....	21
<b>Mensaje clave 4.3</b>	
<b>Los avances hacia la adaptación han sido desiguales .....</b>	<b>24</b>
Enfoques de gestión y planificación .....	24
Limitaciones de adaptación .....	24
Conflicto, competencia y colaboración.....	24
Recuadro 4.3. Cooperación internacional en los Grandes Lagos .....	26
El efecto de la variabilidad natural en la política .....	27
Retos de adaptación a los que se enfrentan las comunidades tribales e indígenas.....	29
Progresos y brechas en la calidad y facilidad de uso de la información.....	29
<b>Cuentas trazables .....</b>	<b>30</b>
Descripción del proceso .....	30
Mensaje clave 4.1 .....	30
Mensaje clave 4.2.....	33
Mensaje clave 4.3 .....	35
<b>Referencias .....</b>	<b>37</b>

## Introducción

El cambio climático intensifica las lluvias y las inundaciones, esto agrava las sequías y modifica los patrones meteorológicos en todo el planeta<sup>1</sup>, lo que provoca profundos efectos en el suministro y la calidad del agua dulce terrestre. El aumento del nivel del mar, la reducción de los mantos de nieve, la disminución de los ríos y el descenso de las aguas subterráneas amenazan a las ciudades y las comunidades rurales y ponen en peligro los ecosistemas forestales, fluviales y de otro tipo en todo Estados Unidos.

El cambio climático, combinado con una mayor exposición y vulnerabilidad, aumenta la frecuencia de los desastres relacionados con el agua en EE. UU. (Figura 4.1).

### Desastres de mil millones de dólares relacionados con el agua en Estados Unidos

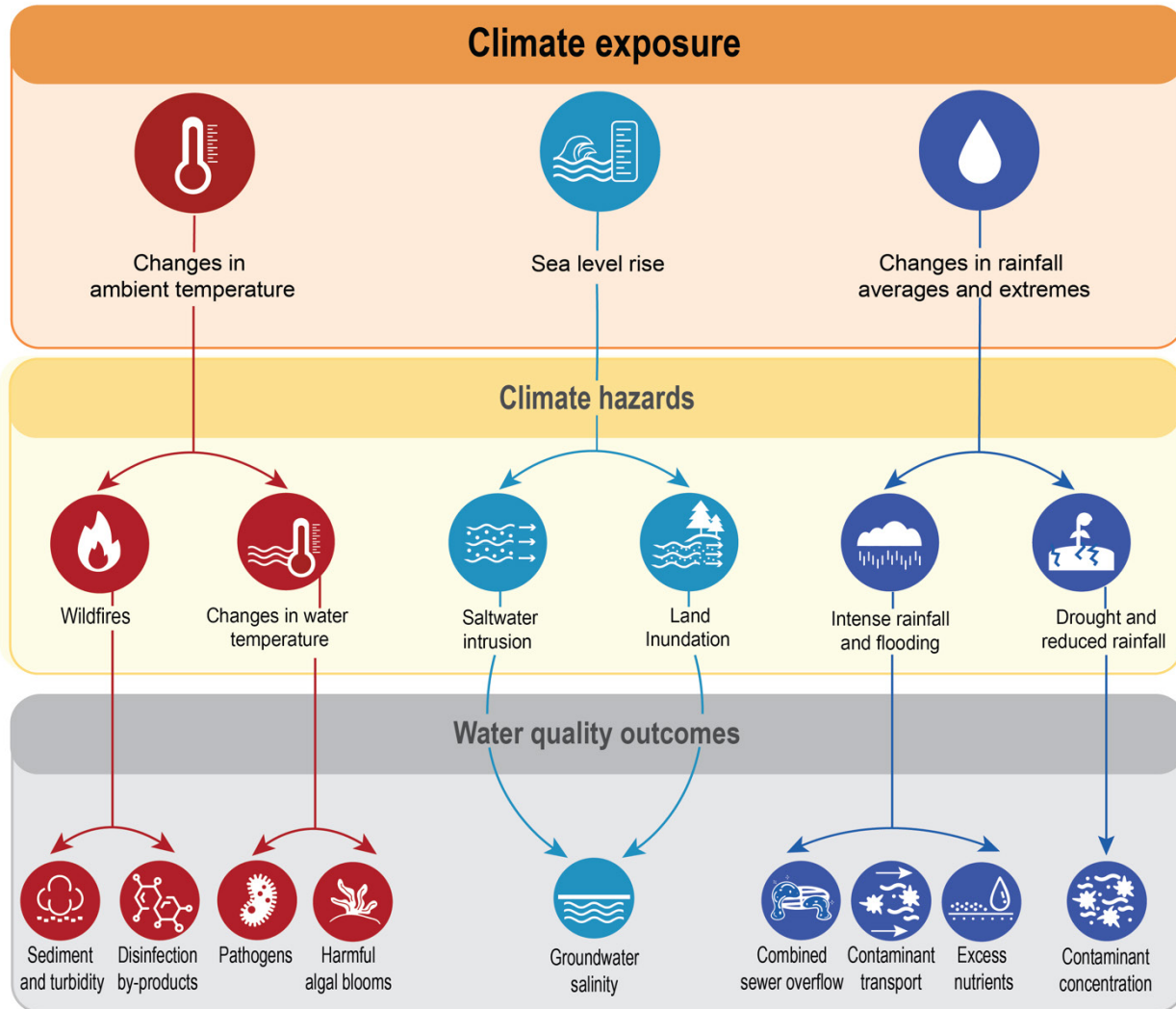


Los desastres de mil millones de dólares relacionados con el agua están en aumento en Estados Unidos.

**Figura 4.1.** En todo EE. UU., el número de desastres relacionados con el agua cuyos daños superaron los \$1,000 millones (ajustado por inflación) entre 1980 y 2022 aumentó por el incremento de la exposición, o activos en riesgo; la vulnerabilidad, o cuánto daño causa un peligro de determinada intensidad; y el aumento de la frecuencia de las condiciones extremas por el cambio climático. Adaptado del informe de los Centros Nacionales de Información Medioambiental 2023 (National Centers for Environmental Information, NCEI 2023)<sup>2</sup>.

Mientras que estos eventos están relacionados principalmente con la *cantidad* de agua, los impactos relativos a la *calidad* del agua también están aumentando, como se predijo en La Cuarta Evaluación Nacional del Clima (Fourth National Climate Assessment, NCA4), publicada en 2018<sup>3</sup>. Se prevé que el aumento de la temperatura, el aumento del nivel del mar y los cambios en las precipitaciones sigan degradando la calidad del agua para las personas y los ecosistemas (Figura 4.2; KM 4.2, 15.1, 15.2)<sup>4,5,6</sup>.

## Efectos del cambio climático en la calidad del agua



### El cambio climático amenaza la calidad de las reservas de agua dulce.

**Figura 4.2.** Cambios en la temperatura ambiente, el nivel del mar y las precipitaciones (**arriba**) pueden crear peligros relacionados con el clima, como cambios en la temperatura del agua e intrusión de agua salada (**centro**) que puede tener un impacto negativo en la calidad del agua (**abajo**). La intrusión de agua salada es una amenaza inminente para las comunidades costeras e insulares que dependen de las aguas subterráneas para obtener agua potable (KM 30.1, 9.2); las áreas agrícolas se enfrentan a riesgos para el suministro de agua cuando fertilizantes y pesticidas son movilizados por las inundaciones<sup>7</sup>; el aumento de las temperaturas expone a muchas áreas a la proliferación de algas nocivas (p. ej., KM 22.2) y al aumento de bacterias coliformes fecales<sup>6</sup>; y las plantas de tratamiento se ven afectadas por sedimentos y residuos de los incendios forestales en sus aguas de origen (KM 6.1)<sup>8,9</sup>. Adaptado de Nijhawan and Howard 2022<sup>6</sup> [CC BY 4.0].

El cambio climático está obligando a reexaminar nuestros conceptos de eventos raros. Los incidentes de precipitaciones extremas son más intensos y frecuentes (KM 2.2); las sequías prolongadas en el Oeste parecen deberse en parte a la aridificación a largo plazo, además de a la desecación episódica (KM 4.2); y los peligros compuestos aumentan a medida que los eventos que se combinan para crearlos se hacen más frecuentes (enfoque en eventos compuestos).

EE. UU. se está adaptando lentamente a estos cambios. Los servicios públicos exploran formas de integrar el cambio en la planificación, y las comunidades buscan de forma cooperativa soluciones a la escasez de

agua y a las inundaciones (KM 4.3). Pero los obstáculos surgen de instituciones legales y reguladoras que han existido durante décadas, o incluso siglos, al bloquear prácticas que dificultan la adaptación (KM 4.3). Las envejecidas infraestructuras hídricas del país, diseñadas conforme a normativas y estándares adecuados a un clima invariable, se están deteriorando y amenazan la salud pública, una situación que apenas ha cambiado desde que se resaltó en la NCA4 (KM 4.2)<sup>3</sup>.

Quizás el avance más notable de los años recientes es el creciente reconocimiento de las injusticias medioambientales exacerbadas por el cambio climático (KM 1.2). Las poblaciones más vulnerables, como las comunidades negras, hispanas, indígenas, tribales y otras, sufren un impacto desproporcionado de los riesgos climáticos relativos a la calidad y cantidad del agua, que amenazan la seguridad hídrica de estas comunidades (KM 4.2, 15.1, 15.2, 16.1).

La Nación está logrando algunos avances. Las herramientas y los datos necesarios para apoyar la planificación y la gestión de los recursos hídricos se han vuelto más sofisticados y accesibles, aunque siguen existiendo brechas, en particular en lo que se refiere a las proyecciones hidrológicas para el Caribe estadounidense, Hawaii y las Islas del Pacífico asociadas a EE. UU., donde la preocupación por la seguridad hídrica es alta (KM 4.1; Recuadro 23.2). Las brechas en las proyecciones locales de frecuencias, magnitudes y duraciones de los eventos extremos también dificultan la adaptación. Se ha producido un enorme crecimiento en la disponibilidad de información climática con base científica para los proveedores de agua y los gerentes de recursos naturales, lo que demuestra una mayor conciencia y demanda de soluciones. Estos y otros esfuerzos similares son los primeros pasos hacia la construcción de sistemas humanos y naturales resilientes frente a los cambios del ciclo del agua inducidos por el clima.

### Mensaje clave 4.1

## El cambio climático seguirá provocando profundos cambios en el ciclo del agua

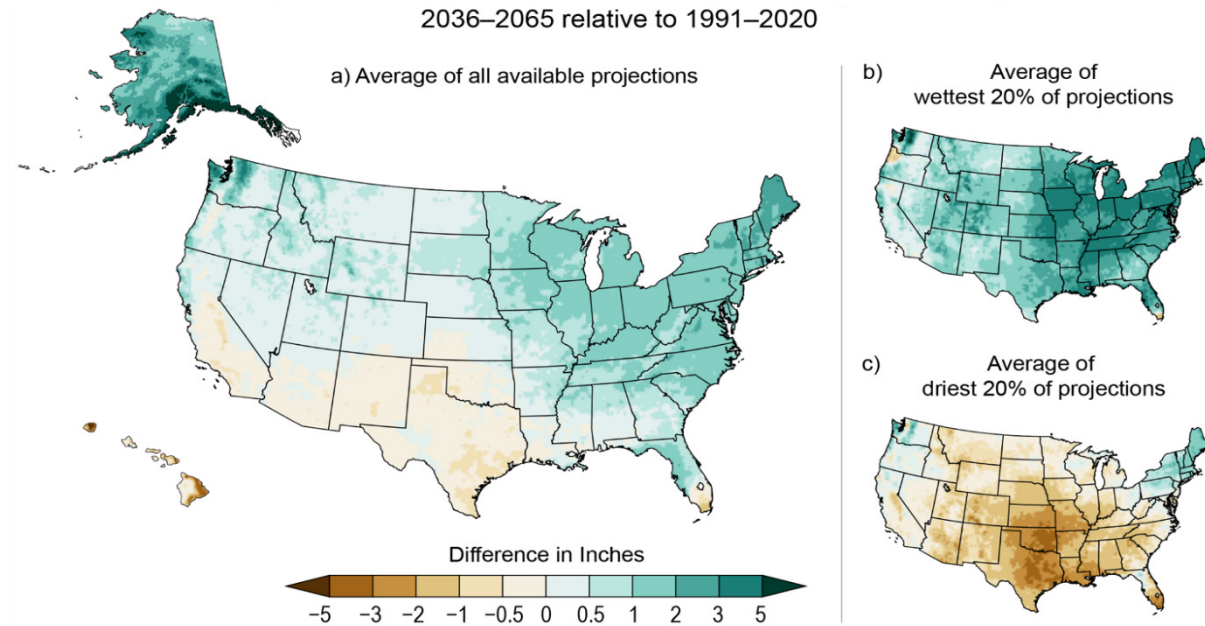
Los cambios en el ciclo del agua plantean riesgos para las personas y la naturaleza. Alaska y las regiones del norte y el este de EE. UU. registran y prevén más precipitaciones promedio, mientras que el Caribe, Hawaii y las regiones del suroeste de EE. UU. registran y prevén menos precipitaciones (*confianza media*). Se espera que aumenten las precipitaciones más intensas en todo el país (*muy probable, confianza muy alta*), y el calentamiento aumentará la evaporación y el consumo de agua de las plantas cuando la humedad no sea un factor limitante (*confianza media*). Las reservas de aguas subterráneas también se ven amenazadas por el calentamiento de las temperaturas, que previsiblemente aumentará la demanda (*muy probable, confianza alta*). La capa de nieve disminuirá y se derretirá antes (*muy probable, confianza alta*). El aumento de la aridez, el descenso del nivel de las aguas subterráneas, la disminución de la capa de nieve y la sequía amenazan el suministro de agua dulce (*confianza media*).

La disponibilidad de agua dulce se ve afectada por la cantidad de agua almacenada, la sincronización en el movimiento del agua, cuánta agua se utiliza y su calidad<sup>10</sup>, todo lo cual se rige por los componentes hidrológicos interrelacionados del ciclo del agua. En todo el país se están produciendo cambios en estos componentes como consecuencia de las actividades humanas y del cambio climático provocado por el hombre. Estos cambios se superponen a la variabilidad natural, lo que ocasiona cambios tanto en la disponibilidad de agua como en los peligros relativos a esta (KM 2.1, 2.2).

## Cambios en las precipitaciones

El cambio climático ya ha modificado los patrones pluviométricos en todo el país, lo que incluye mayor variabilidad y probabilidad elevada de que se produzcan eventos de precipitaciones extremas (KM 2.2, 3.5). Estas tendencias presentan importantes variaciones regionales y estacionales (KM 2.2)<sup>11</sup>. Los cambios proyectados en las precipitaciones anuales también muestran grandes diferencias regionales (Figura 4.3). Las tendencias y proyecciones de las precipitaciones se analizan más a fondo en los Capítulos 2 y 3.

### Cambios proyectados en las precipitaciones anuales a mediados de siglo



#### Las proyecciones de precipitaciones anuales muestran grandes diferencias regionales.

**Figura 4.3.** En un escenario intermedio (RCP4.5), se proyecta que las precipitaciones anuales aumenten en gran parte de EE. UU. (a), excepto en el Suroeste, Hawaii y el Caribe estadounidense (no se muestra; consulte la Figura 23.2, la cual indica una reducción de las precipitaciones de aproximadamente el 10 % a mediados de siglo y un aumento de los días secos durante la estación húmeda en Puerto Rico). El 20 % más húmedo y el 20 % más seco de las proyecciones (b, c) ilustran el rango de incertidumbre en las proyecciones de precipitación anual. Esta figura muestra los cambios proyectados en pulgadas. En el Suroeste, un cambio de media pulgada en las precipitaciones anuales influye más en la hidrología de la región que un cambio de media pulgada en el Noreste (consulte la Figura 2.10 para ver los cambios porcentuales según diferentes niveles de calentamiento). No se dispone de proyecciones para las Islas del Pacífico asociadas a EE. UU. Créditos de la figura: University of Colorado Boulder, Centros Nacionales de Información Medioambiental (National Centers for Environmental Information, NCEI) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) e Instituto Cooperativo de Estudios del Sistema Terrestre por Satélite (Cooperative Institute for Satellite Earth System Studies, CISS) de Carolina del Norte (North Carolina, NC).

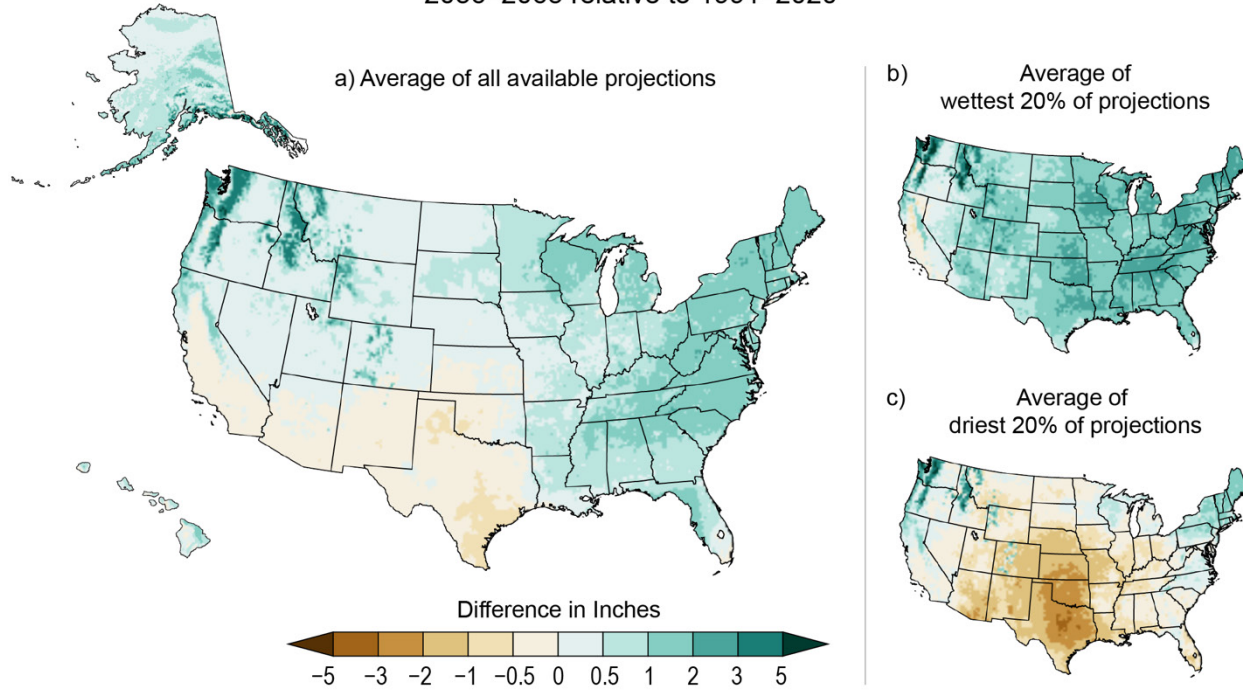
## Cambios en la evapotranspiración

La evapotranspiración es el agua que se evapora del suelo, la nieve y las aguas superficiales o que transpiran las plantas. Es un componente clave del presupuesto hídrico e impulsa la demanda de agua de riego. Los aumentos de temperatura y los cambios en otras variables climáticas alteran la demanda de evaporación (o evapotranspiración potencial). En las décadas recientes, la demanda por evaporación ha aumentado en gran parte del Oeste, con pocas tendencias aparentes en el Este<sup>12</sup>. La evapotranspiración real es la demanda evaporativa limitada por la disponibilidad de agua. En EE. UU. continental, la evapotranspiración real ha tendido a disminuir en el Suroeste, a medida que se reducía la disponibilidad de agua, mientras que en el

este y el norte se registraba un aumento. El mayor aumento de la evapotranspiración real se ha producido en el sur, desde el este de Texas hasta el norte de Florida<sup>14,13</sup>. Se proyecta que estas tendencias continúen en gran medida con el cambio climático (Figura 4.4).

### Cambios proyectados en la evapotranspiración real anual a mediados de siglo

2036–2065 relative to 1991–2020



**Se proyecta que la evapotranspiración real aumente en la mayor parte del país, pero disminuya en las Grandes Llanuras del Sur y en el Suroeste.**

**Figura 4.4.** La evapotranspiración real es el agua que se evapora del suelo y de las aguas superficiales o que transpiran las plantas. Unas tasas de evapotranspiración más elevadas pueden reducir la disponibilidad total de agua aunque no cambien las precipitaciones; a la inversa, una baja disponibilidad de agua puede limitar la evapotranspiración real. En un escenario intermedio (RCP4.5), se espera que la evapotranspiración real disminuya en las regiones con precipitaciones decrecientes o invariables (a), como el Suroeste de EE. UU., las Grandes Llanuras del Sur y el Caribe (no se muestra; Recuadro 23.2). Las regiones más húmedas, como el Noroeste, Alaska y la mitad este de EE. UU., registrarán una mayor evapotranspiración real. Las proyecciones más húmedas y más secas (b, c) ilustran el rango de incertidumbre. No se dispone de proyecciones para las Islas del Pacífico asociadas a EE. UU. Créditos de la figura: University of Colorado Boulder, NCEI de la NOAA y CISSS de NC.

