

**Agua: las consecuencias potenciales de la variabilidad y el
cambio climático en los recursos hidráulicos de los Estados
Unidos**

*Informe del Equipo de Evaluación del Sector Hidráulico del
National Assessment sobre las consecuencias potenciales de la
variabilidad y el cambio climático*

Para el Programa de Investigación del Cambio Global de los E.U.A.

Autor principal

Peter H. Gleick, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security

Presidentes Conjuntos del Sector Hidráulico

D. Briane Adams, U.S. Geological Survey

Peter H. Gleick, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security

Septiembre de 2000

*Este informe fue patrocinado por el U.S. Department of the Interior a través del
U.S. Geological Survey (Contrato # 98HQAG2118)*

Resumen Ejecutivo del

Informe del Sector Hidráulico del National Assessment

Los recursos hidráulicos de los Estados Unidos de Norteamérica, como sucede con el agua en cualquier parte del mundo, forman parte integral del ciclo hidrológico global. Las precipitaciones se originan a partir de la evaporación de la tierra y de los océanos. La humedad del suelo es utilizada por las plantas, que a su vez devuelven más humedad a la atmósfera. El agua que no se evapora o transpira o se filtra hacia los acuíferos, se escurre para formar las corrientes y los ríos de la nación. La nieve que se almacena durante el invierno en las montañas proporciona agua para los ríos y deltas en la primavera y el verano. Las tormentas proporcionan humedad adicional; las sequías se presentan durante los largos períodos de baja precipitación – todo ello como parte de nuestro clima natural.

Durante el siglo pasado, en los Estados Unidos se construyó una vasta y compleja infraestructura para proporcionar agua potable para beber y para la industria, para descargar los residuos, para facilitar el transporte, para generar electricidad, para la irrigación de cultivos, y para reducir los peligros de inundaciones y sequías. Esta infraestructura ha aportado enormes beneficios, aunque con altos costos tanto económicos como ambientales. Para el ciudadano común, las presas, acueductos, presas, plantas de tratamiento, y acueductos son en gran parte invisibles y se dan por hecho. Sin embargo, nos ayudan a aislarnos de los años secos y húmedos y moderan otros aspectos de nuestro clima naturalmente variable. Es cierto que nos han permitido casi olvidarnos de nuestra complicada dependencia del clima. Ya no podemos ignorar estas íntimas relaciones.

La evidencia científica que indica que los humanos están cambiando el clima es cada vez más contundente. Los complejos impactos que afectan cada sector de la sociedad, incluyendo especialmente los recursos hidráulicos de la nación, ahora parecen ineludibles.

Este informe resume las conclusiones de la vasta literatura sobre las implicaciones tanto de la variabilidad actual del clima como de los cambios climáticos futuros sobre los recursos hidráulicos de los E.U.A.. Hemos identificado cerca de 1 000 estudios relevantes elaborados por colegas, y esta cifra crece día con día. Como consecuencia, este informe deberá considerarse sólo como una instantánea en el tiempo, un resumen de lo que creemos saber, lo que no sabemos, y lo que quisiéramos saber a principios del siglo 21. Esperamos que en los años venideros mejore nuestra comprensión de los impactos de los cambios climáticos sobre los recursos hidráulicos de los Estados Unidos, así como nuestra comprensión sobre la capacidad de las tecnologías existentes y las nuevas, de las políticas,

de las herramientas económicas, y de las instituciones, para ayudarnos a mitigar y a adaptarnos a esos impactos.

Aún permanecen muchas dudas; de hecho, esperamos que estas dudas permanezcan siempre. La naturaleza e intensidad de las emisiones de gas de invernadero en el futuro dependerá de las decisiones futuras de los gobiernos y de los individuos, de la velocidad del desarrollo de sistemas de energía alternativa, del tamaño e inmigración de las poblaciones, y de muchos otros factores. Los modelos para simular el papel de estos gases en nuestra atmósfera son imperfectos. Existen limitaciones significativas acerca de la capacidad de los modelos climáticos para incorporar y reproducir aspectos importantes del ciclo hidrológico. Muchos procesos hidrológicos fundamentales, como la formación y distribución de las nubes y de la precipitación se presentan en una escala espacial menor a la que la mayoría de los modelos climáticos son capaces de resolver. Los datos regionales sobre la disponibilidad de agua y su uso con frecuencia son insuficientes. Las herramientas para cuantificar muchos impactos son imperfectas, por decir lo menos. De esta manera, sabemos mucho menos de lo que quisiéramos saber acerca de la forma en que cambiará el ciclo hidrológico, lo que nos ayudaría a tomar las decisiones adecuadas con respecto a la planeación, manejo y operación de los sistemas hidráulicos.

Al mismo tiempo, no todo es incierto. Las investigaciones realizadas hasta la fecha nos enseñan muchas cosas, tanto positivas como negativas, acerca de la forma en que la hidrología y los recursos hidráulicos de los Estados Unidos se verán afectados por la vulnerabilidad y sensibilidad de los sistemas hidráulicos y las reglas de administración, y estamos en proceso de explorar las fortalezas y debilidades de las tecnologías y las políticas que nos ayudarían a enfrentar los impactos adversos y aprovechar los posibles efectos benéficos.

En muchos casos y en muchos lugares, existe una indudable evidencia científica que indica que los cambios climáticos plantean severos retos para nuestros sistemas hidráulicos. La buena noticia es que cuando los cambios climáticos son menores o en donde otros factores son los que dominan, los impactos sobre los recursos hidráulicos de los Estados Unidos pueden ser menores. En algunas regiones y por diferentes razones, los cambios climáticos pueden incluso disminuir los riesgos y las tensiones provocadas por las poblaciones en crecimiento, por la industrialización y por los cambios en el uso del suelo. La mala noticia es que existe una amplia evidencia que sugiere que algunos aspectos de nuestros recursos hidráulicos son muy sensibles tanto al clima como a la forma en que manejamos nuestros complejos sistemas hidráulicos. Los cambios en el manejo de estos sistemas requiere comprender cuáles cambios serían los más efectivos, y después apelar a la voluntad y dirección de las personas responsables de ello. Pasar por alto o mitigar otros tipos de impactos, aún cuando es posible, podría resultar muy costoso en dinero, salud ambiental e incluso en vidas humanas.

