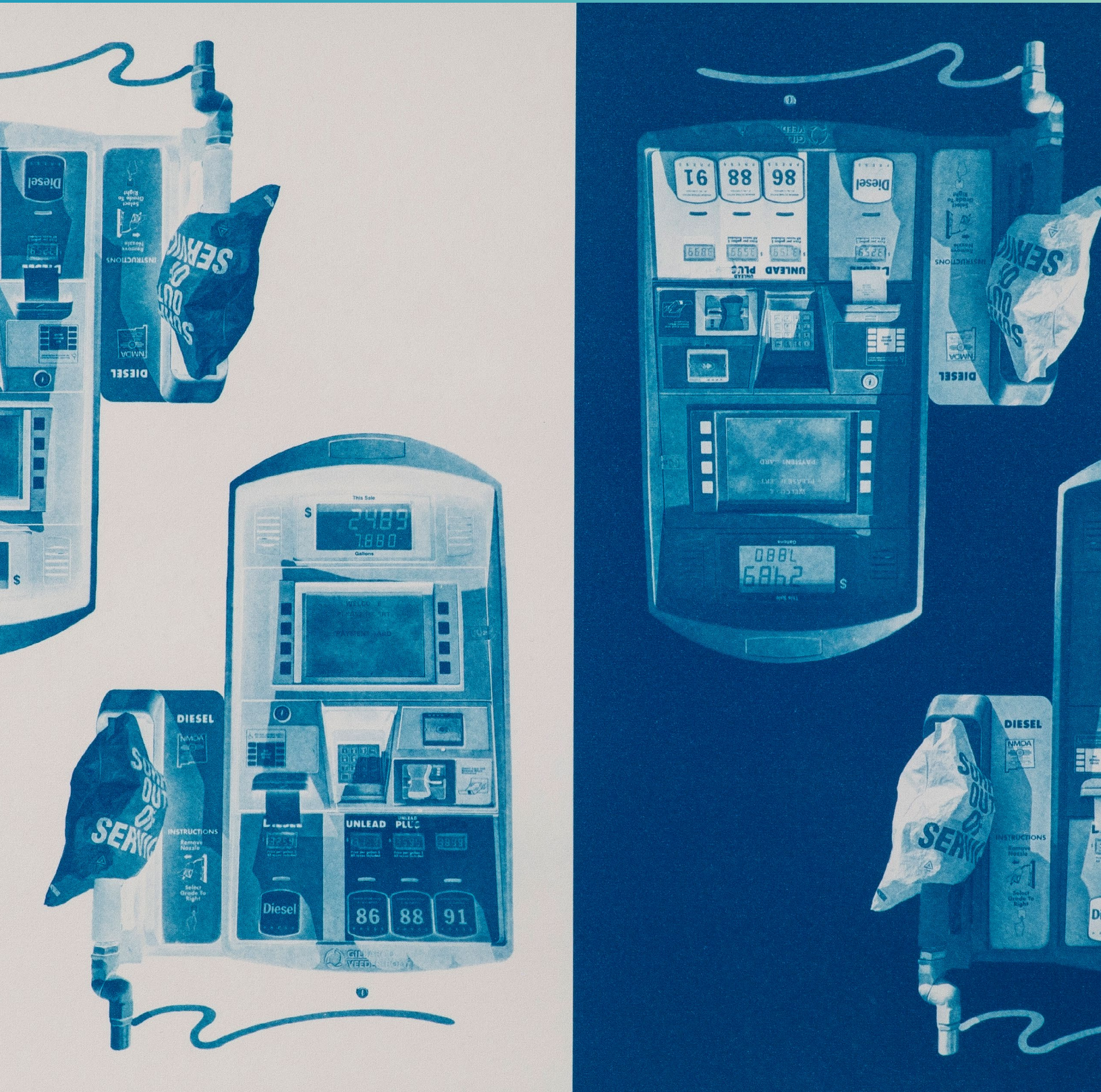


Abastecimiento, suministro y demanda de energía



Capítulo 5. Abastecimiento, suministro y demanda de energía

Autores y colaboradores

Autor principal de coordinación federal

Craig D. Zamuda, US Department of Energy

Autor principal del capítulo

Craig D. Zamuda, US Department of Energy

Autores del capítulo

Daniel E. Bilello, National Renewable Energy Laboratory

Jon Carmack, US Department of Energy

Xujing Jia Davis, US Department of Energy

Rebecca A. Efroymson, Oak Ridge National Laboratory

Kenneth M. Goff, Idaho National Laboratory

Tianzhen Hong, Lawrence Berkeley National Laboratory

Anhar Karimjee, US Department of Energy

Daniel H. Loughlin, US Environmental Protection Agency

Sara Upchurch, Federal Emergency Management Agency

Nathalie Voisin, Pacific Northwest National Laboratory

Contribuyentes técnicos

Laura West Fischer, Electric Power Research Institute

Zarrar Khan, Pacific Northwest National Laboratory

Editor revisor

Ariel Miara, National Renewable Energy Laboratory

Arte de apertura de capítulo

Maria Trunk

Cita recomendada

Zamuda, C.D., D.E. Bilello, J. Carmack, X.J. Davis, R.A. Efroymson, K.M. Goff, T. Hong, A. Karimjee, D.H. Loughlin, S. Upchurch, and N. Voisin, 2023: Cap. 5. Abastecimiento, suministro y demanda de energía. 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.CH5.ES>

Índice de Contenidos

Introducción	4
Mensaje clave 5.1	
El cambio climático amenaza los sistemas energéticos	5
Abastecimiento de energía	6
Suministro de energía	7
Demanda de energía	9
Mensaje clave 5.2	
Múltiples factores afectan la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y las comunidades	10
Descarbonización	10
Limitación de recursos	11
Comunidades vulnerables y equidad	12
Peligros múltiples y en cascada	13
Mensaje clave 5.3	
Se están llevando a cabo esfuerzos para mejorar la capacidad de resiliencia del sistema energético	14
Mejores modelos climáticos que informen la planificación de la resiliencia del sistema energético .	14
Abordando las amenazas múltiples	15
Reforzando los sistemas energéticos para reducir la vulnerabilidad al cambio climático	15
Automatización, tecnologías de información y edificios eficientes de red eléctrica interactiva.....	16
Desarrollo y despliegue de tecnologías para descarbonizar el sistema energético	17
Soluciones para comunidades vulnerables y justicia energética	19
Cuentas trazables	20
Descripción del proceso	20
Mensaje clave 5.1	
El cambio climático amenaza los sistemas energéticos	21
Mensaje clave 5.2	
Múltiples factores agravantes afectan la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y las comunidades	23
Mensaje clave 5.3	
Se están realizando esfuerzos para mejorar la capacidad de resiliencia del sistema energético	26
Referencias	29

Introducción

Energía limpia, fiable y asequible es importante para la calidad de vida, la competitividad económica y la seguridad nacional. Sin embargo, gran parte de las infraestructuras energéticas actuales se diseñaron en el siglo XX, lo que las hace vulnerables a los impactos del cambio climático, incluyendo interrupciones más frecuentes del suministro eléctrico y de combustible, aumento de daños en las infraestructuras energéticas, aumento de la demanda y reducción del abastecimiento de energía y efectos en cascada que impactan a otros sectores, como transporte, comunicaciones y salud y seguridad.

Los cambios sociales están alterando la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y las comunidades al cambio climático. Los riesgos cambiantes se derivan de los cambios en la combinación de generación de energía que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG), incremento en la electrificación de los edificios y el transporte, la innovación tecnológica que crea nuevas demandas de energía, la mayor susceptibilidad de los componentes energéticos a las alteraciones de la cadena de suministro nacional e internacional y un sistema cada vez más automatizado e interconectado susceptible de sufrir ataques físicos y cibernéticos.

Aunque las concentraciones atmosféricas de GHG siguen creciendo a tasas históricamente elevadas debido a factores como el aumento del consumo global de energía, la descarbonización del sistema energético está reduciendo la tasa de emisiones de GHG¹. La demanda de energía está aumentando, superando las mejoras en eficiencia energética, y se espera que la electrificación crezca^{2,3}. La adaptación al cambio medioambiental, junto con la mejora de la resiliencia de los sistemas de producción y suministro de energía a los eventos relacionados con el clima, está en marcha. Las innovaciones en el sistema energético incluyen reducciones de los costos tecnológicos y mejoras operativas y de rendimiento para la producción, el suministro y el almacenamiento de energía; generación distribuida y microrredes; gestión de la demanda; edificios y vehículos con cero emisiones; y diseño y estructuras de gobernanza del mercado energético.

La evolución de la política se centra en la transición hacia sistemas de energía neta cero y el abandono de los combustibles fósiles. La Ley Bipartita de Infraestructuras⁴ y la Ley de Reducción de la Inflación (Inflation Reduction Act, IRA)⁵ son las mayores inversiones en clima y energía de la historia de Estados Unidos (Capítulos 25, 32)^{6, 7, 8}. Estas leyes priorizan las inversiones para las comunidades sobrecargadas y promueven la iniciativa Justice40, que se compromete a hacer llegar a estas comunidades beneficios del clima, energía limpia e inversiones federales relacionadas⁹. Las medidas estatales y locales incluyen códigos de construcción, incentivos y prohibiciones destinados a fomentar el cambio a fuentes de energía limpia^{10, 11}. Los avances están en marcha, pero se necesitan más medidas para aumentar el ritmo, la escala y el alcance de la transición energética con el fin de suministrar más energía limpia y construir un futuro energético más resiliente.

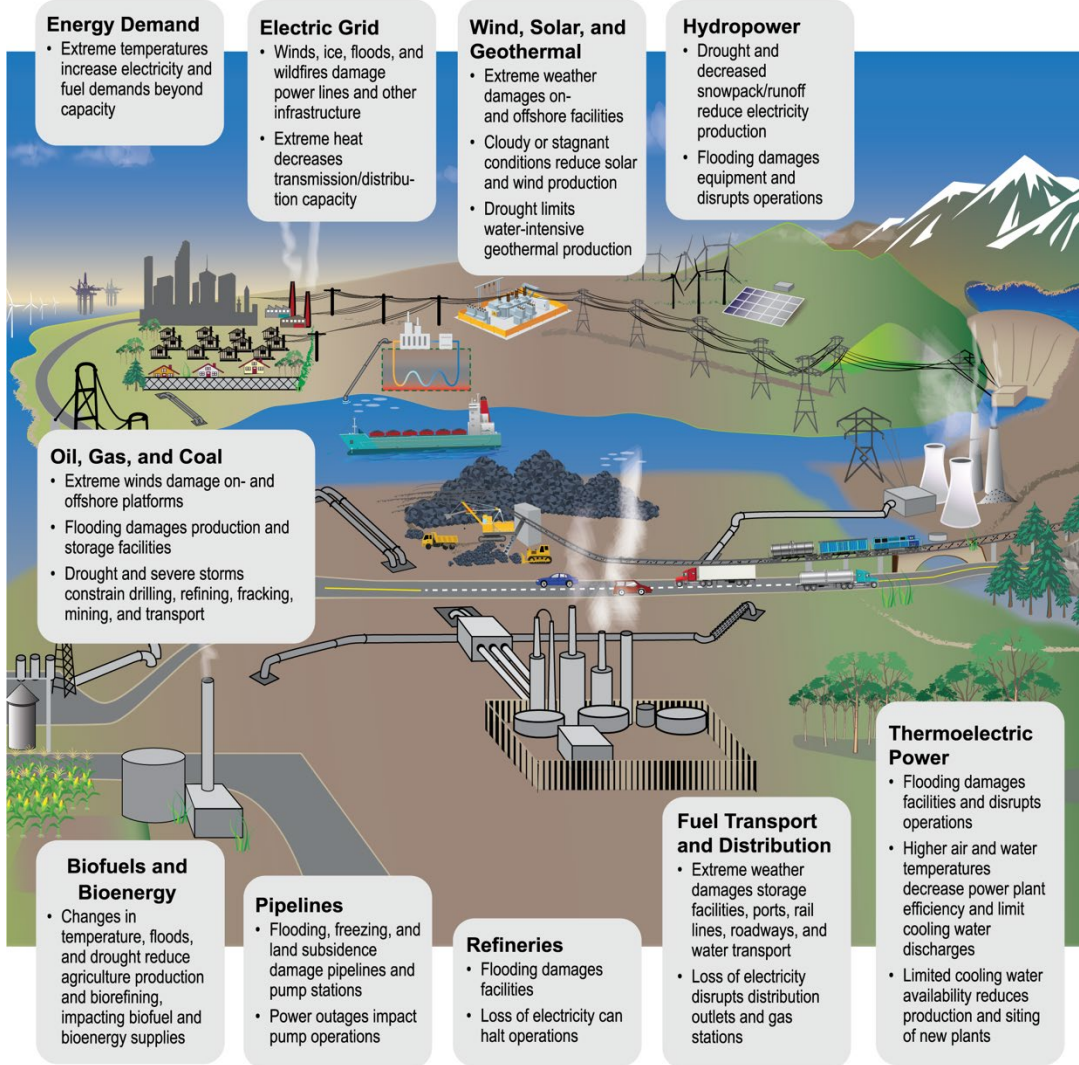
Mensaje clave 5.1

El cambio climático amenaza los sistemas energéticos

El abastecimiento y el suministro de energía corren peligro debido a los cambios climáticos, que también están modificando la demanda (*prácticamente seguro, confianza muy alta*). Las amenazas del cambio climático, como el aumento de las precipitaciones extremas, las temperaturas extremas, el aumento del nivel del mar y la mayor intensidad de tormentas, sequías e incendios forestales, están dañando las infraestructuras y las operaciones y afectando las vidas humanas y los medios de subsistencia (*prácticamente seguro, confianza muy alta*). Los impactos variarán con el tiempo y el lugar (*prácticamente seguro, confianza muy alta*). Sin mitigación ni adaptación, el aumento proyectado de la frecuencia, la intensidad, la duración y la variabilidad de los eventos extremos amplificará los efectos sobre los sistemas energéticos (*prácticamente seguro, confianza muy alta*).

El cambio climático afecta todos los aspectos del sistema energético —abastecimiento, suministro y demanda (Figura 5.1)— debido al aumento de la frecuencia, la intensidad y la duración de los eventos extremos y al cambio de las tendencias climáticas (Capítulo 2). La producción y distribución de energía son vulnerables a inundaciones, huracanes, sequías, incendios forestales y deshielo del permafrost. Las temperaturas extremas aumentan la demanda de energía y sobrecargan el funcionamiento de la electricidad, lo que provoca cortes que interrumpen los servicios a las comunidades. Las magnitudes de las amenazas climáticas varían temporal y espacialmente (p. ej., sequías e incendios forestales en el Suroeste, huracanes y marejadas ciclónicas en las costas del Golfo y del Este).

Impactos del cambio climático en el sistema energético



Todos los aspectos del sistema energético de EE. UU. son vulnerables a los efectos del cambio climático.

Figura 5.1. El cambio climático impacta todos los componentes del sistema energético del país: extracción y procesamiento de recursos, transporte y almacenamiento de energía, generación de electricidad y uso final de la energía. Adaptado del Departamento de Energía (Department of Energy, DOE) 2013¹².

Abastecimiento de energía

Sistemas de generación

El aumento del nivel del mar, los vientos huracanados y las inundaciones terrestres impactan las infraestructuras energéticas costeras y los activos nacionales estratégicos^{13, 14}, incluyendo la Reserva Estratégica de Petróleo de la Nación¹⁵. La región del Golfo de México representa una parte significativa de la producción nacional de petróleo crudo, refinado de petróleo y capacidad de procesamiento de gas natural¹⁶. El abastecimiento energético costero se ve especialmente afectado por el cambio climático y puede impactar de manera desproporcionada las comunidades aisladas y sobrecargadas^{17, 18}.

Las tormentas, las temperaturas extremas, las sequías y los incendios forestales deterioran los sistemas de generación de energía e impactan las operaciones^{19, 20}. La generación de energía solar y eólica se ve afectada por el calor, el humo, el hollín y el granizo^{21, 22, 23}. Las inundaciones y la congelación de los equipos de

extracción, almacenamiento y distribución impactan la producción de gas natural y la generación de energía y provocan cortes de electricidad²⁴. El calor extremo reduce la capacidad y la eficiencia de las turbinas de gas natural y de vapor^{25, 26}. La mayor intensidad de los huracanes ha aumentado las interrupciones de la energía nuclear²⁷. La sequía y las condiciones meteorológicas extremas pueden limitar el suministro de materias primas para biocombustibles²⁸. Las energías renovables se verán afectadas por los cambios en los recursos eólicos y solares, aunque las magnitudes y localizaciones de estos efectos son inciertas^{29, 30, 31, 32, 33, 34}. La incertidumbre sobre los impactos del clima en los recursos eólicos y solares sigue siendo grande, pero los datos de los modelos climáticos a escala reducida, junto con los modelos del sector energético, están avanzando.

Generación de electricidad y disponibilidad de agua

El agua se utiliza en la generación de electricidad, lo que incluye la producción de energía hidroeléctrica e hidrógeno, el enfriamiento de generadores termoeléctricos y el mantenimiento de instalaciones solares fotovoltaicas (photovoltaic, PV)³⁵ y la producción de materias primas para la bioenergía. La generación de energía hidroeléctrica se ve afectada por las sequías^{36, 37, 38}, el agotamiento de la capa de nieve³⁷, el aumento de la temperatura de los ríos³⁹, la evaporación de los embalses⁴⁰, la eliminación de presas para restaurar los ríos y sus funciones sociales y ecológicas⁴¹, la creciente demanda de otros usos del agua y las restricciones de bombeo que aumentan el costo⁴².

La mayor parte del oeste de Estados Unidos está sufriendo una megasequía que altera el suministro de agua y la generación de energía hidroeléctrica (Capítulo 2)^{37, 43, 44}. El aumento de la demanda de energía debido al incremento de las temperaturas de verano, unido a la disminución proyectada de la generación hidroeléctrica en el verano, aumentará el potencial de déficit energético^{45, 46}.

Los generadores termoeléctricos proporcionan la mayor parte de la electricidad del país y dependen de importantes volúmenes de agua^{47, 48, 49}. El despliegue de algunas tecnologías bajas en carbono, como la captura, utilización y almacenamiento de carbono (carbon capture, utilization, and storage, CCUS), aumenta esta dependencia del agua⁵⁰. Las nuevas tecnologías de enfriamiento para pequeños reactores modulares ofrecen opciones para hacer frente a las limitaciones de disponibilidad de agua⁵¹. Los impactos múltiples de la disminución del caudal de los ríos en verano, el aumento de las temperaturas y, en muchas regiones, los límites de temperatura del agua de descarga reducen la eficiencia y la capacidad de generación de los generadores termoeléctricos⁵², lo que disminuye la fiabilidad en condiciones extremas^{39, 53, 54}. Las operaciones que dependen del almacenamiento en embalses para el agua de enfriamiento se enfrentan a una vulnerabilidad cada vez mayor debido a que los niveles de almacenamiento caen por debajo de los umbrales críticos, especialmente en el Suroeste⁵⁵.

Suministro de energía

Suministro de electricidad

Los cortes de electricidad por condiciones meteorológicas extremas aumentan en todo Estados Unidos. El número promedio de cortes de electricidad importantes (superiores a 50,000 usuarios) aumentó aproximadamente un 64% durante 2011-2021, en comparación con 2000-2010, y la mayoría de los cortes de electricidad relacionados con las condiciones meteorológicas se atribuyeron a frío extremo (22%), ciclones tropicales (15%) y condiciones meteorológicas severas (58%)⁵⁶. Los gastos anuales en infraestructuras de transporte y distribución de electricidad podrían aumentar hasta un 25% en 2090 en un escenario muy alto (RCP8.5) en comparación con un escenario sin cambio climático⁵⁷. Los costos adicionales por interrupciones del suministro eléctrico podrían alcanzar entre \$4,700 y \$8,300 millones anuales en 2090 (en dólares de 2022)⁵⁷.

Los eventos de calor extremo están aumentando en frecuencia y duración (KM 2.2)^{58, 59}. Las altas temperaturas debilitan los tendidos eléctricos y reducen la eficiencia del transporte y la distribución, generando tensiones en la red durante los períodos de mayor demanda^{57, 60}. Las infraestructuras eléctricas, incluidos los transformadores y las líneas de transmisión, se deterioran más rápidamente con temperaturas extremas, y los cables ven reducida su capacidad de transporte con el aumento de la temperatura del aire^{25, 57}.

Los incendios forestales y los eventos meteorológicos extremos crean retos a las infraestructuras eléctricas^{61, 62, 63, 64}. Los tendidos eléctricos aéreos son susceptibles a daños por los fuertes vientos y la caída de la vegetación^{65, 66}. Los tendidos eléctricos también son susceptibles de sufrir daños y reducir su eficiencia a causa del hielo⁶⁷ y los incendios forestales, incluido el hollín^{57, 63, 68}. Las inundaciones, los hundimientos y los deslizamientos de tierras, que aumentan con la sequía y el aumento del bombeo de aguas subterráneas⁶⁹, están dañando los tendidos eléctricos y las tuberías de gas natural subterráneas. Las subestaciones eléctricas costeras corren el riesgo de sufrir marejadas ciclónicas agravadas por el aumento del nivel del mar^{70, 71}.

Algunos ejemplos de los impactos de los eventos extremos en el suministro eléctrico incluyen los graves daños a las líneas de transmisión y distribución de Puerto Rico después del paso del huracán María⁷²; condiciones más calurosas y secas en el Suroeste que fomentan los incendios forestales más fuertes y duraderos¹⁹ que amenazan la interfaz urbano-forestal²⁰; y el riesgo de que los incendios forestales influyan en los cortes de electricidad iniciados por las compañías eléctricas en California durante los períodos de fuertes vientos y condiciones secas^{20, 73, 74}.

Suministro de petróleo y gas

El cambio climático y las condiciones meteorológicas extremas interrumpen las cadenas de suministro de petróleo y gas^{75, 76, 77, 78}. Los huracanes, las inundaciones y el aumento del nivel del mar amenazan las infraestructuras y operaciones terrestres y marítimas⁷⁹. Estas amenazas se intensificarían en un mundo cada vez más cálido (Capítulo 2). La interrupción del suministro de petróleo tiene impactos más amplios en el transporte, los edificios y los productos industriales⁸⁰.