### Cambios en la nieve y los glaciares

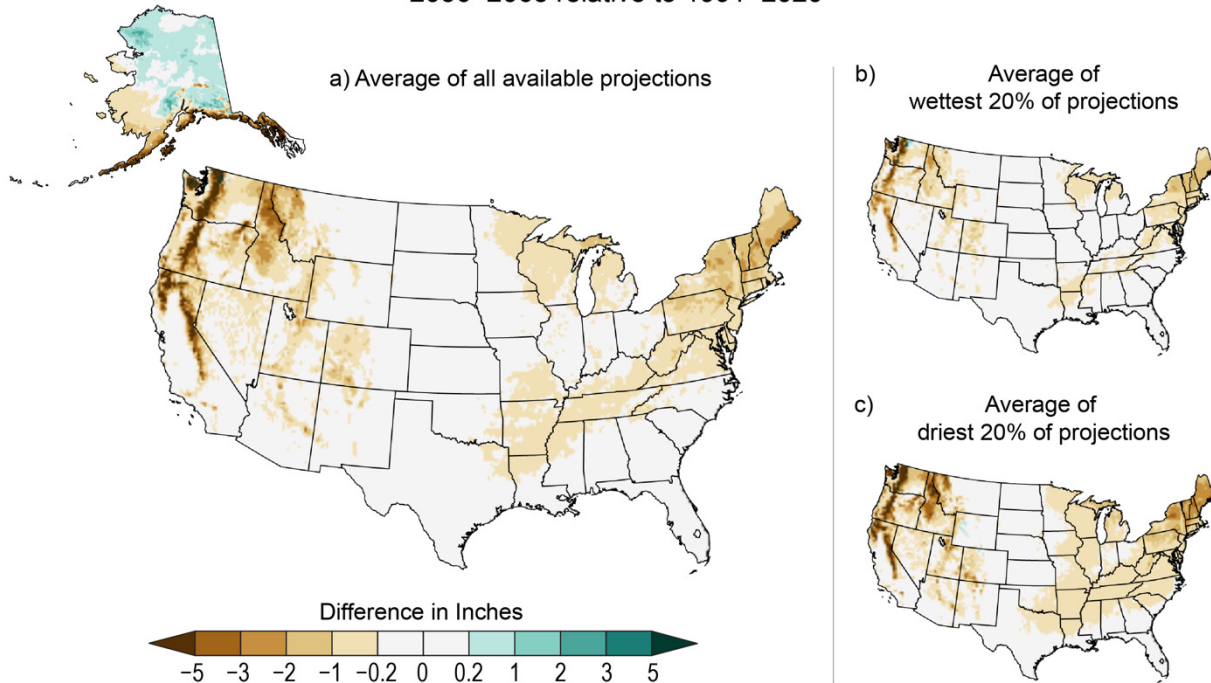
La nieve es un embalse natural, que almacena las precipitaciones de las estaciones frías y libera el agua posteriormente a través del deshielo. Con temperaturas más altas, aumentará la cantidad de precipitación que cae en forma de lluvia en vez de nieve<sup>14,15</sup>. El calentamiento también provocará un deshielo más temprano<sup>14,16</sup>, tasas alteradas de deshielo y evaporación directa de la nieve<sup>17,18,19,20</sup> y períodos más largos sin nieve<sup>21,22</sup>.

La mayoría de los registros históricos de observación de la nieve ya muestran tendencias hacia un pico anticipado del manto de nieve, volúmenes más pequeños y una disminución de la duración de la temporada de nieve (Figura A4.7)<sup>11</sup>, especialmente en las regiones marítimas más cálidas y de menor elevación<sup>23,24,25</sup>. En las áreas del oeste, donde la nieve es la fuente dominante de escorrentía<sup>26</sup>, se proyecta que el volumen total de agua de nieve estacional disminuya en más del 24 % para 2050 en escenarios intermedios (RCP4.5; Figura 4.5) y superiores, con la aparición de condiciones persistentes de escasez de nieve en los próximos 60



años<sup>24</sup>. Se prevé que estas reducciones de nieve, combinadas con los aumentos previstos de la demanda de agua, pongan a prueba el suministro de agua, sobre todo en el oeste (KM 28.1), donde el deshielo suministra una cantidad desproporcionada de agua para el abastecimiento municipal y la agricultura<sup>27,28,29</sup>. La reducción de la capa de nieve también está acelerando el retroceso de los glaciares<sup>30,31,32</sup> que son fundamentales para el caudal de verano en Alaska<sup>33</sup> y el Noroeste del Pacífico (Capítulo 27)<sup>34</sup>.

### Cambios proyectados en el equivalente máximo anual de agua de nieve a mediados de siglo 2036–2065 relative to 1991–2020



**Se proyecta una disminución continuada del contenido de agua del manto de nieve en gran parte de EE. UU.**

**Figura 4.5.** El equivalente de agua de nieve (snow water equivalent, SWE), la cantidad de agua almacenada en el manto de nieve, es clave para el abastecimiento regional de agua. En un escenario intermedio (RCP4.5), se proyecta que el máximo de SWE disminuya en gran parte del país, excepto en algunos lugares interiores de elevación alta en Estados Unidos continental y partes de Alaska (a). Los mayores descensos del manto de nieve se prevén en los climas de nieve más cálidos, como el sur costero de Alaska y las cordilleras de California y el Noroeste. Las proyecciones más húmedas (b) y las más secas (c) muestran disminuciones en el SWE, lo que refleja la influencia del calentamiento en el futuro manto de nieve. La nieve en los picos más altos de las montañas hawaianas tiene un importante significado cultural y ecológico, pero no se dispone de proyecciones a esta resolución. Créditos de la figura: University of Colorado Boulder, NCEI de la NOAA y CISSS de NC.

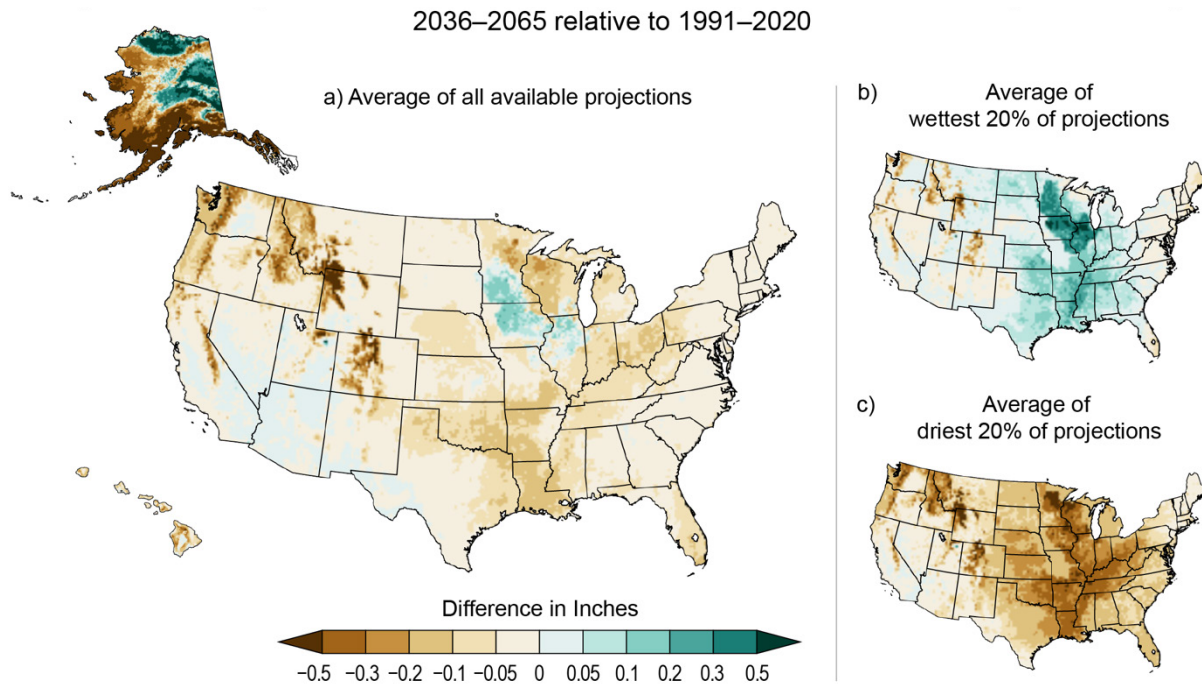
### Cambios en la humedad del suelo

La humedad del suelo es el agua almacenada en el suelo, normalmente cerca de la superficie. Es un componente clave del ciclo del agua, que sustenta la agricultura y la productividad de los ecosistemas, modifica el caudal de los arroyos al absorber las precipitaciones y el deshielo y modula el clima<sup>35,36</sup>. La escasez de observaciones de la humedad del suelo<sup>37</sup> ha generado incertidumbre sobre las cantidades totales, la estacionalidad y la dirección de los cambios; sin embargo, existe consenso en que los suelos se están volviendo más secos en el Suroeste<sup>38,39,40,41</sup>.

Las proyecciones sugieren que la humedad del suelo en verano disminuirá en la mayor parte del país (Figura 4.6), con partes del Medio Oeste superior y Alaska<sup>42</sup> como excepciones. El Noroeste, partes del centro y este

de EE. UU. y Alaska pueden esperar cambios estacionales en la humedad total del suelo, con suelos más húmedos en invierno<sup>42,43</sup>. La humedad del suelo en verano en el Suroeste podría aumentar si las precipitaciones de verano son mayores, pero existe una mayor confianza en la disminución de la humedad anual del suelo en la región (Figura 2.4)<sup>38,43</sup>.

### Cambios proyectados en la humedad promedio del suelo en verano (junio-agosto) a mediados de siglo



**La disminución proyectada de la humedad del suelo en verano tendrá importantes consecuencias para la agricultura y los ecosistemas.**

**Figura 4.6.** La humedad en verano del suelo favorece la agricultura en tierras secas y las funciones de los ecosistemas y reduce la demanda de riego y el riesgo de incendios forestales. En un escenario intermedio (RCP 4.5), se proyecta que la humedad del suelo disminuya durante los meses de verano (junio, julio y agosto) en la mayor parte del país (a), con descensos en el oeste incluso en las proyecciones más húmedas. Las excepciones incluyen partes del Medio Oeste superior y Alaska. El intervalo entre el valor más húmedo (b) y el más seco (c) ilustran la incertidumbre de las proyecciones del suelo en verano. No se dispone de proyecciones para el Caribe estadounidense ni para las Islas del Pacífico asociadas a EE. UU. Créditos de la figura: University of Colorado Boulder, NCEI de la NOAA y CISS de NC.

### Cambios en las aguas subterráneas

El agua subterránea es el agua almacenada bajo la superficie terrestre; puede estar cerca de la superficie o extenderse a cientos de pies de profundidad. Es un suministro de agua crucial para los sistemas humanos y puede moderar los cambios de temperatura y precipitaciones<sup>44,45,46</sup>. En la NCA4 se señaló que el agotamiento de las aguas subterráneas puede aumentar el riesgo de sequía y se destacó el uso insostenible de las aguas subterráneas y la probabilidad de que sigan disminuyendo en el futuro<sup>3</sup>. Trabajos más recientes han resaltado las conexiones hidrológicas entre las aguas superficiales y subterráneas que hacen que los sistemas de aguas superficiales sean vulnerables al descenso de los niveles de aguas subterráneas<sup>47,48</sup>.

Las tendencias de las aguas subterráneas varían de una región a otra y son difíciles de proyectar porque la intensidad tanto de las extracciones como de la recarga de aguas subterráneas depende de factores

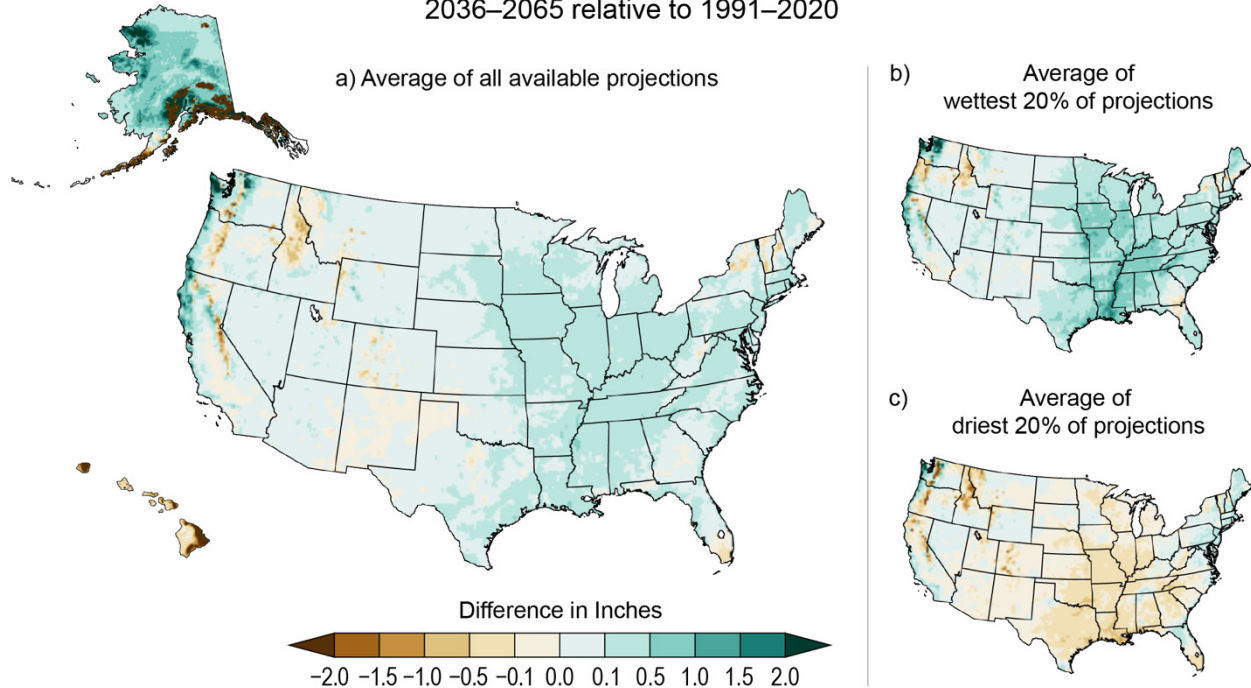
humanos (p. ej., uso del suelo, población, asignaciones de aguas superficiales y regulación de las aguas subterráneas), además de los factores climáticos<sup>49</sup>. La recarga natural de las aguas subterráneas varía de un año a otro, pero se proyecta que disminuya ligeramente en el Suroeste y aumente ligeramente en el Noroeste<sup>50,51</sup>. Las temperaturas más altas aumentarán la demanda de riego (Figura 4.9), lo que puede conducir a un aumento del bombeo de aguas subterráneas en áreas donde las aguas subterráneas son el principal suministro de agua o donde los suministros de aguas superficiales son limitados<sup>52,53,54</sup>. Los niveles de aguas subterráneas ya han disminuido en muchos acuíferos importantes debido a la falta de gestión, al bombeo excesivo y a la disminución de la recarga; el aumento del bombeo podría acelerar las pérdidas de almacenamiento a largo plazo, pero esos efectos dependerán de los factores regionales señalados anteriormente<sup>49,52,55,56</sup>. La disminución de las aguas subterráneas causada por el aumento de la severidad y la duración de las sequías en el futuro es motivo de preocupación en muchas partes del país (KM 23.3, 24.5, 28.1; Capítulo 26).

### **Cambios en la escorrentía**

Los cambios en los componentes del ciclo del agua mencionados anteriormente se combinan con otros factores para afectar la escorrentía (flujo de aguas superficiales). Por ejemplo, los cambios en el manto de nieve influyen en la estacionalidad de la escorrentía en las áreas donde predomina el deshielo,<sup>57</sup> mientras que la humedad del suelo influye en la cantidad de precipitación y deshielo que se convierte en escorrentía<sup>58</sup>. Además de la precipitación directa y de las aguas subterráneas, la escorrentía es una fuente primaria de abastecimiento de agua para personas y ecosistemas. Las tendencias anuales de la escorrentía han seguido en su mayor parte las tendencias anuales de las precipitaciones. Del mismo modo, la tendencia al aumento de la variabilidad de la escorrentía anual en la mayor parte de la mitad este de EE. UU. es coherente con el aumento de las precipitaciones extremas en esa zona<sup>11</sup>. Se proyecta que el aumento de las precipitaciones intensas incremente la escorrentía anual en gran parte de EE. UU. (Figura 4.7)<sup>59,60</sup>.

## Cambios proyectados en la escorrentía anual a mediados de siglo

2036–2065 relative to 1991–2020



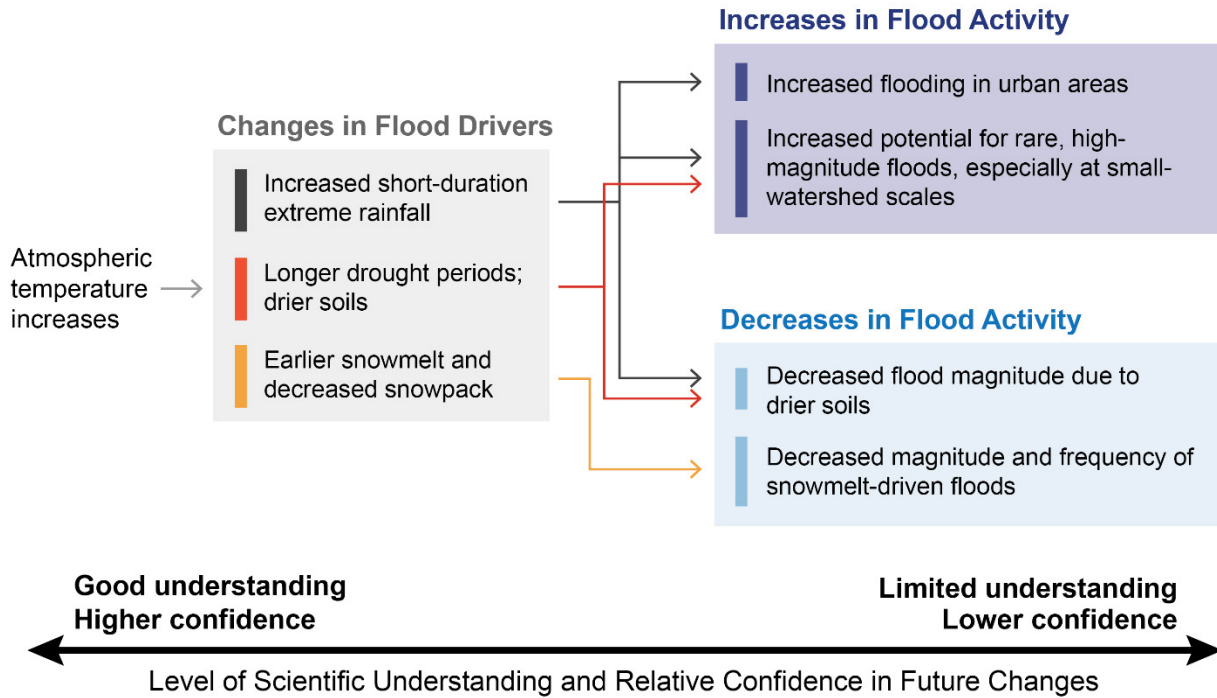
**Los cambios proyectados en la escorrentía varían en todo el país debido a los cambios proyectados en múltiples aspectos del ciclo del agua.**

**Figura 4.7.** Los ríos y arroyos agregan la escorrentía a través de las cuencas hidrográficas, y la escorrentía integra los impactos del cambio climático en el ciclo del agua (Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6); como resultado, los impactos en la escorrentía sobre una cuenca hidrográfica se utilizan comúnmente como sustitutos de los impactos en el caudal de los arroyos. En un escenario intermedio (RCP4.5), las proyecciones de escorrentía anual varían geográficamente según los cambios relativos de las precipitaciones, la evapotranspiración, la nieve y el hielo, las aguas subterráneas y la humedad del suelo. Se proyectan descensos en Hawaii y en partes de la Nación abastecidas por la nieve (a). No se dispone de proyecciones para las Islas del Pacífico asociadas a EE. UU. ni para el Caribe estadounidense; sin embargo, dada la disminución proyectada de las precipitaciones y el aumento de la temperatura en el Caribe, se espera que disminuya la escorrentía anual. El intervalo entre los valores más húmedos (b) y el más seco (c) ilustran la incertidumbre de las proyecciones de escorrentía. Créditos de la figura: University of Colorado Boulder, NCEI de la NOAA y CISESS de NC.

### Eventos extremos: inundaciones y sequías

Las inundaciones continentales se deben a complejas interacciones entre la cantidad y el momento de las precipitaciones, la humedad del suelo, el manto de nieve y la cubierta terrestre (consulte KM 9.1 para ver las inundaciones costeras). Sin embargo, las estimaciones de eventos como la inundación de 100 años suelen basarse en observaciones históricas y en la hipótesis de un clima invariable<sup>61</sup>. Los métodos que tienen en cuenta la incertidumbre añadida del cambio climático son necesarios para el diseño de infraestructuras, la planificación del uso del suelo y otros fines<sup>62,63,64</sup>, pero la frecuencia futura de las inundaciones es difícil de predecir (Figura 4.8)<sup>65,66</sup>. Por ejemplo, algunas precipitaciones extremas se verán amortiguadas por futuras reducciones de la humedad del suelo, lo que permitirá absorber más lluvia,<sup>67,68,69</sup> y se proyecta que en algunas áreas aumenten las inundaciones por lluvia caída sobre nieve<sup>70,71</sup>, precipitaciones en terrenos alterados por incendios forestales<sup>72,73</sup> y pérdida de almacenamiento natural de agua en paisajes urbanos<sup>74</sup>.

## Impactos del cambio climático en los factores y la actividad de la inundaciones continentales



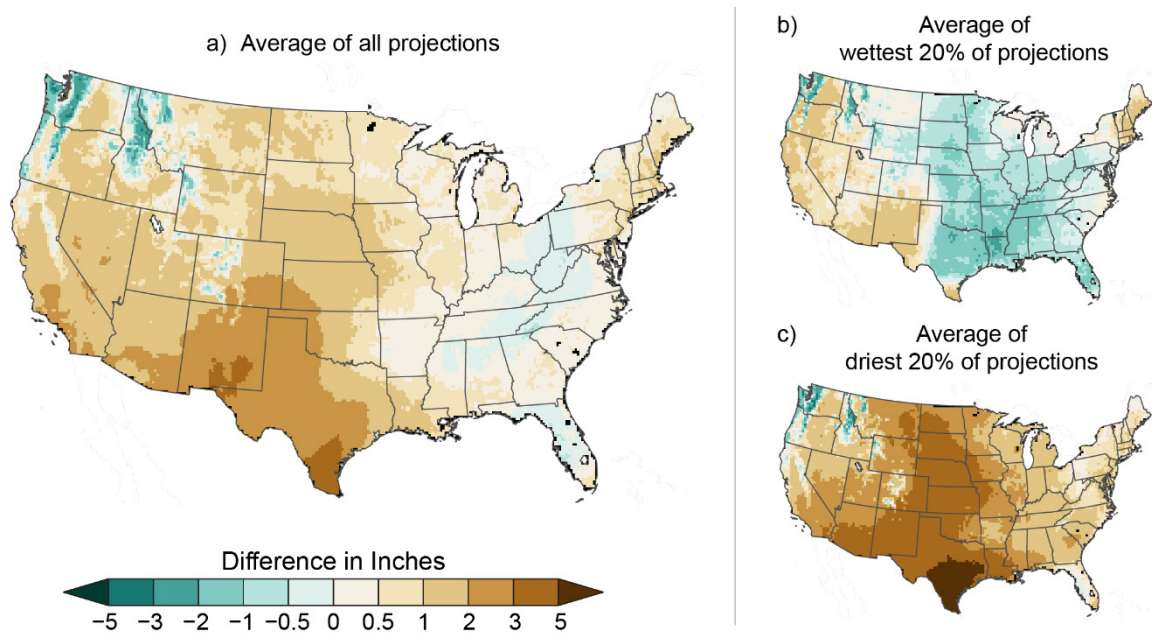
**El cambio climático puede provocar tanto aumentos como disminuciones de las inundaciones continentales, dependiendo del lugar y de la época del año.**

**Figura 4.8.** Las inundaciones continentales son el resultado de una combinación de factores, principalmente precipitaciones extremas, humedad del suelo y condiciones del manto de nieve y del deshielo. Cada uno de ellos está sujeto a una variabilidad y a un cambio sustanciales a lo largo de una amplia gama de escalas temporales, desde la diaria hasta la decenal, en un clima cada vez más cálido. La confianza científica de cómo cambiarán los factores climáticos de las inundaciones es mayor que la de cómo se combinarán esos factores para afectar las inundaciones en determinados lugares y estaciones. Adaptado de Yu *et al.* 2020<sup>66</sup> [CC BY-NC 4.0].