También hemos notado que la mayoría de los estudios sobre el impacto se han llevado a cabo usando información sobre modelos del clima global que evalúan los efectos sobre el incremento de las concentraciones de gases de invernadero hasta niveles específicos. En este momento no existen razones para suponer que las concentraciones en

aumento se detendrán en esos niveles. Se pueden esperar cada vez mayores impactos como resultado de los aumentos indefinidos del cambio climático.

Es muy importante que las incertidumbres no se utilicen para retrasar o evitar acciones inmediatas. Una prudente planeación requiere que se mantenga un sólido programa nacional de investigación sobre el clima y el agua, que las decisiones acerca de la planeación y manejo en el futuro sean flexibles, y que los riesgos y beneficios del cambio climático se incorporen en una planeación hidráulica a largo plazo. Las acciones rígidas, costosas e irreversibles con respecto a las regiones sensibles al clima pueden aumentar la vulnerabilidad y los costos a largo plazo. Los planeadores hidráulicos y los responsables de la toma de decisiones deben empezar a considerar los cambios climáticos como un factor a tomar en cuenta en todas las decisiones acerca de inversiones en el agua y en la operación de los sistemas e instalaciones existentes.

Si nos basamos únicamente en la práctica de la ingeniería actual podemos correr el riesgo de tomar decisiones incorrectas – y potencialmente peligrosas o costosas. Los Estados Unidos han invertido cientos de billones de dólares en presas, acueductos, instalaciones para el tratamiento de agua, y otras estructuras de concreto. Estos sistemas se diseñaron, y en gran parte también son operados suponiendo que las condiciones climáticas e hidrológicas en el futuro serían iguales que las condiciones en el pasado. Ahora sabemos que esto ya no es cierto. Por lo tanto, dos de las estrategias más importantes para hacer frente a esta situación es comprender que serán los recursos hidráulicos los que sufran las consecuencias del cambio climático, y comenzar a planear para enfrentar y adaptarnos a esos cambios.

Conclusiones

Las más de dos décadas de investigación sobre las implicaciones del cambio climático sobre los recursos hidráulicos han mejorado nuestra comprensión acerca de los posibles impactos y los puntos vulnerables. Se han identificado muchos aspectos importantes, y se han obtenido algunos resultados claros y consistentes. En conjunto, el estado del arte de la ciencia actual sugiere una amplia gama de preocupaciones que deberían tomar en cuenta los administradores y planeadores locales del agua, los climatólogos, los hidrólogos, los responsables de la política, y el público. Se esperan muchos cambios climáticos. A continuación resumimos algunos que presentan las mayores implicaciones para el ciclo hidrológico y los recursos hidráulicos de los Estados Unidos, utilizando una serie de términos consistentes para denotar el nivel de confianza. Se utilizan aquí los términos comunes de incertidumbre de las listas de Sidebar ES-1.¹

¹ En el informe principal se podrán encontrar mayores detalles acerca de las definiciones de incertidumbre científica, límites de confiabilidad, y otros términos

La naturaleza de los cambios climáticos esperados

- Las temperaturas promedio globales y de los Estados Unidos continuarán en ascenso por encima de los niveles históricos recientes, a menos que se lleven a cabo cambios substanciales en los patrones energéticos y de uso del suelo tanto en los Estados Unidos como en el ámbito internacional (muy alta confiabilidad). A medida que la emisión de los gases de invernadero continúe en el futuro, el nivel de este incremento en la temperatura será más alto en el futuro.
- Los patrones de aumento de la temperatura regional y de temporada en los Estados Unidos sufrirán variaciones (muy alta confiabilidad). Los investigadores no confían en los cálculos detallados de los puntos de partida en el ámbito regional de estos cambios a mayor escala.
- A medida que las concentraciones en la atmósfera de gases de invernadero continúan en aumento, el promedio global de precipitaciones se incrementará (muy alta confiabilidad).
- Se presentarán cambios en las temporadas y en los patrones regionales de la precipitación (muy alta confiabilidad). Los investigadores no tienen mucha confianza en las proyecciones para regiones específicas porque diferentes modelos dan diferentes resultados detallados regionales.
- Los incrementos de temperatura en las áreas montañosas con capas de nieve temporales producirán un incremento en la proporción de lluvia a nieve, y descensos en la duración de la temporada de nieve (muy alta confiabilidad). Es probable que las disminuciones en las nevadas y la temprana fundición de la nieve y el escurrimiento aumenten la probabilidad de inundaciones en los primeros meses del año y reduzcan el escurrimiento de agua a finales de la primavera y durante el verano. Las cuencas en la parte oeste de los Estados Unidos son especialmente vulnerables a estos cambios.
- Las precipitaciones promedio se incrementarán en las latitudes altas, especialmente en invierno (alta confiabilidad). Los modelos no son consistentes en otros cálculos sobre la forma en que cambiará la temporalidad de la precipitación.
- Es probable que se observen incrementos en el promedio anual de escurrimiento en las latitudes altas ocasionadas por una mayor precipitación (alta confiabilidad).
- Los resultados de la investigación sugieren que las frecuencias de las inundaciones en algunas zonas podrán cambiar. En las latitudes del norte y en las cuencas formadas por la fundición de la nieve, los resultados de la investigación sugieren con una mediana confiabilidad que las frecuencias de las inundaciones se incrementarán, aunque el grado de incremento en cualquier escenario climático en particular no es preciso, y los impactos variarán en cada cuenca.