En 2020, el huracán Laura interrumpió la producción de crudo en el Golfo de México más que cualquier otra tormenta desde 2008⁸¹. Las instalaciones de procesamiento terrestres y los suministros de energía resultaron dañados, y la respuesta de la industria se vio limitada por la falta de recursos, personal, instalaciones de procesamiento y energía. Las inundaciones provocadas por el huracán Harvey en 2017 dañaron grandes oleoductos⁸², y las precipitaciones excesivas dañaron tanques de almacenamiento de techo flotante⁸³. El huracán Ida en 2021 interrumpió hasta el 95% de la producción de crudo y gas de la Costa del Golfo⁸⁴.

Los eventos de frío extremo en zonas sin experiencia con tales temperaturas están impactando los equipos y las operaciones de petróleo y gas²⁴. En las regiones en las que se utiliza gas natural para calefacción y generación de electricidad, los eventos de frío generan retos debido al aumento de la demanda combinado con el riesgo de falla de las infraestructuras^{85, 86}.

Aunque el cambio climático suele aumentar los riesgos para la producción y el suministro de energía, las altas temperaturas tienen efectos mixtos en la producción de petróleo y gas en las regiones frías. Las altas temperaturas benefician la producción en alta mar y el transporte de productos petrolíferos frente a la costa de Alaska al disminuir el hielo marino y abrir rutas de navegación. La extensión promedio anual del hielo marino ártico durante 2011-2020 alcanzó su nivel más bajo desde al menos 1850 (Capítulo 2)⁸⁷. Se proyectan veranos sin hielo para 2050^{87, 88}. El aumento de las temperaturas en Alaska pone en peligro la producción y el suministro de petróleo y gas en el interior, ya que el deshielo del permafrost compromete la integridad estructural de pozos, oleoductos, tanques de almacenamiento, vías férreas y carreteras, lo que impacta a

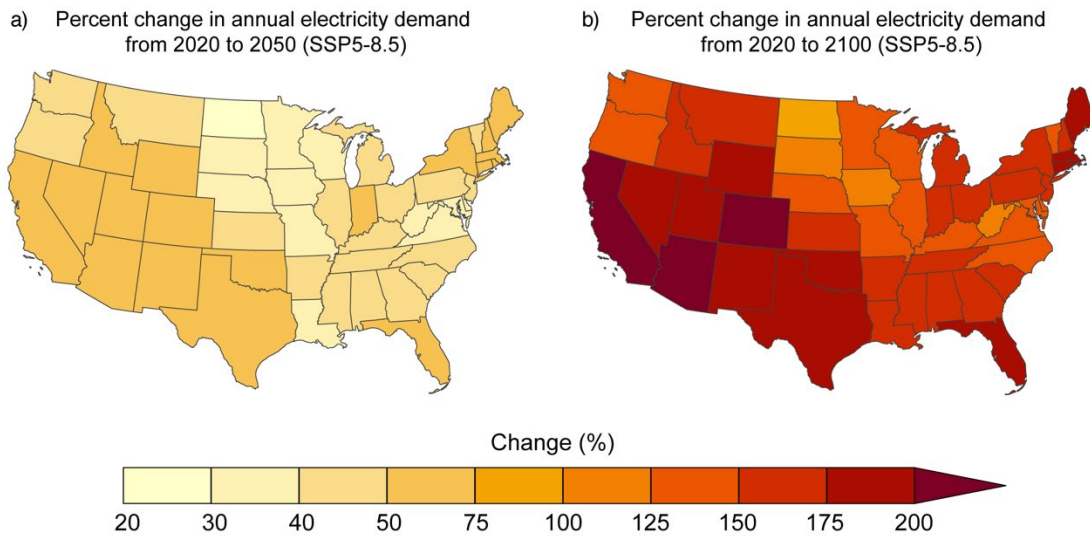
los consumidores y puede contribuir a fugas de metano⁸⁹. La disminución del número de días para viajar por carretera en la tundra helada también impacta la exploración y producción de petróleo y gas^{90, 91}.

Demanda de energía

Se proyecta que la demanda de energía aumente para 2050, intensificada por las altas temperaturas, el aumento de la electrificación y el crecimiento económico^{3, 92}. A pesar del aumento, se espera que disminuya la intensidad global de la demanda energética (energía consumida por hogar o por pie cuadrado de superficie comercial)^{3, 92}. Los modelos de sistemas energéticos proyectan una disminución del consumo total de energía con respecto a los niveles actuales si se consigue un nivel de cero neto de emisiones de CO₂ (KM 32.2).

La demanda de electricidad está creciendo en muchas regiones de los EE. UU., intensificada por el crecimiento demográfico y económico; el aumento de la adopción de vehículos eléctricos, bombas de calor y calentadores de agua; y las metas de descarbonización, que estimulan una mayor electrificación del transporte, la industria y los edificios⁹³. Estas tendencias también alteran los picos de demanda^{94, 95, 96}. El aumento de las temperaturas puede incrementar aún más la demanda total de electricidad, como se ilustra en la Figura 5.2^{97, 98}.

Cambios proyectados en la demanda de electricidad



Debido al cambio climático, se proyecta que la demanda de electricidad aumente a lo largo de este siglo.

Figura 5.2. Los modelos de pronóstico intersectorial del cambio global⁹⁷ que no reflejan las disposiciones de la Ley de Reducción de la Inflación proyectan un aumento potencial de la demanda anual de electricidad del 25 % al 70 % de 2020 a 2050 (a) y del 96 % a más del 215 % de 2020 a 2100 (b) en gran parte del país, intensificado en parte por el aumento de la temperatura ambiental. Alaska, Hawaii y las islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. y el Caribe estadounidense no se incluyen debido a la falta de datos climáticos de alta resolución que sirvan de base a esas proyecciones, pero se esperan tendencias similares. Se prevé un aumento de la demanda de electricidad según los escenarios socioeconómicos y los enfoques de adaptación de la red (KM 23.4). Los cambios se basan en un escenario muy alto (SSP5-8,5). Créditos de la figura: Pacific Northwest National Laboratory.

Pico de demanda eléctrica

Los cambios de temperatura y los eventos extremos alteran los picos de demanda de energía, lo que hace necesario invertir entre un 3% y un 22% más en infraestructuras energéticas para 2100⁹⁹. Se proyecta que las necesidades de electricidad para el enfriamiento de edificios aumenten la demanda de energía hasta 2050^{100, 101, 102}. Para 2050, se espera que el aumento de las temperaturas de verano incremente la demanda residencial de electricidad en el Sur y el Medio Oeste, mientras que las temperaturas de invierno más cálidas reducirán la demanda residencial de gas natural en el Sur^{102, 103}. A finales de este siglo, la demanda máxima de energía para enfriamiento en época de verano en los EE. UU. podría aumentar un 27% en un escenario muy alto (RCP8.5)¹⁰⁴.

Se prevé que los eventos extremos aumenten la demanda de enfriamiento residencial y comercial¹⁰⁰, lo que supondrá una carga adicional para la red eléctrica. La demanda de enfriamiento en época de verano representa entre el 30% y el 50% del consumo diario total de electricidad en las áreas metropolitanas de Sacramento, Los Ángeles y la ciudad de Nueva York. Por cada 1.8 °F (1 °C) de aumento de la temperatura ambiente, el consumo diario de electricidad aumenta un 6.2% en Sacramento, un 4.7% en Los Ángeles y un 5.1 % en la ciudad de Nueva York¹⁰⁵. Durante la ola de calor de 2021 en el Noroeste del Pacífico, las temperaturas en el interior alcanzaron los 120 °F¹⁰⁶. En Portland, Oregón, la demanda máxima de electricidad fue un tercio superior en 2021 que en cualquiera de los dos años anteriores¹⁰⁷. Las olas de calor aumentarán la demanda de electricidad en época de verano si provocan la adopción y el uso del aire acondicionado¹⁰⁸.

Demanda de petróleo y gas

Se proyecta que la demanda de petróleo y gas se mantenga estable en los EE. UU. hasta 2050, y que los avances tecnológicos, como la electrificación y los vehículos eléctricos, reduzcan el consumo potencial³. Sin embargo, con la elevada demanda internacional de gas natural licuado, la producción estadounidense podría aumentar, y Estados Unidos seguirá siendo un exportador neto de gas natural. Las emisiones de metano asociadas al aumento de la producción de gas natural necesitarán ser evaluadas (Capítulo 32).

Mensaje clave 5.2

Múltiples factores afectan la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y las comunidades

Los cambios simultáneos en las tecnologías, las políticas y los mercados, además de sus interconexiones, pueden reducir las emisiones de GHG mientras que también aumentan la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y las comunidades ante el cambio climático y las condiciones meteorológicas extremas (*muy probable, confianza muy alta*). Los peligros múltiples y en cascada relacionados con los sistemas energéticos y factores de estrés, como las amenazas cibernéticas y físicas y las pandemias, crean riesgos para todos, pero afectan de manera desproporcionada a las comunidades sobrecargadas (*muy probable, confianza muy alta*).

Descarbonización

El cambio climático está impulsando los esfuerzos de descarbonización en todo el país, transformando así el sistema energético mediante el aumento de la electrificación y las aplicaciones de energía eólica y solar, hidrógeno, bioenergía, energía nuclear modular, energía geotérmica, energía hidroeléctrica, otros almacenamientos a largo plazo y CCUS. Diseños innovadores del mercado energético se están desarrollando para

acelerar la descarbonización. En los escenarios de descarbonización que reducen las emisiones de carbono de toda la economía en al menos un 50% para 2030, se espera que aumente la demanda de electricidad, liderada por la electrificación del transporte. El aumento de la demanda varía según los modelos entre un 2% y un 56% en 2030, en comparación con los niveles de 2019¹⁰⁹. Las proyecciones de crecimiento de la demanda de electricidad para transporte varían desde menos del 10% hasta casi el 100% de las ventas para 2050^{95, 96, 110, 111}, dependiendo de las normativas futuras, los incentivos y la aceptación del mercado. Existen otras oportunidades de electrificación en los edificios, como el calentamiento de espacios y de agua, y en la industria, como las bombas de calor y la recuperación de calor residual.^{112, 113} La sustitución de equipos de aire acondicionado antiguos por bombas de calor puede mejorar la eficiencia energética del enfriamiento y la calefacción de espacios, y la gestión de la demanda puede reducir las emisiones de GHG mediante transferencias estratégicas de las cargas en el tiempo¹¹⁴.

El hidrógeno limpio, producido con energías bajas en carbono, incluidas las renovables y la nuclear, puede contribuir a descarbonizar el transporte y la industria (Capítulo 32)^{115, 116, 117, 118, 119}. La CCUS puede reducir la intensidad de carbono en la producción de electricidad y la combustión en la industria y puede combinarse con la bioenergía para obtener reducciones adicionales de carbono^{120, 121}.

El rápido despliegue de las tecnologías de descarbonización creará retos adicionales (KM 32.2)^{122, 123, 124}. Por ejemplo, la electrificación de los vehículos requiere la expansión de la capacidad de fabricación de vehículos eléctricos y baterías, el desarrollo de infraestructuras de recarga, la expansión de la transmisión, la adaptación de las operaciones de refinado para reflejar una menor demanda de gasolina y diésel y la aparición de industrias de reciclaje, reutilización o eliminación de baterías al final de su vida útil (KM 13.4)^{125, 126}. Las vulnerabilidades al cambio climático pueden aumentar con la descarbonización; por ejemplo, una mayor dependencia de la electricidad y la bioenergía podría exacerbar los impactos de los cortes de electricidad y las sequías^{85, 127}.

Los comportamientos de los consumidores y las normas sociales influyen en la adopción y el rendimiento real de las tecnologías de descarbonización, como los sistemas de gestión de la energía doméstica y la instalación de paneles solares^{128, 129, 130, 131}. Las tecnologías más eficientes pueden reducir los costos para los consumidores, lo que aumenta actividades como la conducción de vehículos y la calefacción¹³².

Limitación de recursos

Alteraciones mundiales, como la pandemia del COVID-19^{133, 134}, provocan escasez de materiales y de mano de obra disponible, lo que limita la transición hacia la descarbonización del sistema energético. Algunas cadenas de suministro de tecnología energética, en particular la solar fotovoltaica y las baterías de vehículos eléctricos, son más susceptibles que otras a la limitación de recursos (KM 13.4)^{135, 136}. Las comunidades insulares son especialmente vulnerables y tardan en recuperarse cuando las cadenas de suministro se ven interrumpidas por eventos extremos (Capítulo 23)¹³⁷.

Los materiales críticos, como los minerales raros utilizados en baterías y motores eléctricos, se extraen y producen predominantemente fuera de los EE. UU. (Figura 17.2; Capítulo 32). Los factores geopolíticos y medioambientales influyen en cómo se extraen, utilizan y reciclan estos materiales (enfoque en los riesgos para las cadenas de suministro)¹³⁸. La protección de fuentes nacionales fiables y medioambientalmente sostenibles de minerales críticos es una prioridad nacional dada la creciente demanda de tecnologías energéticas bajas en carbono¹³⁹.

La expansión del sistema energético para satisfacer la demanda futura requiere terrenos adecuados, que pueden verse limitados por el cambio climático¹⁴⁰. A medida que crece la demanda de nueva generación y transmisión, surgen estrategias integradas de uso de la tierra para apoyar múltiples objetivos, como el aumento de la seguridad alimentaria, la producción local y la resiliencia del sistema energético, así como

la conservación de la tierra y el agua. Algunos ejemplos incluyen la combinación de la energía solar con la agricultura o el montaje de paneles solares en estructuras flotantes.

Comunidades vulnerables y equidad

Las comunidades sobrecargadas se ven desproporcionadamente afectadas por el impacto climático y la injusticia energética. Estas poblaciones son las que mayormente sufren los cortes de electricidad¹⁴¹, los altos precios de la energía y los problemas de salud derivados de los contaminantes y residuos producidos por las centrales eléctricas y refinerías de combustibles fósiles^{142, 143, 144, 145}. Después del huracán Ida (2021), las zonas con una elevada proporción de población negra tuvieron que esperar más tiempo para que se restableciera el suministro eléctrico⁶¹. Los niveles domésticos de CO₂ asociado a la combustión fósil se ha relacionado con una reducción en el desarrollo cognitivo humano (Capítulo 15)¹⁴⁶. Las comunidades sobrecargadas pueden ser las que más se beneficien de la descarbonización y de una mayor resiliencia del sistema energético^{147, 148, 149, 150, 151}.

El calor extremo impacta desproporcionadamente las comunidades sobrecargadas^{149, 152}, especialmente en zonas urbanas donde abunda el asfalto y escasean los árboles^{108, 153}. Los hogares con ingresos más bajos que no utilizan o no disponen de aire acondicionado, o no lo utilizan, corren un mayor riesgo de enfermedad, como se pudo comprobar durante las olas de calor sin precedentes en el Noroeste del Pacífico (Capítulo 15)^{108, 154}.

Las comunidades sin acceso a una energía fiable son más susceptibles a los peligros derivados de eventos meteorológicos extremos. Después de los huracanes Irma y María (2017), las zonas rurales de Puerto Rico y Florida sufrieron cortes de electricidad más prolongados y tiempos de restablecimiento más lentos^{141, 155, 156}. La falta de protección térmica adecuada acentuó los efectos de la tormenta invernal de 2021 en Texas en las comunidades negras de bajo nivel socioeconómico¹⁵⁷. Los cortes de electricidad pueden aumentar lesiones y muertes por envenenamiento por monóxido de carbono debido al uso de generadores de gasolina, parrillas de carbón y calentadores de queroseno y propano dentro de hogares que carecen de ventilación adecuada^{158, 159}.

La carga económica de la energía (costo de la energía como porcentaje de los ingresos del hogar) es un indicador de la vulnerabilidad de las comunidades y los hogares^{143, 160, 161, 162}. A nivel nacional, los hogares rurales con ingresos bajos experimentan la mayor carga económica de la energía media, con el 9% (en algunas regiones llega al 15%), frente al 3% de los hogares rurales con ingresos medios y altos, y en comparación con los valores más bajos de los hogares metropolitanos¹⁶³.

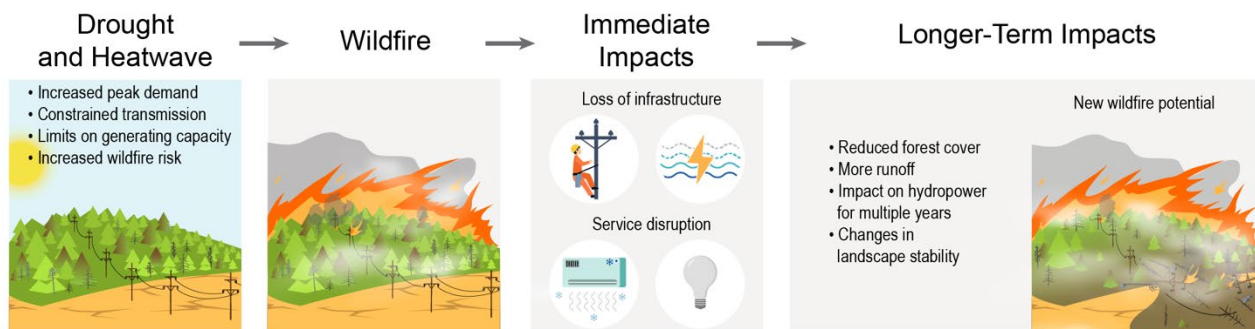
Las desigualdades energéticas pueden asociarse a fuentes de energía con menos emisiones de carbono. Aunque la transición energética creará nuevas oportunidades económicas, las comunidades y las personas que dependen del empleo y los ingresos fiscales del carbón, el petróleo o el gas natural pueden volverse económicamente más vulnerables. Las personas que ocupaban puestos de trabajo en el sector de los combustibles fósiles pueden tener dificultades para encontrar un empleo nuevo debido a insuficientes habilidades, pérdida de sueldo, desplazamientos de larga distancia o necesidad de reubicación^{164, 165}. Es posible que el número de puestos de trabajo en la construcción de energía solar y eólica en las antiguas comunidades carboneras no sea suficiente para sustituir la oferta de antiguos puestos de trabajo en el sector del carbón¹⁶⁶. La reutilización de las infraestructuras de combustibles fósiles existentes para la transición a fuentes de energía limpias puede permitir a las comunidades económicamente vulnerables realizar la transición en el mismo lugar¹⁶⁷. Las pérdidas de empleo y salarios en los sectores de los combustibles fósiles podrían compensarse con aumentos en las industrias que utilizan recursos con bajas emisiones de carbono^{168, 169, 170}, aunque se espera que los condados de los Apalaches, la región de la Costa del Golfo y el Oeste intermontañoso experimenten los impactos más significativos, incluso en los servicios locales, a medida que disminuye la base impositiva^{105, 171, 172}.

Peligros múltiples y en cascada

El cambio climático plantea peligros agudos y crónicos para el sistema energético y las comunidades, originados por tendencias coincidentes o secuenciales y eventos extremos (Figura 5.3; Capítulo 18). Las proyecciones climáticas para 2041-2050 muestran un aumento de la demanda eléctrica en Texas al mismo tiempo que puede disminuir el suministro, debido en parte a posibles disminuciones de recursos renovables como el viento, así como a reducciones de la producción energética de las centrales termoeléctricas debido a temperaturas ambiente más cálidas¹⁷³. Los eventos secuenciales pueden agravar los impactos si la recuperación no se ha producido antes del siguiente evento o peligro^{174, 175}. Las comunidades vulnerables cercanas a Houston, Texas, se vieron afectadas negativamente por la tormenta invernal de 2021 antes de haberse recuperado del huracán Harvey en 2017¹⁵⁷. Algunas zonas pueden ser más vulnerables a los peligros múltiples; por ejemplo, la urbanización exagerada o se combina con las inundaciones para agravar los efectos sobre las infraestructuras costeras¹⁷⁶.

Los riesgos cibernéticos y físicos pueden aumentar la vulnerabilidad de la red eléctrica ante el cambio climático y las condiciones meteorológicas extremas, especialmente si estos eventos coinciden^{177, 178}. En ocasiones, los ataques cibernéticos y físicos buscan agravar los daños causados a la red eléctrica por eventos extremos¹⁷⁹. Los flujos multidireccionales de datos, combustibles y electricidad aumentan las vulnerabilidades. Además, el aumento de la penetración de las energías renovables y los sistemas de energía distribuida (tecnologías que generan electricidad en el punto de uso o cerca de él) son nuevas variables que afectan el riesgo de cortes de electricidad durante eventos extremos^{177, 178}. Existen nuevos métodos para evaluar la vulnerabilidad del sistema eléctrico a estos factores de estrés y cuantificar su resiliencia¹⁸⁰.

Eventos consecutivos y en cascada que afectan el sistema energético



Los impactos climáticos secuenciales y concurrentes tienen efectos a corto y largo plazos sobre la generación y distribución de electricidad.

Figura 5.3. La sequía y las olas de calor pueden reducir la generación y el suministro de electricidad a través de mecanismos en cascada. Las sequías reducen la disponibilidad de agua y la generación de electricidad. La cobertura vegetal en peligro, incluida la mortalidad de los árboles después de las plagas de insectos, alimenta los incendios forestales. Al mismo tiempo, las olas de calor aumentan la demanda de electricidad y la dependencia del transporte, lo que también puede desencadenar incendios forestales. Los incendios forestales dañan la infraestructura eléctrica y alteran el suministro y los servicios asociados. La reducción de la vegetación aumenta la escorrentía, lo que provoca inundaciones y deslizamientos de tierra y aumenta el riesgo de incendios forestales. El ciclo de acontecimientos puede acelerarse, ya que la nueva vegetación es más sensible a las sequías y las olas de calor. Créditos de la figura: Oak Ridge National Laboratory, National Renewable Energy Laboratory y Pacific Northwest National Laboratory.

Las amenazas en cascada pueden causar sobrecargas al sistema energético. Por ejemplo, se proyecta que en California aumenten las lluvias intensas sobre zonas quemadas por incendios forestales, lo que intensificará los problemas de inundaciones para las infraestructuras energéticas¹⁸¹. La demanda de sistemas de enfria-

miento durante el verano debido a las temperaturas más cálidas coincide a veces con una reducción de la energía hidroeléctrica debido a alteraciones en la sincronización de los caudales máximos¹⁸². Además, las inundaciones seguidas de altas temperaturas que aumentan la demanda de sistemas de enfriamiento pueden saturar la red eléctrica¹⁸³.