Se prevé que los cambios en las precipitaciones y la temperatura agraven la sequía en amplias partes de EE. UU.<sup>75</sup>. Las tendencias observadas en la sequía (Figura A4.9) y el déficit hídrico climático reflejan estos cambios<sup>13</sup>, al igual que las proyecciones, con la señal de sequía más fuerte en el Suroeste (Figura 4.9)<sup>76</sup>.

## Cambios proyectados en el déficit hídrico climático anual a mediados de siglo

2036–2065 relative to 1991–2020



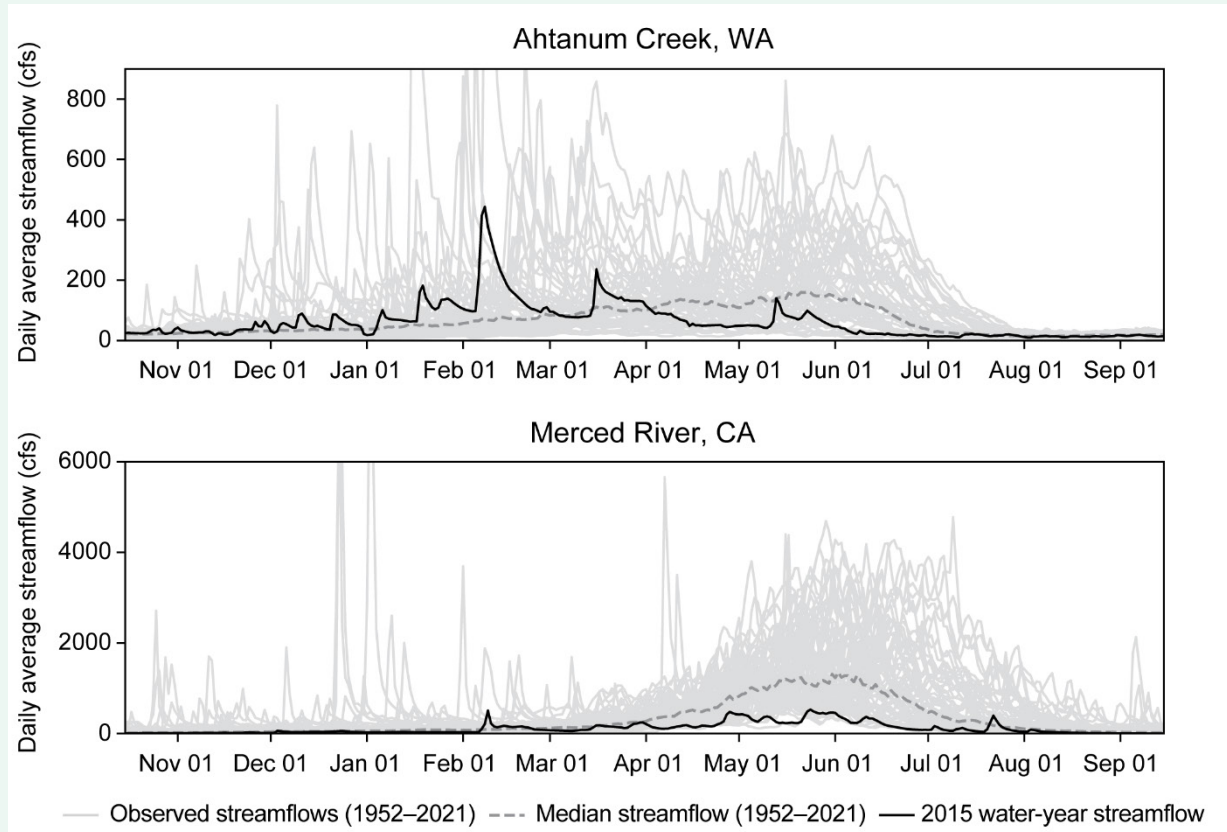
### La escasez de agua para la vegetación aumentará en la mayor parte de la Nación.

**Figura 4.9.** El déficit hídrico climático (climatic water deficit, CWD) es el déficit de agua necesario para satisfacer plenamente las necesidades de la vegetación: el CWD es cero si se cubren esas necesidades, y un número mayor indica condiciones más secas. Las necesidades de agua de la vegetación serán mayores con los incrementos de temperatura; como resultado, en ausencia de incrementos compensatorios de las precipitaciones, se proyecta un aumento del CWD. En un escenario intermedio (RCP4.5), se espera que el CWD aumente en gran parte de la Nación, siendo las Grandes Llanuras y el Suroeste las regiones que experimenten el mayor incremento (a, c). Incluso las proyecciones más húmedas muestran aumentos del CWD en el Oeste (b). No se dispone de proyecciones para el Caribe estadounidense, Alaska, Hawaii o las Islas del Pacífico asociadas a EE. UU.; sin embargo, dados los aumentos de temperatura previstos y los descensos de precipitaciones anuales en Hawaii y el Caribe estadounidense, se espera que el CWD aumente en esas regiones, mientras que en Alaska se prevén tanto aumentos como descensos similares al patrón observado en el Noroeste. Créditos de la figura: University of Colorado Boulder.

## Recuadro 4.1. Sequía de Nieve entre Washington y California 2015

Durante el invierno 2014-2015 se produjeron sequías de nieve en gran parte de las cordilleras costeras del oeste. Sin embargo, las causas climáticas de estas sequías variaron. El oeste de Oregon y Washington experimentaron una sequía de nieve *cálida*, en la que las precipitaciones invernales fueron entre el 77 % y el 113 % de lo normal, pero las elevadas temperaturas hicieron que una mayor proporción de esas precipitaciones cayera en forma de lluvia, lo que redujo la acumulación de nieve y aumentó el deshielo invernal<sup>15,77</sup>. Como consecuencia, los caudales invernales fueron de normales a altos, pero los caudales de abril a agosto estuvieron más bajos de lo normal (Figura 4.10).

### Sequía de nieve entre Washington y California



**En 2015, partes de Oregon y Washington experimentaron una sequía de nieve cálida, mientras que Sierra Nevada, en California, experimentó una sequía de nieve seca.**

**Figura 4.10.** Las líneas temporales comparan el caudal medio de 70 años (1952-2021) (línea discontinua) con el caudal del año hidrológico 2015 (octubre 2014-septiembre 2015) (línea negra). También se muestran los caudales anuales observados de 1952-2021 (líneas grises). Los valores son caudales medios diarios en pies cúbicos por segundo. El caudal de los arroyos en el verano de 2015 fue anormalmente bajo, como consecuencia de la reducción del manto de nieve durante una sequía de nieve cálida (arroyo Ahtanum) y una sequía de nieve seca (río Merced). El caudal diario se expresa en pies cúbicos por segundo para cada uno de los años 1952-2021 (líneas grises). Los caudales del río Merced son más bajos durante todo el año debido a las escasas precipitaciones totales y a las pocas nevadas; los caudales del arroyo Ahtanum pasaron del verano al invierno en 2014-2015 porque hacía demasiado calor para la acumulación de nieve. Créditos de la figura: University of Maryland, College Park and Lynker.

En contraste, la Sierra Nevada de California experimentó una sequía de nieve seca, lo que provocó el menor volumen de nieve jamás registrado allí<sup>15,78,79</sup>. Tanto la sequía como el calor provocaron tensiones entre los titulares de derechos de agua. En Oregón y Washington, los cultivos de riego —incluidos los valiosos cultivos de huerta— que dependen de derechos de agua de desviación directa del caudal de los arroyos no se lograron (Figura 4.11), pero los suministros municipales de agua que dependían de derechos de almacenamiento que permiten a los embalses captar la escorrentía invernal fueron suficientes<sup>80</sup>. En California, el suministro total de agua fue limitado, lo que provocó recortes severos o totales a los titulares de derechos de agua y contratos de menor importancia<sup>81</sup>.

### Los manzanares de Washington bajo la sobrecarga de la sequía



**Un manzano del distrito de riego de Roza, en Washington, muestra una sobrecarga extrema por sequía en septiembre de 2015.**

**Figura 4.11.** Este manzano sufrió los efectos de una sequía de nieve cálida el invierno anterior. Las temperaturas invernales cálidas provocaron que gran parte de las precipitaciones cayeran en forma de lluvia en vez de nieve, lo que redujo el manto de nieve y provocó un deshielo anticipado, con la consiguiente disminución del caudal de los arroyos durante la temporada de riego. Créditos de la foto: © Sonia A. Hall.



## Mensaje clave 4.2

### Los cambios en el ciclo del agua afectarán todas las comunidades, con impactos desproporcionados para algunas

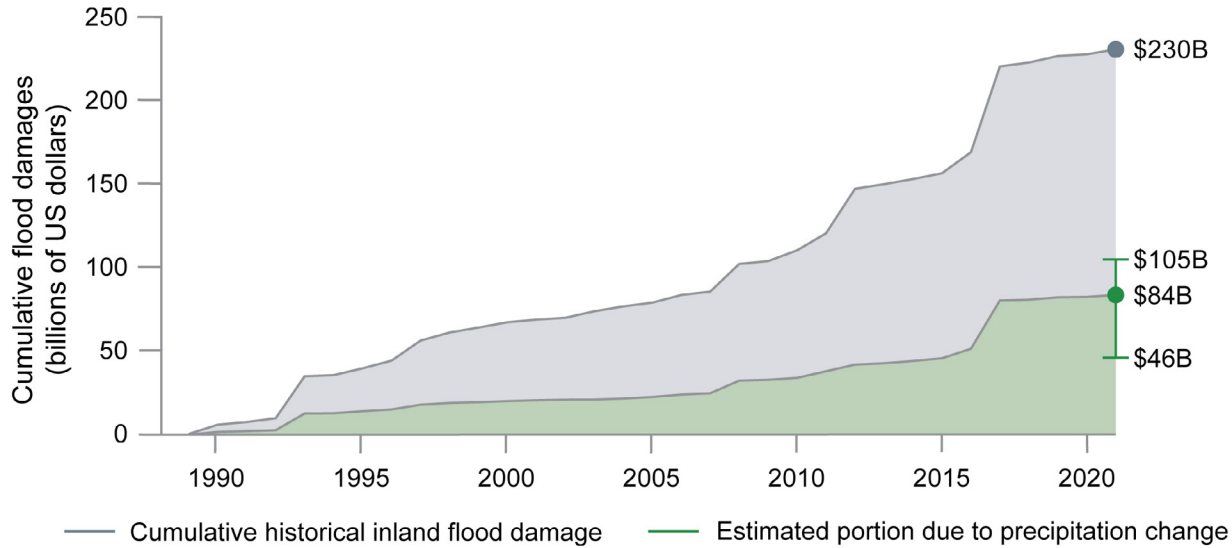
Los sistemas naturales y humanos han evolucionado según los patrones históricos del ciclo del agua, lo que dificulta una adaptación rápida. Las precipitaciones más intensas, combinadas con los cambios en el uso de la tierra y otros factores como la humedad del suelo y la nieve, están provocando un aumento de los daños por inundaciones (*probable, confianza alta*). Los impactos de la sequía también están en aumento (*confianza media*), al igual que los impactos en la calidad del agua relacionados con las inundaciones y la sequía (*confianza media*). Todas las comunidades se verán afectadas, pero en particular las que están en primera línea del cambio climático —incluidas muchas comunidades negras, hispanas, tribales, indígenas y socioeconómicamente desfavorecidas— se enfrentan a riesgos crecientes de cambios en la cantidad y calidad del agua debido a la proximidad de sus hogares y lugares de trabajo a los peligros y al acceso limitado a recursos e infraestructuras (*muy probable, confianza alta*).

Los cambios en el ciclo del agua tienen múltiples efectos más allá de los descritos en este capítulo. Consulte los capítulos sobre Energía (Capítulo 5), Ecosistemas (Capítulo 8), Agricultura (Capítulo 11), Entorno construido (Capítulo 12), Transporte (Capítulo 13) y Salud Humana (Capítulo 15) para más conocer información.

### **Impacto de las inundaciones**

Las inundaciones desempeñan un papel importante en la creación y mantenimiento de hábitats acuáticos, en la regulación de los ciclos reproductivos de los peces y otros organismos fluviales, y en la reposición del suelo y los nutrientes en las llanuras aluviales. Los cambios en la cubierta vegetal han limitado estos efectos positivos e incluso han agravado algunas de las consecuencias negativas de las inundaciones. Los cambios impulsados por el cambio climático en la cantidad y duración de las precipitaciones, el manto de nieve/derretimiento de la nieve y la humedad del suelo se han combinado con el cambio de la cubierta terrestre y el aumento del valor de las propiedades para incrementar los daños económicos globales de las inundaciones (Figura 4.12)<sup>82</sup>.

## Daños por inundaciones asociados al cambio de las precipitaciones



**Una parte de los aumentos observados en los daños por inundaciones interiores puede atribuirse a los cambios en las precipitaciones.**

**Figura 4.12.** Se muestran los daños acumulados por inundaciones interiores (en dólares de 2021) en EE .UU. continental (gris) y la parte estimada debido a los cambios en las precipitaciones (verde) desde 1988 hasta 2021. Durante este período, las precipitaciones intensas han aumentado en la mayor parte de EE. UU. debido al cambio climático (consulte la Figura 2.8 para ver los cambios en las precipitaciones intensas durante 1958-2021). Las barras de error (en verde) muestran el intervalo plausible de daños acumulados en 2021, calculado utilizando un nivel de confianza del 95 %. Aproximadamente entre el 20 % y el 46 % del aumento de los daños por inundaciones observados puede atribuirse al aumento de las precipitaciones (suponiendo los mismos patrones históricos de desarrollo durante el período 1988-2021). Otros factores importantes que contribuyen a los daños causados por las inundaciones son la urbanización y el cambio de uso del suelo, que pueden exacerbar la escorrentía, y el aumento del número y valor de las construcciones y otros activos afectados por las inundaciones. Adaptado de Davenport *et al.* 2021<sup>82</sup>.

En los entornos urbanos, las aceras, los techos y los suelos compactados no absorben el agua con la misma efectividad que los paisajes naturales, lo que amplifica los efectos de las fuertes precipitaciones y concentra las inundaciones. En los entornos rurales, la menor cantidad de cubierta impermeable permite que los suelos retengan más precipitaciones. Sin embargo, la agricultura intensiva puede reducir la capacidad de infiltración y retención de agua de los suelos y aumentar la escorrentía, lo que provoca inundaciones<sup>83</sup>.

A escala de las grandes cuencas hidrográficas, las inundaciones a lo largo de los grandes sistemas fluviales y lacustres causan numerosas perturbaciones, entre ellas al transporte ferroviario, por carretera y fluvial; a la producción agrícola; a la entrega de productos básicos; y a la producción industrial, como se vio durante la inundación del río Mississippi en 2011 (KM 24.4)<sup>84</sup>.

El aumento de las inundaciones amenaza la calidad del agua y los ecosistemas (Figura 4.2). Cuando las aguas de inundación inundan áreas normalmente secas, también transportan residuos, productos químicos, bacterias y otros contaminantes (KM 23.1)<sup>85,86</sup>. Las fuertes precipitaciones están saturando los sistemas combinados de aguas pluviales y alcantarillado, lo que provoca vertidos de agua contaminada y aguas residuales sin tratar en las aguas receptoras<sup>87,88</sup>. Es probable que la trayectoria ascendente de los impactos de las inundaciones urbanas continúe con los cambios en los patrones y la intensidad de las precipitaciones<sup>89</sup>. El agua potable de origen subterráneo se contamina por el agua estancada de las inundaciones en

los pozos y la percolación en los campos de pozos<sup>90</sup>, y en las tierras de cultivo, la elevada escorrentía vierte fertilizantes en arroyos y lagos, provocando la proliferación de algas nocivas<sup>91</sup>.

### **Impactos de la sequía**

Las sequías se deben a muchos factores, entre ellos la insostenible demanda de agua por parte de la sociedad<sup>92</sup>. Desde una perspectiva climática, las precipitaciones por debajo de lo normal son el principal impulsor de la sequía, pero cada vez se reconoce más que las temperaturas más altas pueden hacer que la sequía se desarrolle o se haga más intensa de lo que cabría esperar solo por el déficit de precipitaciones; las temperaturas más altas provocan un aumento de la demanda atmosférica de humedad, un fenómeno conocido como sequía cálida<sup>75,93,94,95</sup>. Las temperaturas por encima de lo normal también contribuyen a la sequía de nieve (Recuadro 4.1) y a la sequía repentina, que se desarrolla rápidamente en unas pocas semanas<sup>96,97</sup>. Las megasequías son eventos de duración y severidad extraordinarias<sup>98</sup>, y muchas de ellas están documentadas en registros paleo climáticos<sup>99,100</sup>. La contribución de la temperatura a la sequía deja claro que el calentamiento asociado al cambio climático podría aumentar la frecuencia, severidad o duración de la sequía<sup>73,101,102</sup> e impulsar la aridificación, un cambio a largo plazo hacia un clima más seco, que es motivo de preocupación en partes ya secas del Oeste<sup>76</sup>.

Entre 1980 y 2022, la sequía y las olas de calor relacionadas en EE. UU. causaron \$334,800 millones (en dólares de julio de 2023) en daños; solo los ciclones tropicales y las tormentas severas fueron más costosos (KM 22.1)<sup>2</sup>. Las sequías suelen reducir la productividad agrícola y sobrecargar los sistemas hídricos<sup>103,104</sup>, lo que provoca escasez en el suministro de agua y amenaza la generación de energía (KM 5.1)<sup>105</sup>. El transporte fluvial y lacustre también corre peligro debido a la sequía (KM 24.4).

La sequía sobrecarga los ecosistemas terrestres y acuáticos<sup>106</sup>, lo que provoca aumento de la temperatura y de la salinidad del agua, reducción de nutrientes, disminución de los niveles de oxígeno, concentración de contaminantes (Figura 4.2), pérdida de conexiones de aguas superficiales y subterráneas y descenso de la productividad<sup>107,108</sup>. Además, la sequía puede exacerbar otras perturbaciones como las plagas y los incendios forestales<sup>109</sup>. Los ecosistemas pueden ser resilientes en condiciones de variabilidad climática normal, pero la recuperación después de una sequía en un clima cambiado puede no ser posible y provocar la pérdida de servicios ecosistémicos y la pérdida o migración de especies autóctonas e invasoras (Figura 8.6)<sup>110,111</sup>.

La calidad de las aguas subterráneas también se ve amenazada por el calor y la sequía. El aumento de la temperatura del suelo y de las aguas subterráneas puede provocar una disminución de la saturación de oxígeno, un descenso del pH y un aumento de la meteorización mineral, todo lo cual reduce la calidad del agua<sup>112</sup>, y los acuíferos costeros e insulares corren el riesgo de intrusión de agua marina, lo que hace que las aguas subterráneas no sean potables y puede dañar las infraestructuras (Figura 4.2; KM 9.2, 21.2, 23.3, 28.2, 30.1).

Las condiciones de sequía han provocado históricamente un aumento del bombeo de aguas subterráneas en algunas regiones de EE. UU., una práctica que se proyecta aumente con el cambio climático<sup>55,56,113</sup>. El descenso del nivel de las aguas subterráneas debido al bombeo puede reducir el caudal de los arroyos (Figura 4.13)<sup>48</sup> y provocar el hundimiento del terreno<sup>114</sup>.

## Río San Pedro, Arizona



**El río San Pedro, en Arizona, se ha agotado por el bombeo de aguas subterráneas, secando los humedales y el hábitat de la vida silvestre.**

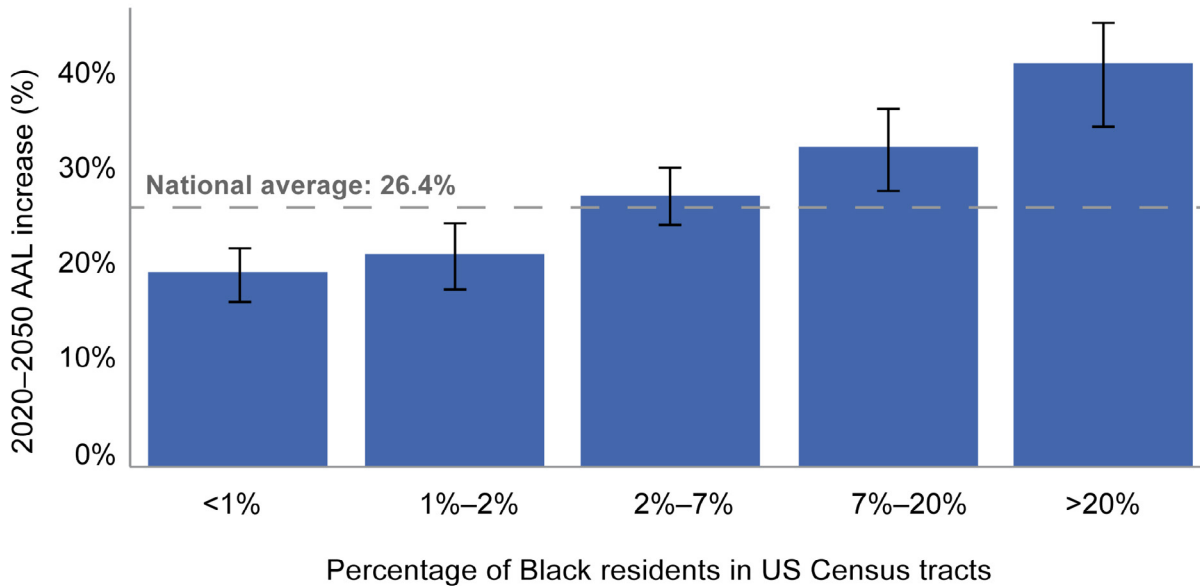
**Figura 4.13.** El bombeo de aguas subterráneas puede reducir el suministro de aguas superficiales. Un ejemplo es el río San Pedro, en Arizona, donde el bombeo iniciado en la década de los años 40 del siglo XX ha privado de agua dulce a los humedales y al hábitat de la vida silvestre<sup>115</sup>. Créditos de la foto: CochiseVista/iStock vía Getty Images.