- Los resultados de la investigación muestran que es probable un cambio en las frecuencias de sequías. Los peligros reales de estos cambios para la sociedad aún no se han evaluado, y las proyecciones específicas de los lugares en donde ocurrirán estos cambios son todavía especulaciones. Los modelos proyectan que la frecuencia y severidad de las sequías en algunas zonas podrían incrementarse como resultado de disminuciones regionales de la precipitación total, de una mayor frecuencia de temporadas de estiaje, y de una mayor evaporación. Los modelos muestran con la misma confiabilidad que la frecuencia y severidad de las sequías en algunas regiones podrían disminuir como resultado de aumentos regionales de la precipitación total y de temporadas de estiaje menos frecuentes.
- Los aumentos en los niveles del mar asociados con la expansión térmica del océano y el aumento de la fundición de los glaciares impulsarán al agua salada hacia los ríos, deltas y acuíferos costeros (muy alta confiabilidad). Se entiende que esto afectaría adversamente la calidad y cantidad de los suministros de agua pura en muchas regiones costeras.
- Los problemas de la calidad del agua empeorarán en los lugares en donde el aumento de las temperaturas sea el factor predominante en el cambio climático (alta confiabilidad). En los lugares en donde los cambios se presenten en las corrientes, se presentarán cambios positivos y negativos en la calidad del agua. Las proyecciones regionales específicas no han sido establecidas con precisión hasta ahora, debido a la incertidumbre sobre la forma en que cambiarán las corrientes regionales.
- El incremento del dióxido de carbono atmosférico afectará el uso de agua por la vegetación (alta confiabilidad), pero los especialistas no confían mucho en los efectos específicos de estas y otras influencias. Las concentraciones de CO₂ podrán reducir en algunas circunstancias la tasa de transpiración de algunas plantas. Este hecho a su vez tenderá a aumentar el escurrimiento, ya que se devuelve a la atmósfera menos agua directamente por esa vegetación, permitiendo que un mayor volumen de precipitación llegue a las corrientes o a los acuíferos. El aumento de las concentraciones de CO₂ también puede aumentar el crecimiento de las plantas, produciendo un área mayor de tejido de transpiración y un correspondiente incremento en la transpiración.
- A medida que constatamos que algunos escenarios climáticos pueden producir condiciones que podrían reducir las tensiones en algunos ecosistemas, la experiencia con la dinámica de los ecosistemas nos indica que el daño a los ecosistemas en cualquier sentido distinto de las condiciones en las que se han desarrollado y sobreviven tendrá impactos adversos en la salud de ese sistema. Los ecosistemas acuáticos pueden ser muy sensibles a los factores hidroclimáticos, especialmente a la temperatura del agua, a la calidad del agua, a la probabilidad de situaciones extremas, y a los volúmenes, tasas y temporadas de las corrientes. La determinación de los impactos sobre especies o ecosistemas específicos requerirá una investigación adicional enfocada a esas regiones específicas y a esos ecosistemas específicos.

- Los ecologistas tienen mucha confianza en que el calentamiento del clima producirá un cambio en la distribución de las especies hacia el norte, produciendo en consecuencia la extinción de especies de agua fría o templada de las latitudes más bajas, y la expansión de especies de agua caliente y templada hacia latitudes más altas.
- Se calcula que el límite sur de las nieves perennes se desplace hacia el norte unos 500 kilómetros durante los siguientes 50 años, debido a las proyecciones de calentamiento de GCM. Un calentamiento de 5° en Alaska fundiría eventualmente todas las nieves perennes de la región sub-ártica en Alaska (mediana confiabilidad), lo que afectaría a una región pantanosa mayor que la que actualmente existe en el resto de los Estados Unidos.
- Un creciente número de estudios indica que los cambios climáticos aumentarán la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, pero no hay consenso sobre los cambios regionales detallados en cuanto a las tormentas que podrían presentarse en un planeta caliente. Algunos resultados contradictorios de los modelos apoyan la necesidad de más investigaciones, especialmente para aclarar la divergencia entre la resolución de los modelos y las escalas a las que los acontecimientos extremos pueden presentarse. Este asunto deberá verificarse regularmente en evaluaciones posteriores.

¿Cuáles son los mayores impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre los recursos hidráulicos de los Estados Unidos?

El actual estado del arte de la ciencia indica que los probables cambios climáticos, proyectados por los modelos de circulación general, plantean una amplia gama de preocupaciones que deberán ser atendidos por los administradores y planeadores hidráulicos nacionales y locales, por los climatólogos, los hidrólogos, los responsables de las políticas, y el público.

- En los Estados Unidos se han producido cálculos detallados de los cambios en el escurrimiento debidos a los cambios climáticos, utilizando modelos hidrológicos regionales de muchas cuencas de ríos específicas. A pesar de muchas incertidumbres, el modelo sugiere que se presentarán cambios significativos en la época y volumen del escurrimiento, causados por probables cambios en las variables climáticas (alta confiabilidad).
- Con pocas excepciones, no mostramos mucha confianza en que podamos determinar los cambios específicos para regiones específicas. En las regiones áridas y semiáridas del oeste de los Estados Unidos, se ha visto que aún cambios modestos en la precipitación pueden tener proporcionalmente grandes impactos sobre el escurrimiento.
- Las investigaciones muestran que los manantiales de los Estados Unidos que cuentan con una capa de nieve durante el invierno experimentarán grandes cambios en la época e intensidad del escurrimiento a medida que las temperaturas promedio se incrementen (muy alta confiabilidad). Las reducciones del escurrimiento en primavera y verano, los aumentos del escurrimiento en invierno, y un gran escurrimiento temprano son

respuestas comunes al incremento de las temperaturas. La capacidad de los sistemas existentes y las reglas de operación para manejar estos cambios no han sido evaluadas correctamente.