Durante la tormenta invernal de 2021 en Texas, las temperaturas extremadamente bajas provocaron una elevada demanda de electricidad y combustibles, fallas en los equipos de generación fósil y de energías renovables e interrupciones en la cadena de suministro (Recuadro 26.2)^{24, 85}. Los pozos de gas natural y conductos se congelaron, las estaciones de compresión sufrieron cortes de electricidad y los equipos de las centrales eléctricas fallaron²⁴. Las interrupciones en el suministro y la distribución de electricidad desencadenaron fallas en cascada en otros sectores críticos, como el suministro municipal de agua y los servicios médicos^{24, 184}. Al menos 210 personas murieron como consecuencia de los cortes de electricidad y el frío¹⁸⁵.

Mensaje clave 5.3

Se están llevando a cabo esfuerzos para mejorar la capacidad de resiliencia del sistema energético

Se están realizando inversiones federales, estatales, locales, tribales y del sector privado para aumentar la resiliencia del sistema energético a los factores de estrés relacionados con el clima, y existen oportunidades para fortalecer estos avances (*confianza muy alta*). Las inversiones en curso tendrán que incluir mejoras en los edificios energéticamente eficientes, tecnología para descarbonizar el sistema energético, tecnologías avanzadas de automatización y comunicación e inteligencia artificial para optimizar las operaciones, modelación climática y metodologías de planificación bajo incertidumbres y esfuerzos para aumentar el acceso equitativo a la energía limpia (*confianza muy alta*). Una transición del sistema energético que enfatice la descarbonización y la electrificación requeriría esfuerzos en nueva generación, transmisión, distribución y suministro de combustible (*confianza muy alta*).

Las actividades para aumentar la resiliencia del sistema energético incluyen la mejora del diseño de la red, refuerzo de la infraestructura energética, gestión de la vegetación para reducir los incendios forestales^{186, 187} y la caída de árboles sobre tendidos eléctricos¹⁸⁸ y microrredes de energía limpia para las comunidades vulnerables a los cortes de electricidad¹⁸⁹. El almacenamiento de baterías combinado con la energía solar fotovoltaica puede mejorar la resiliencia de los edificios durante los cortes de electricidad¹⁹⁰. El refuerzo de las tuberías de gas natural, así como la realización de evaluaciones periódicas de tensión y mantenimiento, reducen el riesgo de hundimiento⁶⁹. Las opciones de producción de petróleo incluyen el suministro de sistemas de agua caliente en los lugares de perforación para evitar el congelamiento y la mejora de las plataformas de perforación para que sean resistentes a los huracanes¹⁹¹. Existen múltiples oportunidades para la gestión del riesgo climático en la industria eléctrica^{192, 193, 194}, con algunos estados (p. ej., California, Oregón y Nueva York) que exigen a las compañías de servicios públicos de electricidad que realicen evaluaciones de vulnerabilidad climática (KM 21.4, 32.5).

Mejores modelos climáticos que informen la planificación de la resiliencia del sistema energético

La mejora de la precisión, el detalle y las capacidades de modelación están permitiendo que los modelos de alta resolución del sistema de la Tierra y los modelos del sistema de la Tierra-humano ayuden a los respon-

sables de la toma de decisiones a reducir las vulnerabilidades al cambio climático y a informar los planes del sistema energético y las estrategias operativas a diferentes escalas espaciales^{14, 45, 195, 196, 197, 198}. Por ejemplo, la identificación de los lugares en los que las marejadas ciclónicas pueden amenazar las infraestructuras energéticas podría conducir a reforzar o trasladar dichas infraestructuras¹⁹⁹. Las proyecciones sobre la severidad y duración de las futuras sequías podrían orientar las decisiones para reducir la demanda de agua para el suministro energético^{200, 201}.

Los avances en modelación están ayudando a mejorar la comprensión del impacto del clima y los incendios forestales en las líneas de transmisión^{165, 202} y la energía solar fotovoltaica²¹, la temperatura de las corrientes para las centrales termoeléctricas⁵² y la disponibilidad de agua para la producción de energía hidroeléctrica⁴⁵ e hidrógeno²⁰³. Las aplicaciones de los modelos incluyen la estimación de la pérdida de energía y los costos de restauración por daños de huracanes²⁰⁴. Los estudios han investigado la integración de los impactos relacionados con el clima en la planificación a largo plazo para lograr resiliencia ante futuros eventos extremos^{39, 205, 206, 207, 208}.

Se están realizando esfuerzos para comprender la gama de impactos climáticos en los sistemas energéticos interconectados, lo que incluye mejoras en los modelos multisectoriales^{209, 210} las consideraciones⁴⁸ y los análisis^{182, 211, 212} y el desarrollo de modelos del sistema de la Tierra con retroalimentaciones climáticas-humanas avanzadas²¹³. Los análisis de eventos extremos, como el episodio de frío extremo de 2021 en Texas⁸⁵, los cortes de electricidad en cascada en California en 2020 y el huracán María en Puerto Rico en 2017²¹⁴ pueden utilizarse para planificar y diseñar la resiliencia intersectorial.

Abordando las amenazas múltiples

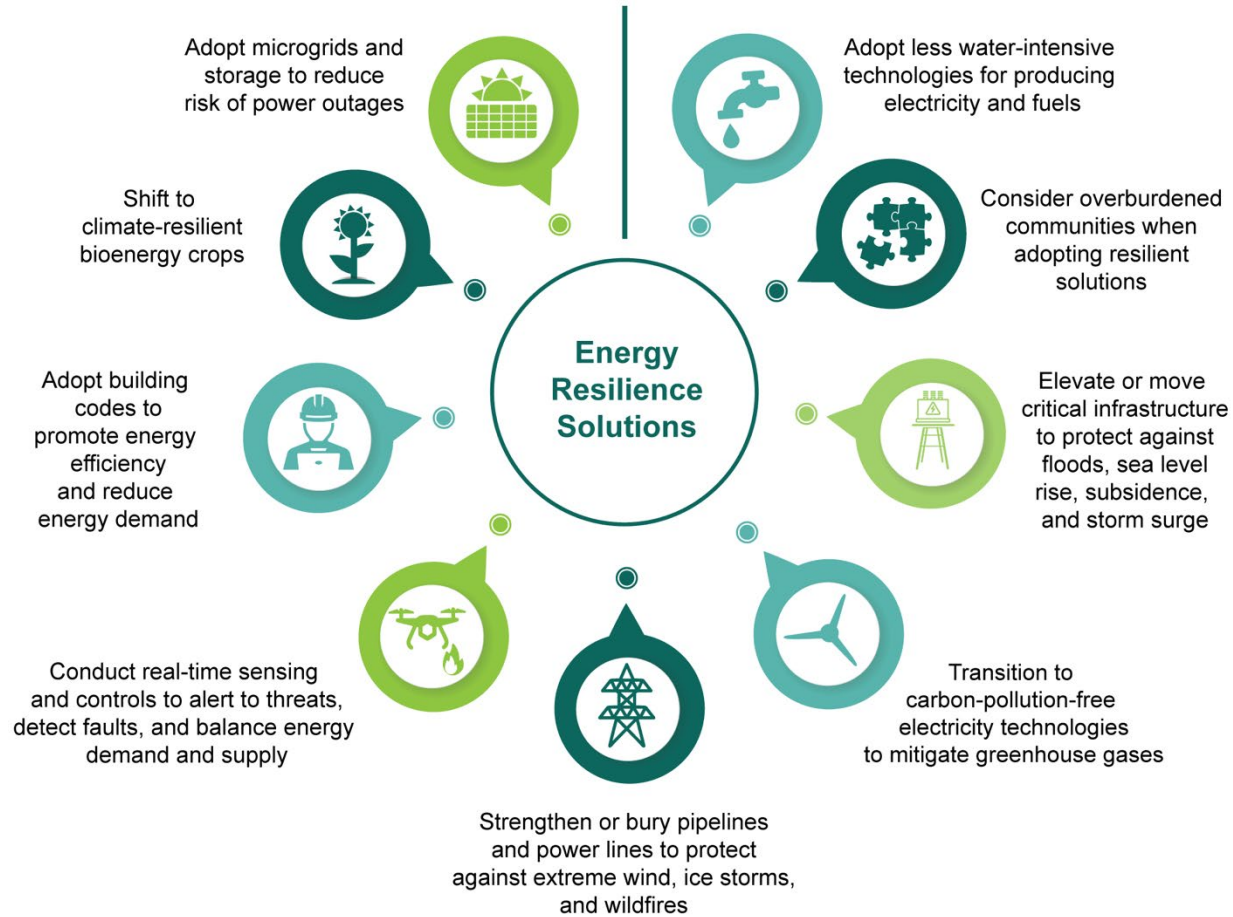
Se está avanzando en el desarrollo y la implementación de soluciones para abordar los riesgos del sistema energético derivados de los múltiples impactos del cambio climático y las amenazas de pandemias (COVID-19) y ciberataques^{177, 215, 216}, pulsos electromagnéticos^{85, 174, 176, 180, 217}, crisis del mercado²¹⁸ e interrupciones de la cadena de suministro (KM 5.2). Algunos ejemplos incluyen la elaboración de modelos y análisis holísticos que reflejen la interconexión de los sistemas energéticos e hídricos y el diseño y funcionamiento de sistemas energéticos que tengan en cuenta los efectos combinados de las tendencias climáticas y los eventos meteorológicos extremos^{205, 219}.

Reforzando los sistemas energéticos para reducir la vulnerabilidad al cambio climático

El diseño y el funcionamiento de los sistemas energéticos están siendo reforzados para reducir su vulnerabilidad al cambio climático (Figura 5.4). Algunos ejemplos incluyen la elevación o traslado de equipos para evitar inundaciones, refuerzo de tuberías y tendidos eléctricos o su traslado bajo tierra para reducir los daños causados por el viento o el hielo y el riesgo de incendios forestales y reciclaje del agua de enfriamiento y despliegue de tecnologías de enfriamiento en seco para reducir la susceptibilidad de las centrales eléctricas a la sequía²²⁰. La mejora de los códigos de construcción puede aportar cambios (p. ej., edificios eficientes conectados a la red eléctrica, techos fríos o materiales de construcción resilientes) al entorno construido (Capítulo 12), permitiendo la reducción de energía y emisiones (Capítulo 32) y el uso de tecnologías (p. ej., edificios adaptables o edificios preparados para la energía fotovoltaica; Capítulo 31) para fomentar la resiliencia al cambio climático. Los drones y sensores identifican los riesgos de incendios forestales en tiempo real, lo que permite adoptar medidas de protección²²¹.

Se dispone de nuevas herramientas y modelos para identificar las vulnerabilidades de las infraestructuras y las probabilidades de tormenta, así como para determinar enfoques efectivos de refuerzo^{214, 222, 223}, lo que incluye aceleración de las inversiones en infraestructuras para mejorar la resiliencia de los sistemas costeros a las tormentas²²⁴.

Posibles soluciones para la resiliencia del sistema energético



Existen muchas estrategias para aumentar la resiliencia del sistema energético al cambio climático.

Figura 5.4. Aunque el cambio climático conlleva riesgos para el sistema energético, existen muchos enfoques para mejorar la resiliencia del sistema energético. Las opciones de resiliencia incluyen el cubrimiento subterráneo de los tendidos eléctricos, elevación de las infraestructuras críticas, introducción de microrredes y generación distribuida y mejora del monitoreo. Créditos de la figura: EPA, FEMA y DOE.

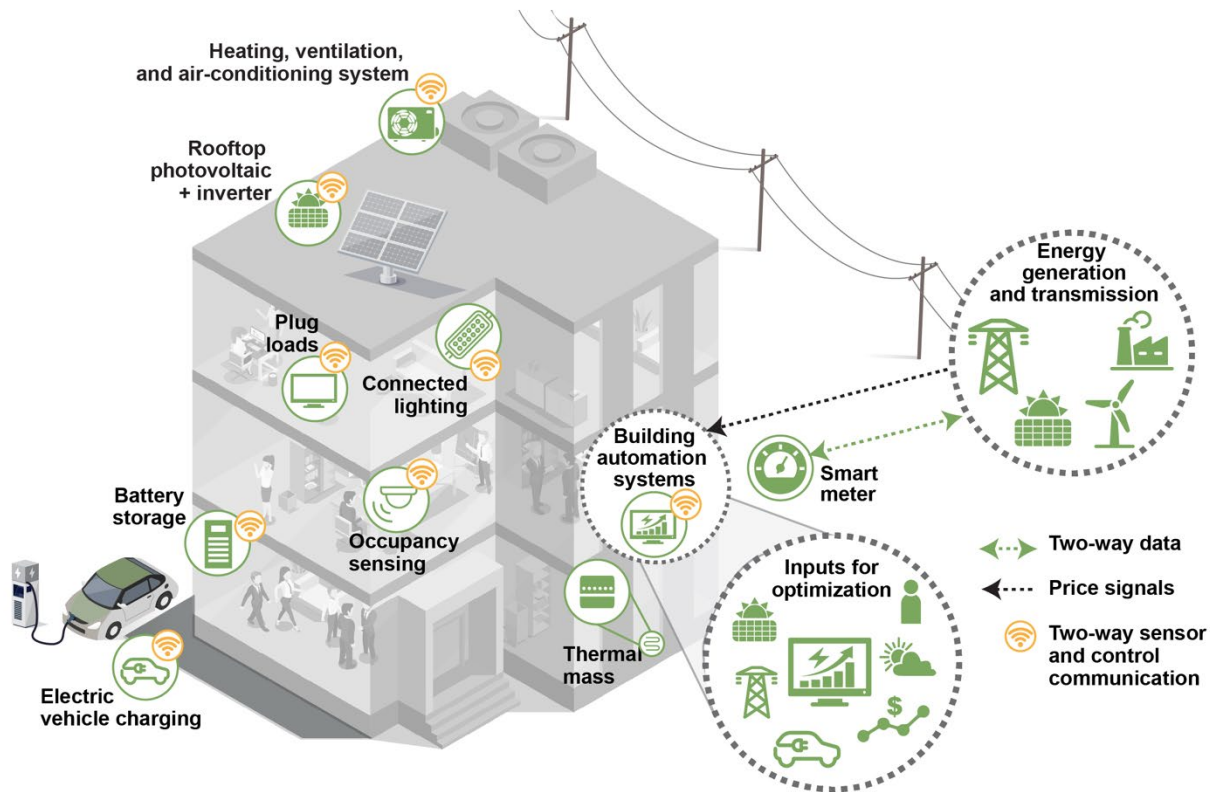
Automatización, tecnologías de información y edificios eficientes de red eléctrica interactiva

Los avances en sensores, contadores inteligentes y aparatos conectados a la internet han permitido supervisar en tiempo real los sistemas energéticos. Los algoritmos de aprendizaje automático facilitan la comprensión del abastecimiento, la demanda y las operaciones energéticas²²⁵. La red eléctrica puede ser más resiliente a los factores de estrés climático si se prevé mejor la generación de energía renovable a futuro, se detectan y diagnostican fallas operativas, se equilibran el abastecimiento y la demanda para tener en cuenta la generación eléctrica usando fuentes variables y la carga de vehículos y se detectan ciberataques²²⁶.

Los edificios eficientes de red eléctrica interactiva (Figura 5.5) aplican eficiencia energética, tecnologías inteligentes y gestión flexible de la carga²²⁷. Los sistemas de control avanzados^{228, 229} predicen la demanda energética en tiempo real y maximizan la eficiencia, minimizan los costos y reducen las emisiones de carbono de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (heating, ventilation and air conditioning, HVAC). Se proyecta que la demanda de gas natural para la calefacción residencial en condiciones de

frío extremo se reduzca hasta un 29%⁸⁶. Mediante la reducción y el cambio de la sincronización del consumo de electricidad, los edificios eficientes de red eléctrica interactiva podrían reducir las emisiones de carbono en 80 millones de toneladas métricas al año de aquí a 2030, es decir, el 6% de las emisiones totales de carbono del sector eléctrico²²⁷.

Edificios eficientes de red eléctrica interactiva



Las metas de descarbonización están impulsando una nueva concepción para el diseño y funcionamiento de los edificios.

Figura 5.5. Los edificios eficientes de red eléctrica interactiva (Grid-interactive efficient buildings, GEB) integran tecnologías de eficiencia energética (HVAC, conectadores e iluminación), energía renovable en el sitio (fotovoltaica), vehículos eléctricos y almacenamiento eléctrico con sensores inteligentes (HVAC, iluminación y ocupación) y optimización del control para permitir una demanda flexible y proporcionar electricidad excedente a la red eléctrica a través del contador inteligente cuando la demanda supera la oferta o cuando el abastecimiento de la red es limitado. Los sistemas de automatización de edificios pueden importar el precio de la electricidad de la red y el factor de intensidad de carbono en tiempo real y comunicar el potencial de reducción de la demanda a la red a través del sensor bidireccional y el protocolo de comunicación. Adaptado de Nubbe y Yamada 2019²³⁰ © 2019 Guidehouse Inc.

Desarrollo y despliegue de tecnologías para descarbonizar el sistema energético

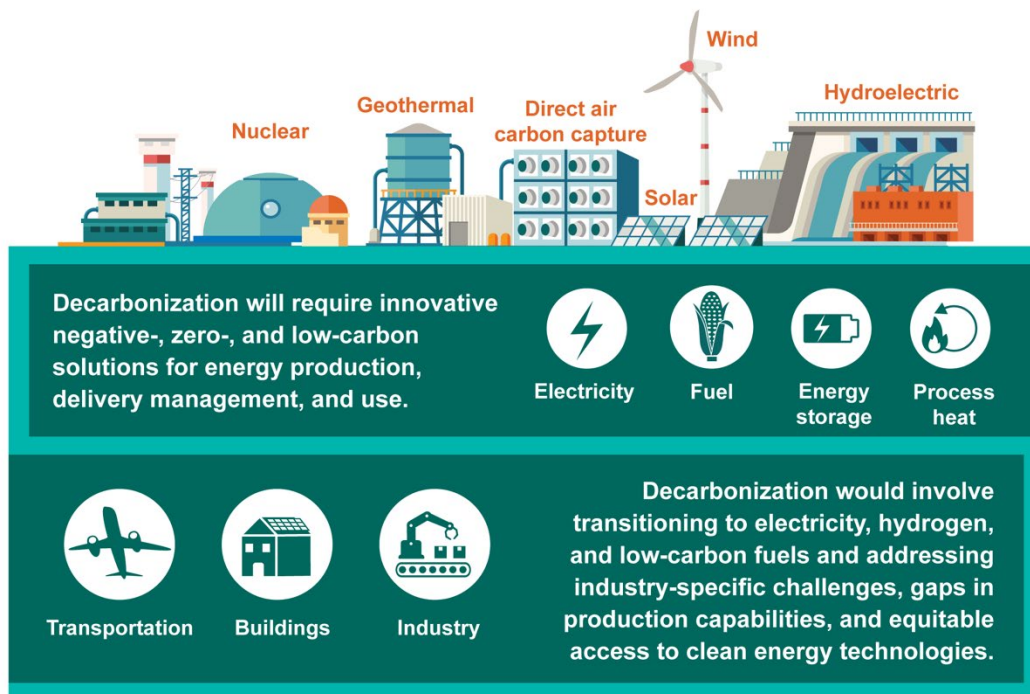
Se está llevando a cabo una transición significativa para descarbonizar los principales sectores económicos (Figura 5.6)^{231, 232, 233} apoyada por políticas (p. ej., mandatos para reducir el uso de combustibles fósiles e incentivos fiscales), la caída de los costos y las innovaciones tecnológicas. En el sector eléctrico se han logrado avances significativos en las tecnologías energéticas con bajas emisiones de carbono.

Se proyecta un crecimiento de la demanda de energía eléctrica debido a la creciente electrificación y al continuo crecimiento económico. Se proyecta que el descenso de los costos de capital y los subsidios

públicos, incluidas las iniciativas de la IRA, impulsen el aumento de la generación de energía renovable solar y eólica en un 325% y un 138%, respectivamente, para 2050 en comparación con 2022³. Se proyecta una mayor electrificación de los sectores de uso final con la adopción de más bombas de calor y vehículos eléctricos, así como hornos de arco eléctrico en la industria siderúrgica.

Algunas tecnologías pueden aportar beneficios energéticos a otros sectores. Por ejemplo, la energía nuclear produce energía térmica que puede utilizarse en aplicaciones industriales, y así sustituir los combustibles fósiles. Además de reducir las emisiones relacionadas con la energía, la electricidad puede ser más fiable, eficiente y económica en comparación con otras fuentes de energía⁹⁵. Las altas tasas de electrificación podrían verse favorecidas por una mayor integración de las energías renovables^{93, 234}.

Descarbonización del sistema energético

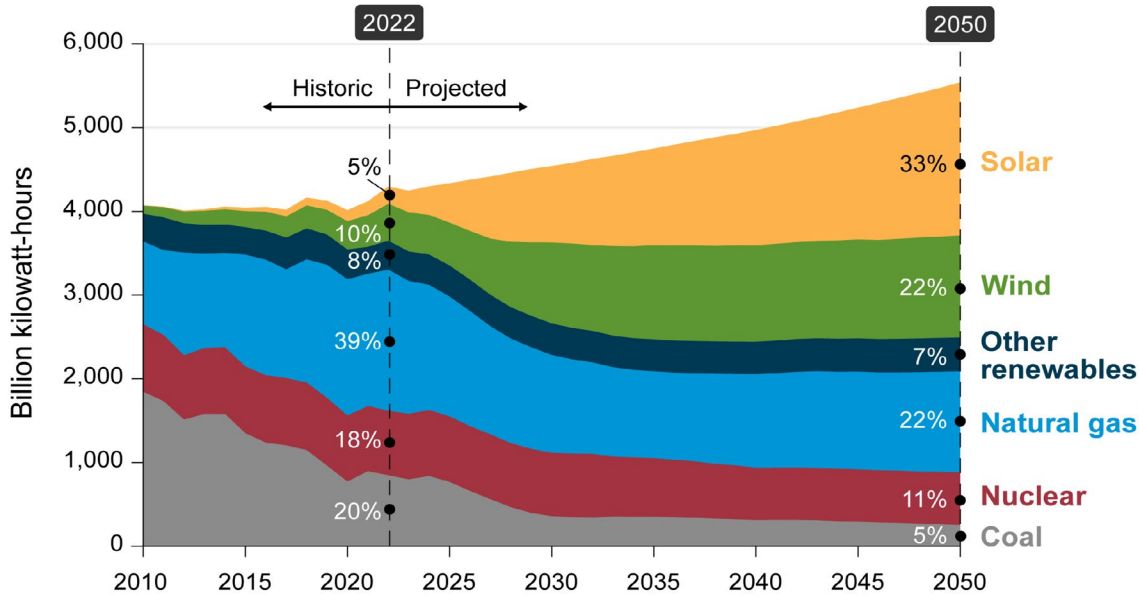


La descarbonización exigirá soluciones innovadoras en múltiples sectores.