### ***Impactos desproporcionados***

El cambio climático crea cargas desiguales sobre las personas y las comunidades<sup>116,117,118</sup>. Las personas que viven a lo largo de las costas y los ríos o que trabajan en la agricultura y la pesca están más expuestas a los peligros relacionados con el agua<sup>119,120,121</sup>. Los adultos mayores, los niños y los residentes de vecindarios con bajos ingresos y de áreas rurales son los que corren mayor riesgo de exposición a patógenos y contaminantes debido a los efectos del cambio climático sobre la calidad del agua<sup>122,123,124</sup>.

Muchas comunidades tribales e indígenas residen en áreas sujetas a inundaciones costeras y fluviales y corren el riesgo de ser desplazadas de tierras con significado cultural<sup>125,126,127</sup>. Los vecindarios que albergan minorías raciales y personas con bajos ingresos tienen las mayores exposiciones a inundaciones interiores en el Sur<sup>128</sup>. Los residentes hispanos tienen un 50 % más de probabilidades de vivir en la llanura aluvial de 500 años<sup>129</sup>, mientras que se proyecta que las comunidades negras soporten una parte desproporcionada de los futuros daños por inundaciones (Figura 4.14; Recuadro 4.2)<sup>130</sup>. La sequía también puede tener efectos desiguales según el sector económico, el acceso a recursos hídricos, la capacidad de regar, la dependencia de la electricidad y la situación socioeconómica<sup>131</sup>.

### Aumento proyectado de las pérdidas promedio anuales (AAL) por inundaciones para 2050



**Se proyecta que las pérdidas debido a las inundaciones aumenten de forma desproporcionada en las secciones censales de EE. UU. con mayores porcentajes de residentes negros.**

**Figura 4.14.** Se proyecta que las pérdidas anuales —daños económicos promedio en un año típico— debido a las inundaciones en las secciones censales con una población negra de al menos el 20 % aumenten aproximadamente el doble que en las zonas donde los residentes negros representan menos del 1 % de la población. Las barras negras representan intervalos de confianza del 95 %. Adaptado de Wing et al. 2022<sup>130</sup> [CC BY 4.0].

### Recuadro 4.2. Cambio climático, inundaciones urbanas y desigualdad

El huracán Harvey ocasionó precipitaciones récord sobre las áreas metropolitanas de Houston y Beaumont-Port Arthur en agosto de 2017 (Figura 4.15). Las inundaciones, agravadas por la urbanización extensiva, mataron a más de 100 personas y causaron unos daños estimados en \$147,600 millones (en dólares de 2022)<sup>132</sup>. Se calcula que las precipitaciones de Harvey fueron entre el 15 % y el 20 % más intensas de lo que habrían sido sin el calentamiento provocado por el hombre<sup>133,134,135</sup>, lo que aumentó el área inundada en el área metropolitana de Houston en un 14 %<sup>136</sup>, lo que provocó la inundación de un 32 % más de viviendas<sup>137</sup>. Muchas de las propiedades inundadas se encontraban fuera de las llanuras aluviales de 100 años designadas por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (Federal Emergency Management Agency, FEMA) y no estaban cubiertas por el seguro federal contra inundaciones. Estas propiedades estaban habitadas de forma desproporcionada por residentes negros e hispanos<sup>138</sup>. Las personas con discapacidades y los residentes en viviendas subvencionadas también se vieron afectados de forma desproporcionada<sup>139,140</sup>. Se espera que el impacto del cambio climático en las inundaciones empeore este tipo de desigualdades.

## Inundaciones residenciales por el huracán Harvey

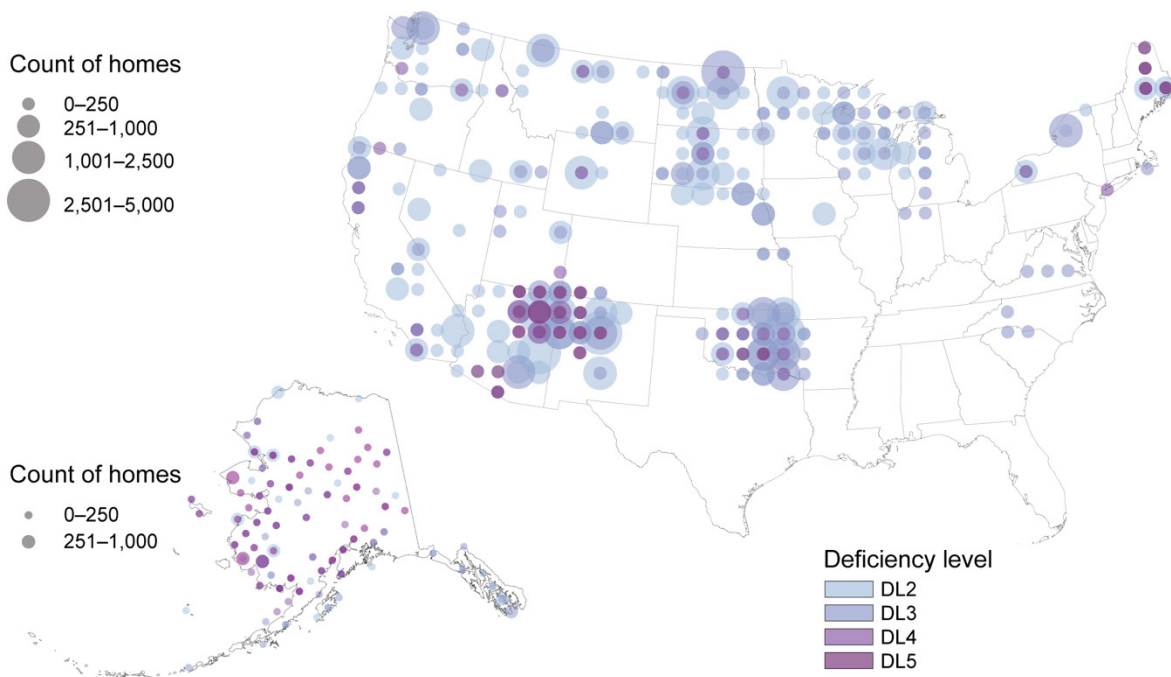


Las inundaciones provocadas por el huracán Harvey inundaron vecindarios residenciales de Port Arthur, Texas.

Figura 4.15. Créditos de la foto: Sargento Primero Daniel J. Martinez, Guardia Nacional Aérea de EE.UU.

En todo el país, las infraestructuras de suministro de agua potable se hacen viejas y se deterioran (KM 12.2), lo que aumenta los riesgos de contaminación y de suministro de agua no potable<sup>141</sup>. Más de 1,000 sistemas comunitarios de abastecimiento de agua —que atienden principalmente personas mayores y personas económicamente desfavorecidas en áreas rurales, indígenas o con menor nivel educativo<sup>142</sup>— ya suministran agua de mala calidad y no están preparados para hacer frente a inundaciones, sequías y enfermedades transmitidas por el agua provocadas por el cambio climático (Figura 4.2; KM 15.1, 15.2). Para algunas comunidades tribales e indígenas, las deficiencias de las infraestructuras de agua amenazan su bienestar social, físico y mental y merman su capacidad de prosperar (KM 16.1)<sup>143,144,145</sup>. La Figura 4.16 muestra la distribución y severidad de las deficiencias de las instalaciones de saneamiento en los hogares de indios americanos y nativos de Alaska<sup>146</sup>.

### Viviendas de indios americanos y nativos de Alaska que requieren mejoras en los sistemas de agua y alcantarillado



**Las infraestructuras hídricas de apoyo a los pueblos indígenas y tribales están especialmente mal equipadas para hacer frente al aumento de las inundaciones y las sequías.**

**Figura 4.16.** El Servicio de Salud Indígena (Indian Health Service, IHS) mantiene una base de datos de hogares de indios americanos y nativos de Alaska (American Indian and Alaska Native, AI/AN) que requieren mejoras en las instalaciones de saneamiento dentro de las áreas de servicio del IHS. La figura muestra los niveles de deficiencia de saneamiento en los hogares AI/AN de todo el país, que van desde el nivel 2 (son necesarias mejoras de capital para satisfacer las necesidades de saneamiento doméstico) hasta el nivel 5 (carece de suministro de agua potable y de un sistema de eliminación de aguas residuales). El IHS no recoge datos sobre Hawaii, las Islas del Pacífico asociadas a EE. UU. ni el Caribe estadounidense, pero en esas regiones se documentan tasas elevadas de deficiencias de fontanería<sup>142</sup>. Créditos de la figura: Servicio de Salud Indígena.

## Mensaje clave 4.3

### Los avances hacia la adaptación han sido desiguales

La capacidad de los gerentes del agua para adaptarse a los cambios ha mejorado con mejores datos, avances en la toma de decisiones y pasos hacia la cooperación. Sin embargo, los estándares de infraestructura y las instituciones de asignación del agua han tardado en adaptarse a un clima cambiante (*confianza alta*), y los esfuerzos se ven dificultados por los ciclos húmedos y secos provocados por la variabilidad natural del clima (*muy probable, confianza alta*). Las comunidades de primera línea, tribales e indígenas se ven muy afectadas, pero carecen de recursos para adaptarse efectivamente y no están plenamente representadas en la toma de decisiones (*confianza alta*).

#### Enfoques de gestión y planificación

La incertidumbre derivada de la variabilidad natural siempre ha formado parte de la planificación de los recursos hídricos, pero a medida que el cambio climático afecta distintos componentes del ciclo del agua, las incertidumbres en torno a los eventos extremos y la disponibilidad de agua han aumentado. Las respuestas a estas crecientes incertidumbres incluyen la adaptación climática y la mitigación de los riesgos mediante la gestión de las cuencas hidrográficas (KM 6.1, 6.2)<sup>147</sup>; soluciones basadas en la naturaleza (KM 8.3); reubicación planificada<sup>148,149</sup>; gestión de llanuras aluviales<sup>150</sup>; conservación y reutilización del agua<sup>151,152</sup>; ciencia de la decisión<sup>153,154</sup>; optimización de embalses y aplicaciones de inteligencia artificial<sup>155,156,157</sup>; mejora de los pronósticos meteorológicos y de caudales<sup>158</sup>; planificación municipal<sup>159,160,161</sup>; sistemas de gestión adaptativa<sup>162</sup>; asociaciones entre las partes interesadas y los científicos<sup>163</sup>; y orientación para la adaptación (KM 31.4)<sup>164,165,166,167</sup>.

#### Limitaciones de adaptación

El cambio climático sobrepasa la formulación de políticas de recursos hídricos<sup>168,169</sup>, lo que hace de la reducción de riesgos un ejercicio continuo de puesta al día. Por ejemplo, las actuales tasas de cambio de las precipitaciones superan los cambios normativos necesarios para hacerles frente. Las medidas pluviométricas clave para el diseño y la toma de decisiones están muy desactualizadas<sup>170,171</sup>; actualizar estas medidas es esencial para proteger las comunidades. Aunque se han producido avances recientes en la recopilación de datos, los métodos estadísticos, la modelización del clima y el pronóstico meteorológico, es difícil progresar, en parte porque normativas, códigos y estándares involucran intereses contrapuestos y, a menudo, abarcan múltiples jurisdicciones<sup>172,173,174</sup>.

#### Conflicto, competencia y colaboración

Los impactos del cambio climático en el suministro de agua pueden ocasionar competencia, colaboración o conflicto. Con frecuencia, los conflictos por el agua en el oeste de EE. UU. se resuelven mediante litigios<sup>175,176</sup>. Sin embargo, en las actuales condiciones de sequía severa y en el contexto de los marcos jurídicos existentes, los intereses en materia de agua en la cuenca del río Colorado, incluido México, están luchando por evitar los litigios mediante acuerdos negociados y la reducción voluntaria del uso (Recuadro 28.1)<sup>177,178,179</sup>. Algunos de estos esfuerzos incluyen ahora a las tribus y a otros usuarios del agua que tradicionalmente han sido excluidos de la participación en las negociaciones, aunque la representación sigue siendo desigual<sup>180</sup>.

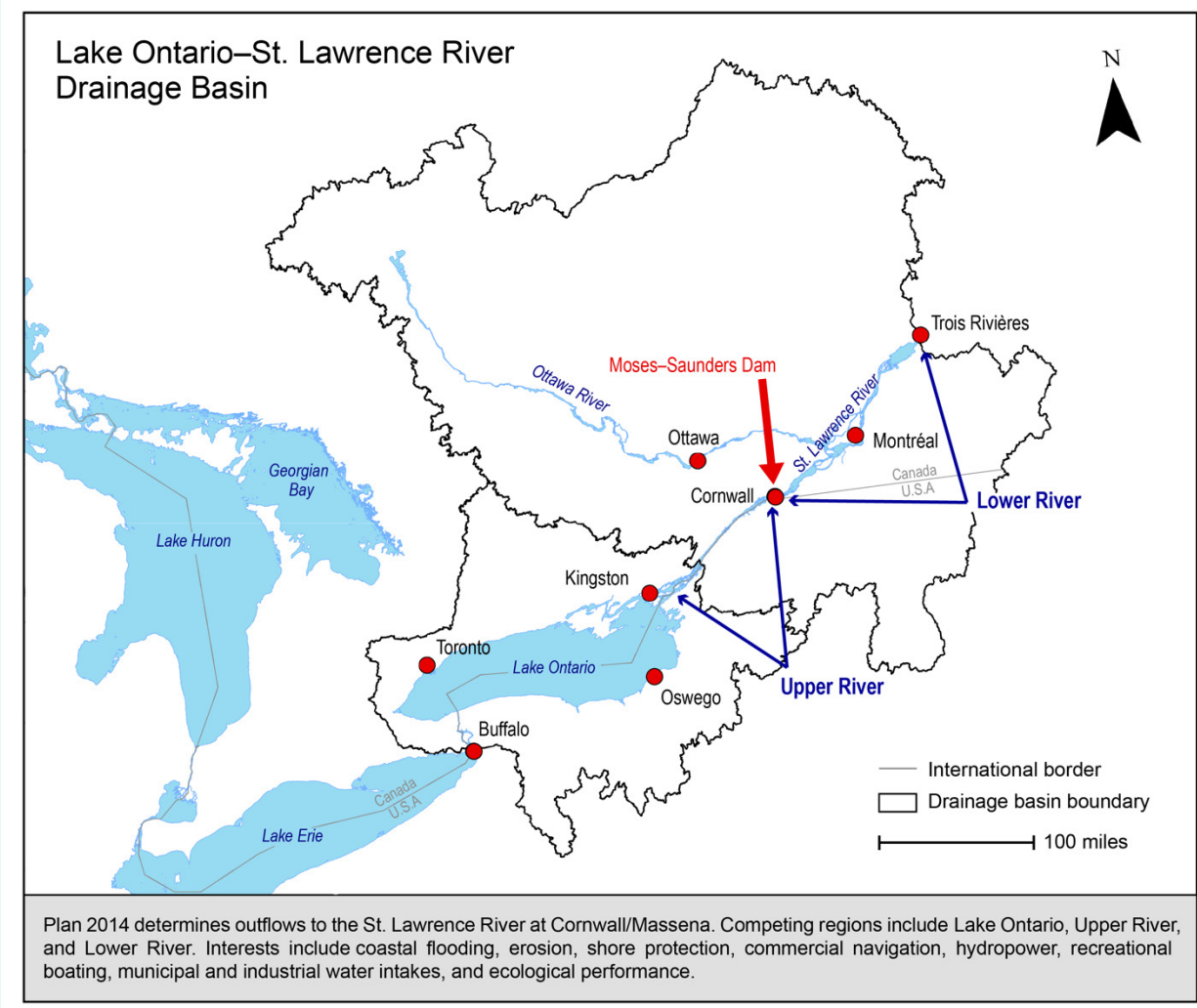


En las áreas donde el riesgo de inundaciones está en aumento, la colaboración en la gestión de los riesgos de inundación a escala regional se ha hecho más urgente, ya que la cooperación puede aportar soluciones que no están disponibles a escala local (Recuadro 4.3). Esto es especialmente cierto en el Medio Oeste, donde las inundaciones suelen ser regionales y las soluciones locales pueden empujar los riesgos de inundación aguas abajo<sup>181</sup>.

### Recuadro 4.3. Cooperación internacional en los Grandes Lagos

Los Grandes Lagos, que contienen la mayor cantidad de agua dulce superficial de la Tierra, son compartidos por dos provincias canadienses, ocho estados estadounidenses y numerosas tribus y primeras naciones soberanas. Aunque se prestan al conflicto y la competencia, las aguas se comparten equitativamente desde el Tratado de Aguas Fronterizas de 1909<sup>182</sup>. En 2017 se puso en marcha un plan de gestión que regula los niveles y las salidas del lago Ontario (Figura 4.17)<sup>183</sup>. Fue la culminación de más de 16 años de estudios científicos, participación pública y revisión gubernamental, incluido un modelo construido en colaboración de las respuestas físicas, ambientales y económicas del sistema a las alternativas de gestión y climáticas. Los indicadores de resultados permitieron comprender y cuantificar las ventajas y desventajas, y generó un plan que equilibra las inundaciones a lo largo de las riberas del lago en Nueva York y Ontario con las inundaciones río abajo en el río St. Lawrence, en Montreal (Quebec). El plan también pretende restablecer la salud y la diversidad de los humedales costeros y protegerlos de los niveles altos y bajos de agua. Un comité de gestión adaptativa evalúa el rendimiento del plan ante el cambio climático y recomienda ajustes.

#### Resolución de conflictos por el agua en el sistema del lago Ontario y el río St. Lawrence



**El Plan 2014 se elaboró para gestionar los niveles de agua del lago Ontario y el río San Lorenzo, restaurar los ecosistemas y tener en cuenta el cambio climático.**

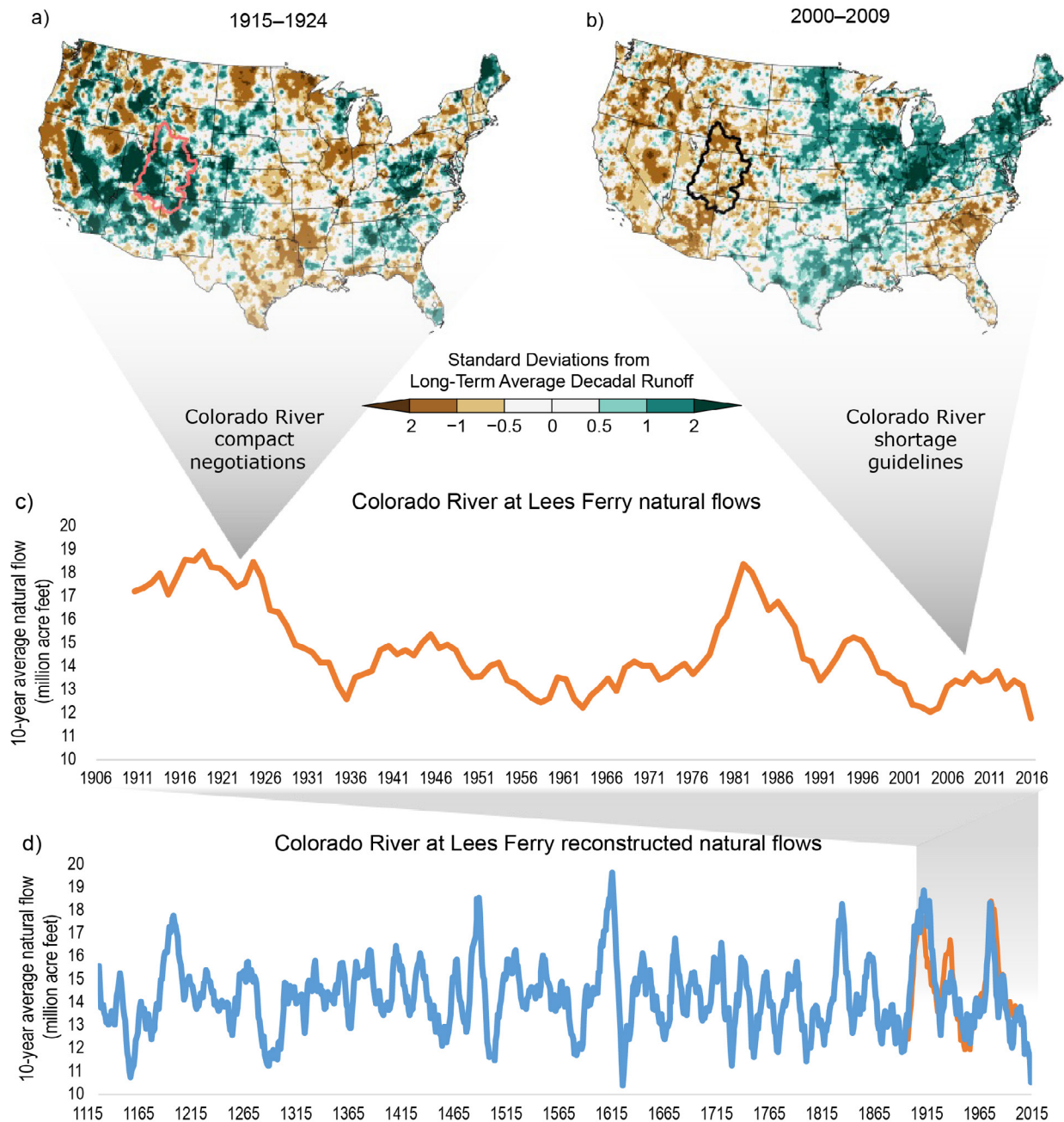
**Figura 4.17.** El mapa muestra el marco geográfico de un plan internacional entre EE. UU. y Canadá para gestionar de forma cooperativa el lago Ontario. El plan equilibra los intereses aguas arriba de la presa Moses-Saunders con los intereses aguas abajo. El marco de colaboración utilizado para elaborar el plan sirve de modelo de un planteamiento acertado para resolver los conflictos relacionados con el agua. Adaptado de International Joint Commission 2014<sup>183</sup>.