- Las investigaciones realizadas a la fecha indican que existe el peligro de un aumento en las inundaciones en algunas partes de los Estados Unidos que experimentan gran incremento en la precipitación (mediana confiabilidad). El Intergovernmental Panel on Climate Change llegó a la conclusión en 1996, con la que estamos de acuerdo, de que “las inundaciones como consecuencia del cambio climático podrán ser tan peligrosas y vastas como los impactos adversos de las sequías”, y “actualmente existen mayores evidencias de que las inundaciones se convertirán en un gran problema en muchas regiones templadas, que deberán adaptarse no sólo a las sequías y a la escasez crónica de agua, sino además a las inundaciones y a los daños asociados con ellas, provocando preocupaciones acerca de las fallas en presas y diques.”
- Es probable que se presenten situaciones no lineales o limítrofes, pero son difíciles de proyectar. Los ejemplos incluyen una caída en el nivel del lago que evita los derrames o que divide el lago en dos partes separadas, un aumento en la intensidad de la inundación que sobrepasa los límites peligrosos, y un exceso en los límites de la calidad del agua.
- El relativo incremento del nivel del mar afecta adversamente a los acuíferos subterráneos y a los ecosistemas costeros de agua dulce (alta confiabilidad). El aumento en el nivel del mar ocasiona un incremento de la penetración de agua salada hacia los acuíferos costeros. Los acuíferos isleños superficiales (como los que se encuentran en Hawaii, Nantucket, Martha’s Vineyard, y a lo largo de la costa sureste), así como los acuíferos costeros que resienten un uso intensivo por las personas (como los de Long Island, Nueva York, y los de la costa central de California) se encuentran en gran peligro. Es probable que otros impactos del aumento del nivel del mar incluyan cambios en la distribución de la salinidad de los estuarios, en patrones costeros de circulación alterada, en la destrucción de infraestructura de transporte en las zonas superficiales, y un aumento de la presión en los sistemas de diques costeros.
- Los cambios climáticos tienen el potencial de alterar significativamente la calidad del agua, al cambiar las temperaturas, corrientes, tasas y épocas de escurrimiento, y la capacidad de los manantiales para asimilar desperdicios y contaminantes. Los aumentos globales y regionales de la temperatura del aire, así como los incrementos asociados de la temperatura del agua, probablemente provoquen cambios adversos en la calidad del agua, aún si no se presentan cambios en la precipitación. Los cambios en la precipitación pueden provocar impactos positivos y negativos en la calidad del agua. El efecto real de la calidad del agua en ríos, lagos y aguas subterráneas en el futuro dependerá no sólo del cambio climático, sino también en una amplia gama de acciones humanas.
- Se sabe que los lagos son sensibles a una amplia variedad de cambios climáticos. Aún pequeños cambios del clima pueden producir grandes cambios en los niveles y la salinidad de los lagos. A medida que la temperatura del aire aumenta, habrá pocos lagos

y corrientes de las zonas de la alta latitud que se congelen hasta el fondo, y el número de días sin hielo se incrementará, provocando un aumento en los ciclos y productividad de los nutrientes. Otros efectos del aumento de la temperatura sobre los lagos podrían incluir una tensión térmica más alta para los peces de agua fría, un hábitat mejorado para los peces de agua caliente, un aumento en la productividad y bajo nivel de oxígeno disuelto, y una degradación de la calidad del agua.

- Los efectos directos del cambio climático en los ecosistemas de agua dulce serán complejos, dependiendo de la naturaleza del cambio, del sistema afectado, y de la naturaleza e intensidad de las intervenciones intencionales de los hombres. Un trabajo realizado a lo largo de los Estados Unidos muestra una amplia variedad de serias preocupaciones para los ecosistemas, que incluyen cambios en los patrones de vegetación, probable extinción de especies de peces endémicos que ya están próximos a sus límites térmicos, una disminución de las zonas pantanosas con una reducción en las poblaciones de aves acuáticas, problemas con la salud de las corrientes, y una mayor pérdida del hábitat.
- Los investigadores muestran preocupación por la limitada capacidad de los ecosistemas naturales para adaptarse o enfrentar los cambios climáticos que se presentan en lapsos cortos. Esta limitada capacidad para adaptarse a los rápidos cambios puede provocar impactos irreversibles, como extinciones. Aunque se han realizado investigaciones a este respecto, se requieren muchas más.
- Se ha hecho muy poco con respecto a los impactos del cambio climático en cuencas subterráneas específicas, o relativas a las características o calidad del agua de la recarga subterránea general. Algunos estudios muestran que algunos volúmenes de almacenamiento de agua subterránea regionales son muy sensibles a los más pequeños cambios de la recarga disponible.

¿Cuáles son los mayores impactos de la variabilidad y cambio climático en los sistemas hidráulicos administrados en los Estados Unidos?

El cambio climático afectará la disponibilidad de agua en los Estados Unidos, al igual que su calidad, distribución y forma. El cambio climático también afectará la compleja infraestructura y los sistemas existentes para administrar el agua de la nación y la existente variabilidad del clima. Existe una enorme literatura acerca de la forma en que los cambios climáticos pueden afectar la infraestructura y los complejos sistemas construidos para manejar los recursos hidráulicos de los Estados Unidos (<http://www.pacinst.org/CCBib.html>). Se han realizado investigaciones sobre los impactos potenciales en una amplia variedad de características de los sistemas hidráulicos, incluyendo las operaciones en las presas, la generación hidroeléctrica, la navegación, y otros asuntos. Al mismo tiempo, existen significativas lagunas en el conocimiento, y se requiere mucha mayor investigación. Las prioridades y las directrices para los trabajos futuros deberán provenir de los planeadores y administradores hidráulicos, así como de la comunidad académica y científica más tradicional.