Figura 5.6. La descarbonización del sistema energético se basará en el aumento de la innovación, despliegue de tecnologías energéticas limpias como la captura de carbono, reactores nucleares modulares pequeños, hidrógeno y una mayor integración y electrificación de los edificios residenciales y comerciales, la industria y el transporte. Créditos de la figura: DOE, Idaho National Laboratory, NOAA NCEI y CISESS NC.

Con la caída de los costos de la energía eólica y solar en un 70 y 90%, respectivamente, en la última década, la nueva capacidad productiva está alcanzando niveles históricos²³⁵ y se proyecta que aumenten (Figura 5.7)^{3, 112, 236}. Entre los avances que contribuyen a la reducción de costos se encuentran los tecnológicos, la mejora de la eficiencia en la generación y fabricación de energía, la reducción de los costos de capital y la acumulación de experiencia operativa. Sin embargo, es necesaria una mayor transformación para alcanzar las metas de un 100% de electricidad limpia en 2035 y cero emisiones netas de GHG en 2050²³⁷. Cumplir ambas metas requiere la electrificación del transporte, los edificios y la industria, así como la producción de electricidad con bajas emisiones de carbono a partir de energías renovables, nuclear y de combustibles fósiles con captura de carbono^{112, 123, 238}. El ritmo de descarbonización vendrá determinado, en parte, por la aceptación pública de las nuevas tecnologías e infraestructuras energéticas²³⁹.

Fuentes históricas y proyectadas de generación de electricidad en los EE. UU.



La red eléctrica del país sigue ampliando el uso de tecnologías energéticas limpias.

Figura 5.7. La mayoría de las proyecciones de generación de electricidad contemplan un crecimiento significativo de las fuentes renovables. Se prevé que la legislación promulgada recientemente aumente los índices de utilización de tecnologías con bajas emisiones de carbono. Adaptado de la Agencia de Investigación Ambiental (Environmental Investigation Agency, EIA) 2023³.

Se están produciendo avances en el rendimiento y el costo de otras tecnologías energéticas. En la última década, los costos de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos han bajado un 85%²⁴⁰, y se está avanzando en el reciclaje de las baterías y el desarrollo de materiales alternativos al litio. Los esfuerzos para reducir los costos de producción de hidrógeno limpio en un 80% y \$1 por kilogramo podrían desbloquear nuevos mercados y crear empleo en industrias como las de fabricación de acero, producción de amoníaco limpio, almacenamiento de energía y camiones pesados²⁴¹.

Las demostraciones de pequeños reactores nucleares modulares avanzados han comenzado con la aprobación del diseño por parte de la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos²⁴², así como esfuerzos para utilizar centrales nucleares existentes y centrales alimentadas con combustibles fósiles con captura de carbono para generar hidrógeno limpio y purificar agua además de producir electricidad.

Soluciones para comunidades vulnerables y justicia energética

Las políticas relacionadas con la descarbonización del sistema energético pueden promover la equidad energética. El derecho procesal, que se refiere a la participación equitativa y la influencia en las decisiones energéticas²⁴³, es clave para encontrar soluciones energéticas equitativas. Las oportunidades para promover la equidad energética y reducir las cargas económicas de la energía incluyen la toma de decisiones de forma colectiva e inclusiva en torno a los cortes de energía iniciados por compañías de servicios públicos; adopción de sistemas de almacenamiento de energía con soluciones descentralizadas, como microrredes o sistemas fuera de la red⁷³; desarrollo de oportunidades para compartir la energía solar en la comunidad (incluyendo paneles solares) y el almacenamiento de energía^{144, 244}; y la construcción de refugios de enfriamiento o calefacción de emergencia para atender a las comunidades sobrecargadas²⁴⁵. Un ejemplo de comunidad indígena que implementa una transición equitativa de combustibles fósiles a energías renovables es el proyecto de energía solar a gran escala y microrred de la tribu Blue Lake Rancheria^{223, 246}.

Se espera que muchas tecnologías de descarbonización disminuyan los impactos medioambientales, como la contaminación del aire (KM 14.5, 32.4)^{247, 248, 249, 250}, beneficiando potencialmente a las comunidades sobrecargadas que sufren de forma desproporcionada la contaminación procedente de carreteras, refinerías y centrales eléctricas^{251, 252, 253}. Sin embargo, los impactos de algunas tecnologías de descarbonización pueden cambiar la magnitud, la ubicación y el tipo de contaminación (KM 32.4)^{254, 255, 256, 257}. La legislación medioambiental y los requisitos para la concesión de permisos desempeñan un papel importante al abordar los impactos.

La carga económica de energía sigue siendo elevada para los grupos sobrecargados. Muchas políticas y programas que promueven las energías limpias o la eficiencia energética son inaccesibles para los hogares con bajos ingresos²⁵⁸. Las políticas que fijan los precios de la energía durante eventos extremos o dan prioridad al restablecimiento energético de las comunidades sobrecargadas pueden proporcionar un apoyo más equitativo¹⁸⁴. Los programas de asistencia federal pueden ayudar a las comunidades a superar los retos climáticos y mejorar la resiliencia (Capítulo 31)²⁵⁹. Además, se están creando programas federales para promover la equidad energética y atender a las comunidades sobrecargadas^{260, 261}.

Cuentas trazables

Descripción del proceso

El equipo de autores fue seleccionado para aportar experiencias, conocimientos y perspectivas diversas al capítulo. Algunos miembros participaron en procesos de evaluación previos. La diversidad del equipo refleja adecuadamente el espectro de los impactos climáticos actuales y proyectados en el complejo sistema energético de la nación, las funciones del sistema energético en la seguridad nacional y el bienestar económico y la necesidad de acceso equitativo a energía fiable y asequible y de justicia medioambiental. La composición íntegramente federal del equipo de autores fue una decisión del Comité Directivo Federal de la Evaluación Nacional del Clima (National Climate Assessment, NCA). El equipo de autores demostró tener experiencia en las siguientes áreas:

- Caracterización de la oferta y la demanda básicas de electricidad y combustible a partir de diversas fuentes a múltiples escalas.
- Caracterización de los efectos del clima en el sector energético, así como las oportunidades para mitigar el cambio climático y las opciones para aumentar la resiliencia a los factores de estrés relacionados con el clima, a escala nacional, regional, estatal y local.
- Desarrollo e implementación de modelos de sistemas energéticos para proyectar la distribución de tecnologías, el uso de combustibles y las emisiones de GHG y contaminantes atmosféricos en escenarios de amplio alcance.
- Análisis de la sensibilidad del sistema energético a factores como la política, los mercados, la tecnología y los cambios físicos.
- Desarrollo e implementación de modelos, herramientas e información climatológica para caracterizar los riesgos del sector energético.
- Apoyo a las partes interesadas locales, estatales, tribales, federales y del sector privado en la integración de temas relacionados con el cambio climático en la planificación a largo plazo y la ejecución de proyectos.
- Evaluación del impacto medioambiental de las tecnologías energéticas nuevas y emergentes.
- Análisis de factores tecnológicos, sociales (incluida la justicia), económicos y empresariales relevantes para la reducción de riesgos y la resiliencia de los sistemas energéticos.

El equipo de autores se reunió virtualmente una vez a la semana para desarrollar el capítulo, solucionar problemas y llegar a un consenso. Además, el equipo se reunió con autores representantes de otros capítulos para identificar y abordar asuntos transversales. Para garantizar que el capítulo sea útil para las partes interesadas, se organizó un taller de participación pública en el que los asistentes tuvieron la oportunidad de intercambiar ideas con los equipos de redacción sobre los temas clave del capítulo, compartir recursos y dar su opinión sobre asuntos de importancia para ellos. Los participantes del taller representaban al gobierno (federal, estatal, local y tribal), organizaciones sin fines de lucro, instituciones académicas, empresas y el sector privado, grupos comunitarios, estudiantes y otros.

Para desarrollar los mensajes clave, el equipo realizó búsquedas en la literatura científica, incluidos artículos científicos, informes gubernamentales e informes de organizaciones no gubernamentales, además de incorporar los aportes del taller. El equipo se basó en mediciones (p. ej., datos sobre los efectos actuales de eventos extremos pasados y datos energéticos gubernamentales); resultados de modelos (p. ej., de modelos climáticos, de abastecimiento y demanda de energía, de efectos climáticos y de resiliencia de los factores de estrés del cambio climático en el sistema energético); perspectivas publicadas por expertos, algunos de los cuales identificaron fuentes de incertidumbre y aportes del taller y de los revisores expertos de este capítulo. El capítulo no hace referencia a artículos periodísticos.

Mensaje clave 5.1

El cambio climático amenaza los sistemas energéticos

Descripción de la base de evidencia

El impacto del aumento de las concentraciones de GHG en el calentamiento global (Capítulo 2) y el aumento del nivel del mar (Capítulo 3) está bien establecido en investigaciones científicas y en las publicaciones de apoyo, y el impacto del cambio climático en los eventos extremos es cada vez mayor (Capítulo 3). Los mecanismos por los que el cambio climático impacta las infraestructuras energéticas y la demanda de electricidad también cuentan con una sólida base de investigación, con amplios análisis documentados de las tendencias climáticas y los eventos extremos del pasado, así como investigaciones científicas sobre los impactos proyectados que utilizan datos empíricos²⁶² o datos de proyecciones climáticas a escala reducida^{29, 263} y modelos detallados de diseños de sistemas energéticos futuros²⁶⁴. Un estudio nuevo relacionó los resultados de los modelos climáticos globales a un modelo de pronóstico meteorológico para proyectar los efectos energéticos regionales³². La importancia de los eventos extremos ha requerido nuevos tipos de modelos empíricos, algunos de los cuales se integran con modelos o resultados climáticos (p. ej., la relación entre el humo y la capacidad o productividad fotovoltaica)^{21, 22}. Los datos históricos sobre huracanes se combinan con los modelos marinos para comprender mejor las variables que afectan la energía eólica marina¹³. Los modelos econométricos nuevos basados en variables meteorológicas, datos de consumo y estimaciones de crecimiento de la población son también componentes importantes de la base de evidencia relacionada con las proyecciones de la demanda de electricidad¹⁰³. Existe un amplio consenso en la literatura sobre los mecanismos y los tipos de impacto de la demanda de electricidad²⁶⁵, aunque se espera que los impactos difieran según el lugar¹⁰³. Las magnitudes de los impactos proyectados sobre el sistema energético dependen de la magnitud del cambio climático y del aumento de la tasa, la magnitud y la localización de los eventos extremos (KM 23.4, 27.4). Existe una base de estudios a nivel regional sobre cómo el sistema energético está siendo impactado y se proyecta que sea impactado^{31, 32} y, en última instancia, cómo esos impactos pueden afectar a los usuarios de energía locales. El lugar y el momento en que se producirán estos impactos locales es mucho más difícil de modelar en el contexto de las tendencias de la temperatura y las precipitaciones, y especialmente en el contexto de los eventos extremos, que a escalas más regionales y continentales⁸.

Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Gran parte de las evidencias clave relacionadas con los eventos extremos son empíricas y oportunistas. Aunque se dispone de datos significativos para documentar los efectos de los eventos extremos en los sistemas energéticos, esos datos y análisis suelen publicarse después de dos a cuatro años posteriores al evento. Por ejemplo, al momento de redactar este informe, todavía se estaban publicando importantes trabajos sobre los efectos de los huracanes Harvey, Irma y María en 2017 en las infraestructuras y la justicia energética^{82, 141, 155, 157}. La mayoría de los análisis de los impactos del huracán Ida en 2021 no estarán disponibles hasta dentro de varios años, aunque Coleman *et al.* (2023)⁶¹ es una excepción. Hay oportunidad para realizar evaluaciones más oportunas de los principales impactos de los eventos extremos en los sistemas energéticos, con el fin de informar debates políticos, inversiones y esfuerzos relevantes para aumentar la resiliencia de los sistemas energéticos y la adaptación humana.

Hay más nivel de confiabilidad en las proyecciones nacionales de variables climáticas y eventos extremos que en las estimaciones de impactos locales. Por ello, los autores confían en que la frecuencia y la intensidad de los eventos extremos aumenten a escala nacional (Capítulo 2), pero no hay confianza en cuanto a la localización de eventos específicos que puedan impactar el abastecimiento y la demanda de energía en las próximas décadas^{13, 266}. Del mismo modo, las proyecciones de la energía eólica solo son tan buenas como la resolución espacial y temporal, a menudo aproximada, de los modelos climáticos utilizados³¹. Los autores confían en que la demanda de enfriamiento de los edificios durante el verano aumente en la mayoría de las regiones del territorio continental de Estados Unidos¹⁰³. En los estudios en los que se reduce la escala de las proyecciones climáticas, las exigencias informáticas y los requisitos de almacenamiento de datos limitan el número de proyecciones que pueden utilizarse y, por tanto, aumentan la incertidumbre, como lo reconocen los autores citados²⁶³. Las proyecciones de los costos de los daños físicos a las infraestructuras no incluyen los derivados de inundaciones, vientos fuertes y tormentas de hielo, que están deficientemente representados a la escala espacial aproximada de los modelos climáticos⁵⁷.

Además, en los estudios citados, a veces, hay desacuerdo entre los investigadores. Mientras que las investigaciones nuevas sugieren que la frecuencia de los eventos meteorológicos de fríos y de nevadas intensas puede estar aumentando debido al calentamiento de la temperatura del Ártico²⁶⁷, existe cierto desacuerdo en la comunidad investigadora^{268, 269} con respecto a esta proyección y al impacto que dicho cambio puede tener en el aumento o la disminución de las futuras demandas de calefacción a nivel regional. Además, existe incertidumbre sobre los recursos eólicos y las tendencias futuras^{31, 262, 270}.

Muchos datos del modelo son inciertos. Por ejemplo, las proyecciones de bioenergía potencial dependen de la intensidad de fertilización incierta de CO₂³⁰. Además, las proyecciones de demanda de electricidad y gas natural son sensibles a factores socioeconómicos, como la proporción entre población urbana y rural o los cambios en los precios de la energía, que pueden reflejar el ritmo de los cambios en las tecnologías energéticas¹⁰³.

Descripción de confianza y probabilidad

Con base en datos históricos, tendencias recientes, proyecciones de modelos y análisis de atribución, hay una *confianza muy alta* y es *prácticamente seguro* que el cambio climático y los eventos meteorológicos extremos están impactando negativamente el sistema energético de la nación y que, a menos que se tomen medidas, el cambio climático seguirá afectando el sistema energético, incluso dañando infraestructuras y operaciones energéticas. Hay una *confianza muy alta* en que el abastecimiento y el suministro de energía corren un alto riesgo debido a los cambios climáticos^{271, 272}, lo que incluye cambios en la demanda^{45, 273}, daños en infraestructuras y operaciones^{271, 274} y los efectos resultantes sobre las vidas humanas y los medios de subsistencia. Es *prácticamente seguro* que las tendencias del cambio climático se mantendrán, basándose en la experiencia del pasado y en las proyecciones de los modelos (Capítulo 2), y los efectos sobre los sistemas energéticos variarán con el tiempo y el lugar y aumentarán con los incrementos proyectados en

la frecuencia, la intensidad y la duración de amenazas meteorológicas extremas, incluidas precipitaciones extremas, temperaturas extremas, aumento del nivel del mar y tormentas, sequías, incendios forestales y deshielo del permafrost más intensos.

Mensaje clave 5.2

Múltiples factores agravantes afectan la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y las comunidades

Descripción de la base de evidencia

Descarbonización

Cada vez hay más evidencia científica que demuestra tanto la necesidad como los avances en la descarbonización del sistema energético mediante una mayor electrificación y aplicaciones de energías limpias, como la eólica y la solar; hidrógeno, la bioenergía; energía nuclear modular; geotérmica; hidroeléctrica; otros almacenamientos a largo plazo; y la captura, utilización y almacenamiento de carbono (Capítulo 32)^{95, 96, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 117, 118, 119, 121}. Sin embargo, se necesitan más estudios para caracterizar mejor cómo el rápido despliegue de las tecnologías de descarbonización creará múltiples retos adicionales (KM 32.2)^{122, 123, 124}, que incluyen la necesidad de infraestructuras energéticas adicionales asociadas a la expansión de la demanda de electrificación (como generación, transmisión y distribución), la expansión de la capacidad de fabricación de vehículos eléctricos y baterías, el desarrollo de infraestructuras de recarga, la adaptación de las operaciones de refinación para reflejar una menor demanda de gasolina y diésel y la aparición de industrias de reciclaje, reutilización o eliminación de baterías al final de su vida útil (KM 13.4)^{125, 126}. También se necesita más información para caracterizar mejor los comportamientos de los consumidores y el costo y el rendimiento de las tecnologías de descarbonización, que influirán en el ritmo, la escala y el alcance de su adopción por la sociedad^{128, 129, 130, 131, 132}. Existen oportunidades para caracterizar mejor los beneficios colaterales tanto de la reducción de las emisiones de GHG como del aumento de la resiliencia climática a través de la descarbonización, entre ellos, por ejemplo, la cuantificación de los beneficios del despliegue de la generación de energía limpia distribuida con microrredes y almacenamiento que reduce las emisiones y proporciona generación de reservas durante los cortes de energía.

Limitación de recursos

Mientras que existen muchas investigaciones y conocimientos industriales sobre la dinámica de la cadena de suministro global, los mercados de materias primas y los materiales estratégicos, hay menos literatura científica que se centre específicamente en la cadena de suministro actual y futura y en las limitaciones de recursos asociadas a las partes del sistema energético que están ganando, o se prevé que ganen, una mayor participación en el mercado de la economía energética, incluidos los vehículos eléctricos, las energías eólica y solar y el almacenamiento en baterías. Falta investigación en esta área, en particular sobre las relaciones y sensibilidades entre los componentes del sector energético que pueden estar compitiendo por las mismas materias primas, así como sobre el potencial de materiales o procesos alternativos que pueden ayudar a abordar las limitaciones o los riesgos de la cadena de suministro, en particular cuando sectores distintos del energético pueden estar compitiendo por materias primas, materiales o personal similares.

Amenazas cibernéticas y físicas a la red eléctrica

Un creciente número de investigaciones científicas relacionadas con la seguridad cibernética o física respaldan la consideración conjunta del cambio climático y los ataques cibernéticos o físicos en los análisis de red y las respuestas de resiliencia^{177, 178}. Sin embargo, muchos análisis basados en datos de incidentes reales del sistema, medidas de respuesta y defensas no están disponibles públicamente y, por tanto, no se

hace referencia a ellos. Cada vez se investigan más las amenazas humanas y medioambientales al sistema energético, cómo se relacionan entre sí y cómo pueden optimizarse objetivos múltiples como la descarbonización del sistema energético, la resiliencia del sistema a los factores de estrés climático y las ciberdefensas a medida que cambia la combinación de generación de energía y evolucionan las amenazas en la red y otras infraestructuras energéticas^{177, 178}.

Al igual que en el caso de la ciberseguridad, se está produciendo una cantidad significativa de análisis científico relacionado con peligros y amenazas múltiples y en cascada, especialmente en aquellos casos que involucran una amenaza humana o un incidente cibernético. Además, las noticias anecdóticas hacen referencia a eventos extremos consecutivos, pero no se dispone de evidencia científica suficiente que indique si algunas de estas múltiples amenazas están aumentando, si existe una asociación causal entre ellas o si tienen un efecto compuesto sobre los sistemas energéticos. Además, si bien se dispone de información sobre la caracterización de los beneficios de un sistema de red inteligente que puede redirigir automáticamente la energía a los sistemas eléctricos que más se necesitan para minimizar los impactos de los cortes, existen oportunidades para caracterizar mejor las consecuencias no deseadas de un sistema de red inteligente y su mayor susceptibilidad a las amenazas climáticas y cibernéticas extremas.

Comunidades vulnerables y equidad

Abundan las investigaciones científicas sobre justicia medioambiental relacionadas con la ubicación de las fuentes de energía de combustibles fósiles y la consecuente contaminación del aire¹⁴⁵ y amenazas para la salud en comunidades sobrecargadas o cerca de ellas. Cada vez hay más evidencia que demuestra que las comunidades sobrecargadas se ven afectadas de forma desproporcionada por los impactos del cambio climático, como la escasez de recursos para desplazarse y el escaso acceso a infraestructuras de alta calidad, como el aire acondicionado²⁷⁵. Además, la exposición desigual a las islas de calor en las ciudades es objeto de análisis en la literatura científica^{149, 152}. Se dispone de más información sobre las desigualdades en el suministro de electricidad (p. ej., acceso a la energía, carga económica de la energía¹⁶² y tiempos de restablecimiento de la electricidad⁶¹) que sobre las desigualdades en el suministro o en la diferencia de demanda (incluidas las temperaturas de uso de los sistemas de enfriamiento¹⁵⁴) en respuesta al cambio climático y los eventos extremos.

Peligros múltiples y en cascada

Cada vez son más las investigaciones científicas que se centran en la comprensión del clima, los ecosistemas y los sistemas humanos y sus implicaciones para el sistema energético. En particular, en la última década se han logrado avances significativos para comprender mejor el nexo entre agricultura, energía y agua, los riesgos correlacionados en estos tres ámbitos y las estrategias para abordarlos. Múltiples eventos extremos y otros factores de estrés relacionados con el clima afectan las mismas regiones; p. ej., los incendios forestales pueden ir seguidos de inundaciones¹⁸¹ y múltiples huracanes pueden afectar una misma localidad costera¹⁵⁷. Las proyecciones climáticas muestran que el aumento de la demanda y la disminución de la oferta de electricidad coincidirán en las regiones durante las olas de calor¹⁷³. Los últimos eventos de calor extremo (p. ej., Turner *et al.* 2021⁵⁵), frío extremo (p. ej., Busby *et al.* 2021²⁴) e inundaciones (p. ej., Collins *et al.* 2019⁴⁷) en Texas, por ejemplo, han ayudado a avanzar investigaciones para comprender las relaciones entre la red eléctrica, el suministro de combustible y la infraestructura, y el diseño y la fijación de precios del mercado, así como la forma en que los seres humanos responden a los eventos extremos en tiempo real y cómo las comunidades sobrecargadas se ven desproporcionadamente impactadas¹⁵⁷. Se trata de sistemas complejos y dinámicos. Aunque nuevos marcos de modelación multidisciplinar están mejorando la comprensión de la dinámica de los sistemas multisectoriales que incluyen la energía, existen muchas oportunidades para mejorar estos esquemas, incluida la mejora de la resolución espacial y temporal, el detalle sectorial, las interacciones intersectoriales, la representación de los factores que impactan la energía y la justicia

medioambiental y la utilización de la informática de alto rendimiento para abordar los requisitos de datos y computación^{174, 176}.

Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Un mayor análisis e investigación multidisciplinar e intersectorial puede conducir a una mejor comprensión de los peligros múltiples y en cascada en todo el sistema energético. Dado que las amenazas en cascada están correlacionadas, éstas pueden ser más fáciles de predecir que las amenazas múltiples, que son independientes¹⁷⁶. Podrían realizarse análisis basados en datos para comprender mejor las dinámicas de los sistemas complejos que impactan los riesgos climáticos y las vulnerabilidades del sector de la energía que involucran el comportamiento humano, los mercados, las infraestructuras, la electricidad, los combustibles y las condiciones medioambientales.

Los resultados de la investigación sobre justicia energética son sensibles a las escalas espaciales de análisis²³⁹.

El limitado tamaño de la muestra de localidades, regiones o sectores que han alcanzado sus metas de descarbonización o electrificación hasta la fecha limita la información que puede fundamentar los análisis de las implicaciones climáticas para el sistema energético. La mayoría de las investigaciones científicas no consideran los esfuerzos pasados o actuales, sino que se orientan hacia el futuro y abordan las posibles implicaciones y oportunidades. Existe una necesidad urgente de conocer mejor los impactos localizados a corto plazo de los esfuerzos de descarbonización en las redes antiguas de distribución, sobre todo donde la penetración de los vehículos eléctricos está creciendo rápidamente.

Las brechas en la investigación incluyen la necesidad de comprender mejor las implicaciones de la cadena de suministro global y las relaciones entre aquellas tecnologías o materiales que serán importantes para mitigar el cambio climático y aumentar la resiliencia de los sistemas energéticos a los factores de estrés y a los eventos relacionados con el clima. También es necesario comprender mejor otras limitaciones de recursos que influyen en la rápida ampliación de las estrategias de descarbonización, como la optimización del uso de la tierra y las concesiones mutuas, las limitaciones de infraestructura, la dimensión humana de las transiciones energéticas, incluido el desarrollo de la mano de obra, y las vías para desarrollar y utilizar materias primas o materiales alternativos, en particular los que pueden mitigar los riesgos geopolíticos o de seguridad. Existe incertidumbre sobre cómo los eventos en cascada cambiarán en el futuro, cómo las actividades humanas alterarán el riesgo de eventos múltiples y cómo las nuevas normas de diseño de infraestructuras podrían alterar el riesgo¹⁷⁴.

El intercambio de investigación entre las compañías de servicios públicos y la industria, la investigación de dominio clasificado y la investigación científica pública podría ayudar a los expertos a comprender mejor las amenazas cibernéticas actuales y futuras para el sistema energético, lo que incluye cómo y dónde esas amenazas pueden exacerbar o aprovechar los riesgos relacionados con el cambio climático.

Descripción de confianza y probabilidad

Con base en un creciente conjunto de evidencias, incluidas las tendencias recientes y la investigación científica, hay una *confianza muy alta* en que los peligros múltiples y en cascada —muchos de ellos relacionados con el clima^{175, 179, 181}— y los efectos múltiples de los cambios en las tecnologías, las políticas y los mercados seguirán impactando la vulnerabilidad al cambio climático del sistema energético del país. Es *muy probable* que la descarbonización del sistema energético y el aumento de la electrificación creen nuevas y crecientes demandas en la infraestructura eléctrica existente y requieran una inversión significativa en nueva generación y suministro¹²⁴. Si bien estos cambios reducirán la dependencia en las fuentes de combustibles fósiles, es *muy probable* que, a menos que se enfrenten, ocasionarán un aumento de las vulnerabilidades y las limitaciones de la cadena de suministro.

Mensaje clave 5.3

Se están realizando esfuerzos para mejorar la capacidad de resiliencia del sistema energético

Descripción de la base de evidencia

Gran parte de la evidencia de este mensaje clave es cualitativa, con citas en el texto principal. Por ejemplo, las opciones de resiliencia energética y las tecnologías de descarbonización se describen en el texto principal sin evidencia adicional aquí.

Dentro de la evidencia que existe con relación a los esfuerzos en favor de los sistemas energéticos está la legislación y las recomendaciones de los estados. En general, el sector energético lidera la descarbonización de la economía, con 22 estados, el Distrito de Columbia y Puerto Rico que han promulgado leyes para alcanzar metas de energía 100% limpia²⁷⁶. Se exigen planes de recursos integrados (integrated resources plans, IRP) a las compañías de servicios públicos de electricidad de 33 estados que trabajan con socios en el desarrollo de un marco de adaptación específico para los sectores de servicios eléctricos²⁷⁷. La Guía de acción estatal sobre energía y medioambiente de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos²⁷⁸ proporciona un marco directivo sobre cómo representar el cambio climático en los IRP de las compañías de servicios públicos. Cooke *et al.* (2021)²⁷⁹ revisó las mejores prácticas en consideración del cambio climático en los IRP en 40 compañías de servicios públicos de electricidad de los EE. UU., admitiendo un mayor nivel de complejidad en el proceso. Aunque los IRP no son jurídicamente vinculantes, algunos estados como California y Nueva York legislaron sobre algunas recomendaciones. También se aprovechan las evaluaciones de vulnerabilidad a escala estatal para elaborar legislación (KM 21.4, 32.5).

La reducción de la incertidumbre en futuras proyecciones climáticas es esencial para la planificación futura, la adaptación humana y el aumento de la resiliencia de los sistemas energéticos, y varios estudios han demostrado los progresos realizados^{195, 196, 201, 209, 210, 280, 281, 282, 283, 284, 285}. También se han elaborado curvas de fragilidad de los daños sufridos por las centrales eléctricas (carbón, gas, solar y eólica) y los componentes de la red eléctrica, así como los costos de sustitución y reparación en escenarios de huracanes²⁰⁴. Incluso en contextos en los que las proyecciones climáticas son inciertas, los avances en los modelos son útiles para la planificación; por ejemplo, los modelos de tormentas sintéticas generan información sobre las cargas extremas de viento y olas necesarias para la planificación de la energía eólica marina¹⁴.

Se están realizando investigaciones para determinar las necesidades de consolidación²⁴ y reducir la vulnerabilidad de las tecnologías de los sistemas energéticos convencionales al cambio climático¹⁹¹. Por ejemplo, diversos estudios reflejan los esfuerzos que está realizando el sector del petróleo y gas para afrontar el reto del calentamiento climático en Alaska, incluidas las mejoras tecnológicas implementadas en la exploración sísmica, las prácticas de explotación y mantenimiento y otras mejoras (p. ej., el uso de termosifones o dispositivos de refrigeración que enfrían el suelo bajo las infraestructuras de petróleo y gas para protegerlo de los peligros por el deshielo del permafrost).

Se están produciendo importantes innovaciones y despliegues de tecnologías de generación de electricidad con cero emisiones de carbono, como la solar fotovoltaica y la eólica terrestre y marina. Los costos y el rendimiento de las baterías y el almacenamiento a largo plazo también están mejorando a medida que aumenta su capacidad para apoyar la integración de las energías renovables¹⁹⁰. Las tecnologías nucleares avanzadas (pequeños reactores modulares y microrreactores) están en fase de demostración. Los estudios muestran investigaciones innovadoras, desarrollo, demostración y despliegue para abordar la gestión del carbono a gran escala. Entre ellas se encuentran las aplicaciones de la CCUS en centrales eléctricas e industrias, así como la creciente atención a la eliminación del dióxido de carbono de la atmósfera mediante

la captura directa en el aire y la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono^{286, 287}. Además, los avances en las fuentes de combustible con bajas emisiones de carbono pueden complementar la electricidad limpia, como el hidrógeno (es decir, producido a partir de gas natural con CCUS o por electrólisis del agua utilizando fuentes de electricidad sin emisiones de carbono) para sustituir el papel que actualmente desempeña el gas natural.

Por el lado de la demanda, hay evidencias de avances en la reducción del carbono mediante la electrificación. Estas evidencias incluyen el aumento de la comercialización y venta de vehículos eléctricos y el despliegue de estaciones de recarga^{115, 288}. Además, las políticas federales (p. ej., normas de eficiencia y emisiones) y los incentivos (p. ej., créditos fiscales para vehículos eléctricos) parecen estar logrando reducir el uso de combustibles fósiles. Además, las compañías eléctricas están evaluando cómo los vehículos eléctricos pueden mejorar la resiliencia de la red eléctrica a eventos extremos proporcionando energía de reserva durante los cortes de suministro.

Los estudios demuestran cómo las nuevas tecnologías, la reducción de costos y una serie de políticas estatales y federales habilitadoras están contribuyendo a la transición hacia un sistema energético limpio (Capítulos 25, 32)^{4, 5, 7, 8, 9, 10, 11}. Sin embargo, hay inconsistencias en la adopción de estas políticas en todo el país. Por ejemplo, algunos estados y comunidades locales están adoptando códigos de construcción, incentivos y prohibiciones para cambiar a fuentes de energía limpias^{10, 11}, mientras que otros estados están adoptando políticas que prohibirían las acciones necesarias para reducir las emisiones de GHG, como la prohibición de restringir el uso de combustibles fósiles. Aunque se está avanzando, las acciones varían de un estado a otro al establecer un marco político propicio para aumentar el ritmo, la escala y el alcance de la transición energética, con el fin de suministrar más energía limpia y construir un futuro energético más resiliente.

Principales incertidumbres y brechas en la investigación

La investigación sobre la resiliencia energética, incluidos los enfoques actuales y los métodos futuros, presenta brechas. Gran parte de la investigación sobre resiliencia y planificación energética a largo plazo realizada hasta la fecha ha incluido estudios de casos desarrollados en silos, y es necesario integrar más la gama de modelos y las recomendaciones asociadas sobre la toma de decisiones²⁸⁹. Por ejemplo, los efectos de una mayor penetración de las energías renovables en la resiliencia del sistema eléctrico, incluida la planificación, la respuesta y la restauración, no se han estudiado en profundidad¹⁷⁷. La información sobre las implicaciones de las medidas que las comunidades están utilizando para aumentar la resiliencia ante eventos extremos es limitada. Durante los cortes de electricidad, las comunidades remotas o insulares suelen recurrir a la generación diésel de reserva para aumentar la potencia. Sin embargo, en los análisis actuales suelen faltar datos sobre los tipos de medidas empleadas y los costos y beneficios asociados a estas opciones de respaldo. Los esfuerzos de investigación más específicos para los modelos de sistemas de energía incluyen el desarrollo de herramientas de nueva generación para crear dependencias multiescala entre dominios con una eficiencia computacional estratégica para una adopción más rápida, lo que mejorará la capacidad de planificar para lo impredecible, incluidos eventos extremos y ataques cibernéticos²⁸⁹.

Se están realizando grandes esfuerzos en el desarrollo de modelos del sistema de la Tierra que podrían informar al sector energético, incluidas las capacidades regionales para el refinamiento de mallas que permitan simulaciones de alta resolución en la región de interés en entornos globales²⁹⁰. Además, aunque se ha avanzado en el desarrollo de modelos de energía, el medioambiente y las ciencias sociales, aún hay brechas en la comprensión de sus complejas interacciones²¹⁰. Entre los posibles ámbitos de estudio y desarrollo se incluyen el nexo entre energía y agua. Específicamente, la investigación en innovación tecnológica incluye tecnologías de desalinización competitivas en costos, la transformación del agua producida en un recurso reutilizable, la reducción del impacto del agua en el sector energético, el aumento de la recuperación de recursos de las aguas residuales y el desarrollo de pequeños sistemas modulares

de energía-agua²⁹¹. Las proyecciones de futuras infraestructuras energéticas en conformidad con las políticas actuales, así como de las trayectorias de descarbonización, investigan ahora sistemáticamente las demandas de agua en todos los sectores²⁹², ya que las diferentes tecnologías dependen de la extracción de agua o del uso para consumo con complejas interacciones y coordinación con otros usos del agua. Se necesita una modelación de mayor resolución para abordar las prioridades y vulnerabilidades institucionales regionales²⁹³.

La justicia energética es un campo de investigación relativamente nuevo. Mientras que los investigadores están empezando a registrar y analizar las injusticias distributivas (p. ej., los tiempos diferenciales de restablecimiento del suministro eléctrico en las distintas comunidades)^{41, 155, 156}, la falta de comprensión de las diferencias de suministro y de vulnerabilidad limita la capacidad de las compañías de servicios públicos y de los gobiernos para estudiar y desarrollar políticas y respuestas justas. Además, a menudo, no se dispone de datos con una mayor resolución que la escala de los sectores de la población; por lo tanto, las injusticias distributivas locales son más inciertas que las injusticias que se producen a escalas espaciales mayores.

Se están llevando a cabo numerosas investigaciones utilizando modelos de optimización de sistemas energéticos y de evaluación integrada para comprender los impactos medioambientales de las distintas estrategias de mitigación del cambio climático, en particular sobre los contaminantes coemitidos y la calidad del aire²⁴⁷, así como en los impactos sobre la mano de obra y los cultivos²⁹⁴. Aunque estos estudios tienden a sugerir beneficios para la calidad del aire asociados a la descarbonización, algunos sugieren que podría haber cambios en la localización de la contaminación y, potencialmente, la introducción de nuevas fuentes de contaminación del aire²⁵⁷. Existen oportunidades para mejorar nuestra comprensión de las emisiones de contaminantes atmosféricos asociadas a las tecnologías de descarbonización, el grado en que estas emisiones pueden controlarse y el papel de los permisos y las normativas medioambientales al influir en las decisiones de ubicación y control. También hay oportunidades para comprender mejor cómo los cambios resultantes afectan las poblaciones vulnerables, por ejemplo, cómo los cambios en las emisiones de contaminantes atmosféricos provocan cambios en los impactos a escala de vecindarios.

Los métodos de análisis del ciclo de vida pueden utilizarse para conocer los beneficios medioambientales relativos de las tecnologías y vías alternativas de mitigación del cambio climático, incluidos los impactos de la fabricación de tecnologías energéticas y la construcción de infraestructuras energéticas²⁹⁵. La integración de los métodos de análisis del ciclo de vida con los modelos de sistemas energéticos y de evaluación integrada podría ayudar a disminuir los vacíos en la investigación para comprender mejor el impacto ambiental de las transiciones energéticas^{254, 296}.

Descripción de confianza y probabilidad

Las investigaciones llevadas a cabo por autores del gobierno, el mundo académico y el sector privado han aportado evidencias que les permiten concluir con *confianza muy alta* que se están realizando mejoras en la resiliencia del sistema energético frente a los factores de estrés relacionados con el clima, lo que incluye mejoras en edificios energéticamente eficientes; tecnología para descarbonizar el sistema energético; tecnologías avanzadas de automatización y comunicación, inteligencia artificial y aprendizaje automático para optimizar las operaciones; capacidades de modelado climático y metodologías de planificación; esfuerzos para aumentar el acceso equitativo a la energía limpia; y apoyo federal a las comunidades para inversiones en resiliencia. Existe una *confianza muy alta* en que hay oportunidades para aprovechar estos esfuerzos y que sería necesario aumentar su ritmo, escala y alcance para abordar la crisis climática^{87, 232, 233, 236}.

Referencias

1. NOAA, 2023: Greenhouse gases continued to increase rapidly in 2022. National Oceanic and Atmospheric Administration, April 5, 2023. <https://www.noaa.gov/news-release/greenhouse-gases-continued-to-increase-rapidly-in-2022>
2. EIA, 2021: U.S. Energy-Related Carbon Dioxide, 2021. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. https://www.eia.gov/environment/emissions/carbon/pdf/2021_co2analysis.pdf
3. EIA, 2023: Annual Energy Outlook 2023. AEO2023 Narrative. U.S. Energy Information Administration. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2023_narrative.pdf
4. Infrastructure Investment and Jobs Act. 117th Congress, Pub. L. No. 117-58, 135 Stat. 429, November 15, 2021. <https://www.congress.gov/117/plaws/publ58/PLAW-117publ58.pdf>
5. Inflation Reduction Act of 2022. 117th Congress, Pub. L. No. 117-169, 136 Stat. 1818, August 16, 2022. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text>
6. DOE, 2022: The Inflation Reduction Act Drives Significant Emissions Reductions and Positions America to Reach our Climate Goals. DOE/OP-0018. U.S. Department of Energy, Office of Policy, 6 pp. https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-08/8.18%20InflationReductionAct_Factsheet_Final.pdf
7. IEA, 2023: World Energy Investment 2023. International Energy Agency, Paris, France. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
8. Steinberg, D.C., M. Brown, R. Wiser, P. Donohoo-Vallett, P. Gagnon, A. Hamilton, M. Mowers, C. Murphy, and A. Prasana, 2023: Evaluating Impacts of the Inflation Reduction Act and Bipartisan Infrastructure Law on the U.S. Power System. NREL/TP-6A20-85242. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85242.pdf>
9. CRS, 2022: Inflation Reduction Act of 2022 (IRA): Provisions Related to Climate Change. CRS Report R47262. Congressional Research Service. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/r/r47262>
10. To Amend the Administrative Code of the City of New York, in Relation to the Use of Substances with Certain Emissions Profiles. Local Law No. 154 of 2021, Council Int. No. 2317-A of 2021, City of New York, December 22, 2021. http://www.nyc.gov/assets/buildings/local_laws/ll154of2021.pdf
11. CEC, 2022: 2022 Building Energy Efficiency Standards. California Energy Commission. <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-energy-efficiency-standards/2022-building-energy-efficiency>
12. DOE, 2013: U.S. Energy Sector Vulnerabilities to Climate Change and Extreme Weather. U.S. Department of Energy. <https://www.energy.gov/articles/us-energy-sector-vulnerabilities-climate-change-and-extreme-weather>
13. Hashemi, M.R., B. Kresning, J. Hashemi, and I. Ginis, 2021: Assessment of hurricane generated loads on onshore wind farms: A closer look at most extreme historical hurricanes in New England. *Renewable Energy*, **175**, 593–609. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.042>
14. Kresning, B., M. Reza Hashemi, and C. Gallucci, 2020: Simulation of hurricane loading for proposed offshore windfarms off the US Northeast coast. *Journal of Physics: Conference Series*, **1452** (1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1452/1/012026>
15. Davlasheridze, M., Q. Fan, W. Highfield, and J. Liang, 2021: Economic impacts of storm surge events: Examining state and national ripple effects. *Climatic Change*, **166** (1), 11. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03106-z>
16. EIA, 2022: Gulf of Mexico Fact Sheet. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. http://www.eia.gov/special/gulf_of_mexico/
17. Cinner, J.E., W.N. Adger, E.H. Allison, M.L. Barnes, K. Brown, P.J. Cohen, S. Gelcich, C.C. Hicks, T.P. Hughes, J. Lau, N.A. Marshall, and T.H. Morrison, 2018: Building adaptive capacity to climate change in tropical coastal communities. *Nature Climate Change*, **8** (2), 117–123. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0065-x>
18. Hinkel, J., J.C.J.H. Aerts, S. Brown, J.A. Jiménez, D. Lincke, R.J. Nicholls, P. Scussolini, A. Sanchez-Arcilla, A. Vafeidis, and K.A. Addo, 2018: The ability of societies to adapt to twenty-first-century sea-level rise. *Nature Climate Change*, **8** (7), 570–578. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0176-z>

19. Balch, J.K., J.T. Abatzoglou, M.B. Joseph, M.J. Koontz, A.L. Mahood, J. McGlinchy, M.E. Cattau, and A.P. Williams, 2022: Warming weakens the night-time barrier to global fire. *Nature*, **602** (7897), 442–448. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04325-1>
20. Muhs, J.W., M. Parvania, and M. Shahidepour, 2020: Wildfire risk mitigation: A paradigm shift in power systems planning and operation. *Journal of Power and Energy*, **7**, 366–375. <https://doi.org/10.1109/oaipse.2020.3030023>
21. Donaldson, D.L., D.M. Piper, and D. Jayaweera, 2021: Temporal solar photovoltaic generation capacity reduction from wildfire smoke. *IEEE Access*, **9**, 79841–79852. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3084528>
22. Gilletly, S.D., N.D. Jackson, and A. Staid, 2021: Quantifying wildfire-induced impacts to photovoltaic energy production in the western United States. In: *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. Fort Lauderdale, FL, 20–25 June 2021. IEEE, 1619–1625. <https://doi.org/10.1109/pvsc43889.2021.9518514>
23. Muehleisen, W., G.C. Eder, Y. Voronko, M. Spielberger, H. Sonnleitner, K. Knoebl, R. Ebner, G. Ujvari, and C. Hirschl, 2018: Outdoor detection and visualization of hailstorm damages of photovoltaic plants. *Renewable Energy*, **118**, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.010>
24. Busby, J.W., K. Baker, M.D. Bazilian, A.Q. Gilbert, E. Grubert, V. Rai, J.D. Rhods, S. Shidore, C.A. Smith, and M.E. Webber, 2021: Cascading risks: Understanding the 2021 winter blackout in Texas. *Energy Research & Social Science*, **77**, 102106. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102106>
25. Allen-Dumas, M., B. Kc, and C.I. Cunliff, 2019: Extreme Weather and Climate Vulnerabilities of the Electric Grid: A Summary of Environmental Sensitivity Quantification Methods. ORNL/TM-2019/1252. U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. <https://doi.org/10.2172/1558514>
26. Murphy, S., L. Lavin, and J. Apt, 2020: Resource adequacy implications of temperature-dependent electric generator availability. *Applied Energy*, **262**, 114424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114424>
27. Ahmad, A., 2021: Increase in frequency of nuclear power outages due to changing climate. *Nature Energy*, **6** (7), 755–762. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00849-y>
28. Morrow, W.R., A. Gopal, G. Fitts, S. Lewis, L. Dale, and E. Masanet, 2014: Feedstock loss from drought is a major economic risk for biofuel producers. *Biomass and Bioenergy*, **69**, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.006>
29. Coburn, J. and S.C. Pryor, 2023: Projecting future energy production from operating wind farms in North America. Part II: Statistical downscaling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **62** (1), 81–101. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-22-00471>
30. Gernaat, D.E.H.J., H.S. de Boer, V. Daioglou, S.G. Yalew, C. Müller, and D.P. van Vuuren, 2021: Climate change impacts on renewable energy supply. *Nature Climate Change*, **11** (2), 119–125. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00949-9>
31. Karnauskas, K.B., J.K. Lundquist, and L. Zhang, 2018: Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. *Nature Geoscience*, **11** (1), 38–43. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0029-9>
32. Losada Carreño, I., M.T. Craig, M. Rossol, M. Ashfaq, F. Batibeniz, S.E. Haupt, C. Draxl, B.-M. Hodge, and C. Brancucci, 2020: Potential impacts of climate change on wind and solar electricity generation in Texas. *Climatic Change*, **163** (2), 745–766. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02891-3>
33. Solaun, K. and E. Cerdá, 2019: Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **116**, 109415. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109415>
34. Yin, J., A. Molini, and A. Porporato, 2020: Impacts of solar intermittency on future photovoltaic reliability. *Nature Communications*, **11** (1), 4781. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18602-6>
35. Bukhary, S., S. Ahmad, and J. Batista, 2018: Analyzing land and water requirements for solar deployment in the Southwestern United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 3288–3305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.016>
36. EIA, 2021: Electricity Data Browser: Net Generation, Conventional Hydroelectric, All Sectors, Annual. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. <https://www.eia.gov/electricity/data/browser/>