## ***El efecto de la variabilidad natural en la política***

Los registros históricos y la evidencia paleoecológica, como los datos de los anillos de los árboles, muestran que la variabilidad natural del sistema climático ha ocasionado períodos húmedos y secos de varias décadas en el pasado <sup>99</sup>. Las proyecciones climáticas indican que este patrón continuará, lo que supone un reto para la planificación y la formulación de políticas de adaptación al cambio climático, y sugiere que son necesarias perspectivas duraderas y realistas a largo plazo para el desarrollo de políticas sólidas. Por ejemplo, la variabilidad natural provocó el período más húmedo de los 1,200 años pasados en el río Colorado a principios del siglo XX (Figura 4.18). El Pacto del Río Colorado, negociado en ese período de relativa abundancia, asignó mucha más agua de la que el río ha proporcionado desde entonces<sup>184</sup>. En los últimos años del siglo XX, los altos niveles sostenidos de los embalses impulsaron la elaboración de directrices para la asignación de excedentes, pero cuando esas directrices terminaron, ya había comenzado la actual sequía de 22 años<sup>73</sup>. Esa sequía ha desencadenado restricciones sin precedentes en el uso del agua y está generando debates políticos más realistas (Recuadro 28.1)<sup>177</sup>. Las proyecciones climáticas e hidrológicas para finales de siglo presentan una variabilidad similar. La amplitud de los períodos húmedos y secos proyectados en el río Colorado para el promedio de 30 años puede ser el doble de la disminución media del caudal prevista para finales de este siglo<sup>185</sup>; en consecuencia, es casi seguro que la variabilidad natural de varias décadas vuelva a provocar períodos húmedos prolongados<sup>186</sup>, aunque disminuidos por el aumento de las temperaturas.

## La variabilidad hidrológica natural influye en la política

Variations in decadal runoff



**La variabilidad hidrológica natural puede fomentar la urgencia o la complacencia en la planificación a largo plazo.**

**Figura 4.18.** La figura muestra la variabilidad hidrológica tanto en el espacio como en el tiempo: (a, b) variabilidad de la escorrentía (un sustituto de la variabilidad del caudal) en todo el país entre dos décadas, mostrando el límite de la cuenca superior del río Colorado; y variabilidad del caudal a lo largo del tiempo con (c) estimaciones de los caudales del río Colorado a partir de observaciones históricas y (d) caudales reconstruidos a partir de anillos de árboles antiguos (línea azul), con los datos de (c) en naranja. Las cuñas apuntan a dos eventos políticos negociados. Créditos de la figura: Lynker y University of Colorado Boulder.

## **Retos de adaptación a los que se enfrentan las comunidades tribales e indígenas**

Para hacer frente a los impactos climáticos relacionados con el agua, las tribus han expresado la necesidad de realizar evaluaciones del impacto climático como primer paso para la planificación de la resiliencia y han identificado la información sobre los impactos del cambio climático en el agua como una de las principales prioridades<sup>187</sup>. Muchas comunidades indígenas carecen de datos sobre la calidad del agua a pesar de que sufren de forma desproporcionada deficiencias en esta<sup>188</sup>. Otros tipos de datos fundamentales para las decisiones tribales sobre la gestión del agua son el caudal, la temperatura, las precipitaciones, el manto de nieve y la humedad del suelo, pero no siempre están disponibles a través de fuentes de información federales<sup>187</sup>.

La seguridad alimentaria, la protección de los conocimientos tradicionales y la capacidad de las tribus para aplicar planes de adaptación, supervisar y recopilar datos y realizar evaluaciones de la vulnerabilidad climática son también prioridades importantes. Las tribus reconocidas por el gobierno federal tienen derecho a recibir ayuda federal para la adaptación al cambio climático, pero se enfrentan a obstáculos para acceder a estos recursos limitados, como los requisitos de las agencias (p. ej., los fondos de contrapartida), la falta de capacidad tribal y como proceder ante los procesos interinstitucionales.

## **Progresos y brechas en la calidad y facilidad de uso de la información**

La planificación de los recursos hídricos sigue basándose en registros hidrológicos del pasado que no reflejan los efectos del cambio climático. Aunque algunas agencias federales, estatales y locales de mayor tamaño utilizan proyecciones climáticas en la planificación, las proyecciones de precipitaciones, caudales, uso del agua<sup>189</sup> y eventos extremos a escala de las cuencas hidrográficas locales, sobre todo fuera de EE. UU. continental. El uso de proyecciones también es costoso porque las herramientas y técnicas son especializadas y no están estandarizadas. Por último, los modelos climáticos proyectan una amplia gama de incertidumbres (Figura 4.3), lo que obliga a los planificadores a utilizar su mejor juicio sobre cómo aplicar la información.

Los datos son fundamentales para la adaptación. Las agencias estatales y federales llevan más de un siglo recopilando valiosos datos sobre el clima, la hidrología y el uso del agua, pero estos datos son escasos en las áreas poco pobladas y de bajos ingresos<sup>185</sup>. Cada vez más, la modelización y la teledetección están colmando esas brechas. Los datos medioambientales y de elevación de alta resolución recogidos desde plataformas aéreas y espaciales proporcionan información topográfica e hidrológica detallada que puede utilizarse para cartografiar los peligros de inundación y el manto de nieve<sup>190,191</sup> y perfeccionar la simulación de nieve en tiempo real.<sup>192,193</sup> La evapotranspiración se estima mediante teledetección por satélite combinada con modelos de vegetación<sup>194</sup>, proporcionando una alerta temprana de las sequías incipientes<sup>195</sup>, y los satélites se utilizan ahora para detectar el agotamiento de las aguas subterráneas<sup>196</sup>. No obstante, la ampliación de la recogida directa de datos de observación sigue siendo clave para el seguimiento de las condiciones medioambientales y para apoyar el desarrollo y la comprobación de datos y modelos obtenidos por teledetección.

## Cuentas trazables

### Descripción del proceso

Con el apoyo del punto de contacto del capítulo y del autor principal de la coordinación federal, el autor principal del capítulo seleccionó a los autores por su experiencia en la evaluación de los impactos climáticos sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos del país y las consecuencias de dichos impactos para los sistemas humanos y naturales, con énfasis en la capacidad de los autores para aportar diversas perspectivas al equipo. El equipo está formado por expertos procedentes de varias regiones de todo el país que trabajan en distintos tipos de empleo (es decir, empresas privadas, instituciones académicas y administraciones locales, estatales y federales), proceden de diversos ámbitos y representan una gama de combinaciones de edad y sexo. El equipo se reunió virtualmente en varias ocasiones para analizar el capítulo, y cada autor ofreció sus propias prioridades sobre lo que debería abarcar un capítulo sobre los recursos hídricos del país, teniendo en cuenta las metas de esta Evaluación, los temas tratados en anteriores Evaluaciones Nacionales del Clima (National Climate Assessments, NCA) y los temas de los otros 31 capítulos de la NCA5. Los debates del equipo giraron en torno a estas preguntas: ¿Cómo influyen los cambios climáticos en el volumen y el movimiento del agua? ¿Cómo cambian los extremos y la noción de extremos? ¿Cómo los cambios climáticos afectan los sistemas naturales y artificiales? ¿Cuáles son las consideraciones de justicia medioambiental y la distribución de los impactos? ¿Los datos y herramientas actuales sobre el clima son adecuados para los responsables de la toma de decisiones? ¿Y cuáles son los riesgos climáticos interconectados? Con estas preguntas en mente, el equipo elaboró iterativamente un borrador de esquema para el capítulo. Ese borrador se puso a disposición del público en internet para que lo revisara y comentara. El equipo presentó y participó en un taller virtual, público, de cuatro horas de duración, en el que se recogieron comentarios y sugerencias para el capítulo por parte de los participantes en el taller. En la elaboración del texto del capítulo se han tenido en cuenta los comentarios de los talleres y las observaciones presentadas formalmente. El borrador de la tercera resolución fue presentado al público por cinco de los autores en un seminario web organizado por Western Water Assessment en la University of Colorado. El equipo de autores se reunió virtualmente al menos dos veces al mes durante los periodos en que el borrador no estaba para revisión. El equipo también se reunió en persona en la NCA5 All-Author Meeting celebrada en abril de 2023 en Washington, DC. Las reuniones sirvieron para fijar plazos provisionales, evaluar el estado de las tareas, debatir sobre las opciones lingüísticas, llegar a un consenso sobre los Mensajes Clave y las cifras, elaborar respuestas a los comentarios sobre los borradores y apoyarse mutuamente con referencias y revisiones de textos.

### Mensaje clave 4.1

## El cambio climático seguirá provocando profundos cambios en el ciclo del agua

### Descripción de la base de evidencia

Los mapas de componentes hidrológicos mostrados en las Figuras 4.3, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.9 constituyen parte de la base de evidencia. Muestran proyecciones de los componentes del ciclo del agua a mediados del siglo XXI basadas en un escenario intermedio (RCP4.5). Las proyecciones de los componentes del ciclo del agua están disponibles tanto para el escenario RCP4.5 como para el RCP8.5, pero ambos escenarios muestran respuestas hidrológicas similares a mediados de siglo, ninguno de ellos está disponible como proyecciones a 100 años, y el espacio en este capítulo es limitado; en consecuencia, aquí solo se presentan las proyecciones RCP4.5. El mapa central de EE. UU. continental (CONUS) en cada una de estas figuras representa el promedio de las 32 proyecciones de del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) elegidas para esta discusión.<sup>197</sup> Los mapas de

Alaska y Hawaii representan el promedio de 10 proyecciones CMIP5. El 20 % más húmedo y seco de las proyecciones muestran la gama de resultados del conjunto de 32 proyecciones para CONUS, e ilustra la incertidumbre que rodea las respuestas del ciclo del agua al cambio climático. Fuera de CONUS, las proyecciones climáticas a escala reducida son limitadas, especialmente las necesarias para cartografiar los cambios proyectados en los componentes hidrológicos para el Caribe estadounidense y las Islas del Pacífico asociadas a EE. UU. La ausencia de proyecciones sobre la evapotranspiración real, la humedad del suelo y la escorrentía contribuye a la incertidumbre a la hora de evaluar los futuros retos en materia de seguridad hídrica para estas regiones. Encontrará más información sobre los datos utilizados para generar los mapas en los metadatos de las figuras.

Dado que este capítulo se centra en el agua dulce terrestre, los autores se basaron en gran medida en el Capítulo 2 (Tendencias climáticas) y en el Capítulo 3 (Procesos del sistema terrestre) para sus evaluaciones de las tendencias y proyecciones de precipitaciones, en particular las tendencias y proyecciones de precipitaciones extremas.

En cuanto a la evapotranspiración, hay consenso general en que el calentamiento de las temperaturas aumentará la demanda de evaporación (evapotranspiración potencial [potential evapotranspiration, PET]) en todo el país (Capítulo 3)<sup>43,44,75</sup>; sin embargo, las incertidumbres en la respuesta de la vegetación al calentamiento reducen la confianza en las proyecciones de evapotranspiración (ET)<sup>75</sup>. En muchas partes del país, los cambios proyectados en la evapotranspiración anual para finales de este siglo no son sólidos, y hay desacuerdos entre los modelos en los estados del sur y en partes del centro de EE. UU.<sup>43</sup>. El grado y a veces la dirección de los cambios observados en la PET y la ET también son menos seguros, sobre todo al este de las Montañas Rocosas, debido a las diferencias en las tendencias de las variables que fuerzan la PET<sup>12</sup>. Estas tendencias tampoco están bien respaldadas por la observación directa. Se carece de información sobre las tendencias más recientes de la evaporación en bandeja en EE. UU. La evaporación en bandeja es un concepto útil para estimar la demanda de evaporación atmosférica, pero se ve muy afectada por las condiciones ambientales locales, que pueden ocasionar tendencias contradictorias en la evaporación en bandeja en una región más amplia<sup>198</sup>, como se observa en EE. UU.<sup>199</sup>. Por ejemplo, el aumento de la humedad local (p. ej., por el riego) o los cambios en el uso del suelo (p. ej., cambios en la densidad de árboles cerca de las bandejas) podrían afectar la evaporación de las bandejas. Por lo tanto, es posible que la evaporación en bandeja no proporcione una indicación fiable de las tendencias a escala regional de la demanda evaporativa. El desacuerdo entre los datos observacionales y los reanálisis limita nuestra confianza en las tendencias pasadas de la ET y la PET. Las complejidades relacionadas con la vegetación, así como los efectos contrapuestos de múltiples impulsores de la evaporación, dificultan la asignación de una probabilidad y una confianza coherentes a escala nacional. Sin embargo, el balance de la evidencia sugiere con *confianza media* que se espera que aumente la evaporación en lugares donde la humedad no sea un factor limitante de la demanda atmosférica.

Existe un consenso generalizado sobre el hecho de que el aumento de la temperatura reducirá la proporción de precipitaciones estadounidenses que caen en forma de nieve<sup>14,15,24,43</sup>, disminuirá la extensión de la nieve<sup>24,25</sup>, adelantará la sincronización de las tasas y pulsos de deshielo,<sup>16,27</sup> aumentará la prevalencia de eventos de lluvia sobre los de nieve,<sup>70,71</sup> e influirá en la forma en que los recursos hídricos de la nieve se dividen en escorrentía<sup>19,20</sup>.

Dado que algunas partes de Alaska y las elevaciones más altas de EE. UU. continental pueden ser lo suficientemente frías como para mantener las nevadas en climas futuros, algunos estudios han proyectado aumentos del volumen de nieve en estos lugares con futuros aumentos de las precipitaciones. Sin embargo, se espera que esos aumentos de nieve se vean ampliamente superados por las futuras disminuciones de nieve en otros lugares, especialmente en el oeste de EE. UU. y a finales del siglo XXI para todos los escenarios intermedios (RCP4.5 y SSP2-4.5) y superiores.

Está bien establecido que las aguas subterráneas y superficiales son recursos conectados y que las aguas subterráneas pueden ayudar a estabilizar los suministros de aguas superficiales<sup>47,48</sup>. Del mismo modo, hay acuerdo en que la pérdida de aguas subterráneas poco profundas puede exacerbar las sequías y disminuir el caudal de los arroyos. También hay acuerdo en que las temperaturas más cálidas aumentarán la demanda de agua y que esto podría incrementar el bombeo de aguas subterráneas<sup>52,53,54</sup>.

### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Las incertidumbres se derivan de las proyecciones futuras del clima. Esto puede ser especialmente cierto para las proyecciones de finales del siglo XXI que dependen del grado en que las sociedades responderán al cambio climático. La literatura emplea diferentes proyecciones y escenarios de emisiones, así como medidas y mediciones que varían en su grado de sensibilidad climática, lo que resulta en estudios que no siempre son directamente comparables.

Comprender las respuestas recientes y las posibles respuestas futuras de las inundaciones al cambio climático es difícil por varias razones. Las inundaciones son el producto de complejas interacciones subestacionales a interanuales entre las precipitaciones, la humedad del suelo, la evapotranspiración, el manto de nieve/fundido y otros procesos. Aislar los efectos del cambio climático en las inundaciones continentales se complica aún más por el “replanteamiento” hidrológico provocado por la urbanización y las presas. Por estas razones, la traducción de las tendencias pluviométricas en cambios en las inundaciones es compleja y poco conocida. Con el estudio nacional<sup>65,200</sup> y global<sup>201</sup> de los registros históricos de inundaciones se ha llegado a la conclusión de que las influencias climáticas han sido relativamente limitadas, lo que contradice un estudio anterior que sostenía que las mayores inundaciones han aumentado en severidad<sup>202</sup>. Este último argumento se contradice además por la evidencia de que las inundaciones en el centro de EE. UU. se han vuelto más comunes pero no más intensas<sup>203,204</sup>.

Sin embargo, las grandes inundaciones son, por definición, raras, lo que dificulta la detección y atribución de los cambios. Así pues, la ausencia de tendencias estadísticamente significativas en las inundaciones observadas no indica necesariamente que tales eventos no estén cambiando. De hecho, un número relativamente limitado de estudios de casos centrados geográficamente han pintado cuadros complejos de cambios de inundaciones relacionados con el clima que faltan en análisis regionales y nacionales más amplios. Otros estudios de casos basados en lugares específicos —en vez de análisis a escala regional o nacional— podrían ayudar a desentrañar las complejas interacciones entre los factores climáticos y no climáticos de las inundaciones.

Dada la influencia de primer orden de los cambios de temperatura y precipitación sobre las nevadas, existe una gran certeza de que en el futuro cambiarán la cubierta de nieve, el volumen de nieve y la persistencia de la nieve en EE. UU.<sup>24</sup>. Sin embargo, existe cierto desacuerdo en la literatura sobre el alcance y la dirección (positiva o negativa) del cambio en la disponibilidad de agua superficial con los futuros cambios climáticos. Los estudios existentes indican tanto aumentos como disminuciones de la escorrentía futura para diferentes regímenes hidroclimáticos de EE. UU.

En particular, existe incertidumbre sobre el grado en que la temperatura puede afectar el caudal en algunos sistemas fluviales importantes del Oeste<sup>205,206</sup>. Sigue habiendo desacuerdos significativos en la dirección de las tendencias observadas de la humedad del suelo<sup>38,39,40</sup>, en gran parte porque puede ser difícil estimarla con teledetección o modelos, y la red existente de monitorización *in situ* de la humedad del suelo es insuficiente<sup>37</sup>. También pueden introducirse incertidumbres porque no todos los productos son directamente comparables, ya que captan tendencias a profundidades ligeramente diferentes, aunque las diferencias modestas probablemente no sean una fuente importante de error. También existe incertidumbre en las proyecciones de humedad del suelo en relación con el modelo, la estación y la profundidad del suelo<sup>38,42,43</sup>.



Del mismo modo, existe incertidumbre tanto en la magnitud como en la dirección de los cambios en el almacenamiento de aguas subterráneas, debido principalmente a la incertidumbre en la futura política de gestión de las aguas subterráneas y a la incertidumbre en la futura recarga. Esto se debe a la incertidumbre tanto en la respuesta humana a las condiciones climáticas cambiantes como a las brechas en la investigación para cuantificar la recarga natural de las aguas subterráneas. El bombeo de aguas subterráneas está controlado por una miríada de factores humanos como la población, la política de aguas, la elección de cultivos y la tecnología de riego. Aunque está bien establecido que las temperaturas más cálidas pueden aumentar la demanda de agua<sup>52,53,54</sup>, y las tendencias históricas demuestran un uso insostenible de las aguas subterráneas en el pasado (como se analiza en la NCA4), los futuros aumentos del bombeo de aguas subterráneas dependerán de las prácticas de gestión del agua y la política. La recarga de aguas subterráneas es igualmente incierta<sup>50,51</sup>. Se espera que el aumento previsto de grandes precipitaciones e inundaciones aumente la recarga (conocida como eventos de recarga). Sin embargo, la cantidad de esta recarga es menos segura y depende en gran medida de la naturaleza y el momento de las tormentas que se produzcan. Además, aunque el aumento de la recarga puede verse contrarrestado por cambios en el uso del agua por parte de las plantas y en el manto de nieve pueden disminuir la recarga natural, la magnitud de estos cambios en la recarga no se ha cuantificado bien. Separar los efectos del bombeo de aguas subterráneas de las tendencias climáticas es especialmente difícil debido a la falta de pozos de control de aguas subterráneas a largo plazo, sobre todo fuera de las áreas con mayor desarrollo de aguas subterráneas.

### Descripción de confianza y probabilidad

El equipo de autores determinó que la evidencia apunta a *confianza media* de que seguirá habiendo aumentos de las precipitaciones en Alaska y en las regiones norte y este de EE. UU. y disminuciones de las precipitaciones en el Caribe y el Suroeste. A pesar de las incertidumbres persistentes en torno a las precipitaciones promedio, hay *muy alta confianza* tanto de las observaciones como de las proyecciones se desprende que las precipitaciones extremas son cada vez más frecuentes en todo el país, y es *muy probable* que esta tendencia continúe en el futuro. El desacuerdo entre los datos observacionales y los reanálisis limita nuestra confianza en las tendencias pasadas de la ET y la PET. Las complejidades relacionadas con la vegetación, así como los efectos contrapuestos de múltiples impulsores de la evaporación, dificultan la asignación de una probabilidad y una confianza coherentes a escala nacional. Sin embargo, el balance de la evidencia sugiere con *confianza media* que la evaporación aumentará en los lugares donde la humedad no sea un factor limitante de la demanda atmosférica. Según las tendencias actuales y las proyecciones de los modelos climáticos, existe *alta confianza* y es *muy probable* que el calentamiento de las temperaturas aumente la demanda de aguas superficiales y subterráneas para los cultivos y el uso humano. Dada la influencia directa del aumento de las temperaturas en la nieve, existe *alta confianza* y es *muy probable* que la extensión, el volumen y la duración de la capa de nieve y el deshielo, de los que dependen los sistemas humanos y naturales, se reduzcan y sigan reduciéndose por el calentamiento.

### Mensaje clave 4.2

**Los cambios en el ciclo del agua afectarán todas las comunidades, con impactos desproporcionados para algunas**

### Descripción de la base de evidencia

En la actualidad, los registros de observación abarcan períodos lo suficientemente largos como para evaluar los cambios en el volumen, la variabilidad y la sincronización de la disponibilidad de agua<sup>41</sup>. La magnitud de estos cambios y su concordancia con las proyecciones de los modelos varían de acuerdo con los regímenes hidroclimáticos de EE. UU.