- Se podrían presentar grandes cambios en la confiabilidad de los rendimientos de agua de las presas, debido a pequeños cambios en las afluencias (alta confiabilidad).
- En algunos manantiales, el crecimiento a largo plazo de la demanda producirá mayor impacto en el desempeño del sistema que los cambios climáticos. Las incertidumbres en la proyección de las futuras demandas de agua complican la evaluación de los efectos relativos de estas dos fuerzas. Los impactos regionales en general dependerán de las condiciones económicas, institucionales y estructurales de cualquier región.
- La variabilidad del clima ya provoca fluctuaciones en la generación hidroeléctrica. Los cambios climáticos que reducen la disponibilidad general de agua disminuirán la productividad de las instalaciones hidroeléctricas de los Estados Unidos. Los incrementos confiables en las afluencias promedio incrementarán la producción de energía hidráulica. Los cambios en las temporadas de la generación hidroeléctrica pueden afectar el valor de la energía producida. Aún no se han establecido claramente los impactos regionales específicos.
- Las estrategias dinámicas de administración podrán ser efectivas para mitigar los impactos adversos del cambio climático, pero estas políticas deben ser implementadas antes de que se presenten esos cambios, a efecto de maximizar su efectividad.
- El cambio climático jugará un papel en la producción de energía en las plantas de combustibles fósiles y de energía nuclear, al elevar las temperaturas de enfriamiento del agua y reducir la eficiencia de las plantas (mediana confiabilidad). En algunas circunstancias, las elevadas temperaturas del agua limitarán las operaciones de las plantas.
- La navegación y el transporte por mar son sensibles a los cambios en las corrientes, profundidad del agua, formación de hielo y otros factores climáticos. Un calentamiento podría aumentar la duración potencial de la temporada de navegación en algunos lagos y ríos del norte que normalmente se congelan en el invierno. La disminución en las corrientes de los ríos podría reducir los períodos en los que la navegación es posible, incrementar los costos de transporte, o aumentar los conflictos sobre el agua suministrada para otros propósitos. Los cambios en la frecuencia o intensidad de las tempestades afectarían la navegación en los Grandes Lagos. La investigación realizada hasta la fecha indica que los efectos reales del cambio climático pueden ser el aumento de los costos del transporte y de la navegación en la región de los Grandes Lagos (mediana confiabilidad).
- Las investigaciones en manantiales específicos muestran que algunas cuencas de ríos principales en los Estados Unidos están tan intensamente desarrolladas, con tal traslape de niveles administrativos, que su capacidad para adaptarse a los cambios climáticos podría verse seriamente comprometida.

Todos los impactos físicos y ecológicos del cambio climático ocasionarán costos y beneficios sociales y económicos. Además de las incertidumbres para evaluar tanto el

cambio climático como sus impactos potenciales, la evaluación de las implicaciones económicas de los diversos impactos conlleva dificultades adicionales, y se han realizado muy pocos esfuerzos para su cuantificación. Sin embargo, en última instancia, serán necesarios esfuerzos adicionales para evaluar los costos, con el objeto de apoyar a los responsables de las políticas y al público para que comprendan las implicaciones de llevar o no llevar a cabo acciones para reducir o adaptarse a los impactos del cambio climático.

Los impactos socioeconómicos del efecto invernadero son muy diferentes dependiendo de las proyecciones climáticas que se usen, y de los métodos y suposiciones que adopten los investigadores. Los resultados publicados a la fecha constituyen una valiosa guía para las evaluaciones futuras, pero los responsables de las políticas no deben confiar demasiado en los cálculos cuantitativos específicos. Algunos resultados se describen a continuación:

- Aún tomando en consideración las incertidumbres, las investigaciones muestran que los posibles impactos económicos de la reducción de las corrientes podrían ser muy elevados, y que algunos sistemas hidráulicos de los Estados Unidos son muy sensibles al clima. Bajo ciertos escenarios climáticos, los costos adicionales provocados por los cambios climáticos son considerablemente mayores que los costos adicionales provocados por el crecimiento futuro de la población, los cambios industriales, y el cambio en las demandas de agua para la agricultura.
- Las contrastantes implicaciones hidrológicas de los dos modelos climáticos utilizados para el National Assessment indican que la dirección y el tamaño de muchos impactos socioeconómicos son inciertos y pueden variar de región en región.
- El extremo superior de los costos de los recursos hidráulicos de los Estados Unidos impuesto por los cambios climáticos, que se describe en algunos estudios, es del orden de 0.5 por ciento del producto interno bruto de la nación.
- Existen muchas oportunidades para adaptarse a las condiciones hidrológicas cambiantes, y los costos implican una asignación cuidadosa por parte de las instituciones que deben determinar cómo se maneja y asigna el agua entre los usuarios.

¿Ya está afectando el cambio climático a los recursos hidráulicos nacionales?

Existe un alto grado de confiabilidad por parte de la comunidad científica de que los aumentos en las concentraciones de gases de invernadero no contabilizadas eventualmente provocarán cambios en el clima del planeta, incluyendo la variabilidad de ese clima. A pesar de las lagunas en los datos, el inadecuado y disparejo monitoreo del clima y de la hidrología, de los cortos períodos de captación, y los sesgos en los registros instrumentales, existe suficiente evidencia que indica que algunos cambios ya se están presentando.

La evidencia de que los hombres están cambiando el ciclo hidrológico de los Estados Unidos es cada día más clara. Algunos de los cambios observados más relevantes para los recursos hidráulicos y la hidrología de los Estados Unidos se resumen a continuación:

- Los Estados Unidos han provocado el calentamiento, en promedio, de las dos terceras partes de un grado centígrado desde 1900 (muy alta confiabilidad).
- Las nieves perpetuas del Ártico de Alaska están comenzando a retraerse (muy alta confiabilidad).
- El nivel promedio del mar se ha elevado entre 10 y 20 centímetros desde 1890 (muy alta confiabilidad).
- Los glaciares de las montañas se están derritiendo a tasas sin precedente en la historia (alta confiabilidad).
- El grosor del hielo del Ártico ha disminuido significativamente de los niveles registrados a mediados del siglo 20 (alta confiabilidad). Una comparación de estas tendencias con los cálculos del modelo muestra que los decrementos observados son similares a las proyecciones del modelo, y que ambas tendencias son mucho mayores de lo que se esperaría debido a la variabilidad natural del clima.
- La vegetación está floreciendo más tempranamente en primavera y verano, y continúa la fotosíntesis en el otoño (mediana confiabilidad).
- Las cubiertas de nieve y hielo están disminuyendo y se derriten más tempranamente, en promedio, en tanto que hay un incremento de la precipitación anual de nieve en las latitudes del norte (mediana confiabilidad). Los estudios de campo muestran que desde 1988 la cubierta de nieve sobre la superficie de la tierra del hemisferio norte se ha mantenido por debajo de los promedios a lo largo del último tercio del siglo, y la disminución promedio anual de la cubierta de nieve es del 10 por ciento en América del Norte. Estos cambios se han relacionado con los incrementos de la temperatura.
- Existe una evidencia de las tendencias históricas tanto de un aumento como de una disminución de la precipitación en diferentes partes de América del Norte desde 1900. La precipitación promedio de los Estados Unidos se ha incrementado en cerca del 10 por ciento desde 1910. La intensidad de la precipitación ha aumentado en cuanto a los días de muy intensa y extrema precipitación. Existe una mediana confiabilidad en los resultados promedio de los Estados Unidos, pero también una baja confiabilidad en algunos cambios regionales.
- Parece estar cambiando la temporada de escurrimiento en los ríos dominados por la fundición de nieve en el oeste de los Estados Unidos (mediana confiabilidad), y hay una disminución del escurrimiento primaveral y un aumento en el escurrimiento invernal. Las causas de estos cambios no han sido completamente explicadas.