37. EIA, 2022: Today in Energy: California Drought Could Reduce Hydroelectric Generation to Half of Normal Levels. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=52578>
38. Voisin, N., A. Dyreson, T. Fu, M. O'Connell, S.W.D. Turner, T. Zhou, and J. Macknick, 2020: Impact of climate change on water availability and its propagation through the western U.S. power grid. *Applied Energy*, **276**, 115467. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115467>
39. Webster, M., K. Fisher-Vanden, V. Kumar, R.B. Lammers, and J. Perla, 2022: Integrated hydrological, power system and economic modelling of climate impacts on electricity demand and cost. *Nature Energy*, **7** (2), 163–169. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00958-8>
40. Zhao, G., H. Gao, and S.-C. Kao, 2021: The implications of future climate change on the blue water footprint of hydropower in the contiguous US. *Environmental Research Letters*, **16** (3), 034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd78d>
41. Sharma, S., J. Waldman, S. Afshari, and B. Fekete, 2019: Status, trends and significance of American hydropower in the changing energy landscape. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **101**, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.028>
42. Brown, T.C., V. Mahat, and J.A. Ramirez, 2019: Adaptation to future water shortages in the United States caused by population growth and climate change. *Earth's Future*, **7** (3), 219–234. <https://doi.org/10.1029/2018ef001091>
43. 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>
44. 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>
45. Kao, S.C., M. Ashfaq, D. Rastogi, S. Gangrade, R.U. Martinez, A. Fernandez, G. Konapala, N. Voisin, T. Zhou, W. Xu, H. Gao, B. Zhao, and C. Zhao, 2022: The Third Assessment of the Effects of Climate Change on Federal Hydropower. ORNL/TM-2021/2278. U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. <https://doi.org/10.2172/1887712>
46. Turner, S.W.D., N. Voisin, J. Fazio, D. Hua, and M. Jourabchi, 2019: Compound climate events transform electrical power shortfall risk in the Pacific Northwest. *Nature Communications*, **10** (1), 8. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07894-4>
47. EIA, 2021: Electricity Explained: How Electricity is Generated. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/how-electricity-is-generated.php>
48. Grubert, E. and K.T. Sanders, 2018: Water use in the United States energy system: A national assessment and unit process inventory of water consumption and withdrawals. *Environmental Science & Technology*, **52** (11), 6695–6703. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00139>
49. Sanders, K.T., 2015: Critical review: Uncharted waters? The future of the electricity–water nexus. *Environmental Science & Technology*, **49** (1), 51–66. <https://doi.org/10.1021/es504293b>
50. Rosa, L., D.L. Sanchez, G. Realmonte, D. Baldocchi, and P. D'Odorico, 2021: The water footprint of carbon capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **138**, 110511. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110511>
51. Mays, G., 2021: Ch. 21. Small modular reactors (SMRs): The case of the United States of America. In: *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*, 2nd ed. Ingersoll, D.T. and M.D. Carelli, Eds. Woodhead Publishing, 521–553. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823916-2.00021-7>
52. Cheng, Y., N. Voisin, J.R. Yearsley, and B. Nijssen, 2020: Thermal extremes in regulated river systems under climate change: An application to the southeastern U.S. rivers. *Environmental Research Letters*, **15** (9), 094012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8f5f>
53. Liu, L., M. Hejazi, H. Li, B. Forman, and X. Zhang, 2017: Vulnerability of US thermoelectric power generation to climate change when incorporating state-level environmental regulations. *Nature Energy*, **2** (8), 17109. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.109>

54. Miara, A., J.E. Macknick, C.J. Vörösmarty, V.C. Tidwell, R. Newmark, and B. Fekete, 2017: Climate and water resource change impacts and adaptation potential for US power supply. *Nature Climate Change*, **7** (11), 793–798. <https://doi.org/10.1038/nclimate3417>
55. Turner, S.W.D., K. Nelson, N. Voisin, V. Tidwell, A. Miara, A. Dyreson, S. Cohen, D. Mantena, J. Jin, P. Warnken, and S.-C. Kao, 2021: A multi-reservoir model for projecting drought impacts on thermoelectric disruption risk across the Texas power grid. *Energy*, **231**, 120892. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120892>
56. Climate Central, 2022: Climate Matters: Surging Weather-related Power Outages [Webpage]. <https://www.climatecentral.org/climate-matters/surging-weather-related-power-outages>
57. Fant, C., B. Boehlert, K. Strzepek, P. Larsen, A. White, S. Gulati, Y. Li, and J. Martinich, 2020: Climate change impacts and costs to U.S. electricity transmission and distribution infrastructure. *Energy*, **195**, 116899. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116899>
58. Emerton, R., C. Brimicombe, L. Magnusson, C. Roberts, C. Di Napoli, H.L. Cloke, and F. Pappenberger, 2022: Predicting the unprecedented: Forecasting the June 2021 Pacific Northwest heatwave. *Weather*, **77** (8), 272–279. <https://doi.org/10.1002/wea.4257>
59. Song, F., G.J. Zhang, V. Ramanathan, and L.R. Leung, 2022: Trends in surface equivalent potential temperature: A more comprehensive metric for global warming and weather extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **119** (6), e2117832119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2117832119>
60. Bartos, M., M. Chester, N. Johnson, B. Gorman, D. Eisenberg, I. Linkov, and M. Bates, 2016: Impacts of rising air temperatures on electric transmission ampacity and peak electricity load in the United States. *Environmental Research Letters*, **11** (11), 114008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/114008>
61. Coleman, N., A. Esmalian, C.-C. Lee, E. Gonzales, P. Koirala, and A. Mostafavi, 2023: Energy inequality in climate hazards: Empirical evidence of social and spatial disparities in managed and hazard-induced power outages. *Sustainable Cities and Society*, **92**, 104491. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104491>
62. EIA, 2021: Today in Energy: U.S. Electricity Customers Experienced Eight Hours of Power Interruptions in 2020. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=50316>
63. Nazaripouya, H., 2020: Power grid resilience under wildfire: A review on challenges and solutions. In: 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Montreal, QC, Canada, 2–6 August 2020. IEEE. <https://doi.org/10.1109/pesgm41954.2020.9281708>
64. Panteli, M. and P. Mancarella, 2015: Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research*, **127**, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.012>
65. Cerrai, D., D.W. Wanik, M.A.E. Bhuiyan, X. Zhang, J. Yang, M.E.B. Frediani, and E.N. Anagnostou, 2019: Predicting storm outages through new representations of weather and vegetation. *IEEE Access*, **7**, 29639–29654. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2902558>
66. D'Amico, D.F., S.M. Quiring, C.M. Maderia, and D.B. McRoberts, 2019: Improving the Hurricane Outage Prediction Model by including tree species. *Climate Risk Management*, **25**, 100193. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.100193>
67. Brettschneider, S. and I. Fofana, 2021: Evolution of countermeasures against atmospheric icing of power lines over the past four decades and their applications into field operations. *Energies*, **14** (19), 6291. <https://doi.org/10.3390/en14196291>
68. Arab, A., A. Khodaei, R. Eskandarpour, M.P. Thompson, and Y. Wei, 2021: Three lines of defense for wildfire risk management in electric power grids: A review. *IEEE Access*, **9**, 61577–61593. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3074477>
69. Oruji, S., M. Ketabdar, D. Moon, V. Tsao, and M. Ketabdar, 2022: Evaluation of land subsidence hazard on steel natural gas pipelines in California. *Upstream Oil and Gas Technology*, **8**, 100062. <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2021.100062>
70. de Bruijn, K.M., C. Maran, M. Zygnerski, J. Jurado, A. Burzel, C. Jeuken, and J. Obeysekera, 2019: Flood resilience of critical infrastructure: Approach and method applied to Fort Lauderdale, Florida. *Water*, **11** (3), 517. <https://doi.org/10.3390/w11030517>

71. Khanam, M., G. Sofia, M. Koukoulou, R. Lazin, E.I. Nikolopoulos, X. Shen, and E.N. Anagnostou, 2021: Impact of compound flood event on coastal critical infrastructures considering current and future climate. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **21** (2), 587–605. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-587-2021>
72. Kwasinski, A., F. Andrade, M.J. Castro-Sitiriche, and E. O'Neill-Carrillo, 2019: Hurricane Maria effects on Puerto Rico electric power infrastructure. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, **6** (1), 85–94. <https://doi.org/10.1109/jpets.2019.2900293>
73. Abatzoglou, J.T., C.M. Smith, D.L. Swain, T. Ptak, and C.A. Kolden, 2020: Population exposure to pre-emptive de-energization aimed at averting wildfires in Northern California. *Environmental Research Letters*, **15**, 094046. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba135>
74. Rhodes, N., L. Ntaimo, and L. Roald, 2021: Balancing wildfire risk and power outages through optimized power shut-offs. *IEEE Transactions on Power Systems*, **36** (4), 3118–3128. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3046796>
75. Antoniou, A., A. Dimou, E. Zacharis, F. Konstantopoulou, and P. Karvelis, 2020: Adapting oil & gas infrastructures to climate change. *Pipeline Technology Journal*. <https://www.pipeline-journal.net/articles/adapting-oil-gas-infrastructures-climate-change>
76. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2020: *Strengthening Post-Hurricane Supply Chain Resilience: Observations from Hurricanes Harvey, Irma, and Maria*. The National Academies Press, Washington, DC, 136 pp. <https://doi.org/10.17226/25490>
77. Ni, W., Y. Liang, Z. Li, Q. Liao, S. Cai, B. Wang, H. Zhang, and Y. Wang, 2022: Resilience assessment of the downstream oil supply chain considering the inventory strategy in extreme weather events. *Computers & Chemical Engineering*, **163**, 107831. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107831>
78. Sichani, M.E. and J.E. Padgett, 2021: Performance assessment of oil supply chain infrastructure subjected to hurricanes. *Journal of Infrastructure Systems*, **27** (4), 04021033. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000637](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000637)
79. Dong, J., Z. Asif, Y. Shi, Y. Zhu, and Z. Chen, 2022: Climate change impacts on coastal and offshore petroleum infrastructure and the associated oil spill risk: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10** (7), 849. <https://doi.org/10.3390/jmse10070849>
80. EIA, 2022: Oil and Petroleum Products Explained: Use of Oil. U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/use-of-oil.php>
81. EIA, 2020: Today in Energy: Hurricane Laura Shut in More Gulf of Mexico Crude Oil Production Than Any Storm Since 2008. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, accessed October 2, 2020. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=45376>
82. Davis, A., D. Thrift-Viveros, and C.M.S. Baker, 2021: NOAA scientific support for a natural gas pipeline release during Hurricane Harvey flooding in the Neches River Beaumont, Texas. *International Oil Spill Conference Proceedings*, **2021** (1), 687018. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2021.1.687018>
83. Qin, R., N. Khakzad, and J. Zhu, 2020: An overview of the impact of Hurricane Harvey on chemical and process facilities in Texas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **45**, 101453. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101453>
84. GAO, 2021: Offshore Oil and Gas: Updated Regulations Needed to Improve Pipeline Oversight and Decommissioning. GAO-21-293. U.S. Government Accountability Office. <https://www.gao.gov/products/gao-21-293>
85. Doss-Gollin, J., D.J. Farnham, U. Lall, and V. Modi, 2021: How unprecedented was the February 2021 Texas cold snap? *Environmental Research Letters*, **16** (6), 064056. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0278>
86. Speake, A., P. Donohoo-Vallett, E. Wilson, E. Chen, and C. Christensen, 2020: Residential natural gas demand response potential during extreme cold events in electricity-gas coupled energy systems. *Energies*, **13** (19), 5192. <https://doi.org/10.3390/en13195192>
87. IPCC, 2021: Summary for policymakers. In: *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, 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

88. Ileri, E.C., H. Her, A. Mazounie, and L. Pinson, 2021: DRILL, BABY, DRILL: How Banks, Investors and Insurers Are Driving Oil and Gas Expansion in the Arctic. Reclaim Finance. https://reclaimfinance.org/site/wp-content/uploads/2021/09/Drill_Baby_Drill_RF_Arctic_Report_23_09_2021.pdf
89. Zamuda, C., D.E. Bilello, G. Conzelmann, E. Mecray, A. Satsangi, V. Tidwell, and B.J. Walker, 2018: Ch. 4. Energy supply, delivery, and demand. 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, 174–201. <https://doi.org/10.7930/nca4.2018.ch4>
90. Gädeke, A., M. Langer, J. Boike, E.J. Burke, J. Chang, M. Head, C.P.O. Reyer, S. Schaphoff, W. Thiery, and K. Thonicke, 2021: Climate change reduces winter overland travel across the Pan-Arctic even under low-end global warming scenarios. *Environmental Research Letters*, **16** (2), 024049. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdcf2>
91. Hori, Y., V.Y.S. Cheng, W.A. Gough, J.Y. Jien, and L.J.S. Tsuji, 2018: Implications of projected climate change on winter road systems in Ontario's Far North, Canada. *Climatic Change*, **148** (1), 109–122. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2178-2>
92. EIA, 2023: AEO2023 Issues in Focus: Inflation Reduction Act Cases in the AEO2023. U.S. Department of Energy, U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/iif_ira/pdf/ira_iif.pdf
93. Zhou, E. and T. Mai, 2021: Electrification Futures Study: Operational Analysis of U.S. Power Systems with Increased Electrification and Demand-Side Flexibility. NREL/TP-6A20-79094. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79094.pdf>
94. Bistline, J.E.T., C.W. Roney, D.L. McCollum, and G.J. Blanford, 2021: Deep decarbonization impacts on electric load shapes and peak demand. *Environmental Research Letters*, **16** (9), 094054. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2197>
95. EPRI, 2018: U.S. National Electrification Assessment. Electric Power Research Institute. <https://www.epri.com/research/products/000000003002013582>
96. EPRI, 2021: Strategies and Actions for Achieving a 50% Reduction in U.S. Greenhouse Gas Emissions by 2030. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA. <https://www.epri.com/research/products/000000003002023165>
97. Khan, Z., M. Zhao, H. Ahsan, P. Wolfram, A. Snyder, P. Kyle, J. Rice, C. Vernon, Y. Ou, M. Binsted, and G. Iyer. 2023: Version of GCAM-USA used for National Climate Assessment 5, Chapter 5: GCAM-USA-v5.3-IM3-NCA5. MSD-LIVE Data Repository. <https://doi.org/10.57931/1963007>
98. Murphy, C., T. Mai, E. Zhou, M. Muratori, and P. Jadun, 2022: Electrification futures study. In: *Electrify the Big Sky Conference*. Missoula, MT. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, National Renewable Energy Laboratory. <https://www.osti.gov/biblio/1888234>
99. Khan, Z., G. Iyer, P. Patel, S. Kim, M. Hejazi, C. Burleyson, and M. Wise, 2021: Impacts of long-term temperature change and variability on electricity investments. *Nature Communications*, **12** (1), 1643. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21785-1>
100. Obringer, R., R. Nateghi, D. Maia-Silva, S. Mukherjee, V. Cr, D.B. McRoberts, and R. Kumar, 2022: Implications of increasing household air conditioning use across the United States under a warming climate. *Earth's Future*, **10** (1), e2021EF002434. <https://doi.org/10.1029/2021ef002434>
101. Ralston Fonseca, F., P. Jaramillo, M. Bergés, and E. Severnini, 2019: Seasonal effects of climate change on intra-day electricity demand patterns. *Climatic Change*, **154** (3), 435–451. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02413-w>
102. van Ruijven, B.J., E. De Cian, and I. Sue Wing, 2019: Amplification of future energy demand growth due to climate change. *Nature Communications*, **10** (1), 2762. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10399-3>
103. Rastogi, D., J.S. Holladay, K.J. Evans, B.L. Preston, and M. Ashfaq, 2019: Shift in seasonal climate patterns likely to impact residential energy consumption in the United States. *Environmental Research Letters*, **14** (7), 074006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab22d2>
104. Ortiz, L., J.E. González, and W. Lin, 2018: Climate change impacts on peak building cooling energy demand in a coastal megacity. *Environmental Research Letters*, **13** (9), 094008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad8d0>
105. Wang, Z., T. Hong, H. Li, and M. Ann Piette, 2021: Predicting city-scale daily electricity consumption using data-driven models. *Advances in Applied Energy*, **2**, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100025>

106. Overland, J.E., 2021: Causes of the record-breaking Pacific Northwest heatwave, late June 2021. *Atmosphere*, **12** (11), 1434. <https://doi.org/10.3390/atmos12111434>
107. EIA, 2021: Today in Energy: June Heat Wave in the Northwest United States Resulted in More Demand for Electricity. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=48796>
108. Rempel, A.R., J. Danis, A.W. Rempel, M. Fowler, and S. Mishra, 2022: Improving the passive survivability of residential buildings during extreme heat events in the Pacific Northwest. *Applied Energy*, **321**, 119323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119323>
109. Bistline, J., N. Abhyankar, G. Blanford, L. Clarke, R. Fakhry, H. McJeon, J. Reilly, C. Roney, T. Wilson, M. Yuan, and A. Zhao, 2022: Actions for reducing US emissions at least 50% by 2030. *Science*, **376** (6596), 922–924. <https://doi.org/10.1126/science.abn0661>
110. Mai, T.T., P. Jadun, J.S. Logan, C.A. McMillan, M. Muratori, D.C. Steinberg, L.J. Vimmerstedt, B. Haley, R. Jones, and B. Nelson, 2018: Electrification Futures Study: Scenarios of Electric Technology Adoption and Power Consumption for the United States. NREL/TP-6A20-71500. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. <https://doi.org/10.2172/1459351>
111. Muratori, M., M. Alexander, D. Arent, M. Bazilian, P. Cazzola, E.M. Dede, J. Farrell, C. Gearhart, D. Greene, A. Jenn, M. Keyser, T. Lipman, S. Narumanchi, A. Pesaran, R. Sioshansi, E. Suomalainen, G. Tal, K. Walkowicz, and J. Ward, 2021: The rise of electric vehicles—2020 status and future expectations. *Progress in Energy*, **3** (2), 022002. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abe0ad>
112. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021: *Accelerating Decarbonization of the U.S. Energy System*. The National Academies Press, Washington, DC, 268 pp. <https://doi.org/10.17226/25932>
113. Rightor, E., A. Whitlock, and N. Elliot, 2020: Beneficial Electrification in Industry. American Council for an Energy-Efficient Economy. <https://www.aceee.org/research-report/ie2002>
114. Langevin, J., C.B. Harris, A. Satre-Meloy, H. Chandra-Putra, A. Speake, E. Present, R. Adhikari, E.J.H. Wilson, and A.J. Satchwell, 2021: US building energy efficiency and flexibility as an electric grid resource. *Joule*, **5** (8), 2102–2128. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.06.002>
115. Cheng, A.J., B. Tarroja, B. Shaffer, and S. Samuelsen, 2018: Comparing the emissions benefits of centralized vs. decentralized electric vehicle smart charging approaches: A case study of the year 2030 California electric grid. *Journal of Power Sources*, **401**, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.092>
116. DOE, 2022: Clean Hydrogen Production Standard (CHPS) Draft Guidance. U.S. Department of Energy. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/clean-hydrogen-production-standard>
117. Oliveira, A.M., R.R. Beswick, and Y. Yan, 2021: A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, **33**, 100701. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100701>
118. Rose, S.K., N. Bauer, A. Popp, J. Weyant, S. Fujimori, P. Havlik, M. Wise, and D.P. van Vuuren, 2020: An overview of the Energy Modeling Forum 33rd study: Assessing large-scale global bioenergy deployment for managing climate change. *Climatic Change*, **163** (3), 1539–1551. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02945-6>
119. Thombs, R.P., 2019: When democracy meets energy transitions: A typology of social power and energy system scale. *Energy Research & Social Science*, **52**, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.02.020>
120. Fajardy, M. and N. Mac Dowell, 2017: Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions? *Energy and Environmental Science*, **10** (6), 1389–1426. <https://doi.org/10.1039/c7ee00465f>
121. Greig, C. and S. Uden, 2021: The value of CCUS in transitions to net-zero emissions. *The Electricity Journal*, **34** (7), 107004. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.107004>
122. Arent, D.J., P. Green, Z. Abdullah, T. Barnes, S. Bauer, A. Bernstein, D. Berry, J. Berry, T. Burrell, B. Carpenter, J. Cochran, R. Cortright, M. Curry-Nkansah, P. Denholm, V. Gevorian, M. Himmel, B. Livingood, M. Keyser, J. King, B. Kroposki, T. Mai, M. Mehos, M. Muratori, S. Narumanchi, B. Pivovar, P. Romero-Lankao, M. Ruth, G. Stark, and C. Turchi, 2022: Challenges and opportunities in decarbonizing the U.S. energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **169**, 112939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112939>