Aunque ha sido difícil establecer vínculos claros entre el aumento de las precipitaciones extremas y las tendencias de las medidas “tradicionales” de la actividad de las inundaciones, como el caudal máximo de los arroyos, los estudios de atribución han adjudicado algunos de los aumentos históricos de los daños por inundaciones a los cambios en las precipitaciones<sup>68,69</sup>. Es probable que muchos de estos aumentos se hayan concentrado en las cuencas urbanizadas, que son más sensibles a las precipitaciones que los entornos rurales y naturales<sup>74</sup>. La vulnerabilidad a las inundaciones, incluso en áreas urbanizadas, tiende a concentrarse en vecindarios históricamente marginados y socioeconómicamente desfavorecidos<sup>130</sup>. Cada vez hay más consenso en que las comunidades sistemáticamente desfavorecidas han sido y seguirán siendo las más afectadas por estos peligros, debido a factores como vigilancia climática/hidrológica inadecuada, mantenimiento diferido de las infraestructuras y acceso insuficiente a los recursos de recuperación<sup>207</sup>.

Existe una amplia literatura que describe los efectos de las inundaciones, los incendios y las sequías en una gran variedad de peligros para la calidad del agua<sup>6</sup>. Estos estudios permiten comprender mejor los efectos de la intensificación de los eventos debidos al cambio climático en la calidad del agua, y cada vez son más frecuentes los estudios específicos sobre los efectos del cambio climático en la calidad del agua. Existen algunos informes sobre beneficios específicos para las concentraciones de contaminantes derivados del aumento o la disminución de las precipitaciones, pero no hay consenso sobre si la calidad del agua mejorará con el cambio climático.

Existe un consenso generalizado en que el aumento de la temperatura del aire impactará en la calidad del agua al aumentar la temperatura del agua, lo que provocará que el agua sea menos rica en oxígeno, exacerbará la proliferación de algas nocivas, aumentará los agentes patógenos y creará problemas de sabor y olor del agua potable<sup>6,7</sup>.

Del mismo modo, existe consenso en que el aumento de las precipitaciones y de su intensidad degradará la calidad del agua debido a los desbordamientos de las aguas pluviales urbanas y del alcantarillado combinado, al aumento de la escorrentía agrícola y a las inundaciones fluviales. Hay menos certidumbre en las regiones del país donde las precipitaciones no aumentan ni disminuyen. Los factores agravantes del aumento de las temperaturas y el envejecimiento de los sistemas de aguas pluviales y de alcantarillado y de los depósitos de agua pueden agravar los problemas debidos al exceso o a la escasez de agua.

La literatura está repleta de observaciones sobre segmentos de la población que se ven afectados negativamente por el cambio climático, especialmente por los peligros relacionados con el agua. Hay consenso en que estos efectos negativos del cambio climático relacionado con el agua se dejarán sentir de forma desproporcionada entre las personas marginadas y con bajos ingresos<sup>122</sup>.

### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Existe una incertidumbre moderada sobre el grado en que los cambios en la superficie terrestre provocarán cambios no estacionarios en el volumen y la sincronización de los recursos hídricos. Faltan investigaciones sobre los vínculos entre el cambio climático y las inundaciones<sup>68</sup>. Existe incertidumbre sobre la medida en que las tormentas de diseño tradicionales —es decir, tormentas de intensidad y duración determinadas, utilizadas en la planificación de llanuras aluviales y del entorno construido— y las hipótesis de inundación basadas en observaciones antiguas reflejan las condiciones de inundación actuales y futuras<sup>171</sup>. La investigación adicional sobre los efectos del cambio climático en la calidad del agua mejoraría nuestra comprensión de los impactos, sobre todo ante factores agravantes como el envejecimiento de las infraestructuras, los incendios forestales y el aumento de la escorrentía agrícola.

## Descripción de confianza y probabilidad

Existe evidencia fehaciente de que el cambio climático provoca una serie de cambios importantes en los ciclos hidrológicos locales y regionales y de que, cuando se combina con cambios en el uso del suelo y otros factores humanos, es *probable* que se produzcan aumentos en la frecuencia, la severidad, la duración y los daños de las inundaciones (*confianza alta*) y aumentan los impactos de las sequías (*confianza media*). Los trabajos sobre los efectos del cambio climático en la calidad del agua son más limitados, por lo que hay *confianza media* en que el cambio climático esté degradando la calidad del agua. Sin embargo, aún hay incertidumbre sobre cómo los factores climáticos pueden influir en las floraciones de algas nocivas, un factor importante en la calidad del agua. Sobre la base de la vasta literatura que documenta los impactos actuales y dispares de las inundaciones, las sequías y las exposiciones que conllevan para las comunidades de primera línea, hay *confianza alta* y es *muy probable* que las comunidades de primera línea corran un riesgo desproporcionado por los peligros relacionados con el agua exacerbados por el cambio climático.

## Mensaje clave 4.3

### Los avances hacia la adaptación han sido desiguales

#### Descripción de la base de evidencia

Hay muchos ejemplos de cambios climáticos que superan la velocidad de adaptación<sup>168,169</sup>, incluso comunidades sorprendidas por precipitaciones extremas y eventos de sequía amplificados por el cambio climático<sup>96,133</sup>. Una amplia gama de literatura de la década pasada ha identificado la seguridad y los riesgos económicos planteados por el envejecimiento de los sistemas de agua y el cambio de la hidrología<sup>87</sup>. Desde la publicación de la NCA4, la ampliación de la recogida de datos, la mejora de las proyecciones climáticas y de los pronósticos a corto y medio plazos contribuyen a mejorar la gestión y la planificación de los recursos hídricos. Sin embargo, los gerentes locales de los recursos hídricos siguen luchando por encontrar conocimientos y datos científicos accesibles y utilizables a la escala espacial adecuada, y siguen basándose en registros históricos que a menudo no reflejan la disponibilidad y la sincronización actuales y futuros del agua. La literatura sobre gestión de desastres contiene muchos ejemplos de complacencia pública o urgencia en la preparación ante eventos extremos<sup>208</sup>.

Una literatura cada vez más abundante se centra en proporcionar información científica más utilizable para la planificación y gestión de los recursos hídricos<sup>164</sup>. Se ha trabajado menos en la evaluación del éxito y la equidad de estos enfoques<sup>209</sup>.

Varias revisiones retrospectivas destacan la omisión de las voces de primera línea, tribales e indígenas y de los beneficios de los proyectos hídricos<sup>180</sup>. Los derechos legales de larga data, establecidos antes de que el cambio climático fuera una consideración, están bien documentados. La mayor parte de los derechos sobre el agua y los derechos legales en el Oeste pertenecen a tribus y a usuarios agrícolas del agua, pero se rigen por decretos, acuerdos y pactos estatales y federales que no se redactaron para ser flexibles o responder a un clima cambiante. La literatura actual documenta estas barreras y evalúa los enfoques emergentes para superarlas<sup>177</sup>.

#### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Aumentar la resiliencia climática de los sistemas hidrológicos es todo un reto, dada la elevada incertidumbre de la variabilidad y el cambio climáticos. Las brechas en los datos sobre el agua a escala local son especialmente problemáticas, sobre todo a la hora de trasladar las proyecciones de los modelos climáticos globales al ámbito regional y local. Los enfoques a nivel de sistema y el uso de métricas de resiliencia también son áreas susceptibles de mejora.

Existe una incertidumbre moderada sobre el grado en que los cambios en las características de la superficie terrestre provocarán cambios en el volumen y la sincronización de los recursos hídricos, y sobre el grado en que las infraestructuras existentes y las asignaciones históricamente definidas podrán adaptarse. Gran parte de esta incertidumbre está relacionada con la rapidez con que las acciones y políticas humanas reaccionan ante los riesgos hidrológicos.

### Descripción de confianza y probabilidad

El aumento de los costos de los desastres relacionados con el agua, las comunidades mal preparadas para las inundaciones y las sequías y los usuarios de las cuencas hidrográficas que aplazan decisiones difíciles sobre la asignación del agua son solo algunas de las evidencias que conducen a una *confianza alta* de que los esfuerzos de adaptación están siendo desiguales en relación con el ritmo del cambio climático y que es *muy probable* (con *confianza alta*) debido en parte a la variabilidad natural del clima que enmascara los cambios a largo plazo. La historia de la toma de decisiones sobre los recursos hídricos pocas veces incluye la participación de personas o comunidades de primera línea, tribales o indígenas. Su exclusión de negociaciones, pactos, decretos y otras acciones de asignación apoya una evaluación de *confianza alta* de que las comunidades de primera línea, tribales e indígenas no han tenido plena representación en la toma de decisiones sobre los recursos hídricos en el pasado, a pesar de verse afectadas por esas decisiones.

## Referencias

1. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2391 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
2. NCEI, 2023: U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/>
3. Lall, U., T. Johnson, P. Colohan, A. Aghakouchak, C. Brown, G. McCabe, R. Pulwarty, and A. Sankarasubramanian, 2018: Ch. 3. Water. In: *Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II*. Reidmiller, D.R., C.W. Avery, D. Easterling, K. Kunkel, K.L.M. Lewis, T.K. Maycock, and B.C. Stewart, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 145–173. <https://doi.org/10.7930/nca4.2018.ch3>
4. Delpla, I., A.-V. Jung, E. Baures, M. Clement, and O. Thomas, 2009: Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International*, **35** (8), 1225–1233. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.07.001>
5. NCEH, 2022: Climate Effects on Health. Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Environmental Health, accessed May 3, 2022. <https://www.cdc.gov/climateandhealth/effects/default.htm>
6. Nijhawan, A. and G. Howard, 2022: Associations between climate variables and water quality in low- and middle-income countries: A scoping review. *Water Research*, **210**, 117996. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117996>
7. Shukla, N., S. Gupta, and S. Rai, 2023: Ch. 7. Potential impacts of climatic changes and human activity on water quality. In: *Environmental Processes and Management: Tools and Practices for Groundwater*. Shukla, P., P. Singh, and R.M. Singh, Eds. Springer, Cham, Switzerland, 103–111. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20208-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20208-7_7)
8. Chow, A.T., K.-P. Tsai, T.S. Fegel, D.N. Pierson, and C.C. Rhoades, 2019: Lasting effects of wildfire on disinfection by-product formation in forest catchments. *Journal of Environmental Quality*, **48** (6), 1826–1834. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.04.0172>
9. Robinne, F.-N., D.W. Hallema, K.D. Bladon, M.D. Flannigan, G. Boisramé, C.M. Bréthaut, S.H. Doerr, G. Di Baldassarre, L.A. Gallagher, A.K. Hohner, S.J. Khan, A.M. Kinoshita, R. Mordecai, J.P. Nunes, P. Nyman, C. Santín, G. Sheridan, C.R. Stoof, M.P. Thompson, J.M. Waddington, and Y. Wei, 2021: Scientists' warning on extreme wildfire risks to water supply. *Hydrological Processes*, **35** (5), e14086. <https://doi.org/10.1002/hyp.14086>
10. Corson-Dosch, H.R., C.S. Nell, R.E. Volentine, A.A. Archer, E. Bechtel, J.L. Bruce, N. Felts, T.A. Gross, D. Lopez-Trujillo, C.E. Riggs, and E.K. Read, 2023: The Water Cycle. USGS General Information Product 221, 1 sheet. U.S. Geological Survey, Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/gip221>
11. Jasinski, M.F., J.S. Borak, S.V. Kumar, D.M. Mocko, C.D. Peters-Lidard, M. Rodell, H. Rui, H.K. Beaudoin, B.E. Vollmer, K.R. Arsenault, B. Li, J.D. Bolten, and N. Tangdamrongsub, 2019: NCA-LDAs: Overview and analysis of hydrologic trends for the National Climate Assessment. *Journal of Hydrometeorology*, **20** (8), 1595–1617. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-17-0234.1>
12. Albano, C.M., J.T. Abatzoglou, D.J. McEvoy, J.L. Huntington, C.G. Morton, M.D. Dettinger, and T.J. Ott, 2022: A Multidataset assessment of climatic drivers and uncertainties of recent trends in evaporative demand across the continental United States. *Journal of Hydrometeorology*, **23** (4), 505–519. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-21-0163.1>
13. Tercek, M.T., D. Thoma, J.E. Gross, K. Sherrill, S. Kagone, and G. Senay, 2021: Historical changes in plant water use and need in the continental United States. *PLoS ONE*, **16** (9), e0256586. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256586>
14. Hale, K.E., A.N. Wlostowski, A.M. Badger, K.N. Musselman, B. Livneh, and N.P. Molotch, 2022: Modeling streamflow sensitivity to climate warming and surface water inputs in a montane catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **39**, 100976. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100976>

15. Harpold, A.A., M.L. Kaplan, P.Z. Klos, T. Link, J.P. McNamara, S. Rajagopal, R. Schumer, and C.M. Steele, 2017: Rain or snow: Hydrologic processes, observations, prediction, and research needs. *Hydrology and Earth System Sciences*, **21** (1), 1–22. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1-2017>
16. Musselman, K.N., N. Addor, J.A. Vano, and N.P. Molotch, 2021: Winter melt trends portend widespread declines in snow water resources. *Nature Climate Change*, **11** (5), 418–424. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01014-9>
17. Barnhart, T.B., N.P. Molotch, B. Livneh, A.A. Harpold, J.F. Knowles, and D. Schneider, 2016: Snowmelt rate dictates streamflow. *Geophysical Research Letters*, **43** (15), 8006–8016. <https://doi.org/10.1002/2016gl069690>
18. Evan, A. and I. Eisenman, 2021: A mechanism for regional variations in snowpack melt under rising temperature. *Nature Climate Change*, **11** (4), 326–330. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00996-w>
19. Harpold, A.A. and P.D. Brooks, 2018: Humidity determines snowpack ablation under a warming climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115** (6), 1215–1220. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716789115>
20. Musselman, K.N., M.P. Clark, C. Liu, K. Ikeda, and R. Rasmussen, 2017: Slower snowmelt in a warmer world. *Nature Climate Change*, **7** (3), 214–219. <https://doi.org/10.1038/nclimate3225>
21. Breckheimer, I.K., E.J. Theobald, N.C. Cristea, A.K. Wilson, J.D. Lundquist, R.M. Rochefort, and J. HilleRisLambers, 2020: Crowd-sourced data reveal social–ecological mismatches in phenology driven by climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **18** (2), 76–82. <https://doi.org/10.1002/fee.2142>
22. Gergel, D.R., B. Nijssen, J.T. Abatzoglou, D.P. Lettenmaier, and M.R. Stumbaugh, 2017: Effects of climate change on snowpack and fire potential in the western USA. *Climatic Change*, **141** (2), 287–299. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1899-y>
23. Nolin, A.W. and C. Daly, 2006: Mapping “at risk” snow in the Pacific Northwest. *Journal of Hydrometeorology*, **7** (5), 1164–1171. <https://doi.org/10.1175/jhm543.1>
24. Siirila-Woodburn, E.R., A.M. Rhoades, B.J. Hatchett, L.S. Huning, J. Szinai, C. Tague, P.S. Nico, D.R. Feldman, A.D. Jones, W.D. Collins, and L. Kaatz, 2021: A low-to-no snow future and its impacts on water resources in the western United States. *Nature Reviews Earth & Environment*, **2** (11), 800–819. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00219-y>
25. Vano, J.A., B. Nijssen, and D.P. Lettenmaier, 2015: Seasonal hydrologic responses to climate change in the Pacific Northwest. *Water Resources Research*, **51** (4), 1959–1976. <https://doi.org/10.1002/2014wr015909>
26. Rauscher, S.A., J.S. Pal, N.S. Diffenbaugh, and M.M. Benedetti, 2008: Future changes in snowmelt-driven runoff timing over the western US. *Geophysical Research Letters*, **35** (16). <https://doi.org/10.1029/2008gl034424>
27. Li, D., M.L. Wrzesien, M. Durand, J. Adam, and D.P. Lettenmaier, 2017: How much runoff originates as snow in the western United States, and how will that change in the future? *Geophysical Research Letters*, **44** (12), 6163–6172. <https://doi.org/10.1002/2017gl073551>
28. Qin, Y., J.T. Abatzoglou, S. Siebert, L.S. Huning, A. AghaKouchak, J.S. Mankin, C. Hong, D. Tong, S.J. Davis, and N.D. Mueller, 2020: Agricultural risks from changing snowmelt. *Nature Climate Change*, **10** (5), 459–465. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0746-8>
29. Sturm, M., M.A. Goldstein, and C. Parr, 2017: Water and life from snow: A trillion dollar science question. *Water Resources Research*, **53** (5), 3534–3544. <https://doi.org/10.1002/2017wr020840>
30. Fountain, A.G., C. Gray, B. Glenn, B. Menounos, J. Pflug, and J.L. Riedel, 2022: Glaciers of the Olympic Mountains, Washington—The past and future 100 years. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **127** (4), e2022JF006670. <https://doi.org/10.1029/2022jf006670>
31. Hugonnet, R., R. McNabb, E. Berthier, B. Menounos, C. Nuth, L. Girod, D. Farinotti, M. Huss, I. Dussailant, F. Brun, and A. Käab, 2021: Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, **592** (7856), 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
32. Menounos, B., R. Hugonnet, D. Shean, A. Gardner, I. Howat, E. Berthier, B. Pelto, C. Tennant, J. Shea, M.-J. Noh, F. Brun, and A. Dehecq, 2019: Heterogeneous changes in western North American glaciers linked to decadal variability in zonal wind strength. *Geophysical Research Letters*, **46** (1), 200–209. <https://doi.org/10.1029/2018gl080942>

33. Mizukami, N., A.J. Newman, J.S. Littell, T.W. Giambelluca, A.W. Wood, E.D. Gutmann, J.J. Hamman, D.R. Gergel, B. Nijssen, M.P. Clark, and J.R. Arnold, 2022: New projections of 21st century climate and hydrology for Alaska and Hawai'i. *Climate Services*, **27**, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100312>
34. Frans, C., E. Istanbuluoglu, D.P. Lettenmaier, A.G. Fountain, and J. Riedel, 2018: Glacier recession and the response of summer streamflow in the Pacific Northwest United States, 1960–2099. *Water Resources Research*, **54** (9), 6202–6225. <https://doi.org/10.1029/2017wr021764>
35. Yang, L., G. Sun, L. Zhi, and J. Zhao, 2018: Negative soil moisture–precipitation feedback in dry and wet regions. *Scientific Reports*, **8** (1), 4026. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22394-7>
36. Zhou, S., A.P. Williams, B.R. Lintner, A.M. Berg, Y. Zhang, T.F. Keenan, B.I. Cook, S. Hagemann, S.I. Seneviratne, and P. Gentile, 2021: Soil moisture–atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. *Nature Climate Change*, **11** (1), 38–44. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00945-z>
37. Ford, T.W. and S.M. Quiring, 2019: Comparison of contemporary in situ, model, and satellite remote sensing soil moisture with a focus on drought monitoring. *Water Resources Research*, **55** (2), 1565–1582. <https://doi.org/10.1029/2018wr024039>
38. Cheng, S., J. Huang, F. Ji, and L. Lin, 2017: Uncertainties of soil moisture in historical simulations and future projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **122** (4), 2239–2253. <https://doi.org/10.1002/2016jd025871>
39. Deng, Y., S. Wang, X. Bai, G. Luo, L. Wu, Y. Cao, H. Li, C. Li, Y. Yang, Z. Hu, and S. Tian, 2020: Variation trend of global soil moisture and its cause analysis. *Ecological Indicators*, **110**, 105939. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105939>
40. Gu, X., J. Li, Y.D. Chen, D. Kong, and J. Liu, 2019: Consistency and discrepancy of global surface soil moisture changes from multiple model-based data sets against satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **124** (3), 1474–1495. <https://doi.org/10.1029/2018jd029304>
41. Su, L., Q. Cao, M. Xiao, D.M. Mocko, M. Barlage, D. Li, C.D. Peters-Lidard, and D.P. Lettenmaier, 2021: Drought variability over the conterminous United States for the past century. *Journal of Hydrometeorology*, **22** (5), 1153–1168. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-20-0158.1>
42. Berg, A., J. Sheffield, and P.C.D. Milly, 2017: Divergent surface and total soil moisture projections under global warming. *Geophysical Research Letters*, **44** (1), 236–244. <https://doi.org/10.1002/2016gl071921>
43. Marvel, K., B.I. Cook, C. Bonfils, J.E. Smerdon, A.P. Williams, and H. Liu, 2021: Projected changes to hydroclimate seasonality in the continental United States. *Earth's Future*, **9** (9), e2021EF002019. <https://doi.org/10.1029/2021ef002019>
44. Condon, L.E., A.L. Atchley, and R.M. Maxwell, 2020: Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States. *Nature Communications*, **11** (1), 873. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14688-0>
45. Maxwell, R.M. and S.J. Kollet, 2008: Interdependence of groundwater dynamics and land-energy feedbacks under climate change. *Nature Geoscience*, **1** (10), 665–669. <https://doi.org/10.1038/ngeo315>
46. Russo, T.A. and U. Lall, 2017: Depletion and response of deep groundwater to climate-induced pumping variability. *Nature Geoscience*, **10** (2), 105–108. <https://doi.org/10.1038/ngeo2883>
47. Condon, L.E. and R.M. Maxwell, 2019: Simulating the sensitivity of evapotranspiration and streamflow to large-scale groundwater depletion. *Science Advances*, **5** (6), 4574. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav4574>
48. Jasechko, S., H. Seybold, D. Perrone, Y. Fan, and J.W. Kirchner, 2021: Widespread potential loss of streamflow into underlying aquifers across the USA. *Nature*, **591** (7850), 391–395. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03311-x>
49. Lovelace, J.K., M.G. Nielsen, A.L. Read, C.J. Murphy, and M.A. Maupin, 2020: Estimated Groundwater Withdrawals from Principal Aquifers in the United States, 2015. Circular 1464. U.S. Geological Survey, Reston, VA, 70 pp. <https://doi.org/10.3133/cir1464>
50. Meixner, T., A.H. Manning, D.A. Stonestrom, D.M. Allen, H. Ajami, K.W. Blasch, A.E. Brookfield, C.L. Castro, J.F. Clark, D.J. Gochis, A.L. Flint, K.L. Neff, R. Niraula, M. Rodell, B.R. Scanlon, K. Singha, and M.A. Walvoord, 2016: Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States. *Journal of Hydrology*, **534**, 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.027>