Efectos en otros sectores

Se han preparado cinco informes sectoriales para el National Assessment. Además de éste sobre el agua, están disponibles los estudios sobre agricultura, salud humana,

ecosistemas costeros y bosques (ver <http://www.nacc.usgcrp.gov>). Ninguno de los impactos que se mencionan en esos sectores es independiente de lo que sucede con los recursos hidráulicos y los sistemas hidráulicos de los Estados Unidos. Sin embargo aún no se ha realizado un análisis integrado de los posibles impactos. Recomendamos que se realice un trabajo sobre los efectos sinérgicos del cambio climático en los Estados Unidos, y hacemos algunos comentarios a continuación sobre algunos temas importantes.

Salud humana

Existen relaciones directas e indirectas entre la disponibilidad de agua y la calidad y la salud humana. Los cambios climáticos afectarán la viabilidad de vectores de enfermedades como los mosquitos que transmiten malaria o dengue. El transporte de patógenos acuáticos como el *Cryptosporidium* se ve afectado por los cambios en la intensidad de la precipitación y del escurrimiento, así como por las prácticas de uso del suelo. La distribución del *Vibrio cholera*, la bacteria transmisora del cólera, se ve afectada por el clima incluyendo la frecuencia de El Niño y la intensidad, temperatura y salinidad del océano.

Aún no está disponible una clara evidencia para concluir la forma en que el cambio climático afectará en última instancia estos factores, o para relacionar la incidencia de estos tipos de enfermedades con cualquier cambio en el clima en los Estados Unidos, pero nuestra recomendación es que se realicen más investigaciones y un cuidadoso monitoreo de los vectores y datos de las enfermedades relacionadas con el agua.

Agricultura

Los estudios recientes sobre la agricultura en los Estados Unidos indican que la producción general de alimentos no se verá seriamente afectada por los cambios climáticos, como actualmente lo señalan los proyectos de las GCM. De hecho, en los escenarios climáticos evaluados para el National Assessment, los efectos económicos reales de los cambios en la agricultura fueron en general positivos, aunque se encontraron diferencias regionales substanciales, y algunas regiones registraron disminución en la producción. Los resultados generales mostraron una disminución en la demanda de agua para la irrigación, en gran parte debido a los efectos diferenciales del cambio climático sobre la productividad de los cultivos irrigados contra los no irrigados, y los efectos positivos sobre las plantas de niveles más altos de CO₂. Al mismo tiempo, existen serias advertencias incluidas en la investigación realizada hasta la fecha, algunas de ellas relacionadas con la disponibilidad y calidad del agua. Todavía no está disponible una información confiable acerca de los cambios en la frecuencia e intensidad de las tormentas. No se ha difundido la integración de los efectos indirectos del cambio climático sobre la hidrología y el agua en los modelos agroclimáticos, especialmente los efectos de las plagas, las condiciones del suelo, los vectores de enfermedades, y los factores socioeconómicos. Aún menos investigación se ha realizado para evaluar los cambios de la variabilidad del clima sobre la agricultura. La integración de estas y otras relaciones entre el agua y los alimentos deberá ser una alta prioridad para los investigadores.

Bosques

Las investigaciones indican que el cambio climático puede provocar cambios importantes a largo plazo en la salud y distribución de los bosques. Estos factores dependen en parte de la forma en que cambiarán los patrones de precipitación y escurrimiento. Pero los cambios en las condiciones de los bosques a su vez tendrán efectos locales importantes sobre el escurrimiento, la erosión del suelo, la salinización del suelo, la calidad del agua subterránea, y otros aspectos. Estos efectos no se han evaluado adecuadamente.

Ecosistemas costeros

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hidráulicos tendrán una amplia diversidad de consecuencias para los ecosistemas costeros. La salud de los ecosistemas se verá afectada por los cambios en la calidad y cantidad del escurrimiento de agua dulce en los pantanos costeros, así como por las altas temperaturas del agua, tasas de escurrimiento extremas o la alteración en las temporadas, y por la capacidad de los manantiales para asimilar los desperdicios y contaminantes. El efecto real sobre los ecosistemas costeros depende no sólo de la forma en que el clima podría cambiar, sino también en una amplia variedad de otras acciones del hombre, incluyendo la construcción y operación de presas que atrapan los sedimentos y los nutrientes, las tasas y los volúmenes de las extracciones, la descarga de residuos, y otros factores adicionales.

Un alto promedio o variedad de corrientes de agua podrían reducir las concentraciones de contaminantes, o incrementar la erosión de las superficies de la tierra y los cauces de los ríos, provocando un incremento en la sedimentación y mayores cargas de productos químicos y nutrientes en los ríos y en los deltas costeros. Un menor promedio de corrientes podría reducir las concentraciones de oxígeno disuelto, reducir la dilución de contaminantes, reducir la erosión e incrementar las zonas con altas temperaturas. Para casi todas las fuentes o cuerpos de agua, el uso de la tierra y las prácticas agrícolas tienen un impacto significativo sobre la calidad del agua. Los cambios en estas prácticas, así como acciones técnicas y reguladoras para proteger la calidad del agua, tendrán la mayor importancia para las condiciones futuras del agua.