123. IPCC, 2022: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, and J. Malley, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
124. NREL, 2021: Electrification Futures Study. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/analysis/electrification-futures.html>
125. Gaines, L., K. Richa, and J. Spangenberg, 2018: Key issues for Li-ion battery recycling. *MRS Energy & Sustainability*, **5** (1), 12. <https://doi.org/10.1557/mre.2018.13>
126. Pereirinha, P.G., M. González, I. Carrilero, D. Anseán, J. Alonso, and J.C. Viera, 2018: Main trends and challenges in road transportation electrification. *Transportation Research Procedia*, **33**, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.096>
127. Freitas, E.N., J.C. Salgado, R.C. Alnoch, A.G. Contato, E. Habermann, M. Michelin, C.A. Martínez, M. de Polizeli, and T.M. Lourdes, 2021: Challenges of biomass utilization for bioenergy in a climate change scenario. *Biology*, **10** (12). <https://doi.org/10.3390/biology10121277>
128. Chen, C.-f., X. Xu, J. Adams, J. Brannon, F. Li, and A. Walzem, 2020: When East meets West: Understanding residents' home energy management system adoption intention and willingness to pay in Japan and the United States. *Energy Research & Social Science*, **69**, 101616. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101616>
129. Goodarzi, S., A. Masini, S. Aflaki, and B. Fahimnia, 2021: Right information at the right time: Reevaluating the attitude–behavior gap in environmental technology adoption. *International Journal of Production Economics*, **242**, 108278. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108278>
130. Sharma, N., 2021: Public perceptions towards adoption of residential solar water heaters in USA: A case study of Phoenixians in Arizona. *Journal of Cleaner Production*, **320**, 128891. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128891>
131. Wolske, K.S., K.T. Gillingham, and P.W. Schultz, 2020: Peer influence on household energy behaviours. *Nature Energy*, **5** (3), 202–212. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0541-9>
132. Gillingham, K., D. Rapson, and G. Wagner, 2016: The rebound effect and energy efficiency policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, **10** (1), 68–88. <https://doi.org/10.1093/reep/rev017>
133. Hald, K.S. and P. Coslugeanu, 2022: The preliminary supply chain lessons of the COVID-19 disruption—What is the role of digital technologies? *Operations Management Research*, **15** (1), 282–297. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00207-x>
134. Olabi, V., T. Wilberforce, K. Elsaid, E.T. Sayed, and M.A. Abdelkareem, 2022: Impact of COVID-19 on the renewable energy sector and mitigation strategies. *Chemical Engineering & Technology*, **45** (4), 558–571. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100504>
135. Ballinger, B., M. Stringer, D.R. Schmeda-Lopez, B. Kefford, B. Parkinson, C. Greig, and S. Smart, 2019: The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply. *Applied Energy*, **255**, 113844. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113844>
136. IEA, 2021: World Energy Outlook 2021. International Energy Agency, Paris, France. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
137. Kim, K. and L. Bui, 2019: Learning from Hurricane Maria: Island ports and supply chain resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **39**, 101244. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101244>
138. IEA, 2021: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
139. The White House, 2021: Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-Based Growth. The White House, Washington, DC, 250 pp. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/06/100-day-supply-chain-review-report.pdf>
140. UNECE, 2021: Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland. https://unece.org/sites/default/files/2021-11/LCA_final.pdf

141. Mitsova, D., A.-M. Esnard, A. Sapat, and B.S. Lai, 2018: Socioeconomic vulnerability and electric power restoration timelines in Florida: The case of Hurricane Irma. *Natural Hazards*, **94** (2), 689–709. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3413-x>
142. Hendricks, M.D. and S. Van Zandt, 2021: Unequal protection revisited: Planning for environmental justice, hazard vulnerability, and critical infrastructure in communities of color. *Environmental Justice*, **14** (2), 87–97. <https://doi.org/10.1089/env.2020.0054>
143. Howard, L., 2021: LIHEAP American Rescue Plan Funding: Racial and Economic Justice Is Also Equity in Energy. U.S. Department of Health and Human Services, Administration for Children and Families, Washington, DC. <https://acfmmain-dev.acf.hhs.gov/blog/2021/05/liheap-american-rescue-plan-funding-racial-economic-justice-also-equity-energy>
144. PNNL, 2021: Energy Storage for Social Equity: Capturing Benefits from Power Plant Decommissioning. PNNL-31451. U.S. Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory. <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Energy%20Storage%20for%20Social%20Equity%20Case%20Study.pdf>
145. Thind, M.P.S., C.W. Tessum, I.L. Azevedo, and J.D. Marshall, 2019: Fine particulate air pollution from electricity generation in the US: Health impacts by race, income, and geography. *Environmental Science & Technology*, **53** (23), 14010–14019. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02527>
146. Karnauskas, K.B., S.L. Miller, and A.C. Schapiro, 2020: Fossil fuel combustion is driving indoor CO₂ toward levels harmful to human cognition. *GeoHealth*, **4** (5), e2019GH000237. <https://doi.org/10.1029/2019gh000237>
147. Collins, T.W., S.E. Grineski, J. Chakraborty, and A.B. Flores, 2019: Environmental injustice and Hurricane Harvey: A household-level study of socially disparate flood exposures in Greater Houston, Texas, USA. *Environmental Research*, **179**, 108772. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108772>
148. EPA, 2021: Climate Change and Social Vulnerability in the United States: A Focus on Six Impacts. EPA 430-R-21-003. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/cira/social-vulnerability-report>
149. Voelkel, J., D. Hellman, R. Sakuma, and V. Shandas, 2018: Assessing vulnerability to urban heat: A study of disproportionate heat exposure and access to refuge by socio-demographic status in Portland, Oregon. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15** (4), 640. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040640>
150. Wilhelmi, O.V., P.D. Howe, M.H. Hayden, and C.R. O'Lenick, 2021: Compounding hazards and intersecting vulnerabilities: Experiences and responses to extreme heat during COVID-19. *Environmental Research Letters*, **16** (8), 084060. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1760>
151. 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>
152. Hsu, A., G. Sheriff, T. Chakraborty, and D. Manya, 2021: Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities. *Nature Communications*, **12** (1), 2721. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22799-5>
153. Hoffman, J.S., V. Shandas, and N. Pendleton, 2020: The effects of historical housing policies on resident exposure to intra-urban heat: A study of 108 US urban areas. *Climate*, **8** (1), 12. <https://doi.org/10.3390/cli8010012>
154. Cong, S., D. Nock, Y.L. Qiu, and B. Xing, 2022: Unveiling hidden energy poverty using the energy equity gap. *Nature Communications*, **13** (1), 2456. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5>
155. Román, M.O., E.C. Stokes, R. Shrestha, Z. Wang, L. Schultz, E.A.S. Carlo, Q. Sun, J. Bell, A. Molthan, V. Kalb, C. Ji, K.C. Seto, S.N. McClain, and M. Enekel, 2019: Satellite-based assessment of electricity restoration efforts in Puerto Rico after Hurricane Maria. *PLoS ONE*, **14** (6), e0218883. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218883>
156. Sotolongo, M., L. Kuhl, and S.H. Baker, 2021: Using environmental justice to inform disaster recovery: Vulnerability and electricity restoration in Puerto Rico. *Environmental Science & Policy*, **122**, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.04.004>
157. Adepoju, O.E., D. Han, M. Chae, K.L. Smith, L. Gilbert, S. Choudhury, and L. Woodard, 2021: Health disparities and climate change: The intersection of three disaster events on vulnerable communities in Houston, Texas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19** (1), 35. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010035>

158. Falise, A.M., I. Griffin, D. Fernandez, X. Rodriguez, E. Moore, A. Barrera, J. Suarez, L. Cutie, and G. Zhang, 2019: Carbon monoxide poisoning in Miami-Dade County following Hurricane Irma in 2017. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, **13** (1), 94–96. <https://doi.org/10.1017/dmp.2018.67>
159. Waddell, S.L., D.T. Jayaweera, M. Mirsaedi, J.C. Beier, and N. Kumar, 2021: Perspectives on the health effects of hurricanes: A review and challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18** (5), 2756. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052756>
160. DOE. 2020: Low-Income Energy Affordability Data - LEAD Tool - 2018 Update. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://doi.org/10.25984/1784729>
161. Drehobl, A., L. Ross, and R. Ayala, 2020: How High Are Household Energy Burdens? An Assessment of National and Metropolitan Energy Burden across the United States. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC. <https://www.aceee.org/sites/default/files/pdfs/u2006.pdf>
162. Kontokosta, C.E., V.J. Reina, and B. Bonczak, 2020: Energy cost burdens for low-income and minority households. *Journal of the American Planning Association*, **86** (1), 89–105. <https://doi.org/10.1080/01944363.2019.1647446>
163. Ross, L., A. Drehobl, and B. Stickles, 2018: The High Cost of Energy in Rural America: Household Energy Burdens and Opportunities for Energy Efficiency. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington DC. <https://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/u1806.pdf>
164. Jolley, G.J., C. Khalaf, G. Michaud, and A.M. Sandler, 2019: The economic, fiscal, and workforce impacts of coal-fired power plant closures in Appalachian Ohio. *Regional Science Policy & Practice*, **11** (2), 403–422. <https://doi.org/10.1111/rsp3.12191>
165. Wang, S.S.-C., Y. Qian, L.R. Leung, and Y. Zhang, 2021: Identifying key drivers of wildfires in the contiguous US using machine learning and game theory interpretation. *Earth's Future*, **9** (6), e2020EF001910. <https://doi.org/10.1029/2020ef001910>
166. Pai, S., H. Zerriffi, J. Jewell, and J. Pathak, 2020: Solar has greater techno-economic resource suitability than wind for replacing coal mining jobs. *Environmental Research Letters*, **15** (3), 034065. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6c6d>
167. Hansen, J.K., W.D. Jenson, A.M. Wrobel, N. Stauff, K. Biegel, T.K. Kim, R. Belles, and F. Omitaomu, 2022: Investigating Benefits and Challenges of Converting Retiring Coal Plants into Nuclear Plants. INL/RPT-22-67964-Rev000. U.S. Department of Energy, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, ID. <https://doi.org/10.2172/1886660>
168. Mayfield, E., J. Jenkins, E. Larson, and C. Greig, 2023: Labor pathways to achieve net-zero emissions in the United States by mid-century. *Energy Policy*, **177**, 113516. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113516>
169. Pollin, R., J. Wicks-Lim, and S. Chakraborty, 2020: Ch. 3. Industrial policy employment, and just transition. In: *America's Zero Carbon Action Plan*. Sustainable Development Solutions Network, 50–104. <https://irp-cdn.multiscreensite.com/6f2c9f57/files/uploaded/zero-carbon-action-plan-ch-03.pdf>
170. Wei, M., S. Patadia, and D.M. Kammen, 2010: Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, **38** (2), 919–931. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.044>
171. Raimi, D., S. Carley, and D. Konisky, 2022: Mapping county-level vulnerability to the energy transition in US fossil fuel communities. *Scientific Reports*, **12** (1), 15748. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19927-6>
172. Righetti, T.K., T. Stoellinger, and R. Godby, 2021: Adapting to coal plant closures: A framework to understand state energy transition resistance. *Environmental Law*, **51** (4), 957–990. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.32801.74083>
173. Craig, M.T., P. Jaramillo, B.-M. Hodge, B. Nijssen, and C. Brancucci, 2020: Compounding climate change impacts during high stress periods for a high wind and solar power system in Texas. *Environmental Research Letters*, **15** (2), 024002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6615>
174. AghaKouchak, A., F. Chiang, L.S. Huning, C.A. Love, I. Mallakpour, O. Mazdiyasi, H. Moftakhari, S.M. Papalexioiu, E. Ragno, and M. Sadegh, 2020: Climate extremes and compound hazards in a warming world. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **48** (1), 519–548. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055228>
175. Zscheischler, J., S. Westra, B.J.J.M. van den Hurk, S.I. Seneviratne, P.J. Ward, A. Pitman, A. AghaKouchak, D.N. Bresch, M. Leonard, T. Wahl, and X. Zhang, 2018: Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, **8** (6), 469–477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>

176. Wells, E.M., M. Boden, I. Tseytlin, and I. Linkov, 2022: Modeling critical infrastructure resilience under compounding threats: A systematic literature review. *Progress in Disaster Science*, **15**, 100244. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100244>
177. Mahzarnia, M., M.P. Moghaddam, P.T. Baboli, and P. Siano, 2020: A review of the measures to enhance power systems resilience. *IEEE Systems Journal*, **14** (3), 4059–4070. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.2965993>
178. Ratnam, E.L., K.G.H. Baldwin, P. Mancarella, M. Howden, and L. Seebeck, 2020: Electricity system resilience in a world of increased climate change and cybersecurity risk. *The Electricity Journal*, **33** (9), 106833. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106833>
179. Bommareddy, S., B. Gilby, M. Khan, I. Chiu, M. Panteli, J.W. van de Lindt, L. Wells, Y. Amir, and A. Babay, 2022: Data-centric analysis of compound threats to critical infrastructure control systems. In: *52nd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W)*. IEEE, 72–79. <https://doi.org/10.1109/DSN-W54100.2022.00022>
180. Paul, S., F. Ding, K. Utkarsh, W. Liu, M.J. O'Malley, and J. Barnett, 2022: On vulnerability and resilience of cyber-physical power systems: A review. *IEEE Systems Journal*, **16** (2), 2367–2378. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2021.3123904>
181. Moftakhari, H. and A. AghaKouchak, 2019: Increasing exposure of energy infrastructure to compound hazards: Cascading wildfires and extreme rainfall. *Environmental Research Letters*, **14** (10), 104018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab41a6>
182. Hill, J., J. Kern, D.E. Rupp, N. Voisin, and G. Characklis, 2021: The effects of climate change on interregional electricity market dynamics on the U.S. West Coast. *Earth's Future*, **9** (12), e2021EF002400. <https://doi.org/10.1029/2021ef002400>
183. Zhang, W. and G. Villarini, 2020: Deadly compound heat stress–flooding hazard across the central United States. *Geophysical Research Letters*, **47** (15), e2020GL089185. <https://doi.org/10.1029/2020gl089185>
184. EIA, 2021: Today in Energy: Extreme Winter Weather Is Disrupting Energy Supply and Demand, Particularly in Texas. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, accessed February 19, 2021. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46836>
185. FERC, 2021: FERC, NERC and Regional Entity Staff Report: The February 2021 Cold Weather Outages in Texas and the South Central United States. Federal Energy Regulatory Commission, North American Electric Reliability Corporation. https://www.naesb.org/pdf4/ferc_nerc_regional_entity_staff_report_feb2021_cold_weather_outages_111621.pdf
186. Moreno, R., D.N. Trakas, M. Jamieson, M. Panteli, P. Mancarella, G. Strbac, C. Marnay, and N. Hatziaargyriou, 2022: Microgrids against wildfires: Distributed energy resources enhance system resilience. *IEEE Power and Energy Magazine*, **20** (1), 78–89. <https://doi.org/10.1109/mpe.2021.3122772>
187. Vazquez, D.A.Z., F. Qiu, N. Fan, and K. Sharp, 2022: Wildfire mitigation plans in power systems: A literature review. *IEEE Transactions on Power Systems*, **37** (5), 3540–3551. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2022.3142086>
188. Taylor, W.O., P.L. Watson, D. Cerrai, and E.N. Anagnostou, 2022: Dynamic modeling of the effects of vegetation management on weather-related power outages. *Electric Power Systems Research*, **207**, 107840. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107840>
189. Perera, A.T.D., B. Zhao, Z. Wang, K. Soga, and T. Hong, 2023: Optimal design of microgrids to improve wildfire resilience for vulnerable communities at the wildland-urban interface. *Applied Energy*, **335**, 120744. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120744>
190. Gong, H. and D.M. Ionel, 2021: Improving the power outage resilience of buildings with solar PV through the use of battery systems and EV energy storage. *Energies*, **14** (18). <https://doi.org/10.3390/en14185749>
191. Katopodis, T. and A. Sfetsos, 2019: A review of climate change impacts to oil sector critical services and suggested recommendations for industry uptake. *Infrastructures*, **4** (4), 74. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4040074>
192. Gerlak, A.K., J. Weston, B. McMahan, R.L. Murray, and M. Mills-Novoa, 2018: Climate risk management and the electricity sector. *Climate Risk Management*, **19**, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.12.003>
193. Jordan, D., T. Barnes, N. Haegel, and I. Repins, 2021: Build solar-energy systems to last—Save billions. *Nature*, **600** (7888), 215–217. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-03626-9>

194. Zamuda, C.D., T. Wall, L. Guzowski, J. Bergerson, J. Ford, L.P. Lewis, R. Jeffers, and S. DeRosa, 2019: Resilience management practices for electric utilities and extreme weather. *The Electricity Journal*, **32** (9), 106642. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.106642>
195. Caldwell, P.M., C.R. Terai, B. Hillman, N.D. Keen, P. Bogenschutz, W. Lin, H. Beydoun, M. Taylor, L. Bertagna, A.M. Bradley, T.C. Clevenger, A.S. Donahue, C. Eldred, J. Foucar, J.-C. Golaz, O. Guba, R. Jacob, J. Johnson, J. Krishna, W. Liu, K. Pressel, A.G. Salinger, B. Singh, A. Steyer, P. Ullrich, D. Wu, X. Yuan, J. Shpund, H.-Y. Ma, and C.S. Zender, 2021: Convection-permitting simulations with the E3SM global atmosphere model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **13** (11), e2021MS002544. <https://doi.org/10.1029/2021ms002544>
196. Leung, L.R., D.C. Bader, M.A. Taylor, and R.B. McCoy, 2020: An introduction to the E3SM special collection: Goals, science drivers, development, and analysis. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **12** (11), e2019MS001821. <https://doi.org/10.1029/2019ms001821>
197. Mauree, D., E. Naboni, S. Coccolo, A.T.D. Perera, V.M. Nik, and J.-L. Scartezzini, 2019: A review of assessment methods for the urban environment and its energy sustainability to guarantee climate adaptation of future cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **112**, 733–746. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.005>
198. McGuire, M., S. Gangopadhyay, J. Martin, G.T. Pederson, C.A. Woodhouse, and J.S. Littell, 2021: Water Reliability in the West—Secure Water Act Section 9503(C). Technical Memorandum No. ENV-2021-001. U.S. Bureau of Reclamation, 60 pp. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70219467>
199. Balaguru, K., D.R. Judi, and L.R. Leung, 2016: Future hurricane storm surge risk for the U.S. gulf and Florida coasts based on projections of thermodynamic potential intensity. *Climatic Change*, **138** (1), 99–110. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1728-8>
200. Sippel, S., N. Meinshausen, E. Székely, E. Fischer, A.G. Pendergrass, F. Lehner, and R. Knutti, 2021: Robust detection of forced warming in the presence of potentially large climate variability. *Science Advances*, **7** (43), 4429. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abh4429>
201. Tebaldi, C., R. Ranasinghe, M. Vousdoukas, D.J. Rasmussen, B. Vega-Westhoff, E. Kirezci, R.E. Kopp, R. Sriver, and L. Mentaschi, 2021: Extreme sea levels at different global warming levels. *Nature Climate Change*, **11** (9), 746–751. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01127-1>
202. Wang, J., W. Zuo, L. Rhode-Barbarigos, X. Lu, J. Wang, and Y. Lin, 2019: Literature review on modeling and simulation of energy infrastructures from a resilience perspective. *Reliability Engineering & System Safety*, **183**, 360–373. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.11.029>
203. Beswick, R.R., A.M. Oliveira, and Y. Yan, 2021: Does the green hydrogen economy have a water problem? *ACS Energy Letters*, **6** (9), 3167–3169. <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.1c01375>
204. Watson, E.B. and A.H. Etemadi, 2020: Modeling electrical grid resilience under hurricane wind conditions with increased solar and wind power generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, **35** (2), 929–937. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2019.2942279>
205. Cohen, S.M., A. Dyreson, S. Turner, V. Tidwell, N. Voisin, and A. Miara, 2022: A multi-model framework for assessing long- and short-term climate influences on the electric grid. *Applied Energy*, **317**, 119193. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119193>
206. Miara, A., S.M. Cohen, J. Macknick, C.J. Vörösmarty, F. Corsi, Y. Sun, V.C. Tidwell, R. Newmark, and B.M. Fekete, 2019: Climate-water adaptation for future US electricity infrastructure. *Environmental Science & Technology*, **53** (23), 14029–14040. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03037>
207. Ralston Fonseca, F., M. Craig, P. Jaramillo, M. Bergés, E. Severnini, A. Loew, H. Zhai, Y. Cheng, B. Nijssen, N. Voisin, and J. Yearsley, 2021: Effects of climate change on capacity expansion decisions of an electricity generation fleet in the southeast U.S. *Environmental Science & Technology*, **55** (4), 2522–2531. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06547>
208. Wessel, J., J.D. Kern, N. Voisin, K. Oikonomou, and J. Haas, 2022: Technology pathways could help drive the U.S. West Coast grid's exposure to hydrometeorological uncertainty. *Earth's Future*, **10** (1), e2021EF002187. <https://doi.org/10.1029/2021ef002187>
209. Levi, P.J., S.D. Kurland, M. Carbajales-Dale, J.P. Weyant, A.R. Brandt, and S.M. Benson, 2019: Macro-energy systems: Toward a new discipline. *Joule*, **3** (10), 2282–2286. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.017>