51. Niraula, R., T. Meixner, F. Dominguez, N. Bhattarai, M. Rodell, H. Ajami, D. Gochis, and C. Castro, 2017: How might recharge change under projected climate change in the western U.S.? *Geophysical Research Letters*, **44** (20), 10407–10418. <https://doi.org/10.1002/2017gl075421>
52. Alam, S., M. Gebremichael, R. Li, J. Dozier, and D.P. Lettenmaier, 2019: Climate change impacts on groundwater storage in the Central Valley, California. *Climatic Change*, **157** (3), 387–406. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02585-5>
53. Taylor, R., 2014: When wells run dry. *Nature*, **516** (7530), 179–180. <https://doi.org/10.1038/516179a>
54. Wada, Y. and M.F.P. Bierkens, 2014: Sustainability of global water use: Past reconstruction and future projections. *Environmental Research Letters*, **9** (10), 104003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104003>
55. Hanson, R.T., L.E. Flint, A.L. Flint, M.D. Dettinger, C.C. Faunt, D. Cayan, and W. Schmid, 2012: A method for physically based model analysis of conjunctive use in response to potential climate changes. *Water Resources Research*, **48** (6). <https://doi.org/10.1029/2011wr010774>
56. Scanlon, B.R., C.C. Faunt, L. Longuevergne, R.C. Reedy, W.M. Alley, V.L. McGuire, and P.B. McMahon, 2012: Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109** (24), 9320–9325. <https://doi.org/10.1073/pnas.1200311109>
57. Dudley, R.W., G.A. Hodgkins, M.R. McHale, M.J. Kolian, and B. Renard, 2017: Trends in snowmelt-related streamflow timing in the conterminous United States. *Journal of Hydrology*, **547**, 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.051>
58. Das, T., D.W. Pierce, D.R. Cayan, J.A. Vano, and D.P. Lettenmaier, 2011: The importance of warm season warming to western U.S. streamflow changes. *Geophysical Research Letters*, **38** (23). <https://doi.org/10.1029/2011gl049660>
59. Chegwiddden, O.S., D.E. Rupp, and B. Nijssen, 2020: Climate change alters flood magnitudes and mechanisms in climatically-diverse headwaters across the northwestern United States. *Environmental Research Letters*, **15** (9), 094048. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab986f>
60. Naz, B.S., S.-C. Kao, M. Ashfaq, H. Gao, D. Rastogi, and S. Gangrade, 2018: Effects of climate change on streamflow extremes and implications for reservoir inflow in the United States. *Journal of Hydrology*, **556**, 359–370. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.027>
61. England Jr., J.F., T.A. Cohn, B.A. Faber, J.R. Stedinger, W.O. Thomas Jr., A.G. Veilleux, J.E. Kiang, and R.R. Mason Jr., 2019: Guidelines for Determining Flood Flow Frequency—Bulletin 17C. Techniques and Methods, book 4, chap. B5. U.S. Geological Survey, Reston, VA, 148 pp. <https://doi.org/10.3133/tm4b5>
62. Serinaldi, F. and C.G. Kilsby, 2015: Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. *Advances in Water Resources*, **77**, 17–36. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>
63. Sivapalan, M. and J.M. Samuel, 2009: Transcending limitations of stationarity and the return period: Process-based approach to flood estimation and risk assessment. *Hydrological Processes*, **23** (11), 1671–1675. <https://doi.org/10.1002/hyp.7292>
64. Yu, G., D.B. Wright, Z. Zhu, C. Smith, and K.D. Holman, 2019: Process-based flood frequency analysis in an agricultural watershed exhibiting nonstationary flood seasonality. *Hydrology and Earth System Sciences*, **23** (5), 2225–2243. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2225-2019>
65. Hodgkins, G.A., R.W. Dudley, S.A. Archfield, and B. Renard, 2019: Effects of climate, regulation, and urbanization on historical flood trends in the United States. *Journal of Hydrology*, **573**, 697–709. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.102>
66. Yu, G., D.B. Wright, and Z. Li, 2020: The upper tail of precipitation in convection-permitting regional climate models and their utility in nonstationary rainfall and flood frequency analysis. *Earth's Future*, **8** (10), e2020EF001613. <https://doi.org/10.1029/2020ef001613>
67. Grillakis, M.G., A.G. Koutroulis, J. Komma, I.K. Tsanis, W. Wagner, and G. Blöschl, 2016: Initial soil moisture effects on flash flood generation—A comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions. *Journal of Hydrology*, **541**, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.007>
68. Sharma, A., C. Wasko, and D.P. Lettenmaier, 2018: If precipitation extremes are increasing, why aren't floods? *Water Resources Research*, **54** (11), 8545–8551. <https://doi.org/10.1029/2018wr023749>



69. Wasko, C. and R. Nathan, 2019: Influence of changes in rainfall and soil moisture on trends in flooding. *Journal of Hydrology*, **575**, 432–441. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.054>
70. Il Jeong, D. and L. Sushama, 2018: Rain-on-snow events over North America based on two Canadian regional climate models. *Climate Dynamics*, **50** (1), 303–316. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3609-x>
71. Musselman, K.N., F. Lehner, K. Ikeda, M.P. Clark, A.F. Prein, C. Liu, M. Barlage, and R. Rasmussen, 2018: Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America. *Nature Climate Change*, **8** (9), 808–812. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0236-4>
72. Ebel, B.A., 2020: Temporal evolution of measured and simulated infiltration following wildfire in the Colorado Front Range, USA: Shifting thresholds of runoff generation and hydrologic hazards. *Journal of Hydrology*, **585**, 124765. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124765>
73. Williams, A.P., B.I. Cook, and J.E. Smerdon, 2022: Rapid intensification of the emerging southwestern North American megadrought in 2020–2021. *Nature Climate Change*, **12** (3), 232–234. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01290-z>
74. Hettiarachchi, S., C. Wasko, and A. Sharma, 2018: Increase in flood risk resulting from climate change in a developed urban watershed—The role of storm temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22** (3), 2041–2056. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2041-2018>
75. Hobbins, M., I. Rangwala, J. Barsugli, and C. Dewes, 2019: Ch. 25. Extremes in evaporative demand and their implications for droughts and drought monitoring in the 21st century. In: *Extreme Hydrology and Climate Variability*. Melesse, A.M., W. Abtew, and G. Senay, Eds. Elsevier, 325–341. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815998-9.00025-7>
76. Overpeck, J.T. and B. Udall, 2020: Climate change and the aridification of North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117** (22), 11856–11858. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006323117>
77. Fosu, B.O., S.-Y. Simon Wang, and J.-H. Yoon, 2016: The 2014/15 snowpack drought in Washington State and its climate forcing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **97** (12), S19–S24. <https://doi.org/10.1175/bams-d-16-0154.1>
78. Belmecheri, S., F. Babst, E.R. Wahl, D.W. Stahle, and V. Trouet, 2016: Multi-century evaluation of Sierra Nevada snowpack. *Nature Climate Change*, **6** (1), 2–3. <https://doi.org/10.1038/nclimate2809>
79. Margulis, S.A., G. Cortés, M. Giroto, L.S. Huning, D. Li, and M. Durand, 2016: Characterizing the extreme 2015 snowpack deficit in the Sierra Nevada (USA) and the implications for drought recovery. *Geophysical Research Letters*, **43** (12), 6341–6349. <https://doi.org/10.1002/2016gl068520>
80. Carlton, J., 2015: Snow drought saps Washington state's economy. *Wall Street Journal*, July 1, 2015. <https://www.wsj.com/articles/snow-drought-saps-washington-states-economy-1435801630>
81. Sugg, Z.P., 2018: An equity autopsy: Exploring the role of water rights in water allocations and impacts for the Central Valley Project during the 2012–2016 California drought. *Resources*, **7** (1), 12. <https://doi.org/10.3390/resources7010012>
82. Davenport, F.V., M. Burke, and N.S. Diffenbaugh, 2021: Contribution of historical precipitation change to US flood damages. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (4), e2017524118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2017524118>
83. Alaoui, A., M. Rogger, S. Peth, and G. Blöschl, 2018: Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology*, **557**, 631–642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.052>
84. Mississippi River Commission, 2012: 2011 Mississippi River and Tributaries Flood Report. Mississippi River Commission, 45 pp. [https://www.mvd.usace.army.mil/portals/52/docs/mrc/mrc\\_2011\\_flood\\_report.pdf](https://www.mvd.usace.army.mil/portals/52/docs/mrc/mrc_2011_flood_report.pdf)
85. Harris, A.R., E.N. Fidan, N.G. Nelson, R.E. Emanuel, T. Jass, S. Kathariou, J. Niedermeyer, M. Sharara, F.L. de los Reyes, D.A. Riveros-Iregui, and J.R. Stewart, 2021: Microbial contamination in environmental waters of rural and agriculturally-dominated landscapes following Hurricane Florence. *ACS ES&T Water*, **1** (9), 2012–2019. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00103>
86. Schaffer-Smith, D., S.W. Myint, R.L. Muenich, D. Tong, and J.E. DeMeester, 2020: Repeated hurricanes reveal risks and opportunities for social-ecological resilience to flooding and water quality problems. *Environmental Science & Technology*, **54** (12), 7194–7204. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07815>

87. ASCE, 2021: A Comprehensive Assessment of America's Infrastructure: 2021 Report Card for America's Infrastructure. American Society of Civil Engineers. <https://infrastructurereportcard.org/>
88. Roseboro, A., M.N. Torres, Z. Zhu, and A.J. Rabideau, 2021: The impacts of climate change and porous pavements on combined sewer overflows: A case study of the city of Buffalo, New York, USA. *Frontiers in Water*, **3**, 725174. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.725174>
89. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019: *Framing the Challenge of Urban Flooding in the United States*. The National Academies Press, Washington, DC, 100 pp. <https://doi.org/10.17226/25381>
90. Pieper, K.J., C.N. Jones, W.J. Rhoads, M. Rome, D.M. Gholson, A. Katner, D.E. Boellstorff, and R.E. Beighley, 2021: Microbial contamination of drinking water supplied by private wells after Hurricane Harvey. *Environmental Science & Technology*, **55** (12), 8382–8392. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07869>
91. Wells, M.L., B. Karlson, A. Wulff, R. Kudela, C. Trick, V. Asnaghi, E. Berdalet, W. Cochlan, K. Davidson, M. De Rijcke, S. Dutkiewicz, G. Hallegraeff, K.J. Flynn, C. Legrand, H. Paerl, J. Silke, S. Suikkanen, P. Thompson, and V.L. Trainer, 2020: Future HAB science: Directions and challenges in a changing climate. *Harmful Algae*, **91**, 101632. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101632>
92. AghaKouchak, A., A. Mirchi, K. Madani, G. Di Baldassarre, A. Nazemi, A. Alborzi, H. Anjileli, M. Azarderakhsh, F. Chiang, E. Hassanzadeh, L.S. Huning, I. Mallakpour, A. Martinez, O. Mazdiyasn, H. Mofstakhari, H. Norouzi, M. Sadegh, D. Sadeqi, A.F. Van Loon, and N. Wanders, 2021: Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities. *Reviews of Geophysics*, **59** (2), e2019RG000683. <https://doi.org/10.1029/2019rg000683>
93. Crausbay, S.D., J. Betancourt, J. Bradford, J. Cartwright, W.C. Dennison, J. Dunham, C.A.F. Enquist, A.G. Frazier, K.R. Hall, J.S. Littell, C.H. Luce, R. Palmer, A.R. Ramirez, I. Rangwala, L. Thompson, B.M. Walsh, and S. Carter, 2020: Unfamiliar territory: Emerging themes for ecological drought research and management. *One Earth*, **3** (3), 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.019>
94. Mankin, J.S., I. Simpson, A. Hoell, R. Fu, J. Lisonbee, A. Sheffield, and D. Barrie, 2021: NOAA Drought Task Force Report on the 2020–2021 Southwestern U.S. Drought. National Oceanic and Atmospheric Administration Drought Task Force, Modeling, Analysis, Predictions, and Projections Program, and National Integrated Drought Information System. <https://www.drought.gov/documents/noaa-drought-task-force-report-2020-2021-southwestern-us-drought>
95. Overpeck, J.T., 2013: The challenge of hot drought. *Nature*, **503** (7476), 350–351. <https://doi.org/10.1038/503350a>
96. Otkin, J.A., M. Woloszyn, H. Wang, M. Svoboda, M. Skumanich, R. Pulwarty, J. Lisonbee, A. Hoell, M. Hobbins, T. Haigh, and A.E. Cravens, 2022: Getting ahead of flash drought: From early warning to early action. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **103** (10), E2188–E2202. <https://doi.org/10.1175/bams-d-21-0288.1>
97. Svoboda, M., D. LeComte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus, and S. Stephens, 2002: The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83** (8), 1181–1190. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>
98. Cook, B.I., J.E. Smerdon, E.R. Cook, A.P. Williams, K.J. Anchukaitis, J.S. Mankin, K. Allen, L. Andreu-Hayles, T.R. Ault, S. Belmecheri, S. Coats, B. Coulthard, B. Fosu, P. Grierson, D. Griffin, D.A. Herrera, M. Ionita, F. Lehner, C. Leland, K. Marvel, M.S. Morales, V. Mishra, J. Ngoma, H.T.T. Nguyen, A. O'Donnell, J. Palmer, M.P. Rao, M. Rodriguez-Caton, R. Seager, D.W. Stahle, S. Stevenson, U.K. Thapa, A.M. Varuolo-Clarke, and E.K. Wise, 2022: Megadroughts in the Common Era and the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment*, **3**, 735–745. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00329-1>
99. Gangopadhyay, S., C.A. Woodhouse, G.J. McCabe, C.C. Routson, and D.M. Meko, 2022: Tree rings reveal unmatched 2nd century drought in the Colorado River Basin. *Geophysical Research Letters*, **49** (11), e2022GL098781. <https://doi.org/10.1029/2022gl098781>
100. Lachniet, M.S., 2020: Illuminating the meaning of Asian monsoon cave speleothem records. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, **35** (1), e2019PA003841. <https://doi.org/10.1029/2019pa003841>
101. Martin, J.T., G.T. Pederson, C.A. Woodhouse, E.R. Cook, G.J. McCabe, K.J. Anchukaitis, E.K. Wise, P.J. Erger, L. Dolan, M. McGuire, S. Gangopadhyay, K.J. Chase, J.S. Littell, S.T. Gray, S. St. George, J.M. Friedman, D.J. Sauchyn, J.-M. St-Jacques, and J. King, 2020: Increased drought severity tracks warming in the United States' largest river basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117** (21), 11328–11336. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916208117>

102. Williams, A.P., E.R. Cook, J.E. Smerdon, B.I. Cook, J.T. Abatzoglou, K. Bolles, S.H. Baek, A.M. Badger, and B. Livneh, 2020: Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought. *Science*, **368** (6488), 314–318. <https://doi.org/10.1126/science.aaz9600>
103. Boyer, J.S., P. Byrne, K.G. Cassman, M. Cooper, D. Delmer, T. Greene, F. Gruis, J. Habben, N. Hausmann, N. Kenny, R. Lafitte, S. Paszkiewicz, D. Porter, A. Schlegel, J. Schussler, T. Setter, J. Shanahan, R.E. Sharp, T.J. Vyn, D. Warner, and J. Gaffney, 2013: The U.S. drought of 2012 in perspective: A call to action. *Global Food Security*, **2** (3), 139–143. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2013.08.002>
104. Van Loon, A.F., 2015: Hydrological drought explained. *WIREs Water*, **2** (4), 359–392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
105. Turner, S.W., N. Voisin, K.D. Nelson, and V.C. Tidwell, 2022: Drought Impacts on Hydroelectric Power Generation in the Western United States: A Multiregional Analysis of 21st Century Hydropower Generation. PNNL-33212. U.S. Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA. <https://doi.org/10.2172/1887470>
106. Crausbay, S.D., A.R. Ramirez, S.L. Carter, M.S. Cross, K.R. Hall, D.J. Bathke, J.L. Betancourt, S. Colt, A.E. Cravens, M.S. Dalton, J.B. Dunham, L.E. Hay, M.J. Hayes, J. McEvoy, C.A. McNutt, M.A. Moritz, K.H. Nislow, N. Raheem, and T. Sanford, 2017: Defining ecological drought for the twenty-first century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **98** (12), 2543–2550. <https://doi.org/10.1175/bams-d-16-0292.1>
107. EcoAdapt, 2021: Freshwater Marshes, Wetlands, and Ponds: Climate Change Vulnerability Assessment Summary for the Santa Cruz Mountains Climate Adaptation Project. EcoAdapt, Bainbridge Island, WA, 7 pp. [https://ecoadapt.org/data/documents/EcoAdapt\\_SantaCruzMtnsVASummary\\_Freshwatermarsheswetlandsandponds\\_FINAL\\_Mar2021.pdf](https://ecoadapt.org/data/documents/EcoAdapt_SantaCruzMtnsVASummary_Freshwatermarsheswetlandsandponds_FINAL_Mar2021.pdf)
108. Poff, B., K.A. Koestner, D.G. Neary, and D. Merritt, 2012: Threats to Western United States Riparian Ecosystems: A Bibliography. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO, 78 pp. <https://doi.org/10.2737/rmrs-gtr-269>
109. Vose, J.M., J.S. Clark, C.H. Luce, and T. Patel-Weynand, 2016: Effects of Drought on Forests and Rangelands in the United States: A Comprehensive Science Synthesis. Gen. Tech. Rep. WO-93b. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington Office, Washington, DC, 289 pp. <https://doi.org/10.2737/wo-gtr-93b>
110. Höök, T.O., C.J. Foley, P. Collingsworth, L. Dorworth, B. Fisher, J.T. Hoverman, E. LaRue, M. Pyron, and J. Tank, 2020: An assessment of the potential impacts of climate change on freshwater habitats and biota of Indiana, USA. *Climatic Change*, **163** (4), 1897–1916. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02502-w>
111. Johnson, W.C., B. Werner, and G.R. Guntenspergen, 2016: Non-linear responses of glaciated prairie wetlands to climate warming. *Climatic Change*, **134** (1), 209–223. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1534-8>
112. Riedel, T., 2019: Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology*, **572**, 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059>
113. Bloomfield, J.P., B.P. Marchant, and A.A. McKenzie, 2019: Changes in groundwater drought associated with anthropogenic warming. *Hydrology and Earth System Sciences*, **23** (3), 1393–1408. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1393-2019>
114. Galloway, D.L., D. R. Jones, and S.E. Ingebritsen, 1999: Land Subsidence in the United States. USGS Numbered Series 1182. U.S. Geological Survey, 177 pp. <https://doi.org/10.3133/cir1182>
115. Borunda, A., 2019: We pump too much water out of the ground—And that’s killing our rivers. *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/groundwater-pumping-killing-rivers-streams>
116. CJWG, 2017: Advancing Climate Justice in California: Guiding Principles and Recommendations for Policy and Funding Decisions. California Climate Justice Working Group. <https://www.healthyworldforall.org/en/express-img/17081516-3570-img1.pdf>
117. Goldsmith, L., V. Raditz, and M. Méndez, 2022: Queer and present danger: Understanding the disparate impacts of disasters on LGBTQ+ communities. *Disasters*, **46** (4), 946–973. <https://doi.org/10.1111/disa.12509>
118. Nelson, M., R. Ehrenfeucht, T. Birch, and A. Brand, 2022: Getting by and getting out: How residents of Louisiana’s frontline communities are adapting to environmental change. *Housing Policy Debate*, **32** (1), 84–101. <https://doi.org/10.1080/10511482.2021.1925944>

119. Edmonds, D.A., R.L. Caldwell, E.S. Brondizio, and S.M.O. Siani, 2020: Coastal flooding will disproportionately impact people on river deltas. *Nature Communications*, **11** (1), 4741. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18531-4>
120. Reckien, D., F. Creutzig, B. Fernandez, S. Lwasa, M. Tovar-Restrepo, D. Mcevoy, and D. Satterthwaite, 2017: Climate change, equity and the Sustainable Development Goals: An urban perspective. *Environment and Urbanization*, **29** (1), 159–182. <https://doi.org/10.1177/0956247816677778>
121. Thiault, L., C. Mora, J.E. Cinner, W.W.L. Cheung, N.A.J. Graham, F.A. Januchowski-Hartley, D. Mouillot, U.R. Sumaila, and J. Claudet, 2019: Escaping the perfect storm of simultaneous climate change impacts on agriculture and marine fisheries. *Science Advances*, **5** (11), 9976. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9976>
122. Ebi, K.L., J. Vanos, J.W. Baldwin, J.E. Bell, D.M. Hondula, N.A. Errett, K. Hayes, C.E. Reid, S. Saha, J. Spector, and P. Berry, 2021: Extreme weather and climate change: Population health and health system implications. *Annual Review of Public Health*, **42** (1), 293–315. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-012420-105026>
123. EPA, 2022: Climate Change and Human Health: Who's Most at Risk? U.S. Environmental Protection Agency, accessed March 20, 2022. <https://www.epa.gov/climate-change/climate-change-and-human-health-whos-most-risk>
124. Leffers, J.M., 2022: Climate change and health of children: Our borrowed future. *Journal of Pediatric Health Care*, **36** (1), 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.pedhc.2021.09.002>
125. Bronen, R., J. Maldonado, E. Marino, and P. Hardison, 2018: Ch. 12. Climate change and displacement: Challenges and needs to address an imminent reality. In: *Challenging the Prevailing Paradigm of Displacement and Resettlement: Risks, Impoverishment, Legacies, Solutions*. Cernea, M.M. and J.K. Maldonado, Eds. Routledge, London, UK, 252–272. <https://doi.org/10.4324/9781315163062>
126. MacDonald, J.P., A.C. Willox, J.D. Ford, I. Shiwak, and M. Wood, 2015: Protective factors for mental health and well-being in a changing climate: Perspectives from Inuit youth in Nunatsiavut, Labrador. *Social Science & Medicine*, **141**, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2015.07.017>
127. Marino, E., 2015: *Fierce Climate, Sacred Ground: An Ethnography of Climate Change in Shishmaref, Alaska*. University of Alaska Press, Fairbanks, AK, 122 pp. <https://upcolorado.com/university-of-alaska-press/item/5674-fierce-climate-sacred-ground>
128. Tate, E., M.A. Rahman, C.T. Emrich, and C.C. Sampson, 2021: Flood exposure and social vulnerability in the United States. *Natural Hazards*, **106** (1), 435–457. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04470-2>
129. Titus, J.G., 2023: Population in floodplains or close to sea level increased in US but declined in some counties—Especially among black residents. *Environmental Research Letters*, **18** (3), 034001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acadf5>
130. Wing, O.E.J., W. Lehman, P.D. Bates, C.C. Sampson, N. Quinn, A.M. Smith, J.C. Neal, J.R. Porter, and C. Kousky, 2022: Inequitable patterns of US flood risk in the Anthropocene. *Nature Climate Change*, **12** (2), 156–162. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01265-6>
131. Engström, J., K. Jafarzadegan, and H. Moradkhani, 2020: Drought vulnerability in the United States: An integrated assessment. *Water*, **12** (7), 2033. <https://doi.org/10.3390/w12072033>
132. NHC, 2018: Costliest U.S. Tropical Cyclones Tables Updated. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, National Hurricane Center, Miami, FL, 3 pp. <https://www.nhc.noaa.gov/news/UpdatedCostliest.pdf>
133. Risser, M.D. and M.F. Wehner, 2017: Attributable human-induced changes in the likelihood and magnitude of the observed extreme precipitation during Hurricane Harvey. *Geophysical Research Letters*, **44** (24), 12457–12464. <https://doi.org/10.1002/2017gl075888>
134. van Oldenborgh, G.J., K. van der Wiel, A. Sebastian, R. Singh, J. Arrighi, F. Otto, K. Haustein, S. Li, G. Vecchi, and H. Cullen, 2017: Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017. *Environmental Research Letters*, **12** (12), 124009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9ef2>
135. Wang, S.Y.S., L. Zhao, J.-H. Yoon, P. Klotzbach, and R.R. Gillies, 2018: Quantitative attribution of climate effects on Hurricane Harvey's extreme rainfall in Texas. *Environmental Research Letters*, **13** (5), 054014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabb85>