Otros impactos

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hidráulicos de los Estados Unidos probablemente afectarán las relaciones internacionales de los Estados Unidos con los países de sus fronteras norte y sur, con los que los manantiales compartidos pueden provocar disputas políticas locales e internacionales. Los acuerdos internacionales que se han firmado con relación a esta agua compartida no incluyen medidas para enfrentar explícitamente los riesgos de los cambios debidos al clima en cuanto a la disponibilidad o calidad del agua.

El peligro de un cambio en las inundaciones es uno de los efectos potenciales del cambio climático con enormes implicaciones para el bienestar humano. Muy pocos estudios se han abocado a analizar las implicaciones del cambio climático en la frecuencia de las inundaciones, en gran parte debido a la falta de información detallada sobre la precipitación

regional a partir de los modelos climáticos, y también a la importante influencia de los patrones de colonización humana así como a las directrices del manejo del agua en los riesgos de inundaciones en general.

El cambio climático es sólo uno de varios factores que influyen en el sistema hidrológico y en los recursos hidráulicos de los Estados Unidos. El aumento de la población, los cambios en el uso del suelo, la reestructuración del sector industrial, y las demandas para la protección y restauración de los ecosistemas se presentan simultáneamente. Las leyes y políticas actuales que afectan el uso, manejo y desarrollo del agua frecuentemente muestran contradicciones, son ineficientes o no responden a las condiciones cambiantes. En ausencia de esfuerzos explícitos para enfrentar estos asuntos, surgirán costos sociales por los problemas del agua, como una competencia por el crecimiento del agua y el abastecimiento y demanda a medida que las condiciones cambien.

Recomendaciones

Manejo y adaptación

Existen muchas oportunidades para reducir los peligros de la variabilidad y el cambio climático para los recursos hidráulicos de los Estados Unidos. Los sistemas hidráulicos de la nación están muy desarrollados y los administradores del agua cuentan con una larga historia de adaptación a los cambios en el abastecimiento y la demanda. Los esfuerzos en el pasado se han dedicado a subestimar los peligros de la variabilidad natural y a sobrestimar la confiabilidad del sistema. Muchos de los enfoques para enfrentar con efectividad el cambio climático son muy poco diferentes de los enfoques disponibles para manejar los peligros asociados con la variabilidad existente. Las herramientas para reducir estos riesgos han incluido tradicionalmente opciones para resolver el abastecimiento, como son la construcción de nuevas presas y acueductos, y recientemente, opciones para resolver la demanda, como el mejoramiento de la eficiencia, la modificación de la demanda, el cambio de procesos para el uso del agua, y el cambio de los patrones de uso de la tierra en terrenos de aluvión. Estos trabajos se llevan a cabo independientemente del aspecto del cambio climático, pero tendrán importantes implicaciones en la severidad de los impactos climáticos.

Es un error confiar únicamente en las respuestas tradicionales de la administración: en primer lugar, los cambios climáticos probablemente producirán – en algunos lugares y en algunas ocasiones – condiciones y situaciones extremas en la hidrología de *diferente naturaleza* para la que fueron diseñados los actuales sistemas de administración; en segundo lugar, los cambios climáticos podrán producir formas de variabilidad similares, pero que están *fuera del alcance* de la infraestructura diseñada y construida en la actualidad; en tercer lugar, basarse solamente en los métodos tradicionales presupone que se contará con suficiente tiempo e información antes de que se presenten los grandes o irreversibles impactos que permitan a los administradores dar respuesta adecuadamente; y en cuarto lugar, este enfoque da por hecho que no se requerirán esfuerzos o planes especiales para protegerse contra sorpresas o incertidumbres.

La primera situación requiere que se desarrollen enfoques o tecnologías completamente nuevas. La segunda requiere que se realicen esfuerzos más allá de los que

se han planeado o anticipado en la actualidad. Una complacencia por parte de los administradores del agua, reflejada en la tercera y cuarta situaciones, puede producir severos impactos que podrían haber sido mitigados o prevenidos si se tomaran desde ahora acciones redituables.

Como resultado, planteamos las siguientes observaciones y recomendaciones:

- *Un manejo prudente requiere que se mantengan sólidos monitoreos y programas de investigación, que las decisiones acerca de la planeación y el manejo del agua en el futuro sean flexibles, y que se eviten acciones costosas e irreversibles en las regiones sensibles al clima.*
- *Se deberán desarrollar y aplicar mejores métodos de planeación bajo condiciones de incertidumbre climática.*
- *Los gobiernos en todos los niveles deberán volver a evaluar sus enfoques legales, técnicos y económicos para el manejo de los recursos hidráulicos a la luz de cambios climáticos potenciales. El gobierno federal deberá exigir a todos los sistemas hidráulicos operados por la federación que comiencen a evaluar tanto los impactos climáticos como la efectividad de las diferentes opciones de operación y manejo.*
- *Las mejoras en la eficiencia de los usos finales y el manejo intencional de las demandas de agua deben considerarse como herramientas principales para enfrentar necesidades futuras de agua, especialmente en las regiones con escasez de agua en las que actualmente existe una infraestructura amplia. Anotamos la conclusión del IPCC de que “el manejo de la demanda de agua y la adaptación institucional son los componentes fundamentales para aumentar la flexibilidad del sistema para tener la posibilidad de enfrentar la incertidumbre del cambio climático”.*
- *Los administradores del agua deberán iniciar una revisión sistemática de los diseños de ingeniería, las reglas de operación, los planes de contingencia, y las políticas de distribución del agua a la luz de una variedad más amplia de condiciones del clima y situaciones extremas que los que se han usado tradicionalmente. Por ejemplo, la práctica normal de la ingeniería de realizar diseños de acuerdo con el caso más grave observado en los registros históricos ya no es adecuada.*
- *La cooperación entre las dependencias hidráulicas y las organizaciones científicas más destacadas puede facilitar el intercambio de información sobre el estado del arte del cambio climático y sus impactos en los recursos hidráulicos.*
- *Los flujos oportunos de información entre la comunidad científica del cambio climático el público y la comunidad administradora del agua son valiosos. Estas líneas de comunicación deben desarrollarse y ampliarse.*
- *Las formas tradicionales y alternativas de la nueva demanda, que ya están siendo tomadas en consideración en muchos distritos de riego, pueden jugar un papel*

importante para enfrentar los cambios tanto en la demanda como en el abastecimiento ocasionados por el cambio y la variabilidad climática. Las opciones que hay que tomar en cuenta incluyen el tratamiento y reutilización de aguas residuales, el comercio y transferencia de agua, e incluso la desalinización limitada en donde no estén disponibles alternativas menos costosas y en los lugares en donde los precios del agua son altos. Sin embargo, ninguna de estas alternativas logrará alterar la tendencia a la alza de los costos del agua.