210. Reed, P.M., A. Hadjimichael, R.H. Moss, E. Monier, S. Alba, C. Brelsford, C. Burleyson, S. Cohen, A. Dyreson, D. Gold, R. Gupta, K. Keller, M. Konar, J. Macknick, J. Morris, V. Srikrishnan, N. Voisin, and J. Yoon, 2022: MultiSector Dynamics: Scientific Challenges and a Research Vision for 2030. U.S. Department of Energy, Office of Science. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6144309>
211. Szinai, J.K., R. Deshmukh, D.M. Kammen, and A.D. Jones, 2020: Evaluating cross-sectoral impacts of climate change and adaptations on the energy-water nexus: A framework and California case study. *Environmental Research Letters*, **15** (12), 124065. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc378>
212. Voisin, N., V. Tidwell, M. Kintner-Meyer, and F. Boltz, 2019: Planning for sustained water-electricity resilience over the U.S.: Persistence of current water-electricity operations and long-term transformative plans. *Water Security*, **7**, 100035. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2019.100035>
213. Yoon, J., P. Romero-Lankao, Y.C.E. Yang, C. Klassert, N. Urban, K. Kaiser, K. Keller, B. Yarlagadda, N. Voisin, P.M. Reed, and R. Moss, 2022: A typology for characterizing human action in multisector dynamics models. *Earth's Future*, **10** (8), e2021EF002641. <https://doi.org/10.1029/2021ef002641>
214. Bennett, J.A., C.N. Trevisan, J.F. DeCarolis, C. Ortiz-García, M. Pérez-Lugo, B.T. Etienne, and A.F. Clarens, 2021: Extending energy system modelling to include extreme weather risks and application to hurricane events in Puerto Rico. *Nature Energy*, **6** (3), 240–249. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00758-6>
215. Ross, R., V. Pillitteri, R. Graubart, D. Bodeau, and R. McQuaid, 2021: Developing Cyber-Resilient Systems: A Systems Security Engineering Approach. NIST Special Publication, SP 800-160 Vol. 2 Rev. 1. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/nist.sp.800-160v2r1>
216. Tsvetanov, T. and S. Slaria, 2021: The effect of the Colonial Pipeline shutdown on gasoline prices. *Economics Letters*, **209**, 110122. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2021.110122>
217. AghaKouchak, A., L.S. Huning, F. Chiang, M. Sadegh, F. Vahedifard, O. Mazdiyasn, H. Moftakhari, and I. Mallakpour, 2018: How do natural hazards cascade to cause disasters? *Nature*, **561** (7724), 458–460. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06783-6>
218. Osman, A.I., L. Chen, M. Yang, G. Msigwa, M. Farghali, S. Fawzy, D.W. Rooney, and P.-S. Yap, 2023: Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: A review. *Environmental Chemistry Letters*, **21** (2), 741–764. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
219. Dyreson, A., N. Devineni, S.W.D. Turner, T. De Silva M, A. Miara, N. Voisin, S. Cohen, and J. Macknick, 2022: The role of regional connections in planning for future power system operations under climate extremes. *Earth's Future*, **10** (6), e2021EF002554. <https://doi.org/10.1029/2021ef002554>
220. EIA, 2021: Today in Energy: U.S. Electric Power Sector's Use of Water Continued Its Downward Trend in 2020. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=50698>
221. Bushnaq, O.M., A. Chaaban, and T.Y. Al-Naffouri, 2021: The role of UAV-IoT networks in future wildfire detection. *IEEE Internet of Things Journal*, **8** (23), 16984–16999. <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3077593>
222. OCM, 2022: Digital Coasts. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Office for Coastal Management. <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/>
223. U.S. Federal Government, 2021: U.S. Climate Resilience Toolkit: Energy [Webpage]. <https://toolkit.climate.gov/topics/energy-supply-and-use>
224. GAO, 2019: Climate Resilience: A Strategic Investment Approach for High-Priority Projects Could Help Target Federal Resources. GAO-20-127. U.S. Government Accountability Office. <https://www.gao.gov/products/gao-20-127>
225. Hong, T., Z. Wang, X. Luo, and W. Zhang, 2020: State-of-the-art on research and applications of machine learning in the building life cycle. *Energy and Buildings*, **212**, 109831. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109831>
226. Kumbhar, A., P.G. Dhawale, S. Kumbhar, U. Patil, and P. Magdum, 2021: A comprehensive review: Machine learning and its application in integrated power system. *Energy Reports*, **7**, 5467–5474. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.133>

227. Satchwell, A., M.A. Piette, A. Khandekar, J. Granderson, N.M. Frick, R. Hledik, A. Faruqui, L. Lam, S. Ross, J. Cohen, K. Wang, D. Urigwe, D. Delurey, M. Neukomm, and D. Nemtsov, 2021: A National Roadmap for Grid-Interactive Efficient Buildings. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://gebroadmap.lbl.gov/>
228. Drgoña, J., J. Arroyo, I. Cupeiro Figueroa, D. Blum, K. Arendt, D. Kim, E.P. Ollé, J. Oravec, M. Wetter, D.L. Vrabie, and L. Helsen, 2020: All you need to know about model predictive control for buildings. *Annual Reviews in Control*, **50**, 190–232. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.09.001>
229. Wang, Z. and T. Hong, 2020: Reinforcement learning for building controls: The opportunities and challenges. *Applied Energy*, **269**, 115036. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115036>
230. Nubbe, V. and M. Yamada, 2019: Grid-Interactive Efficient Buildings Technical Report Series: Lighting and Electronics. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://doi.org/10.2172/1580213>
231. Bistline, J.E.T., 2021: Roadmaps to net-zero emissions systems: Emerging insights and modeling challenges. *Joule*, **5** (10), 2551–2563. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.09.012>
232. IEA, 2021: Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency, Paris, France. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
233. IPCC, 2023: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Lee, H. and J. Romero, Eds. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 1–34. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
234. Murphy, C., T. Mai, Y. Sun, P. Jadun, P. Donohoo-Vallett, M. Muratori, R. Jones, and B. Nelson, 2020: High electrification futures: Impacts to the U.S. bulk power system. *The Electricity Journal*, **33** (10), 106878. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106878>
235. McLaughlin, K. and L. Bird, 2021: The US Set a Record for Renewables in 2020, but More Is Needed. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/renewable-energy-2020-record-us>
236. EIA, 2022: Annual Energy Outlook 2022. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/narrative/introduction/sub-topic-02.php>
237. DOS and EOP, 2021: The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050. U.S. Department of State and U.S. Executive Office of the President, Washington, DC. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/us-long-term-strategy.pdf>
238. Larson, E., C. Greig, J. Jenkins, E. Mayfield, A. Pascale, C. Zhang, J. Drossman, R. Williams, S. Pacala, R. Socolow, E. Baik, R. Birdsey, R. Duke, R. Jones, B. Haley, E. Leslie, K. Paustian, and A. Swan, 2021: Final Report Summary—Net-Zero America: Potential Pathways, Infrastructure, and Impacts. Princeton University, Princeton, NJ. <https://netzeroamerica.princeton.edu/the-report>
239. Mueller, J.T. and M.M. Brooks, 2020: Burdened by renewable energy? A multi-scalar analysis of distributional justice and wind energy in the United States. *Energy Research & Social Science*, **63**, 101406. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101406>
240. FCAB, 2021: National Blueprint for Lithium Batteries 2021–2030. Federal Consortium for Advanced Batteries. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/FCAB%20National%20Blueprint%20Lithium%20Batteries%200621_0.pdf
241. DOE, 2021: Hydrogen Shot. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>
242. NRC, 2021: Application Review Schedule for the NuScale US600 Design. U.S. Nuclear Regulatory Commission. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/nuscale/review-schedule.html>
243. Carley, S. and D.M. Konisky, 2020: The justice and equity implications of the clean energy transition. *Nature Energy*, **5** (8), 569–577. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0641-6>
244. McNamara, W., H. Passell, M. Montes, R. Jeffers, and I. Gyuk, 2022: Seeking energy equity through energy storage. *The Electricity Journal*, **35** (1), 107063. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.107063>

245. Widerynski, S., P. Schramm, K. Conlon, R. Noe, E. Grossman, M. Hawkins, S. Nayak, M. Roach, and A.S. Hilts, 2017: The Use of Cooling Centers to Prevent Heat-Related Illness: Summary of Evidence and Strategies for Implementation. Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Environmental Health. <https://www.cdc.gov/climateandhealth/docs/useofcoolingcenters.pdf>
246. STACCCWG, 2021: The Status of Tribes and Climate Change Report. Marks-Marino, D., Ed. Northern Arizona University, Institute for Tribal Environmental Professionals, Flagstaff, AZ. <http://nau.edu/stacc2021>
247. Gallagher, C.L. and T. Holloway, 2020: Integrating air quality and public health benefits in U.S. decarbonization strategies. *Frontiers in Public Health*, **8**, 563358. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.563358>
248. Markandya, A., J. Sampedro, S.J. Smith, R. Van Dingenen, C. Pizarro-Irizar, I. Arto, and M. González-Eguino, 2018: Health co-benefits from air pollution and mitigation costs of the Paris Agreement: A modelling study. *The Lancet Planetary Health*, **2** (3), e126–e133. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(18\)30029-9](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(18)30029-9)
249. Shindell, D., G. Faluvegi, K. Seltzer, and C. Shindell, 2018: Quantified, localized health benefits of accelerated carbon dioxide emissions reductions. *Nature Climate Change*, **8** (4), 291–295. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0108-y>
250. Vandyck, T., K. Keramidias, A. Kitous, J.V. Spadaro, R. Van Dingenen, M. Holland, and B. Saveyn, 2018: Air quality co-benefits for human health and agriculture counterbalance costs to meet Paris Agreement pledges. *Nature Communications*, **9** (1), 4939. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06885-9>
251. Carpenter, A. and M. Wagner, 2019: Environmental justice in the oil refinery industry: A panel analysis across United States counties. *Ecological Economics*, **159**, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.01.020>
252. Elliott, M. and N. Kittner, 2022: Operational grid and environmental impacts for a V2G-enabled electric school bus fleet using DC fast chargers. *Sustainable Production and Consumption*, **30**, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.029>
253. Rowangould, G.M., 2013: A census of the US near-roadway population: Public health and environmental justice considerations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **25**, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.08.003>
254. Babae, S., D.H. Loughlin, and P.O. Kaplan, 2020: Incorporating upstream emissions into electric sector nitrogen oxide reduction targets. *Cleaner Engineering and Technology*, **1**, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100017>
255. Gonzalez-Salazar, M.A., T. Kirsten, and L. Prchlik, 2018: Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82** (1), 1497–1513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.278>
256. Luderer, G., M. Pehl, A. Arvesen, T. Gibon, B.L. Bodirsky, H.S. de Boer, O. Fricko, M. Hejazi, F. Humpenöder, G. Iyer, S. Mima, I. Mouratiadou, R.C. Pietzcker, A. Popp, M. van den Berg, D. van Vuuren, and E.G. Hertwich, 2019: Environmental co-benefits and adverse side-effects of alternative power sector decarbonization strategies. *Nature Communications*, **10** (1), 5229. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13067-8>
257. Ou, Y., W. Shi, S.J. Smith, C.M. Ledna, J.J. West, C.G. Nolte, and D.H. Loughlin, 2018: Estimating environmental co-benefits of U.S. low-carbon pathways using an integrated assessment model with state-level resolution. *Applied Energy*, **216**, 482–493. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.122>
258. Brown, M.A., A. Soni, M.V. Lapsa, K. Southworth, and M. Cox, 2020: High energy burden and low-income energy affordability: Conclusions from a literature review. *Progress in Energy*, **2** (4), 042003. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abb954>
259. Zamuda, C.D. and A. Ressler, 2020: Federal adaptation and mitigation programs supporting community investment in electricity resilience to extreme weather. *The Electricity Journal*, **33** (8), 106825. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106825>
260. DOE, 2021: Weatherization Assistance Program Fact Sheet. U.S. Department of Energy, 2 pp. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021/01/f82/WAP-fact-sheet_2021_0.pdf
261. DOE, 2021: Equity in Energy: An Energy Economy for Everyone. U.S. Department of Energy, Office of Economic Impact and Diversity. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021/01/f82/Equity_in_Energy_Booklet_1_11.pdf

262. Zeng, Z., A.D. Ziegler, T. Searchinger, L. Yang, A. Chen, K. Ju, S. Piao, L.Z.X. Li, P. Ciais, D. Chen, J. Liu, C. Azorin-Molina, A. Chappell, D. Medvigy, and E.F. Wood, 2019: A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nature Climate Change*, **9** (12), 979–985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>
263. Pryor, S.C., J.J. Coburn, R.J. Barthelmie, and T.J. Shepherd, 2023: Projecting future energy production from operating wind farms in North America. Part I: Dynamical downscaling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **62** (1), 63–80. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-22-0044.1>
264. Yalew, S.G., M.T.H. van Vliet, D.E.H.J. Gernaat, F. Ludwig, A. Miara, C. Park, E. Byers, E. De Cian, F. Piontek, G. Iyer, I. Mouratiadou, J. Glynn, M. Hejazi, O. Dessens, P. Rochedo, R. Pietzcker, R. Schaeffer, S. Fujimori, S. Dasgupta, S. Mima, S.R.S. da Silva, V. Chaturvedi, R. Vautard, and D.P. van Vuuren, 2020: Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. *Nature Energy*, **5** (10), 794–802. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0664-z>
265. Burleyson, C.D., G. Iyer, M. Hejazi, S. Kim, P. Kyle, J.S. Rice, A.D. Smith, Z.T. Taylor, N. Voisin, and Y. Xie, 2020: Future western U.S. building electricity consumption in response to climate and population drivers: A comparative study of the impact of model structure. *Energy*, **208**, 118312. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118312>
266. Marsooli, R., N. Lin, K. Emanuel, and K. Feng, 2019: Climate change exacerbates hurricane flood hazards along US Atlantic and Gulf Coasts in spatially varying patterns. *Nature Communications*, **10** (1), 3785. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11755-z>
267. Cohen, J., K. Pfeiffer, and J.A. Francis, 2018: Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States. *Nature Communications*, **9** (1), 869. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02992-9>
268. Blackport, R., J.A. Screen, K. van der Wiel, and R. Bintanja, 2019: Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes. *Nature Climate Change*, **9** (9), 697–704. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0551-4>
269. Cohen, J., X. Zhang, J. Francis, T. Jung, R. Kwok, J. Overland, T.J. Ballinger, U.S. Bhatt, H.W. Chen, D. Coumou, S. Feldstein, H. Gu, D. Handorf, G. Henderson, M. Ionita, M. Kretschmer, F. Laliberte, S. Lee, H.W. Linderholm, W. Maslowski, Y. Peings, K. Pfeiffer, I. Rigor, T. Semmler, J. Stroeve, P.C. Taylor, S. Vavrus, T. Vihma, S. Wang, M. Wendisch, Y. Wu, and J. Yoon, 2020: Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nature Climate Change*, **10** (1), 20–29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>
270. Tian, Q., G. Huang, K. Hu, and D. Niyogi, 2019: Observed and global climate model based changes in wind power potential over the Northern Hemisphere during 1979–2016. *Energy*, **167**, 1224–1235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.027>
271. Craig, M.T., S. Cohen, J. Macknick, C. Draxl, O.J. Guerra, M. Sengupta, S.E. Haupt, B.M. Hodge, and C. Brancucci, 2018: A review of the potential impacts of climate change on bulk power system planning and operations in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **98**, 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.022>
272. Cronin, J., G. Anandarajah, and O. Dessens, 2018: Climate change impacts on the energy system: A review of trends and gaps. *Climatic Change*, **151** (2), 79–93. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2265-4>
273. Auffhammer, M., P. Baylis, and C.H. Hausman, 2017: Climate change is projected to have severe impacts on the frequency and intensity of peak electricity demand across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **114** (8), 1886–1891. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613193114>
274. Martel, J.L., F.P. Brissette, P. Lucas-Picher, M. Troin, and R. Arsenault, 2021: Climate change and rainfall intensity–duration–frequency curves: Overview of science and guidelines for adaptation. *Journal of Hydrologic Engineering*, **26** (10), 03121001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0002122](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0002122)
275. Maxim, A. and E. Grubert, 2022: Anticipating climate-related changes to residential energy burden in the United States: Advance planning for equity and resilience. *Environmental Justice*, **15** (3), 139–148. <https://doi.org/10.1089/env.2021.0056>
276. Leon, W. and A. Ziai, 2023: Table of 100% Clean Energy States. Clean Energy Group, accessed April 5, 2023. <https://www.cesa.org/projects/100-clean-energy-collaborative/guide/table-of-100-clean-energy-states/>
277. McMahan, B. and A.K. Gerlak, 2020: Climate risk assessment and cascading impacts: Risks and opportunities for an electrical utility in the U.S. Southwest. *Climate Risk Management*, **29**, 100240. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100240>

278. EPA, 2022: State Energy and Environment Guide to Action: Electricity Resources Planning and Procurement. EPA-430-R-22-004. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-08/Electricity%20Resource%20Planning%20and%20Procurement_508.pdf
279. Cooke, A., J.S. Homer, J. Lessick, D. Bhatnagar, and K. Kazimierczuk, 2021: A Review of Water and Climate Change Analysis in Electric Utility Integrated Resource Planning. PNNL-30910. U.S. Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1906361>
280. Deser, C., A. Phillips, V. Bourdette, and H. Teng, 2012: Uncertainty in climate change projections: The role of internal variability. *Climate Dynamics*, **38** (3), 527–546. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0977-x>
281. Golaz, J.-C., L.P. Van Roekel, X. Zheng, A.F. Roberts, J.D. Wolfe, W. Lin, A.M. Bradley, Q. Tang, M.E. Maltrud, R.M. Forsyth, C. Zhang, T. Zhou, K. Zhang, C.S. Zender, M. Wu, H. Wang, A.K. Turner, B. Singh, J.H. Richter, Y. Qin, M.R. Petersen, A. Mametjanov, P.-L. Ma, V.E. Larson, J. Krishna, N.D. Keen, N. Jeffery, E.C. Hunke, W.M. Hannah, O. Guba, B.M. Griffin, Y. Feng, D. Engwirda, A.V. Di Vittorio, C. Dang, L.M. Conlon, C.-C.-J. Chen, M.A. Brunke, G. Bisht, J.J. Benedict, X.S. Asay-Davis, Y. Zhang, M. Zhang, X. Zeng, S. Xie, P.J. Wolfram, T. Vo, M. Veneziani, T.K. Tesfa, S. Sreepathi, A.G. Salinger, J.E.J. Reeves Eyre, M.J. Prather, S. Mahajan, Q. Li, P.W. Jones, R.L. Jacob, G.W. Huebler, X. Huang, B.R. Hillman, B.E. Harrop, J.G. Foucar, Y. Fang, D.S. Comeau, P.M. Caldwell, T. Bartoletti, K. Balaguru, M.A. Taylor, R.B. McCoy, L.R. Leung, and D.C. Bader, 2022: The DOE E3SM Model Version 2: Overview of the physical model and initial model evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **14** (12), e2022MS003156. <https://doi.org/10.1029/2022ms003156>
282. Kay, J.E., C. Deser, A. Phillips, A. Mai, C. Hannay, G. Strand, J.M. Arblaster, S.C. Bates, G. Danabasoglu, J. Edwards, M. Holland, P. Kushner, J.F. Lamarque, D. Lawrence, K. Lindsay, A. Middleton, E. Munoz, R. Neale, K. Oleson, L. Polvani, and M. Vertenstein, 2015: The Community Earth System Model (CESM) large ensemble Project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **96** (8), 1333–1349. <https://doi.org/10.1175/bams-d-13-00255.1>
283. Maher, N., S. Milinski, and R. Ludwig, 2021: Large ensemble climate model simulations: Introduction, overview, and future prospects for utilising multiple types of large ensemble. *Earth System Dynamics*, **12** (2), 401–418. <https://doi.org/10.5194/esd-12-401-2021>
284. Peng, W., G. Iyer, V. Bosetti, V. Chaturvedi, J. Edmonds, A.A. Fawcett, S. Hallegatte, D.G. Victor, D. van Vuuren, and J. Weyant, 2021: Climate policy models need to get real about people—Here’s how. *Nature*, **594** (7862), 174–176. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01500-2>
285. Wise, M., P. Patel, Z. Khan, S.H. Kim, M. Hejazi, and G. Iyer, 2019: Representing power sector detail and flexibility in a multi-sector model. *Energy Strategy Reviews*, **26**, 100411. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100411>
286. IEA, 2021: About CCUS. International Energy Agency, accessed April 2021. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>
287. IEA, 2021: Direct Air Capture: More Efforts Needed. International Energy Agency, Paris, France. <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>
288. Gohlke, D., Y. Zhou, X. Wu, and C. Courtney, 2022: Assessment of Light-Duty Plug-in Electric Vehicles in the United States, 2010–2021. ANL-22/71. U.S. Department of Energy, Argonne National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1898424>
289. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2020: *Models to Inform Planning for the Future of Electric Power in the United States: Proceedings of a Workshop*. The National Academies Press, Washington, DC, 88 pp. <https://doi.org/10.17226/25880>
290. Tang, Q., S.A. Klein, S. Xie, W. Lin, J.C. Golaz, E.L. Roesler, M.A. Taylor, P.J. Rasch, D.C. Bader, L.K. Berg, P. Caldwell, S.E. Giangrande, R.B. Neale, Y. Qian, L.D. Riihimaki, C.S. Zender, Y. Zhang, and X. Zheng, 2019: Regionally refined test bed in E3SM atmosphere model version 1 (EAMv1) and applications for high-resolution modeling. *Geoscientific Model Development*, **12** (7), 2679–2706. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2679-2019>
291. Macknick, J., A. Kandt, P. Kurup, X. Li, J. McCall, A. Miara, J. Sperling, and A. de Fontaine, 2019: Water Security Grand Challenge Workshop Outcomes. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://www.energy.gov/eere/analysis/articles/water-security-grand-challenge-workshop-outcomes>
292. Mouratiadou, I., M. Bevione, D.L. Bijl, L. Drouet, M. Hejazi, S. Mima, M. Pehl, and G. Luderer, 2018: Water demand for electricity in deep decarbonisation scenarios: A multi-model assessment. *Climatic Change*, **147** (1), 91–106. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2117-7>

293. Hadjimichael, A., J. Quinn, E. Wilson, P. Reed, L. Basdekas, D. Yates, and M. Garrison, 2020: Defining robustness, vulnerabilities, and consequential scenarios for diverse stakeholder interests in institutionally complex river basins. *Earth's Future*, **8** (7), e2020EF001503. <https://doi.org/10.1029/2020ef001503>
294. Shindell, D., M. Ru, Y. Zhang, K. Seltzer, G. Faluvegi, L. Nazarenko, G.A. Schmidt, L. Parsons, A. Challapalli, L. Yang, and A. Glick, 2021: Temporal and spatial distribution of health, labor, and crop benefits of climate change mitigation in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (46), e2104061118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2104061118>
295. Oke, D., J.B. Dunn, and T.R. Hawkins, 2022: The contribution of biomass and waste resources to decarbonizing transportation and related energy and environmental effects. *Sustainable Energy & Fuels*, **6** (3), 721–735. <https://doi.org/10.1039/d1se01742j>
296. Lamers, P., T. Ghosh, S. Upasani, R. Sacchi, and V. Daioglou, 2023: Linking life cycle and integrated assessment modeling to evaluate technologies in an evolving system context: A power-to-hydrogen case study for the United States. *Environmental Science & Technology*, **57** (6), 2464–2473. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04246>