136. Wehner, M. and C. Sampson, 2021: Attributable human-induced changes in the magnitude of flooding in the Houston, Texas region during Hurricane Harvey. *Climatic Change*, **166** (1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03114-z>
137. Smiley, K.T., I. Noy, M.F. Wehner, D. Frame, C.C. Sampson, and O.E.J. Wing, 2022: Social inequalities in climate change-attributed impacts of Hurricane Harvey. *Nature Communications*, **13** (1), 3418. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31056-2>
138. Smiley, K.T., 2020: Social inequalities in flooding inside and outside of floodplains during Hurricane Harvey. *Environmental Research Letters*, **15** (9), 0940b3. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba0fe>
139. Chakraborty, J., S.E. Grineski, and T.W. Collins, 2019: Hurricane Harvey and people with disabilities: Disproportionate exposure to flooding in Houston, Texas. *Social Science & Medicine*, **226**, 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2019.02.039>
140. Chakraborty, J., A.A. McAfee, T.W. Collins, and S.E. Grineski, 2021: Exposure to Hurricane Harvey flooding for subsidized housing residents of Harris County, Texas. *Natural Hazards*, **106** (3), 2185–2205. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04536-9>
141. Vacs Renwick, D., A. Heinrich, R. Weisman, H. Arvanaghi, and K. Rotert, 2019: Potential public health impacts of deteriorating distribution system infrastructure. *Journal-American Water Works Association*, **111** (2), 42–53. <https://doi.org/10.1002/awwa.1235>
142. Mueller, J.T. and S. Gasteyer, 2021: The widespread and unjust drinking water and clean water crisis in the United States. *Nature Communications*, **12** (1), 3544. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23898-z>
143. Cozzetto, K., K. Chief, K. Dittmer, M. Brubaker, R. Gough, K. Souza, F. Ettawageshik, S. Wotkyns, S. Opitz-Stapleton, S. Duren, and P. Chavan, 2014: Ch. 6. Climate change impacts on the water resources of American Indians and Alaska Natives in the U.S. In: *Climate Change and Indigenous Peoples in the United States: Impacts, Experiences and Actions*. Maldonado, J.K., R.E. Pandya, and B.J. Colombi, Eds. Springer, Cham, Switzerland, 61–76. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05266-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05266-3_6)
144. NCAI, 2017: Tribal Infrastructure: Investing in Indian Country for a Stronger America. National Congress of American Indians, Washington, DC. <http://www.ncai.org/ncai-infrastructurereport-final.pdf>
145. Tanana, H., J. Combs, and A. Hoss, 2021: Water is life: Law, systemic racism, and water security in Indian Country. *Health Security*, **19** (1), 78–82. <https://doi.org/10.1089/hs.2021.0034>
146. IHS, 2019: Annual Report to the Congress of the United States on Sanitation Deficiency Levels for Indian Homes and Communities. Indian Health Service, Office of Environmental Health and Engineering. [https://www.ihs.gov/sites/newsroom/themes/responsive2017/display\\_objects/documents/FY\\_2019\\_RTC\\_Sanitation\\_Deficiencies\\_Report.pdf](https://www.ihs.gov/sites/newsroom/themes/responsive2017/display_objects/documents/FY_2019_RTC_Sanitation_Deficiencies_Report.pdf)
147. Anderson, E.P., S. Jackson, R.E. Tharme, M. Douglas, J.E. Flotemersch, M. Zwarteveen, C. Lokgariwar, M. Montoya, A. Wali, G.T. Tipa, T.D. Jardine, J.D. Olden, L. Cheng, J. Conallin, B. Cosens, C. Dickens, D. Garrick, D. Groenfeldt, J. Kabogo, D.J. Roux, A. Ruhi, and A.H. Arthington, 2019: Understanding rivers and their social relations: A critical step to advance environmental water management. *WIREs Water*, **6** (6), e1381. <https://doi.org/10.1002/wat2.1381>
148. Carey, J., 2020: Managed retreat increasingly seen as necessary in response to climate change's fury. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117** (24), 13182–13185. <https://doi.org/10.1073/pnas.2008198117>
149. Li, J. and K. Spidalieri, 2021: Home is where the safer ground is: The need to promote affordable housing laws and policies in receiving communities. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, **11** (4), 682–695. <https://doi.org/10.1007/s13412-021-00702-4>
150. ASFP, 2014: No Adverse Impact Planning How-To Guide. Association of State Floodplain Managers. [https://asfpm-library.s3-us-west-2.amazonaws.com/FSC/NAI/ASFP\\_NAI\\_Planning\\_2014.pdf](https://asfpm-library.s3-us-west-2.amazonaws.com/FSC/NAI/ASFP_NAI_Planning_2014.pdf)
151. Chang, S., W. Graham, J. Geurink, N. Wanakule, and T. Asefa, 2018: Evaluation of impacts of future climate change and water use scenarios on regional hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22** (9), 4793–4813. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4793-2018>
152. SNWA, 2019: Joint Water Conservation Plan. Southern Nevada Water Authority. <https://www.snwa.com/assets/pdf/reports-conservation-plan-2019.pdf>

153. Smith, R., E. Zagona, J. Kasprzyk, N. Bonham, E. Alexander, A. Butler, J. Prairie, and C. Jerla, 2022: Decision science can help address the challenges of long-term planning in the Colorado River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, **58** (5), 735–745. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12985>
154. Woodhouse, C.A., R.M. Smith, S.A. McAfee, G.T. Pederson, G.J. McCabe, W.P. Miller, and A. Csank, 2021: Upper Colorado River Basin 20th century droughts under 21st century warming: Plausible scenarios for the future. *Climate Services*, **21**, 100206. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100206>
155. Fleming, S.W., D.C. Garen, A.G. Goodbody, C.S. McCarthy, and L.C. Landers, 2021: Assessing the new Natural Resources Conservation Service water supply forecast model for the American West: A challenging test of explainable, automated, ensemble artificial intelligence. *Journal of Hydrology*, **602**, 126782. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126782>
156. Goharian, E., S.J. Burian, and M. Karamouz, 2018: Using joint probability distribution of reliability and vulnerability to develop a water system performance index. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **144** (2), 04017081. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000869](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000869)
157. Steinschneider, S., R. McCrary, S. Wi, K. Mulligan, L.O. Mearns, and C. Brown, 2015: Expanded decision-scaling framework to select robust long-term water-system plans under hydroclimatic uncertainties. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **141** (11), 04015023. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000536](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000536)
158. Towler, E., D. Woodson, S. Baker, M. Ge, J. Prairie, B. Rajagopalan, S. Shanahan, and R. Smith, 2022: Incorporating mid-term temperature predictions into streamflow forecasts and operational reservoir projections in the Colorado River Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **148** (4), 04022007. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001534](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001534)
159. Kim, Y., T. Carvalhaes, A. Helmrich, S. Markolf, R. Hoff, M. Chester, R. Li, and N. Ahmad, 2022: Leveraging SETS resilience capabilities for safe-to-fail infrastructure under climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **54**, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101153>
160. Kim, Y., D.A. Eisenberg, E.N. Bondank, M.V. Chester, G. Mascaro, and B.S. Underwood, 2017: Fail-safe and safe-to-fail adaptation: Decision-making for urban flooding under climate change. *Climatic Change*, **145** (3), 397–412. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2090-1>
161. Salinas Rodriguez, C.N.A., R. Ashley, B. Gersonius, J. Rijke, A. Pathirana, and C. Zevenbergen, 2014: Incorporation and application of resilience in the context of water-sensitive urban design: Linking European and Australian perspectives. *WIREs Water*, **1** (2), 173–186. <https://doi.org/10.1002/wat2.1017>
162. Gorelick, D.E., L. Lin, H.B. Zeff, Y. Kim, J.M. Vose, J.W. Coulston, D.N. Wear, L.E. Band, P.M. Reed, and G.W. Characklis, 2020: Accounting for adaptive water supply management when quantifying climate and land cover change vulnerability. *Water Resources Research*, **56** (1), e2019WR025614. <https://doi.org/10.1029/2019wr025614>
163. Misra, V., T. Irani, L. Staal, K. Morris, T. Asefa, C. Martinez, and W. Graham, 2021: The Florida Water and Climate Alliance (FloridaWCA): Developing a stakeholder–scientist partnership to create actionable science in climate adaptation and water resource management. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **102** (2), 367–382. <https://doi.org/10.1175/bams-d-19-0302.1>
164. Kruk, M.C., B. Parker, J.J. Marra, K. Werner, R. Heim, R. Vose, and P. Malsale, 2017: Engaging with users of climate information and the coproduction of knowledge. *Weather, Climate, and Society*, **9** (4), 839–849. <https://doi.org/10.1175/wcas-d-16-0127.1>
165. Sullivan, A., 2022: Climate-Resilient Planning and Design Guidance: Building Our Future Today. Philadelphia Water Department, Philadelphia, PA. <https://water.phila.gov/pool/files/climate-resilient-guidance.pdf>
166. Vincent, K., M. Daly, C. Scannell, and B. Leathes, 2018: What can climate services learn from theory and practice of co-production? *Climate Services*, **12**, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.11.001>
167. WUCA, 2021: An Enhanced Climate-Related Risks and Opportunities Framework and Guidebook for Water Utilities Preparing for a Changing Climate. Project No. 5056. Water Utility Climate Alliance. <https://www.wucaonline.org/assets/pdf/project-5056-guidebook.pdf>
168. Hoylman, Z.H., R.K. Bocinsky, and K.G. Jencso, 2022: Drought assessment has been outpaced by climate change: Empirical arguments for a paradigm shift. *Nature Communications*, **13** (1), 2715. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30316-5>

169. Xu, Y., V. Ramanathan, and D.G. Victor, 2018: Global warming will happen faster than we think. *Nature*, **564** (7734), 30–32. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07586-5>
170. Lopez-Cantu, T. and C. Samaras, 2018: Temporal and spatial evaluation of stormwater engineering standards reveals risks and priorities across the United States. *Environmental Research Letters*, **13** (7), 074006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac696>
171. Wright, D.B., C.D. Bosma, and T. Lopez-Cantu, 2019: U.S. hydrologic design standards insufficient due to large increases in frequency of rainfall extremes. *Geophysical Research Letters*, **46** (14), 8144–8153. <https://doi.org/10.1029/2019gl083235>
172. Brekke, L.D., J.E. Kiang, J.R. Olsen, R.S. Pulwarty, D.A. Raff, D.P. Turnipseed, R.S. Webb, and K.D. White, 2009: Climate Change and Water Resources Management: A Federal Perspective. USGS Circular 1331. U.S. Geological Survey, Reston, VA, 65 pp. <http://pubs.usgs.gov/circ/1331/>
173. Mulroy, P., 2017: *Water Problem: Climate Change and Water Policy in the United States*. The Brookings Institution, Washington, DC, 208 pp. <https://www.brookings.edu/book/the-water-problem/>
174. Olmstead, S.M., 2014: Climate change adaptation and water resource management: A review of the literature. *Energy Economics*, **46**, 500–509. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.09.005>
175. MacDonnell, L., 2020: Colorado River Governance: A Model? Social Science Research Network, 4 pp. <https://papers.ssrn.com/abstract=3743051>
176. MacDonnell, L., 2021: The Law of the Colorado River: Coping with Sever Sustained Drought, Part II. Social Science Research Network, 14 pp. <https://ssrn.com/abstract=3811024>
177. Fleck, J. and A. Castle, 2022: Green light for adaptive policies on the Colorado River. *Water*, **14** (1), 2. <https://doi.org/10.3390/w14010002>
178. Juricich, R., 2020: Colorado River Basin governance, decision making, and alternative approaches. In: *World Environmental and Water Resources Congress 2020: Water Resources Planning and Management and Irrigation and Drainage*. American Society of Civil Engineers, 121–130. <https://doi.org/10.1061/9780784482957.013>
179. Sullivan, A., D.D. White, and M. Hanemann, 2019: Designing collaborative governance: Insights from the drought contingency planning process for the lower Colorado River Basin. *Environmental Science and Policy*, **91**, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.011>
180. Karambelkar, S. and A.K. Gerlak, 2020: Collaborative governance and stakeholder participation in the Colorado River Basin: An examination of patterns of inclusion and exclusion. *Natural Resources Journal*, **60** (1), 1–46. <https://www.jstor.org/stable/26912770>
181. Reed, T., L.R. Mason, and C.C. Ekenge, 2020: Adapting to climate change in the Upper Mississippi River Basin: Exploring stakeholder perspectives on river system management and flood risk reduction. *Environmental Health Insights*, **14**, 1178630220984153. <https://doi.org/10.1177/1178630220984153>
182. International Joint Commission, 2016: The Boundary Waters Treaty of 1909. International Joint Commission. <https://www.ijc.org/en/boundary-waters-treaty-1909>
183. International Joint Commission, 2014: Lake Ontario–St. Lawrence River Plan 2014: Protecting Against Extreme Water Levels, Restoring Wetlands and Preparing for Climate Change. International Joint Commission, Ottawa, Ontario, 98 pp. [https://ijc.org/sites/default/files/IJC\\_LOSR\\_EN\\_Web.pdf](https://ijc.org/sites/default/files/IJC_LOSR_EN_Web.pdf)
184. Kuhn, E. and J. Fleck, 2019: *Science Be Dammed: How Ignoring Inconvenient Science Drained the Colorado River*. University of Arizona Press, Tucson, AZ. <https://uapress.arizona.edu/book/science-be-dammed>
185. Lukas, J.J. and E.A. Payton, 2020: Colorado River Basin Climate and Hydrology: State of the Science. Western Water Assessment. University of Colorado Boulder, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, Boulder, CO. <https://doi.org/10.25810/3hcv-w477>
186. Salehabadi, H., D.G. Tarboton, B. Udall, K.G. Wheeler, and J.C. Schmidt, 2022: An assessment of potential severe droughts in the Colorado River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **58** (6), 1053–1075. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13061>

187. Fillmore, H. and L. Singletary, 2021: Climate data and information needs of Indigenous communities on reservation lands: Insights from stakeholders in the Southwestern United States. *Climatic Change*, **169** (3), 37. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03285-9>
188. Conroy-Ben, O. and R. Richard, 2018: Disparities in water quality in Indian Country. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, **163** (1), 31–44. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2018.03268.x>
189. Dahm, K., T. Hawbaker, R. Frus, A. Monroe, J. Bradford, W. Andrews, A. Torregrosa, E. Anderson, D. Dean, and S. Qi, 2023: Colorado River Basin Actionable and Strategic Integrated Science and Technology Project—Science Strategy. USGS Circular 1502. U.S. Geological Survey, 57 pp. <https://doi.org/10.3133/cir1502>
190. Margulis, S.A., Y. Fang, D. Li, D.P. Lettenmaier, and K. Andreadis, 2019: The utility of infrequent snow depth images for deriving continuous space-time estimates of seasonal snow water equivalent. *Geophysical Research Letters*, **46** (10), 5331–5340. <https://doi.org/10.1029/2019gl082507>
191. Painter, T.H., D.F. Berisford, J.W. Boardman, K.J. Bormann, J.S. Deems, F. Gehrke, A. Hedrick, M. Joyce, R. Laidlaw, D. Marks, C. Mattmann, B. McGurk, P. Ramirez, M. Richardson, S.M. Skiles, F.C. Seidel, and A. Winstral, 2016: The Airborne Snow Observatory: Fusion of scanning lidar, imaging spectrometer, and physically-based modeling for mapping snow water equivalent and snow albedo. *Remote Sensing of Environment*, **184**, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.06.018>
192. Pflug, J.M., S.A. Margulis, and J.D. Lundquist, 2022: Inferring watershed-scale mean snowfall magnitude and distribution using multidecadal snow reanalysis patterns and snow pillow observations. *Hydrological Processes*, **36** (6), e14581. <https://doi.org/10.1002/hyp.14581>
193. Yang, K., K.N. Musselman, K. Rittger, S.A. Margulis, T.H. Painter, and N.P. Molotch, 2022: Combining ground-based and remotely sensed snow data in a linear regression model for real-time estimation of snow water equivalent. *Advances in Water Resources*, **160**, 104075. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104075>
194. Melton, F.S., J. Huntington, R. Grimm, J. Herring, M. Hall, D. Rollison, T. Erickson, R. Allen, M. Anderson, J.B. Fisher, A. Kilic, G.B. Senay, J. Volk, C. Hain, L. Johnson, A. Ruhoff, P. Blankenau, M. Bromley, W. Carrara, B. Daudert, C. Doherty, C. Dunkerly, M. Friedrichs, A. Guzman, G. Halverson, J. Hansen, J. Harding, Y. Kang, D. Ketchum, B. Minor, C. Morton, S. Ortega-Salazar, T. Ott, M. Ozdogan, P.M. ReVelle, M. Schull, C. Wang, Y. Yang, and R.G. Anderson, 2021: OpenET: Filling a critical data gap in water management for the western United States. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **58** (6), 971–994. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12956>
195. Senay, G.B., S. Kagone, and N.M. Velpuri, 2020: Operational global actual evapotranspiration: Development, evaluation, and dissemination. *Sensors*, **20** (7), 1915. <https://doi.org/10.3390/s20071915>
196. Tapley, B.D., M.M. Watkins, F. Flechtner, C. Reigber, S. Bettadpur, M. Rodell, I. Sasgen, J.S. Famiglietti, F.W. Landerer, D.P. Chambers, J.T. Reager, A.S. Gardner, H. Save, E.R. Ivins, S.C. Swenson, C. Boening, C. Dahle, D.N. Wiese, H. Dolslaw, M.E. Tamisiea, and I. Velicogna, 2019: Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, **9** (5), 358–369. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>
197. Vano, J., J. Hamman, E. Gutmann, A. Wood, N. Mizukami, M. Clark, D.W. Pierce, D.R. Cayan, C. Wobus, K. Nowak, and J. Arnold, 2020: Comparing Downscaled LOCA and BCSD CMIP5 Climate and Hydrology Projections: Release of Downscaled LOCA CMIP5 Hydrology. Bureau of Reclamation, Livermore, CA, 96 pp. [https://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled\\_cmip\\_projections/techmemo/LOCA\\_BCSD\\_hydrology\\_tech\\_memo.pdf](https://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip_projections/techmemo/LOCA_BCSD_hydrology_tech_memo.pdf)
198. Chapman, R.A., G.F. Midgley, and K. Smart, 2021: Diverse trends in observed pan evaporation in South Africa suggest multiple interacting drivers. *South African Journal of Science*, **117** (7/8). <https://doi.org/10.17159/sajs.2021/7900>
199. Hobbins, M.T., J.A. Ramirez, and T.C. Brown, 2004: Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complementary? *Geophysical Research Letters*, **31** (13). <https://doi.org/10.1029/2004gl019846>
200. Hodgkins, G.A., P.H. Whitfield, D.H. Burn, J. Hannaford, B. Renard, K. Stahl, A.K. Fleig, H. Madsen, L. Mediero, J. Korhonen, C. Murphy, and D. Wilson, 2017: Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe. *Journal of Hydrology*, **552**, 704–717. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.027>
201. Do, H.X., S. Westra, and M. Leonard, 2017: A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow. *Journal of Hydrology*, **552**, 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.015>



202. Milly, P.C.D., R.T. Wetherald, K.A. Dunne, and T.L. Delworth, 2002: Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, **415** (6871), 514–517. <https://doi.org/10.1038/415514a>
203. Hirsch, R.M. and S.A. Archfield, 2015: Not higher but more often. *Nature Climate Change*, **5** (3), 198–199. <https://doi.org/10.1038/nclimate2551>
204. Mallakpour, I. and G. Villarini, 2015: The changing nature of flooding across the central United States. *Nature Climate Change*, **5** (3), 250–254. <https://doi.org/10.1038/nclimate2516>
205. Hoerling, M., J. Eischeid, X. Quan, and A. Badger, 2019: Causes for the century-long decline in Colorado River flow. *Journal of Climate*, **32** (23), 8181–8203. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0207.1>
206. Milly, P.C.D. and K.A. Dunne, 2020: Colorado River flow dwindles as warming-driven loss of reflective snow energizes evaporation. *Science*, **367** (6483), 1252–1255. <https://doi.org/10.1126/science.aay9187>
207. Tanana, H., J. Garcia, A. Olaya, C. Colwyn, H. Larsen, R. Williams, and J. King, 2021: Universal Access to Clean Water for Tribes in the Colorado River Basin. Water and Tribes Initiative, Colorado River Basin. <http://www.naturalresourcespolicy.org/docs/water-tribes/wti-full-report-4.21.pdf>
208. Cutter, S.L., 2021: The changing nature of hazard and disaster risk in the Anthropocene. *Annals of the American Association of Geographers*, **111** (3), 819–827. <https://doi.org/10.1080/24694452.2020.1744423>
209. Dilling, L., A. Prakash, Z. Zommers, F. Ahmad, N. Singh, S. de Wit, J. Nalau, M. Daly, and K. Bowman, 2019: Is adaptation success a flawed concept? *Nature Climate Change*, **9** (8), 572–574. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0539-0>