- *Los precios y los mercados están teniendo una importancia cada vez mayor en el equilibrio del abastecimiento y la demanda.* Debido a que las nuevas construcciones y los nuevos proyectos de concreto pueden resultar muy costosos, dañinos para el ambiente y políticamente controvertidos, la aplicación adecuada de la economía y el manejo del agua pueden incentivar una disminución en el uso y una mayor producción. Entre las nuevas herramientas que se han examinado con éxito están las tarifas escalonadas, el banco del agua, y el uso conjunto del agua subterránea.
- *Aún sin la presencia de un cambio climático, se requieren esfuerzos para actualizar y mejorar las herramientas legales para el manejo y distribución de los recursos hidráulicos.* El agua se administra de manera diferente en los distintos lugares del país, provocando una legislación del agua compleja y con frecuencia conflictiva.

Mensajes clave para los administradores del agua, los planeadores, y los miembros del público interesados

El clima no es estático, y las predicciones para el futuro basadas en el clima del pasado pueden ser inadecuadas. Deberán evaluarse cuidadosamente las predicciones acerca de la probabilidad, frecuencia y severidad de las situaciones extremas utilizadas para la planeación.

Los cambios climáticos se impondrán por encima de las tensiones no climáticas actuales y futuras. En algunos casos, estos cambios serán superiores a los que se prevén por el crecimiento de la población, por los cambios en el uso de la tierra, por el crecimiento económico y por otros factores no climáticos.

Será más probable la presencia de algunas situaciones límite, y deberán anticiparse los cambios no lineales y las sorpresas, incluso si no es posible predecirlos.

Las brechas de tiempo entre la identificación de la naturaleza de los problemas, su comprensión, la prescripción de remedios, y su implementación son demasiado amplias. Es probable que resulte más costoso esperar una certeza relativa acerca de la naturaleza del cambio climático antes de actuar para reducir los peligros relacionados con el cambio climático, que asumir desde ahora una actitud proactiva en cuanto al manejo y las etapas de planeación. Deben utilizarse métodos que incorporen de manera explícita la incertidumbre en el proceso de la toma de decisiones.

En tanto que deben asumirse algunas acciones desde ahora, la nueva infraestructura costosa y de larga vida debe posponerse hasta que se tenga información adecuada sobre el clima del futuro. Si no es posible posponerla, es necesario que se incorpore al diseño de la infraestructura una diversidad más amplia de datos sobre la variabilidad del clima que la que proporcionan los registros históricos.

Necesidades de investigación

Los registros de las condiciones climáticas e hidrológicas del pasado ya no se consideran guías confiables para el futuro. El diseño y manejo de los sistemas hidráulicos tanto estructurales como no estructurales deberán tomar en cuenta los posibles efectos del cambio climático, pero no existe mucha orientación profesional en este aspecto. Se necesita mayor investigación de los hidrólogos, los ingenieros civiles, los administradores del agua y los planeadores del agua para llenar esta laguna, así como ampliar la preparación de los científicos en las universidades.

- Se necesita trabajar más para mejorar la capacidad de los modelos climáticos globales a fin de proporcionar información sobre la disponibilidad de los recursos hidráulicos, para evaluar los impactos hidrológicos en general, y para identificar impactos regionales.
- Se requiere un mejoramiento importante de los métodos para el registro de la información sobre el clima, con el objeto de mejorar nuestra comprensión acerca de los procesos regionales y de pequeña escala que afectan los recursos y los sistemas hidráulicos.
- La información acerca de la forma en que la frecuencia e intensidad de las tormentas ha cambiado, y cómo cambiará en el futuro, es un asunto de vital importancia para determinar los impactos en el agua y en los sistemas hidráulicos, y sin embargo no está disponible una información confiable. Se requiere mayor investigación acerca de los posibles cambios en la gravedad de las tormentas y otras situaciones hidrológicas extremas.
- Se necesitan sistemas de monitoreo hidrológico más amplios y mejor distribuidos. Es preocupante la tendencia actual de reducción de las redes de monitoreo.
- Deberán volverse a examinar de manera sistemática a la luz de las condiciones del cambio climático los criterios de diseño de ingeniería y las reglas de operación de las presas existentes.
- Se necesita trabajar más para evaluar los costos y beneficios relativos de las opciones de manejo no estructurales, como el manejo de la demanda y la eficiencia del uso del agua, o bien la prohibición de nuevos desarrollos en tierras de aluvión, en el contexto del cambio climático.

- Se requiere investigar sobre las implicaciones del cambio climático en la legislación internacional del agua, los tratados y acuerdos de los Estados Unidos con México y Canadá, y el comercio internacional del agua. ¿Podrá la “privatización” afectar la vulnerabilidad al cambio climático de los sistemas hidráulicos?
- Hay poca información disponible sobre la forma en que los cambios climáticos pueden afectar a los acuíferos subterráneos, incluyendo la calidad, las tasas de recarga y la dinámica de las corrientes. Se requieren nuevos estudios sobre estos temas.
- El otorgamiento legal de los derechos del agua debe ser revisado, aunque no se presenten cambios climáticos, con el objeto de enfrentar inequidades, problemas de justicia ambiental y uso ineficiente del agua. Los peligros del cambio climático indican que esta revisión debe tener carácter de urgente.